

بررسی مقابله با اثر تخریبی پدیده گسلش بر روی خطوط لوله و شبکه تغذیه و توزیع گاز و تعمیر آن در سطح کشور

دکتر فیاض رحیم زاده،
دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، استفاده از خطوط لوله مدفون بعنوان ابزاری مهم و مطمئن برای انتقال آب، فرآورده‌های مختلف نفتی چون نفت و گاز و سایر سیالات در مقادیر زیاد و فواصل قابل توجه بنحوی اقتصادی بکار گرفته شده است. بنابراین بررسی عواملی که عملکرد این نوع تأسیسات را مورد مخاطره قرار دهد و ارائه‌ی طرقی برای مقابله با آنها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. نیروها و جابجایی‌های اعمال شده لرزه ای بر خطوط لوله مدفون به صورت کلی به دو دسته جابجایی ماندگار زمین و اثر انتشار امواج تقسیم می‌شود.

در مناطقی که جابجایی ماندگار زمین رخ می‌دهد (مانند گسل‌ها)، خرابی ناشی از این پدیده، از خرابی ناشی از انتشار امواج بسیار بیشتر است و از آنجا که در محدوده تهران بزرگ چندین گسل فعال وجود دارد، در مطالعات آسیب‌پذیری لرزه‌ای خطوط لوله، بررسی اثر تغییر شکل یا جابجایی ماندگار زمین بسیار حایز اهمیت می‌باشد. در این پروژه پس از تعیین اهمیت بررسی اثر پدیده تخریبی گسلش بر لوله‌های مدفون، و مروری بر مطالعات تحلیلی و نیز آزمایشات انجام شده بر لوله‌های مدفون در گذشته، نسبت به بررسی تجربی و عددی اثرات تخریبی ناشی از گسلش در گسل‌های معکوس بر این نوع تأسیسات اقدام شد. برای این منظور پس از مرور مطالعات انجام شده نسبت به جزئیات انجام تعدادی آزمایش با مقیاس کامل با استفاده از نمونه لوله‌های فولادی مورد استفاده در خطوط لوله و شبکه‌های تغذیه و توزیع گاز اقدام و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفت. سپس ضمن تهیه مدل‌های ریاضی مناسب برای بررسی عددی پدیده اندرکنش لوله- خاک تحت اثر گسلش معکوس و کالیبره نمودن آنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، نسبت به انجام مطالعات پارامتریک گسترده‌ای اقدام گردید.

ذکر این نکته ضروری است که با توجه به عدم قطعیت موجود در تعیین زوایای برخورد لوله و گسل‌ها به دلیل مقیاس نقشه‌های موجود، زوایای برخورد لوله و گسل به صورت پارامتریک در نظر گرفته شده و بدین ترتیب عدم قطعیت موجود در این رابطه پوشش داده شده‌اند. سپس، حداکثر مقادیر کرنش‌های کششی و فشاری بدست آمده از انجام آزمایش‌ها و تحلیل‌ها و نیز حداکثر کرنش قابل قبول پیشنهادی در ترازهای مختلف لرزه‌ای در آیین‌نامه‌های معتبر جهت تعیین آسیب‌پذیری خطوط لوله و شبکه‌های تغذیه و توزیع، در مناطق تهران- ری و شمیرانات مورد استفاده قرار گرفت. در خاتمه راهکارهای لازم برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای خطوط لوله و شبکه‌های تغذیه و توزیع در مناطق تهران- ری و شمیرانات ارائه گردید.

