

# طرح خطوط لوله نفت و گاز مدفون برای گذر از گسل

دکتر سیروس فخر پاسری  
دانشیار مهندسی سازه  
دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این مقاله روش ساده‌ای برای تحلیل لوله‌های نفت مدفون تحت تاثیر حرکات نسبی بزرگ‌زمین در محل گذر از گسل عرضه شده است. الگوی گسیختگی زمین، ناشی از حرکات زمین لرزه، مشخص شده و روشی برای محاسبه تنش‌ها بحث شده و مشخصات مهارکنندگی خاک بر روی لوله نیز به حساب آورده شده است. کاربرد روش با مثالی عملی تشریح شده. در پایان توصیه‌هایی به منظور افزایش توانایی لوله برای تحمل حرکات نسبی بزرگ زمین در امتداد گسل آورده شده است.

۱- مقدمه

در کشور پهناور ما برای انتقال نفت و گاز از خطوط لوله استفاده می‌شود. امروزه برای حفاظت و نیز به خاطر تامین انکاء برای خطوط لوله آنها را مدفون می‌سازند. علی‌الاصول لوله‌های مدفون را برای تحمل تنش‌های حلقوی ناشی از فشار داخلی، فشار بالای سرناشی از خاکریز و عبور تجهیزات سنگین و احتمالاً تنش ناشی از گرمایش ناهمگون طراحی می‌کنند. اما علاوه بر این‌ها خطوط لوله در ایران در هنگام زلزله تحت تنش‌های دیگری نیز قرار دارند که اهم آنها دو نوعند: یکی تنش ناشی از انتشار امواج زلزله (مرجع ۱) و دیگری تنش ناشی از جابجایی خاک اطراف لوله به علت رونگرایی خاک، حرکت جانبی خاک، زمین لغزه و مهم‌تر از همه حرکت زمین در محل گسل در امتداد لوله است. اثرات گروه دوم تنش‌ها را با انتخاب مناسب مسیر لوله می‌توان تقلیل داد ولی اجتناب از آنها در کشور زلزله خیزی چون ایران امکان‌پذیر نیست.

در این مقاله یک روش ساده اما دقیق برای محاسبه لوله‌های نفت و گاز تحت تاثیر حرکات نسبی بزرگ زمین در محل گسل ارائه شده است. هدف اصلی ارائه روشی ساده برای محاسبه تنش‌ها در خطوط لوله‌ای است که از گسلها عبور می‌کنند.

رفتار لوله در مناطقی که زمین حرکت دائمی کرده به این بستگی دارد که تغییر شکل تحمیل شده به لوله فشاری است یا کششی. در اثر تغییر مکانهای بزرگ گسل، لوله تحت خمش و نیروی محوری قرار می‌گیرد. این نیروی محوری ممکن است فشاری یا کششی باشد. کششی یا فشاری بودن نیروی محوری بستگی به زاویه‌ای دارد که لوله با گسل در محل گذر می‌سازد. در اثر نیروی فشاری ممکن است لوله از جای خود به بیرون رانده شود و به صورت تیر به بالا کمانش نماید، و یا همانند پوسته‌ای در جای خود با چین خوردن موضعی جداره‌اش کمانش نماید. هر دو نوع

کمانش در زلزله‌های قبلی مشاهده شده‌اند.

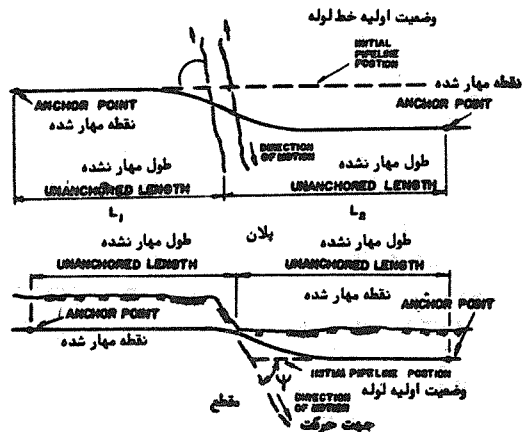
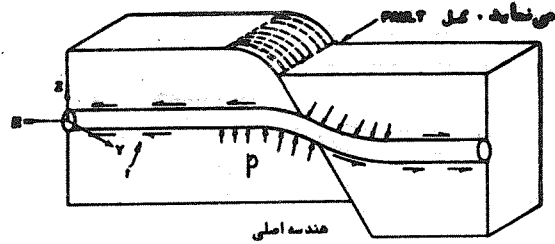
## ۲- حرکات زمین

اگر وقتی که زمین در اثر زلزله در گسلها حرکت می‌کند لوله با آن همراهی نکند و جوری در برابر آن مقاومت نماید، بسته به میزان حرکت نسبی بین لوله و زمین اطرافش، در لوله تنش پیدا می‌شود. در شکل ۱ تغییر شکل احتمالی لوله مدفونی را در تحت تاثیر حرکات گسل عادی و لغزش جانبی نشان می‌دهد. همچنان‌که ملاحظه می‌شود، حرکت جانبی گسل موجب جابجایی لوله نسبت به خاک می‌گردد که در اثر آن خاک به لوله فشار جانبی وارد می‌کند و یا می‌توان گفت که لوله خاک را به دور می‌راند. این جابجایی موجب کرنشهای کششی و انحناء لوله در هر دو طرف گسل می‌گردد (مرجع ۲). لوله در برابر حرکت قائم طور دیگری مقاومت می‌کند. اگر عمق دفن کم باشد، مقاومت خاک در بالا کمتر از مقاومتش در پایین لوله است و نتیجتاً "لوله نسبتاً" به سهولت به طرف بالا رانده می‌شود و بدین‌گونه حرکت قائم گسل را تحمل می‌کند. انحناء و کرنشهای طولی در مقایسه با حرکات لغزش جانبی گسل به همان میزان قاعدتاً کمتر است.