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام شده

نوع خاک	H/D	عمق دفن (m)H	D/t	ضخامت (mm)t	قطر خارجی (mm)D	آزمایش
ماسه ۰۵	۸/۸	۱/۰۰	۲۶	۴/۴	۱۱۴/۳	پ-۱
ماسه ۰۵	۸/۸	۱/۰۰	۲۶	۴/۴	۱۱۴/۳	۱
ماسه ۰۵	۲/۲	۰/۲۵	۲۶	۴/۴	۱۱۴/۳	۲
ماسه بادی	۸/۸	۱/۰۰	۲۶	۴/۴	۱۱۴/۳	۳
ماسه بادی	۴/۴	۰/۵۰	۲۶	۴/۴	۱۱۴/۳	۴
ماسه بادی	۵/۹	۱/۰۰	۳۸/۵	۴/۴	۱۶۸/۳	۵
ماسه ۰۵	۵/۹	۱/۰۰	۳۸/۵	۴/۴	۱۶۸/۳	۶

۲- مطالعات آزمایشگاهی انجام شده

با توجه به عدم وجود اطلاعات آزمایشگاهی در زمینه گسلش معکوس، بر اساس فراوانی پتانسیل آسیب‌پذیری لوله‌ها و امکانات قابل دسترس، و جهت مطابقت هر چه بیشتر نتایج آزمایش با شرایط واقعی تصمیم بر آن شد که آزمایش‌ها به صورت تمام مقیاس صورت گیرد. تعداد ۷ آزمایش بر لوله‌های ۴ اینچ و ۶ اینچ جهت بررسی رفتار لوله‌های فولادی مدفون تحت اثر گسلش معکوس ۰/۶ متر مطابق با جدول ۱ انجام شد.

برای انجام آزمایش‌های فوق دستگاهی مطابق با شکل ۱ طراحی و ساخته شد. این دستگاه از دو بخش متحرک و ثابت تشکیل شده به طوری که قادر به شبیه‌سازی گسلش معکوس و نرمال می‌باشد. ابعاد داخلی آن ۸×۱/۴×۱/۸ متر (ارتفاع × عرض × طول) می‌باشد که در وسط با زاویه حدود ۶۰ درجه به دو بخش تقسیم شده است.

در شکل ۲ مخزن پس از ۰/۶ متر جابجایی در حالت گسلش معکوس مشاهده می‌شود. برای پر کردن مخزن دوبخشی و مدفون کردن لوله‌ها از دو نوع خاک «ماسه ۰۵» و «ماسه بادی» استفاده شد. به لحاظ طبقه‌بندی خاک ماسه ۰۵ از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده (SW) و ماسه بادی از نوع ماسه سیلتی (SM) می‌باشند. ذرات ریز هر دو نوع ماسه از نوع غیرپلاستیک می‌باشند.

در مطالعه حاضر اثر عمق دفن نسبی (H/D) زیاد، متوسط و کم بر رفتار لوله‌های مدفون تحت گسلش معکوس در نظر گرفته شد. در عمق دفن نسبی زیاد لوله در دو نقطه دچار کماتش موضعی شده و اوال شدن به شدت در محل کماتش مشاهده می‌گردد (شکل ۳-الف).



شکل ۱- نمای وسیله آزمایش ساخته شده جهت انجام آزمایش برای حالت گسلش معکوس



شکل ۲- وسیله آزمایش ساخته شده جهت انجام آزمایش برای حالت گسلش معکوس پس از ۰/۶ متر جابجایی