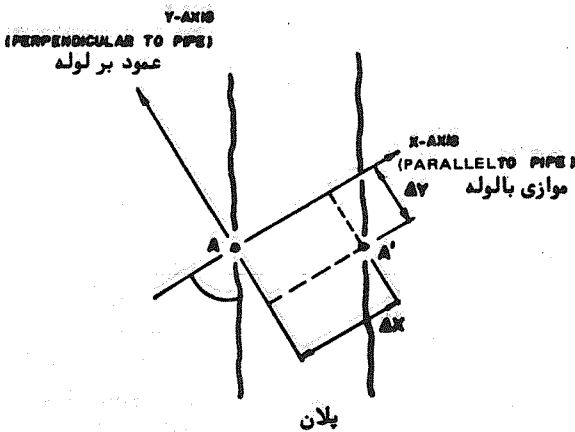
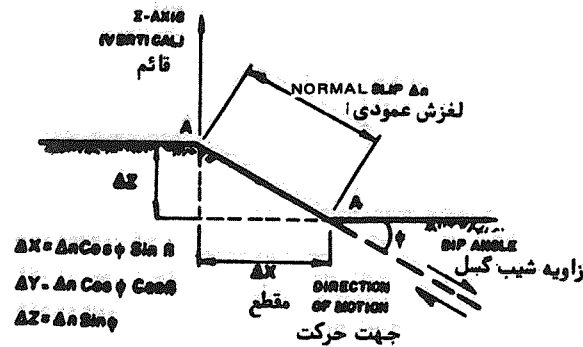
مؤلفه محوری حرکت گسل توسط نیروهای اصطکاکی در سطح تماس خاک و لوله مقابله می‌شود. برای یک مقدار مشخص نیروی محوری لوله، طول مشخصی از لوله لازم است که تا نیروی اصطکاکی مقابله‌کننده خاک به قدر کفایت انکشاف یابد. در ماورای این طول انکشاف، لوله تحت تاثیر حرکت گسل نخواهد بود و می‌توان آن را به‌طور موثر مهار شده تصور کرد. بنابراین مقاومت اصطکاکی بین خاک و لوله، طولی از لوله را که باید تمامی کرنشهای ناشی از حرکت گسل را تحمل نماید، مشخص و تعیین

لوله می‌تواند ازدیاد طولی با کرنش‌هایی حدود ۵-۲ درصد را با کش آمدن در اثر تسلیم تحمل نماید، اما کوتاه شدن طولی موجب چین‌خوردگی در کرنش‌های فشاری در حدود ۳/۵٪ - ۱/۵٪ (بسته به نسبت قطر به ضخامت جدار) می‌گردد. بنابراین در محل گذر از گسل لوله باید طوری گذاشته شود که در اثر حرکت گسل مجبور به کشیده شدن شود. اما این کشیده شدن هم باید طوری تنظیم گردد که از میزان تحمل لوله تجاوز ننماید. عمل تنظیم با انتخاب زاویه مناسب بین لوله و گسل در محل گذر انجام می‌گردد.

شکل ۲ یک گسل لغزش جانبی چپ‌بر را نشان می‌دهد که موجب کشش در لوله می‌گردد. می‌توان با افزودن زاویه گذر (به طرف ۹۰ درجه) از میزان کشش کاست. حال اگر گسل مذکور راست‌بر بود برای تمام‌زوایای گذر (به جز زوایای خیلی بزرگ) در لوله فشار ایجاد می‌شد. در نتیجه برای چنین وضعیتی لوله باید طوری از گسل عبور داده شود که در آن تنش کششی پیدا شود.



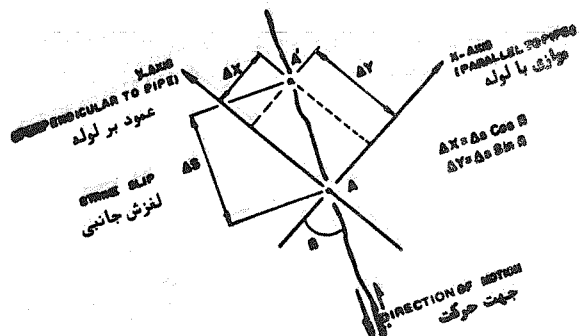
شکل ۱- خط لوله تحت تاثیر دو نوع حرکت عادی و لغزشی جانبی در محل عبور از یک گسل



شکل ۳- حرکات نسبی در یک گسل عادی

شکل ۳ اثر یک گسل عادی را نشان می‌دهد. در تمام موارد در لوله تنش کششی پیدا می‌شود و با کاستن زاویه گذر می‌توان از مقدار آن کاست، در حالی که کاستن زاویه در حالت قبلی عکس این اثر را داشت. گسل‌های لغزش جانبی معکوس (فشاری) معمولاً لوله را تحت فشار قرار می‌دهند. این اثر را نیز می‌توان با کاستن زاویه گذر تقلیل داد. برای گسل‌های لغزش جانبی مایل این دو اثر به صورت ترکیبی ظاهر می‌شوند. میزان

شکل‌های ۳ و ۲ نشان می‌دهند که چگونه حرکات  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  و  $\Delta z$  صفحه گسل در سه جهت عمود بر هم با زاویه گذر از گسل  $\beta$ ، و زاویه شیب گسل  $\phi$  برای گسل لغزش جانبی و عادی تغییر می‌کند. معادلات مربوط به تغییر طول لازم لوله،  $\Delta x$ ، ناشی از حرکت گسل در قسمت پنجم داده شده است. معادلات مذکور اهمیت نسبی حرکت گسل را در امتداد محور لوله  $\Delta x$  نشان می‌دهند. اگر حرکت زمین در امتداد محور لوله،  $\Delta x$  مثبت باشد لوله تحت کشش خواهد بود و در صورت این‌صورت نیروی فشاری بر لوله تحمیل می‌گردد.



شکل ۲- حرکات نسبی در یک گسل لغزش جانبی

ککش در این ترکیب به مقادیر نسبی حرکت لغزشی  $\Delta s$  و حرکت عادی  $\Delta n$  زاویه شیب  $\beta$  و زاویه گذر از گسل  $\beta$  بستگی دارد.

### ۳- اندرکنش خاک و لوله

اندرکنش خاک و لوله، یا باری که خاک در اثر حرکت لوله به آن وارد می‌کند، از مولفه‌های طولی، جانبی افقی و جانبی قائم تشکیل یافته است. مقدار بار یا مهاره که بر لوله تحمیل می‌گردد غیر خطی است و به مقدار حرکت نسبی لوله و خاک بستگی دارد. ذیلاً "فرمول‌های مناسبی برای محاسبه این سه مولفه از بار خاک داده شده است. باید توجه داشت که در سرتاسر این مقاله فقط خاکهای دانه‌ای غیر چسبنده مورد توجه است.

### ۱-۳- اصطکاک طولی روی لوله

تنش انتقال بار محوری،  $\bar{\sigma}_t$ ، در خاکهای ماسه‌ای به صورت زیر است.

$$\bar{\sigma}_t = \bar{\sigma}_n \tan \delta$$

در اینجا:

$\bar{\sigma}_n$  - تنش قائم موثر در امتداد پیرامون لوله

$\delta$  - زاویه اصطکاک سطح تماس بین خاک و لوله

مقادیر  $\delta$  ممکن است بین  $0.5\phi$  تا  $1.0\phi$  تغییر نماید که در آن  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک دانه‌ای است. رقم کمتر نماینده وضعیت اصطکاک بین لوله‌های بدون پوشش محافظ و رقم بزرگتر برای لوله‌های باند پیچی شده و یا زنگ زده است (مرجع ۳).

بار محوری در واحد طول لوله از انتگرال گیری  $\bar{\sigma}_t$  در امتداد سطح تماس بین خاک و لوله به دست می‌آید، در چنین وضعیتی، حداکثر نیروی محوری خاک،  $t_u$ ، برای یک لوله کاملاً "مدفون به صورت زیر بیان می‌شود.

$$t_u = \frac{\pi D}{2} \bar{\gamma} H (1 + K_0) \tan \delta \quad (1)$$

در اینجا

$K_0$  - ضریب فشار خاک در حالت سکون

$H$  - عمق از سطح زمین تا مرکز لوله

$D$  - قطر خارجی لوله

$\bar{\gamma}$  - واحد وزن موثر خاک

باید تاکید شود که معادله (۱) برای حالت سکون است، که در امتداد قسمت‌های جابجا نشده لوله مدفون است که تا حدی از محل گسیختگی خاک فاصله دارد.

برآورد نیروی محوری،  $t_u$ ، برای قسمت منحنی لوله در مجاورت گسل یعنی درجایی که در اثر حرکت گسل تغییر مکان جانبی زیادی اتفاق می‌افتد دشوار است. در منطقه منحنی شده لوله فشار شعاعی در لوله افزایش می‌یابد. به خاطر اغتشاش در خاک و ایجاد اصطکاک حلقوی شدید بین خاک و لوله زاویه اصطکاک طولی نیز افزایش پیدا می‌کند. در مرجع ۴ با استفاده از تعداد زیادی تحلیل، پیشنهاد شده است که نسبت ضرایب اصطکاک در منطقه منحنی شده به منطقه مستقیم از  $2/4$  برای  $H/D$  یک تا  $3/3$  برای  $H/D$  سه معقول است.

### ۲-۳- فشار جانبی افقی

فشار جانبی روی لوله در اثر حرکت جانبی لوله پیدا می‌شود. این اندرکنش خاک و لوله بسیار شبیه دانه‌های مهاره قائم، دیوارها، یا شالوده‌هایی است که نسبت به خاک پیرامونشان به طور افقی حرکت می‌کنند و در نتیجه موجب ایجاد فشار منفعل خاک می‌گردند.

بر اساس آزمایش‌ها بر روی لوله‌های مدفون در ماسه‌های خشک و یکنواخت، نشان داده شده است که رابطه بین نیرو در واحد طول،  $P$ ، و تغییر مکان جانبی افقی،  $\gamma$ ، به صورت هذلولی است (مربع:  $\Delta$ ) و به شکل زیر است.

$$P = \frac{\gamma}{A' + B'\gamma} \quad (2)$$

در اینجا

$$A = 0.15 \gamma_u / p_u$$

$$B = 0.85 / p_u$$

$$P_u = \bar{\gamma} H N_{qh} D$$

$$\gamma_u = \begin{cases} 0.07 - 0.10(H + \frac{D}{2}) & \text{برای ماسه شل} \\ 0.03 - 0.05(H + \frac{D}{2}) & \text{برای ماسه متوسط} \\ 0.02 - 0.03(H + \frac{D}{2}) & \text{برای ماسه متراکم} \end{cases}$$

$\bar{\gamma}$  = واحد وزن موثر خاک

$H$  = عمق تا خط مرکز لوله

$N_{qh}$  = ضریب ظرفیت باربری افقی

$D$  = قطر خارجی لوله

شکل ۴ مقادیر  $N_{qh}$  را به صورت تابعی از  $H/D$  برای خاکهای با

زوایای اصطکاک داخلی  $30^\circ$  و  $45^\circ$  درجه می‌دهد.

### ۳-۳- فشار جانبی قائم

برعکس دو حالت قبل که در آنها مقاومت جانبی افقی و محوری به جهت حرکت بستگی نداشت، فشار جانبی قائم بسته به این که حرکت رو به بالا باشد یا پائین متفاوت خواهد بود.

حرکت رو به پائین - برای حالت حرکت رو به پائین، فرض می‌شود که خط لوله همانند بی‌نواری به شکل استوانه است و مقاومت نهائی آن،  $q_u$ ، از فرمول ظرفیت باربری رایج به شرح زیر استفاده می‌شود.

$$q_u = C N_c B + \bar{\gamma} H N_q B + \frac{1}{2} \gamma B^2 N_\gamma \quad (3)$$

در اینجا

$N_c$ ،  $N_q$ ،  $N_\gamma$  - ضرایب ظرفیت باربری برای بی‌نواری افقی که تحت بار قائم به سمت پائین است (مرجع ۷ را ببینید).

$C$  - چسبندگی خاک برای مقاومت برشی زهکشی نشده،

$\gamma$  - واحد وزن کلی خاک

$\bar{\gamma}$  - واحد وزن موثر خاک

$B$  - پهنای بیرون آمده مساحت تماس با خاک، برای لوله مدفون

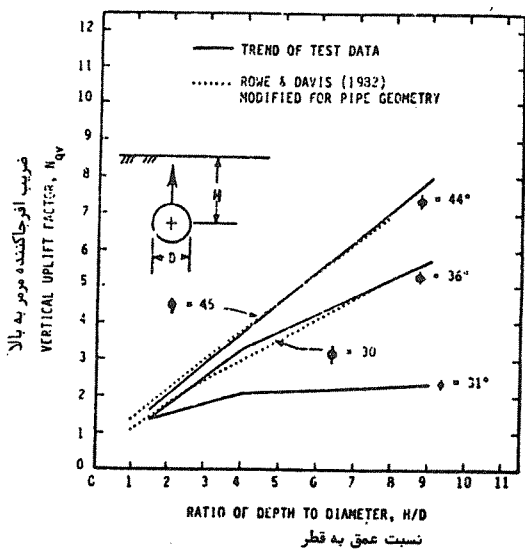
$$B = D$$

حرکت رو به بالا

برای حرکت رو به بالا در ماسه و سایر مصالح بدون چسبندگی داریم:

$$q_u = H \sqrt{N_{qu}} D \quad (4)$$

در شکل ۵ مقادیر  $N_{qu}$  برای جابجایی قائم لوله در ماسه خشک و اشباع شده داده شده است. منحنی‌های پر، از نتایج آزمایشی و منحنی‌های نقطه‌چین نتیجه تحلیل با روش اجزای محدود است.



شکل ۵- ضریب نیروی از جا گننده رو به بالا برای ماسه (مرجع ۶)

دقت کافی با معادله رامبرگ - اسکود تا کرنش برابر ۵ درصد تقریب زد. رابطه بین کرنش طولی  $\epsilon_x$  و تنش نظیر آن  $\sigma_x$  در هر نقطه‌ای روی جدار لوله در فاصله  $x$  از محور خنثی با رابطه زیر داده می‌شود.