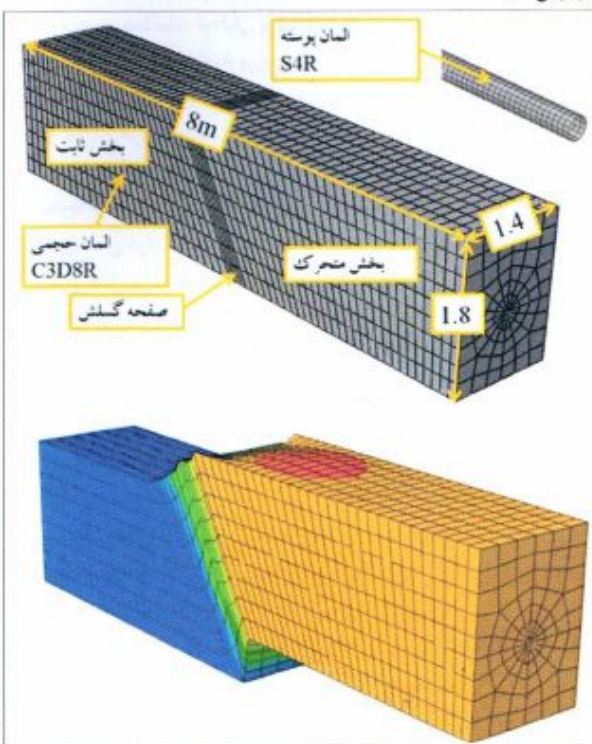
با کاهش عمق دفن نسبی به عمق دفن نسبی متوسط کماتش موضعی در یک نقطه متمرکز می‌گردد و اوایل شدگی در محل کماتش موضعی کاهش می‌یابد. با کاهش بیشتر عمق دفن نسبی به عمق دفن نسبی کم، مود خرابی از کماتش موضعی به کماتش تیری منتقل شده و اوایل شدگی تقریباً نزدیک به صفر میل نموده و لوله قابلیت بهره برداری خود را حفظ می‌نماید (شکل ۳-ب). این روش می‌تواند در مقاوم‌سازی لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرد. اندازه گیری‌های انجام شده توسط کرنش سنج‌ها حاکی از این است که کرنش‌های فشاری ایجاد شده در لوله‌ها از حد 0.88% تجاوز نموده‌اند، هر چند ترکی در مقطع مشاهده نشده است. با وجود اینکه مود خرابی اصلی در لوله‌ها تحت اثر گسلش معکوس کماتش جدااره لوله می‌باشد، اما کرنش‌های کششی نیز با مقادیر مجاز مقایسه شده‌اند. در تمامی آزمایش‌ها کرنش‌ها در حد محدوده ۲ درصد آیین‌نامه می‌باشند و در بدترین حالت به ۲/۵ درصد محدود می‌گردند.

۳-مدلسازی عددی و نتایج تحلیل‌ها

جهت انجام مطالعات تکمیلی مدل اجزاء محدود پیشرفته سه بعدی ساخته و با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شد. شکل ۴ نشان دهنده محیط پیوسته ساخته شده در نرم افزار و همچنین تغییر شکل خاک پس از جابجایی ۰/۶ متر می‌باشد.



شکل ۳- الف) کماتش موضعی جدااره لوله (آزمایش ۵)، ب) کماتش تیرمانند (آزمایش ۲)



شکل ۴- الف) مدل المان سه بعدی محیط خاک و لوله، ب) مدل پس از جابجایی ۰/۶ متر

الف:

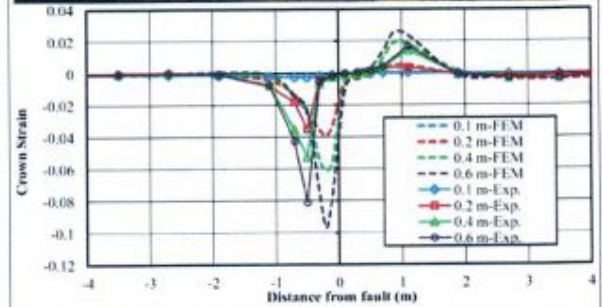
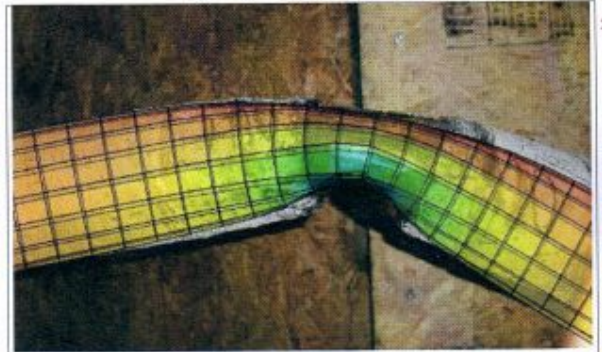
ب:

الف:

ب:

سه جهت طولی، عرضی و قائم در محل گره‌ها مدل‌سازی شده است. تمامی درجات آزادی گره ابتدای فنرهای خاک بسته شده و گره انتهایی آنها همان گره‌های اصلی مربوط به مدلسازی لوله می‌باشد. جهت ایجاد شرایط گسلش، گره ابتدایی فنرهای خاک مربوط به ناحیه گسلش به میزان جابجایی گسل در جهات مختلف جابجا می‌شوند. در شکل ۷ نمای مدل ساده شده و هم چنین صحت سنجی مدل با مدل اجزاء محدود پیشرفته، که پیشتر توضیح داده شد، و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به شکل مدل به لحاظ مهندسی تطابق خوبی با مدل عددی پیشرفته و نتایج آزمایشگاهی دارد.

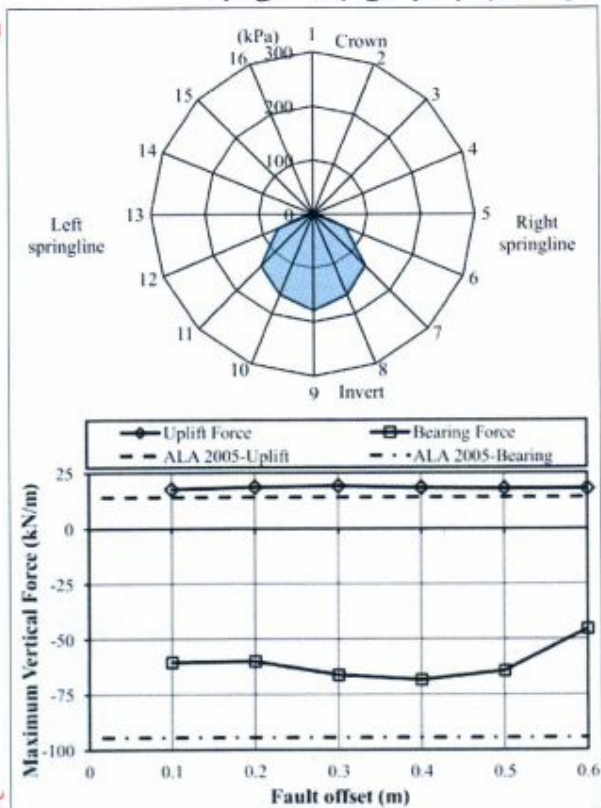
در شکل ۵ کرنش محوری تار فوقانی لوله ۴ اینچ در طول لوله در جابجایی‌های مختلف برای هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی و همچنین مطابقت نقطه کماتش موضعی لوله در آزمایش و مدل نشان داده شده است.



شکل ۵- الف) کرنش محوری تار فوقانی لوله، (ب) مطابقت محل کماتش موضعی در نمونه آزمایشگاهی

در ادامه با استفاده از مدل اجزاء محدود صحت سنجی شده، فشار وارد بر لوله از طرف خاک استخراج و نیروی معادل آن محاسبه گردید. در شکل ۶ توزیع فشار در لوله ۴ اینچ در فاصله ۱/۹ متری از محل گسلش و همچنین حداکثر نیروی اندرکنشی در لوله ۶ اینچ بدست آمده در جابجایی‌های مختلف گسل از مدل عددی نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که آیین نامه‌های موجود مانند ALA (2005) تخمین نادرستی نسبت به نیروی موجود ارائه می‌دهند و نیاز به اصلاح مقادیر آیین نامه‌ها در این زمینه می‌باشد.