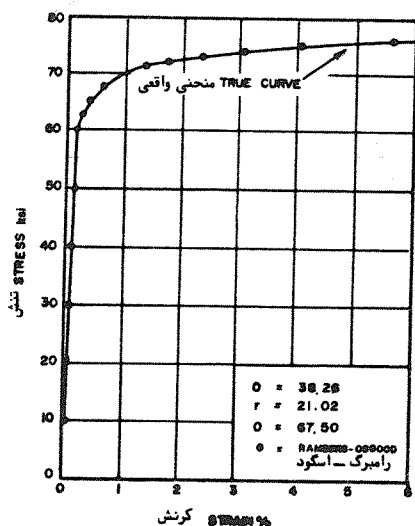
$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_i} \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{r+1} \left( \frac{|\sigma_x|}{\sigma_y} \right)^r \right) \right] \quad (5)$$

در اینجا

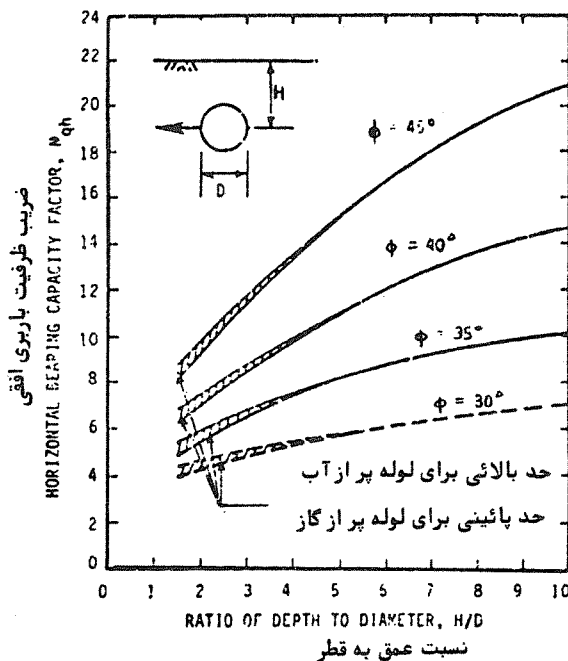
$E_i$  - مدول الاستیسیته ابتدائی (تنش صفر)

$\sigma_y$  - تنش تسلیم موثر (تنش نظیر زانوی منحنی تنش - کرنش، حدوداً ۵ درصد کرنش در لوله است.

$\alpha, r$  - ثابتهای فرمول رامبرگ - اسکود.



شکل ۶- نمایش رابطه رامبرگ - اسکود برای API-5LX60



شکل ۴- ضریب ظرفیت باربری افقی برای ماسه به صورت تابعی از نسبت عمق به قطر لوله (مرجع ۶)

### ۴-۳- انتخاب پارامترهای خاک

معمولاً در طرح شالوده‌ها انتخاب مقادیر دست پایین برای پارامترهای مقاومت برشی خاک محتاطانه است و در نتیجه این عمل تحمل باربری خاک کمتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود. اما در مورد محاسبه اثرات خاک بر روی لوله عکس این باید صورت پذیرد. چون که بار خاک بر روی لوله در محل گسل تاثیر کاهنده روی تنش‌ها دارد، لذا محتاطانه این است که پارامترهای مقاومت خاک دست بالا اختیار شود. نمو افزایش بارگذاری برای خاک‌های رسی موجب افزایش سختی و مقاومت نهایی می‌گردد. اما در مورد خاک‌های غیرچسبنده دانه‌ای افزایش سریع بارگذاری اثرات محسوسی ندارد. در نتیجه احتیاجی به افزایش ضرایب ظرفیت باربری خاک موضوع بحث این فصل به‌خاطر اعمال سریع بارها نمی‌باشد.

### ۴-۴- رفتار لوله در تحت کرنش‌های محوری بزرگ

مصالح لوله‌هایی که در صنعت نفت و گاز به‌کار می‌روند از انواع X-60، X-65، X-70 هستند. رابطه تنش-کرنش نوعی برای لوله‌های نوع API-5LX60 مشابه شکل ۶ می‌باشد. این منحنی را می‌توان با

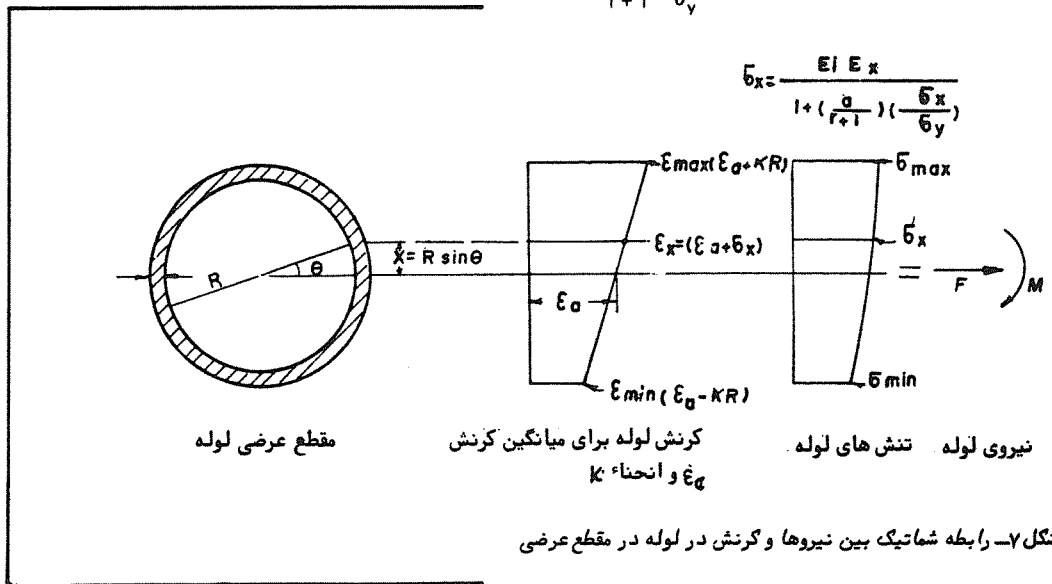
می دهد .

وقتی که لوله در کشش تحت کرنش قرار می گیرد بسیار شکل پذیر است و قادر است قبل از حدوث گسیختگی تحت تاثیر کرنشهای بزرگی قرار گیرد . اما ممکن است به علت نقصهای ناشی از جوشکاری و عدم یکنواختی در ضخامت جدار لوله ، تنش تسلیم و غیره ، در آن تمرکز کرنش ایجاد گردد . بنابراین ماکزیمم کرنش محاسبه شده  $\epsilon_{max} = \epsilon_a + KR$  را باید به مقداری بسیار کمتر از ظرفیت نهائی کرنشی فولاد محدود کرد . در صورت وجود کنترل مرغوبیت دقیق برای اطمینان از یکنواختی خواص لوله و بازرسی جوشکاری برای به حداقل رساندن عیوب جوشکاری در منطقه ای که لوله به شدت تحت تاثیر حرکت گسل قرار می گیرد ، یک حد بالایی ۵ تا ۳ درصد برای محدود کردن ماکزیمم کرنش محاسبه شده معقول است .