برای بررسی آسیب پذیری خطوط لوله گاز تحت گسلش و بالاخص برای کاربردهای مهندسی آیین نامه‌های معتبر دنیا استفاده از مدل‌های اجزاء محدود ساده تری که در آن خاک با یک سری فنرهای متعام در سه جهت مختلف مدلسازی می‌شود را پیشنهاد می‌نمایند. یکی از مزیت‌های این مدل کاهش قابل توجه زمان تحلیل با حفظ دقت مناسب می‌باشد. در تحقیق حاضر، برای مدلسازی و تحلیل کمی و بررسی آسیب پذیری و مقاوم سازی خطوط لوله شهر تهران از نرم افزار ANSYS 12.0 استفاده شده است. بارگذاری مدل با توجه به شرایط واقعی هر مورد انجام شده که شامل سربراشی از وزن خاک و فشار داخلی لوله در محل عبور از گسل می‌باشد. سیستم لوله و خاک در فاصله ۲۰۰ متری از تعدادی المان و گره ساخته شده است. سیستم خاک اطراف لوله با توجه به فواصل گره‌ها توسط فنرهای مجزا در هر



شکل ۶- الف) توزیع فشار در لوله ۴ اینچ در فاصله ۱/۹ متری از محل گسلش، (ب) حداکثر نیروی اندرکنشی در لوله ۶ اینچ بدست آمده در جابجایی‌های مختلف گسل

از مدل ساده فوق می‌توان برای مقاصد مهندسی و طراحی لرزه‌ای لوله‌های مدفون استفاده نمود. در ادامه جزئیات آسیب پذیری شبکه تغذیه و توزیع خطوط گاز استان تهران به عنوان پروژه پایلوت ارائه شده است.

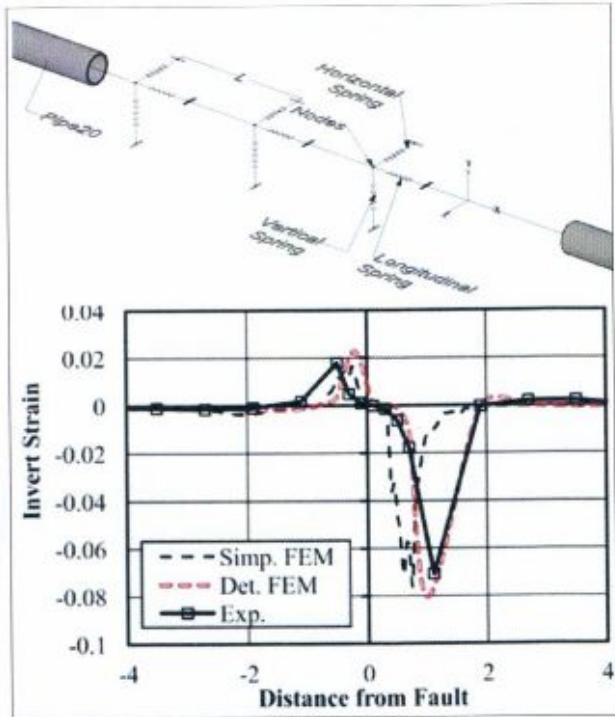
۴- گسل‌های منطقه مورد مطالعه و برآورد جابجایی آن‌ها

نقشه گسل‌های شناخته شده در گستره تهران در شکل ۸ ارائه شده و توان لرزه‌زایی میانگین برخی از گسل‌های محدوده طرح در جدول ۲ مشاهده می‌گردد. مقادیر جابجایی میانگین و بیشینه جابجایی قابل انتظار برخی گسل‌های محدوده طرح برآورد شده و در جدول ۲ ارائه شده است.