#### ۵- روش تقریبی برای تخمین اثرات حرکات گسل

تاثیر حاصله از حرکت گسل عبارت است از کرنش محوری و خمشی لوله در نزدیکی گسل (شکل ۱) هر دو این اثرات در محل عبور از گسل ماکزیمم است . مشاهدات عینی خطوط لوله در محل هایی که زمین گسیخته شده ، تجربیات آزمایشگاهی و نیز بررسی های عددی با کامپیوتر موید این نکته است که تغییر مکان نسبی جانبی و قائم از مقدار ماکزیممی در محل گسل تا حدود صفر در طول مشخصی از لوله تغییر می کند . در تمامی منطقه حرکت نسبی ، انحناء لوله الزاماً ثابت است . در فاصله از گسل ، شعاع های انحناء افقی و قائم عبارتند از :

$$R_{cd} = \frac{1}{K_h} = \frac{F_x C_p}{P_x} \quad R_{cv} = \frac{1}{K_v} = \frac{F_x C_p}{q_x}$$



وضعیت کرنش محوری  $\epsilon_a$  و انحناء  $K$  و همچنین ارتباط آنها با نیروی محوری  $F$  ، و لنگر خمشی  $M$  در مقطع عرضی لوله در شکل ۷ نشان داده شده است . با انتگرال گیری توزیع تنش در روی مقطع عرضی می توان مقادیر  $M$  و  $F$  را برای هر مقدار مشخص کرنش محوری  $\epsilon_a$  و انحناء  $K$  به دست آورد . با انجام این عمل برای هر لوله مشخصی می توان نشان داد (مرجع ۴) که تا زمانی که ماکزیمم کرنش خمشی کمتر از

$$\epsilon_b = KR < 0.8 \epsilon_a \quad (۶)$$

باشد ، نیروی محوری  $F$  ، مستقل از انحناء ،  $K$  می باشد . در این صورت

$$F = 2 \pi R t \sigma_a \quad (۷)$$

در اینجا

$\sigma_a$  - تنش محوری نظیر کرنش  $\epsilon_a$

$R, t$  - به ترتیب شعاع متوسط و ضخامت متوسط

همچنین وقتی که رابطه زیر برقرار باشد .

$$\epsilon_{min} = \epsilon_a - KR \geq \frac{\sigma_y}{F} \quad (۸)$$

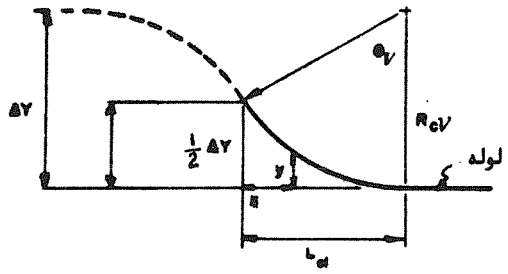
که در آن  $\epsilon_{min}$  کرنش می نیم می باشد ، سختی خمشی لوله در مقایسه با سختی خمشی اولیه قابل اغماض می گردد . در این صورت لوله تقریباً " تمامی سختی خمشی خود را از دست می دهد ، چون که تغییرات تنش در امتداد قطر لوله ناچیز است و این به خاطر این است که کرنش در امتداد تمامی مقطع عرضی چنان زیاد است که وضعیت تنش-کرنش نظیر قسمت تخت منحنی شکل  $\epsilon$  می باشد .

در چنین وضعیتی لوله همانند کابل بدون سختی خمشی رفتار می کنند . مقابله با نیروهای جانبی وارد بر لوله با ایجاد کشش محوری در اثر انحناء طولی صورت میگیرد و لنگر خمشی ایجاد شده ناچیز است .

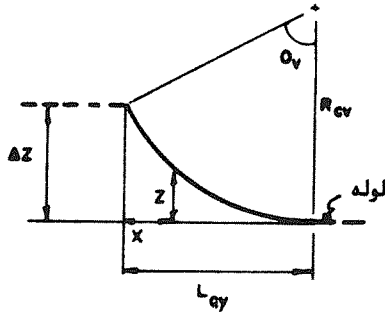
که در اینجا  $P_x$  - نیروی جانبی در واحد طول در فاصله  $x$  از گسل که در حالت حدی در منطقه جابجائی برابر  $p_u$  و ثابت اختیاری می شود .

تا زمانی که شرایط معادلات ۸ و ۷ برقرار باشد ، میتوان لوله را با فرض عدم سختی خمشی تحلیل کرد . حتی اگر این شرایط صادق نباشد تحلیل مذکور با اغماض سختی خمشی تخمین محتاطانه ای از انحناء به دست

$q_x$  - نیروی قائم‌خاک در واحد طول در فاصله از گسل که در حالت حدی در منطقه جابجایی برابر  $q_{H1}$  و ثابت اختیار می‌شود.  
 $F_x$  - کشش محوری در لوله به فاصله  $x$  از گسل که در حالت حدی با  $F_M = \sigma_a A_p$  تقریب زده می‌شود.  
 $A_p$  - مساحت مقطع عرضی لوله  
 $K_v, K_H$  - انحناهای افقی و قائم  
 $C_p = 1 - \frac{P_1 \pi D^2}{4 F_M}$  ضریب تصحیح برای احتساب انحنا اضافی ناشی از فشار داخلی در منطقه خم شده خط لوله است. افزایش نیروی کششی موجب کاهش شعاع انحنا می‌گردد.



تغییر مکان جانبی



تغییر مکان قائم

شکل ۸- تغییر شکل لوله با انحنا ثابت

شکل ۸ رابطه بین تغییر مکان جانبی و فاصله از گسل را با فرض شعاع انحنا ثابت در منطقه تغییر مکان جانبی و قائم نشان می‌دهد. شعاع انحنا توسط معادله (۹) داده شده که در آن  $F_x$  بطور معقولی با کمک ماکزیم نیروی محوری،  $F_M$ ، تقریب زده شده است، تغییر زوایای جانبی و قائم لوله به ترتیب عبارتند از:

$$\theta_l = \text{Arc Cos} \left( 1 - \frac{\Delta y}{2R_{Cv}} \right) \quad (10)$$

$$\theta_v = \text{Arc Cos} \left( 1 - \frac{\Delta n}{R_{Cv}} \right) \quad (11)$$

در اینجا

$L_{Cv} = R_{Cv} \sin \theta_l$  طولی از لوله است که در امتداد آن تغییر مکان جانبی ناشی از انحنا  $K_H$  اتفاق می‌افتد.  
 $L_{Cv}$  - طولی از لوله است که در امتداد آن تغییر مکان جانبی ناشی

از  $K_v$  اتفاق می‌افتد.

$\Delta y$  - حرکت جانبی گسل در امتداد عمود بر لوله  
 $\Delta n$  - جابجایی قائم گسل

با فرض شعاع‌های انحنا افقی و قائم ثابت  $R_{Cv}$  و  $R_{Cl}$  در محدوده طول‌های  $L_{Cv}$  و  $L_{Cl}$  در طرفین گسل، و نیز فرض مستقیم باقیماندن و عدم جابجایی بقیه لوله واقع بین نقاط مهار شده نسبت به زمین اطراف، موجب ساده شدن بسیار در تعیین اثرات حرکت گسل می‌گردد. اگر  $\beta$  زاویه‌ای باشد که لوله با گسل می‌سازد و طول‌های مهار نشده  $L_1$  و  $L_2$  در طرفین گسل باشند (شکل ۱)، از دیاد طول کلی،  $\Delta L$ ، رامی‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\Delta L = 2 [R_{Cl} \theta_l - L_{Cl}] + [R_{Cv} \theta_v - L_{Cv}] + \Delta x \quad (12)$$

تازمانی‌که  $L_1$  و  $L_2$  هر دو از  $L_{Cl}$  و  $L_{Cv}$  بزرگترند رابطه فوق برقرار است، پس از جایگزینی برای زوایای  $\theta_l$  و  $\theta_v$  و توجه به اینکه این زوایا کوچکند، برای حرکات افقی  $\Delta_s$  و قائم  $\Delta_n$  گسل داریم:

$$(13)$$

$$\Delta L_p = \Delta_s \cos \beta + \frac{(\Delta_s \sin \beta)^2}{3L_{Cl}} + \frac{2\Delta_n^2}{3L_{Cv}}$$

که در آن

$$L_{Cl} = (R_{Cl} \Delta_s \sin \beta)^{1/2} ; L_{Cv} = (2R_{Cv} \Delta_n)^{1/2} \quad (14)$$

توجه کنید که اگر  $\Delta L_p < 0$  باشد، لوله در فشار خواهد بود و خمش موضعی و کماتش باید بررسی شود.

از دیاد طول کلی،  $\Delta L$ ، رامی‌توان طور دیگری، یعنی با انتگرال کرنش  $\epsilon_x$  در طول لوله و در طرفین گذر از گسل بیان نمود. کرنش  $\epsilon_x$  رامی‌توان برحسب تنش محوری  $\sigma_x$  با استفاده از رابطه تنش و کرنش مناسب (مثلاً "رابطه رامبرگ - اسگود معادله (۵)) به شرح زیر بیان نمود.

$$(15)$$

$$\Delta L = \epsilon_y \int_0^{L_1} B_x [1 + C(|B_x|)^r] dx + \epsilon_y \int_0^{L_2} B_x [1 + C(|B_x|)^r] dx$$

در اینجا

$$C = \frac{\alpha}{(r+1)}, B_x = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}, \epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_i}$$

ماکزیم تنش محوری،  $\sigma_a$ ، در لوله در محل گذر از گسل اتفاق می‌افتد و در سایر نقاط لوله به علت حضور نیروی اصطکاکی طولی  $t_u$  روی لوله کاهش می‌یابد. بنابراین در فاصله  $x$  از گسل تنش محوری برابر است با:

$$\sigma_x = \sigma_a - \int_0^x \frac{t_u}{A_p} dx \quad (16)$$

که در آن

$A_p$  - مساحت مقطع عرض لوله است.

مقادیر نیروی اصطکاکی طولی در قسمتهای مستقیم و منحنی لوله متفاوت است، بنابراین از دیاد طول را با جمع از دیاد طول‌های قسمتهای مستقیم و منحنی لوله به دست می‌آوریم. بنابراین:

$$\Delta L_a = \Delta L_{s1} + \Delta L_{s2} + 2\Delta L_c$$

$$\Delta L_c = \epsilon_y [L_{Cl} \left( \frac{B_s + B_l}{2} \right) + \frac{C}{h_c (r+2)} \{ (B_l)^{r+2} + (B_s)^{r+2} \}]$$

$$\Delta L_{s1} = \epsilon_y [L_{s1} \left( \frac{B_s + B_{l1}}{2} \right) + \frac{C}{h_s (r+2)} \{ (B_s)^{r+2} - (B_{l1})^{r+2} \}]$$

افقی شدید خاک است برابر  $2.44t_u = 10.0 \text{ Ton/m}$  اختیاری می شود. چون در مثال حاضر حرکت گسل مولفه قائم ندارد، احتیاجی به محاسبه مقاومت رو به بالای خاک نیست.

۲- ماکزیم تنش محوری،  $\sigma_a$ ، در محل گسل را باید اختیار کرد، که در اینجا برابر (  $71.1 \text{ ksi}$  )  $4.98 \text{ Ton/cm}^2$  اختیار می شود. بار محوری ماکزیم،  $F_M$ ، نظیر آن برابر است با:

$$F_M = \sigma_a A_p = 2356 \text{ Ton ( 5202 kips )}$$

۳- در این مرحله شعاع های انحناء قائم و افقی را باید محاسبه کرد. چون در مثال حاضر حرکت لوله فقط در صفحه افقی فرض شده است، در نتیجه انحناء قائم موجود نخواهد بود، و لزومی به محاسبه شعاع انحناء قائم،  $R_{cv}$ ، نیست. اگر تاثیرات فشار داخلی نادیده گرفته شود، شعاع انحناء جانبی،  $R_{cl}$ ، از معادله ۹ برابر (  $301 \text{ ft}$  )  $91.7 \text{ m}$  به دست می آید.

کرنش خمشی  $\epsilon_b$  برابر  $0.58\%$  ( با فرض فقط وجود انحناء جانبی ) و کرنش محوری  $\epsilon_b$  برابر  $1.46\%$  به دست می آید. سه شرط باید کنترل شوند که به شرح زیر هستند.

الف -  $\epsilon_b = 0.40\epsilon_a$  و بنابراین برطبق معادله ( ۶ )، انحناء نباید تاثیر زیادی بر نیروی محوری لوله داشته باشد.

ب -  $\epsilon_{min} = 0.88\%$  و بنابراین بر طبق معادله ۸ سختی خمشی قابل اغماض است.

ج -  $\epsilon_{max} = 2.04\%$  و که زیاد نیست.

۴- تغییرات طول لوله به مقدار جابجائی گسل در جهات X، Y، و Z بستگی دارد. در این مرحله تغییر طول لازم برای حرکت مشخص گسل محاسبه می شود. برای هر دو طرف گسل، طول قسمت های منحنی شده افقی و قائم لوله،  $L_{cv}$  و  $L_{cl}$ ، و نیز ازدیاد طول کلی لوله می شود. لذا از معادلات (۱۳) و (۱۴) داریم:

$$L_{cl} = (R_{cl} \Delta_s \sin \beta)^{1/2} = 19.5 \text{ m (64 ft)}$$

$$L_{cv} = (2R_{cv} \Delta_n)^{1/2} = 0 \quad (\text{تغییر انحناء قائم صفر است})$$

$$\Delta_{lr} = \Delta_s \cos \beta + \frac{(\Delta_s \sin \beta)^2}{3L_{cl}} + \frac{2\Delta_n^2}{3L_{cv}} = 2.23 \text{ m (7.3 ft)}$$

طولی از لوله که در طرفین گسل برای انتقال نیروی محوری، از طریق اصطکاک طولی، لازم است از معادله زیر به دست می آید.

$$L_1 = L_2 = \frac{F_M - t_{uc} L_{cl}}{t_u} + L_{cl} \quad (18)$$

فرض بر این است که طول های قطعات لوله در طرفین گسل به قدر کافی باشد تا از طریق مقاومت اصطکاکي بطور موثری لوله را مهار نماید. اگر طول مدفون در اختیار، به علت بلوک های مهاری، انشعاب، خم های تند یا سایر نقاط مهاری کمتر از مقدار محاسبه شده از معادله بالا باشد، می باید اگر طول های واقعی  $L_1$  و  $L_2$  به جای مقادیر حاصل از معادله بالا در محاسبات بعدی به کار رود.