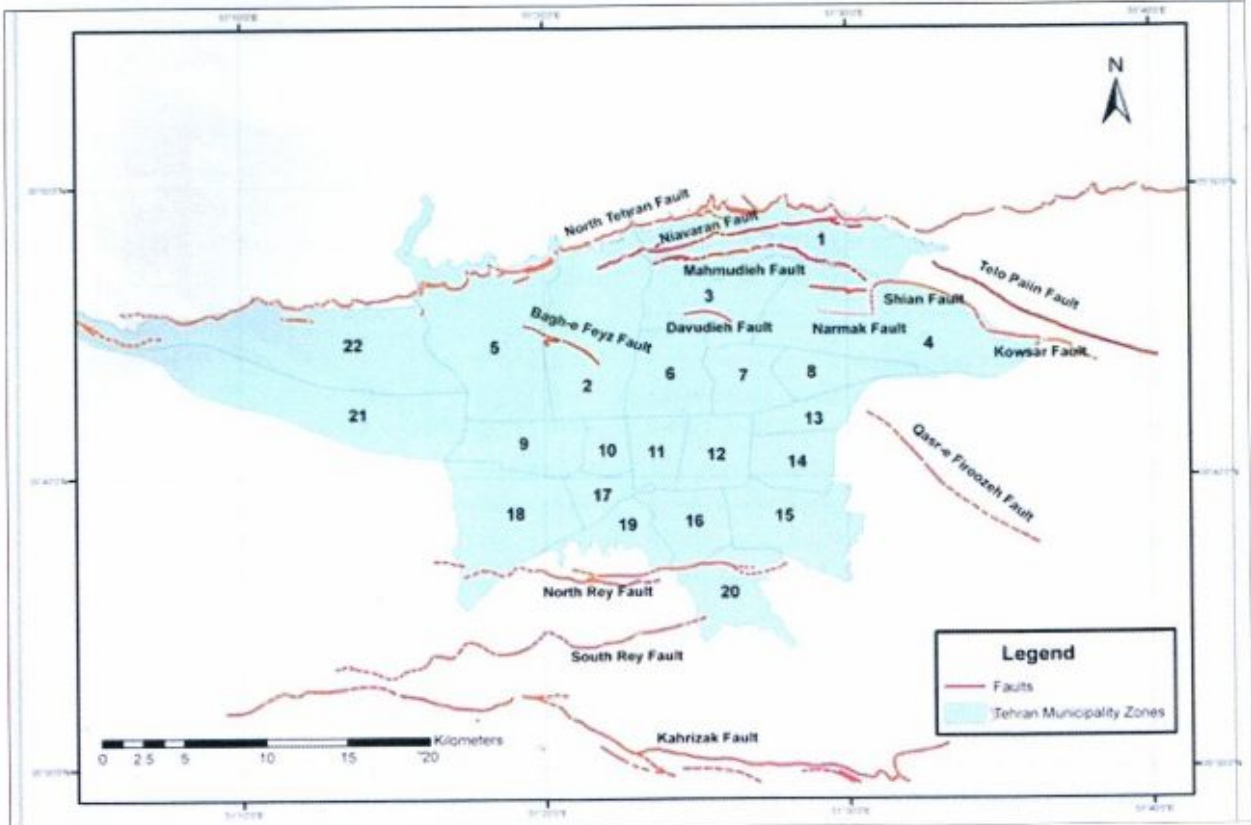
جدول ۲- برآورد توان لرزه‌زایی برخی از گسل‌های محدوده طرح

نام گسل	دراز (Km)	درزای گسیختگی (Km)	سازوکار	توان لرزه‌زایی (Mw)				
				Average	Papa04	MB00	N05	WC94
گسل مندا	200	100	راندگی با مولفه راستاگره	7.30	7.30	7.20	N.A.	7.40
گسل شمال تهران	90	45	راندگی با مولفه راستاگره	7.05	7.10	7.00	7.80	7.00
گسل کهریزک	40	20	راندگی	6.60	N.A.	6.60	6.60	6.60
گسل جنوب ری	185	925	راندگی	6.20	N.A.	6.20	N.A.	6.20
گسل نیاوران	18	9	راندگی	6.20	N.A.	6.20	N.A.	6.20
گسل شمال ری	17	8.5	راندگی	6.20	N.A.	6.20	N.A.	6.20
گسل کهنر	13	6.5	فشاری	6.00	N.A.	6.00	N.A.	6.00
گسل قصر فیروزه	12	6	-	6.00	N.A.	N.A.	N.A.	6.00
گسل باغ فیض	4.5	2.25	فشاری	5.60	N.A.	N.A.	N.A.	5.60

WC94: Wells and Coppersmith, 1994
 N05: Nowroozi, 1985
 MB00: Mai and Berza, 2000
 Papa04: Papadopoulos et al., 2004



شکل ۷- الف) نمای شماتیک سیستم لوله و خاک، ب) صحت سنجی مدل اجزاء محدود ساده شده



شکل ۸- نقشه گسل‌های محدوده شهر تهران

جدول ۳- مقادیر بیشینه جابجایی برخی از گسل های محدوده طرح

جابجایی بیشینه (MD) (متر)					جابجایی متوسط (AD) (متر)					سازوکار	درازای گسیختگی (Km)	درازا (Km)	نام گسل
Average	Papa04	MB00	N85	WC94	Average	Papa04	MB00	N85	WC94				
4.27	N.A.	N.A.	N.A.	4.27	2.04	2.32	1.41	N.A.	2.40	راندگی با مولفه راستالغز	100	200	گسل مشا
2.17	N.A.	N.A.	2.64	1.69	0.85	0.93	0.58	N.A.	1.05	راندگی با مولفه راستالغز	45	90	گسل شمال تهران
1.27	N.A.	N.A.	1.26	1.28	0.54	N.A.	0.43	N.A.	0.64	راندگی	20	40	گسل کهریزک
0.92	N.A.	N.A.	N.A.	0.92	0.40	N.A.	0.29	N.A.	0.50	راندگی	9.25	18.5	گسل جنوب ری
0.26	N.A.	N.A.	N.A.	0.26	0.25	N.A.	0.29	N.A.	0.20	راندگی با مولفه راستالغز	9	18	گسل نیاوران
0.89	N.A.	N.A.	N.A.	0.89	0.39	N.A.	0.28	N.A.	0.49	راندگی	8.5	17	گسل شمال ری
0.80	N.A.	N.A.	N.A.	0.80	0.35	N.A.	0.24	N.A.	0.45	فشاری	6.5	13	گسل کوثر
0.26	N.A.	N.A.	N.A.	0.26	0.18	N.A.	N.A.	N.A.	0.18	-	6	12	گسل قصر فیروزه
0.74	N.A.	N.A.	N.A.	0.74	0.43	N.A.	N.A.	N.A.	0.43	راندگی	5.5	11	گسل محمودیه
0.49	N.A.	N.A.	N.A.	0.49	-	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	فشاری	2.25	4.5	گسل باغ فیض

WC94: Wells and Coppersmith, 1994

N85: Nowroozi, 1985

MB00: Mai and Beroza, 2000

Papa04: Papazachos et al., 2004

دستیابی به سطح عملکردی مورد نظر بطور کمی معادل خواهد بود با:
الف- پذیرش رفتار غیرخطی لوله در قسمتی از لوله که متحمل بیشینه تنش می شود.

ب- محدود نمودن کرنش کششی بیشینه به ۲ درصد و کرنش فشاری بیشینه به آستانه کماتش موضعی جداره یا $0.175/\epsilon$ برای هدف عملکردی ۱ و کرنش کششی بیشینه به ۴ درصد و کرنش فشاری بیشینه معادل با وقوع کماتش موضعی در سطح وسیع با احتمال شکست کم یا $0.88/\epsilon$ برای هدف عملکردی ۲.

۷- نتایج تحلیل آسیب پذیری خطوط لوله تهران

نتایج تحلیل های انجام شده برای شهر تهران به عنوان پایلوت نشان دهنده آن است که در تمامی نقاط عبور خطوط تغذیه و توزیع با فشار داخلی 60 psi از گسله های محدوده تهران بزرگ، در هر دو سطح خطر ۱ و خطر ۲ آسیب پذیر تلقی شده و می بایست اقدامات مرمتی لازم برای مقاوم سازی آنها مورد نظر قرار گیرد. همچنین تحلیل خطوط لوله با فشار داخلی 250 psi نشان داد که تنها تعداد محدودی از این خطوط در مقابل پدیده گسلش آسیب پذیر نیستند. با توجه به نتایج ارائه شده بدلیل تراکم بالای خاک اطراف لوله ها، معکوس بودن گسل ها و نسبت کم ضخامت به قطر لوله ها، در محل عبور از گسل، لوله های گاز رفتار قابل قبولی در برابر جابه جایی