در مثال حاضر طول مهاری لازم در طرفین گسل از معادله فوق برابر (  $1830 \text{ ft}$  )  $558 \text{ m}$  به دست می آید. فرض می شود که در طرفین گسل این طول موجود است، زیرا در مثال حاضر فرض شده است که تا فواصل زیادی هیچگونه نقطه مهار شده موثری موجود نیست.

۵- ازدیاد طولی را که تنش محوری متوسط فرضی در محل گسل ایجاد می کند باید محاسبه شود. ازدیاد طول قسمت های منحنی لوله در

$$\Delta L_{s2} = \epsilon_y [L_{s1} 2 \left( \frac{B_s + B_{l2}}{2} \right) + \frac{C}{h_s(r+2)} [(B_s)^{r+2} - (B_{l2})^{r+2}]$$

$$L_{s1} = L_1 - L_{cl}; L_{s2} = L_2 - L_{cl}; B_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_y}$$

$$B_s = B_a - h_c L_{cl}; B_{l1} = B_s - h_s L_{s1}; B_{l2} = B_s - h_s L_{s2};$$

$$h_c = \frac{t_{uc}}{A_p \sigma_y} \quad h_s = \frac{t_{us}}{A_p \sigma_y} \quad (17)$$

$t_{uc}$  و  $t_{us}$  به ترتیب نیروهای اصطکاکي طولی در قسمت های منحنی و مستقیم لوله می باشند.

### ع-مثال

در این قسمت ضمن مثالی قدم هائی که باید برای محاسبه تاثیرات حرکت گسل بر روی خط لوله طی گردد به طور کامل تشریح می گردد. یک لوله ۴۲ اینچ بدون فشار با ضخامت جدار (  $0.562 \text{ in}$  )  $1.4275 \text{ cm}$  از گسلی با زاویه  $\beta = 65^\circ$  گذر می کند. زاویه لغزش شیب گسل  $\Psi = 60^\circ$  است و جابجائی لغزش جانبی (  $15 \text{ ft}$  )  $\Delta_s = 457 \text{ cm}$  می باشد که موجب کشش در خط لوله می گردد.

لوله در عمق (  $3 \text{ ft}$  )  $91 \text{ cm}$  در ماسه خشک با واحد وزن (  $130 \text{ pcf}$  )  $2100 \text{ kg/m}^3$  و زاویه اصطکاک داخلی  $\Phi = 35^\circ$  دفن شده است. زاویه اصطکاک بین خاک و لوله  $\delta = 28^\circ$  و ضریب فشار خاک در سکون  $K_0 = 0.5$  می باشد.

منحنی تنش - کرنش برای لوله API-51 X 60 در شکل ۶ نشان داده شده است و می توان آن را با رابطه رامبرگ - اسگود با ثابت های (  $67.5 \text{ ksi}$  )  $r = 21.02$ ،  $\alpha = 38.26$ ،  $\sigma_y = 4.725 \text{ Ton/cm}^2$  و مدول الاستیسیته ابتدائی  $E_t = 2100 \text{ Ton/cm}^2$  (  $30000 \text{ ksi}$  ) تقریب زد.

فرض می شود که خط لوله مستقیم است و هیچگونه انحناء، زانوئی، انشعاب، یا تقاطع در مجاورت گذر از گسل وجود ندارد.

جابجائی صفحات گسل را برند با ( با توجه به هندسه گسل شکل ۲ ):

$$\Delta X = \Delta_s \cos \beta = 193.14 \text{ cm (6.34 ft)}$$

$$\Delta Y = \Delta_s \sin \beta = 414.18 \text{ cm (13.6 ft)}$$

$$\Delta Z = 0$$

ذیلاً " روش محاسبه تنش های ناشی از حرکت گسل قدم به قدم با حل مثال فوق تشریح می گردد.

۱- ابتدا باید مقاومت های نهائی ( نیروهای در واحد طول خط لوله ) جانبی،  $p_u$ ، محوری،  $t_u$ ، و قائم رو به بالا  $q_u$  را با استفاده از روابط قسمت دوم محاسبه کرد. چون برای لوله های با عمق دفن کم مقاومت رو به بالای خاک به مراتب کمتر از مقاومت رو به پایین است که خاک عرضه می کند، لذا می توان فرض کرد که تمام حرکت قائم خط لوله در جوانب به سمت بالا صورت می گیرد. با این تقریب احتیاجی به محاسبه مقاومت رو به پایین خاک نیست. با توجه به این نکات داریم.

$$p_u = 25.7 \text{ Ton/m (17.3 kips/ft)}$$

$$t_u = 4.1 \text{ Ton/m (2.71 kips/ft)}$$

مقاومت طولی در نقاطی از لوله که تحت تاثیر خمشی ناشی از بار

مجاورت گسل،  $\Delta L_C$ ، و ازدیاد طول لوله در منطقه مستقیم،  $\Delta L_{S1}$ ، و  $\Delta L_{S2}$  از معادلات (۱۷) محاسبه می‌شود. نتیجه محاسبات به‌قرار زیر است.

$$\begin{aligned}\Delta L_C &= 0.155^m (0.51 \text{ ft}) \\ \Delta L_{S1} = \Delta L_{S2} &= 0.634^m (2.08 \text{ ft}) \\ \Delta L_a &= \Delta L_{S1} + \Delta L_{S2} + 2\Delta L_C = 1.578^m (5.18 \text{ ft})\end{aligned}$$

۶- مقایسه تغییر طول لازم  $\Delta L_P = 2.23^m$  از مرحله چهارم و تغییر طول موجود  $\Delta L_a = 1.578^m$  نشان‌دهنده این است که تنش محوری متوسط فرضی در محل گسل در مرحله دوم کم است و باید زیادتر شود، لذا یک سعی دیگر باید انجام گیرد.

طرز عمل برای دور دوم محاسبات به‌شرح زیر است:

(۱) مشابه مرحله اول دور اول  
(۲)  $\sigma_a = 5.2 \text{ Ton/cm}^2$  (74.2 ksi) فرض می‌کنیم، بنابراین  $\epsilon_a = 3.39\%$

(۳)  $R_{cQ} = 95.4^m$  (313 ft) (از معادله ۹). در نتیجه  $\epsilon_B = 0.55\%$  و  $\epsilon_{min} = 2.65\%$ ، در نتیجه این کنترل نشان می‌دهد که تاثیر خمش قابل اغماض است  $\epsilon_{max} = 3.94\%$  که در حاشیه محدوده قابل قبول است.

۴- تغییر طول لازم،  $\Delta L_P$ ، برابر (۷.28 ft) 2.22m از معادله (۱۳) به‌دست می‌آید. از معادله (۱۸) داریم

$$L_1 = L_2 = 583^m (1913 \text{ ft})$$

۵- ازدیاد طول موجود،  $\Delta L_a$ ، از معادله (۱۷) برابر (7.26 ft) 2.21m به‌دست می‌آید.

۶- چون در این دور از محاسبات ازدیاد طول لازم تقریباً برابر ازدیاد طول موجود است، لذا احتیاجی به تکرار محاسبات نیست. تنش و کرنش محوری در محل گسل عبارتند از  $5.2 \text{ Ton/cm}^2$  و  $3.39\%$ ، ماکزیمم تنش و کرنش در مقطع عرضی عبارتند از  $\sigma_{max} = 5.26 \text{ Ton/cm}^2$  و  $\epsilon_{max} = 3.94\%$  مینیمم تنش و کرنش در مقطع عرضی عبارتند از  $\sigma_{min} = 5.17 \text{ Ton/cm}^2$  و  $\epsilon_{min} = 2.84\%$ . این مقادیر در واقع تخمین دست بالا هستند و تنش‌ها و کرنش‌های واقعی احتمالاً کمتر از این مقادیر خواهند بود.

#### ۷- نتیجه‌گیری و توصیه‌ها

تغییر مکان‌های گذرا در فواصل دور از گسل قابل اغماض نیستند ولی آن‌قدر هم بزرگ نیستند که ایجاد درد سر نمایند، مخصوصاً اگر نظیر تغییر مکان نسبی زیاد هم نباشند. اما در مجاورت گسل حرکات نسبی زیادی ممکن است اتفاق افتد. در صخره‌ها این حرکات نسبی در فواصل نسبتاً کوتاهی حادث می‌شوند، و بنابراین برای حفاظت از لوله تمهیداتی باید اتخاذ نمود. رعایت نکات زیر اثرات این حرکات نسبی را تخفیف می‌دهند.

(۱) در صورت امکان، خط لوله‌ای که از گسل لغزش جانبی می‌گذرد باید با چنان زاویه‌ای از آن بگذرد که در خط لوله کشش ایجاد شود.  
(۲) خط لوله از گسل‌های معکوس باید به‌صورت مایل گذر کند، و این زاویه تمایل باید تا حد امکان کوچک باشد، تا کرنش‌های فشاری تقلیل یابند. اگر انتظار می‌رود که تغییر مکان لغزش جانبی نیز زیاد باشد، زاویه گذر از گسل باید طوری انتخاب‌گردد که در لوله ازدیاد طول تولید

گردد.

(۳) در تمام مناطقی که خطر گسیخته شدن زمین موجود است، خط لوله باید تاجائی‌که می‌توان به‌صورت نسبتاً مستقیم بگذرد و از هرگونه تغییر شدید چه در طول و چه در ارتفاع پرهیز گردد. تاجائی‌که امکان دارد خط لوله باید فاقد خم، زانو، انشعاب و فلنج‌هایی باشد که موجب مهار کردن لوله می‌گردند.

(۴) عمق مدفون لوله در منطقه گسل باید حداقل باشد تا نیروهای مهارکننده لوله به‌حداقل برسد عمق ترانشه‌های لوله‌گذاری در این مناطق حداکثر 1.5-0.9 متر و با زوایای شیب ۴۵ درجه و کمتر باشند.

(۵) افزایش ضخامت جدار لوله موجب بالا رفتن ظرفیت لوله در تحمل حرکات گسل می‌گردد. بهتر است که تا ۳۰۰ متر در طرفین گسل از لوله‌های با جداری ضخیم‌تر استفاده شود. اما باید توجه داشت که عیوب جوشکاری هم به‌حداقل برسد.

(۶) کاهش زاویه اصطکاک سطح بین لوله و خاک،  $\delta$ ، نیز موجب افزایش ظرفیت لوله می‌گردد. یک روش استفاده از روکش سخت اما صاف، مانند اپوکسی، در مجاورت گذر از گسل می‌باشد.

(۷) خاکریزوری لوله در فواصل ۳۰۰ متر در طرفین گسل باید دقت شود. عموماً خاک‌های دانه‌ای شل بدون چسبندگی که حاوی قلوه‌سنگ نباشند مناسب‌تر است. اگر خاک محلی از نوع دیگری است ترانشه را بسیار بزرگتر (مثلاً ۱۵ متر در هر طرف) باید حفر کرد.

(۸) از بلوک‌های مهاری در فواصل ۳۰۰ متر در طرفین گسل استفاده نشود.

(۹) حرکت قائم گسل عموماً خطرناک نیست و لوله‌های با عمق مدفون کم قادر به‌تحمل تا ۱/۵ متر حرکت قائم بدون هیچگونه مشکلی هستند.

(۱۰) اگر هیچکدام از توصیه‌های فوق‌الذکر کفایت نکنند (مخصوصاً در محل‌های صخره‌ای) می‌توان در منطقه گسل لوله را از روی زمین روی تکیه‌گاه‌های اصطکاکی عبور داد.

احتمال جابجایی زمین در محل گذر از گسل در طول عمر طراحی خط لوله کم است و علاوه بر آن تشخیص گسل هم نامطمئن است در نتیجه کاربرد توصیه‌های فوق‌الذکر کافی است. استفاده از راه‌حل‌های ویژه در مناطق با گسل‌های فعال و نتایج حاصل از گسیختگی احتمالی لوله‌ها را باید با توجه به اثرات آلوده‌سازی محیط زیست، خطرات احتمالی دیگر و هزینه اتخاذ نمود.

#### منابع

- Yasseri, S.F., 1985, "Design of Buried Tunnels for Earthquake Loads," Proceedings Second Seminar on Tunneling, Ministry of Plan and Budget, Tehran.
- Newmark, N.M., and W.J. Hall, 1975, "Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement," Proceedings, U.S. National Conference on Earthquake Engineering Ann Arbor, Michigan, EERI.
- Brumund, W.F., and G.A. Leonards, 1973, "Experimental Study



of Static and Dynamic Friction Between Sand and Typical Construction Materials," Journal of Engineering Materials, McGraw-Hill, New York.

Horizontal Motion of Pipes, "Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 103, No. GT10, PP.1119-1142.

4. Kennedy, R.P., A.W. Chow, and R.A. Williamson, 1977, "Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline," Journal of the Transportation Engineering Division. ASCE, Vol. 103, No. TES, PP. 617-633.

6. Trautman, C.H. and T.D. O'Rourke 1983," Load-Displacement Characteristics of Pipe Affected by Permanent Earthquake Ground Movements," Proceedings, International Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, Portland, Oregon, ASME, PVP-77, PP. 254-262.

5. Audibert, J.M.E., and K.J Nyman, 1977,"Soil Restraint Against

7. Bowies, J. 1977," Foundation Analysis and Design," 2ed, McGraw-Hill, New York.