۵- تقاطع خطوط لوله و گسل ها

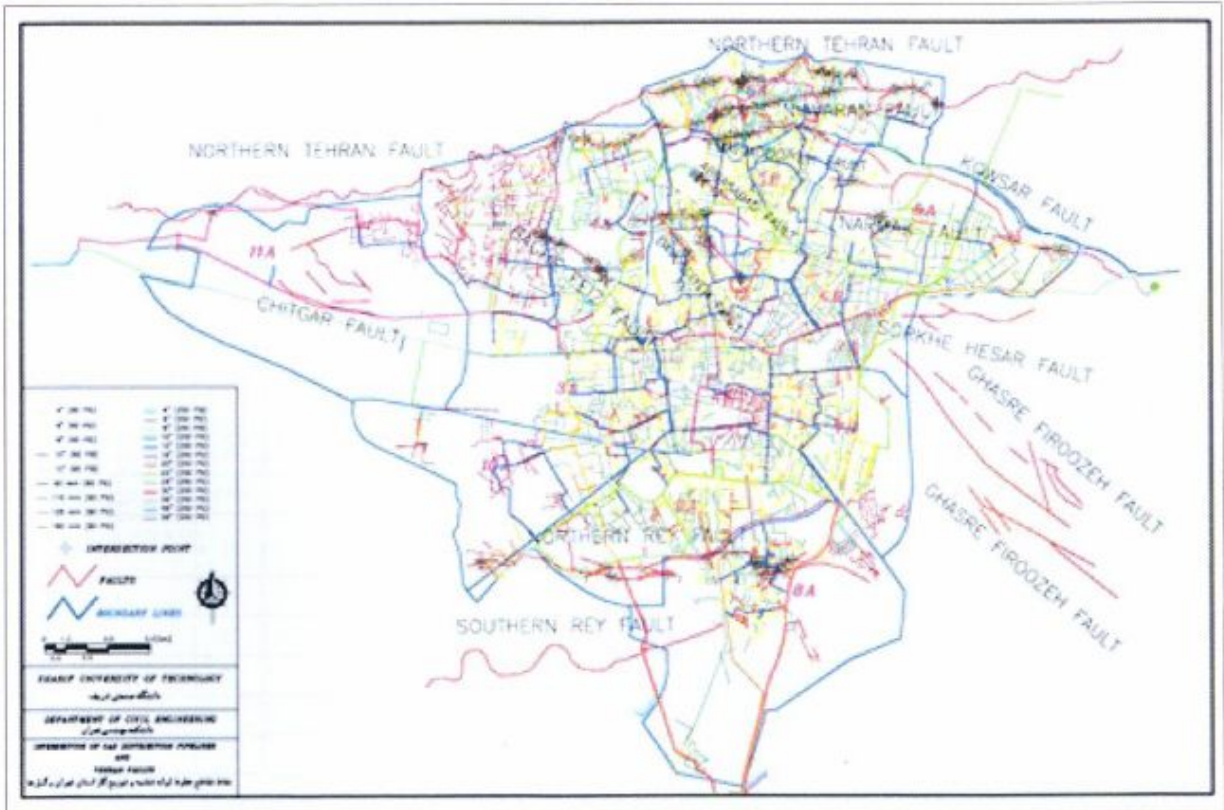
در شکل ۹ نقاط تقاطع خط لوله و گسل ها نشان داده شده است. عدم قطعیتی در زاویه تقاطع لوله و گسل وجود دارد که با پارامتری در نظر گرفتن این زاویه در تحلیل ها عدم قطعیت موجود در این رابطه پوشش داده شده اند. بررسی نتایج حاصله نشان می دهد که گسل شمال تهران با ۴۸ تقاطع، گسل داوودیه با ۴۵ تقاطع، و گسل نیاوران با ۴۲ تقاطع، بیشترین تعداد تقاطع را دارا هستند.

۶- سطوح عملکردی و نیز سطوح خطر لرزه ای مورد استفاده در این پروژه

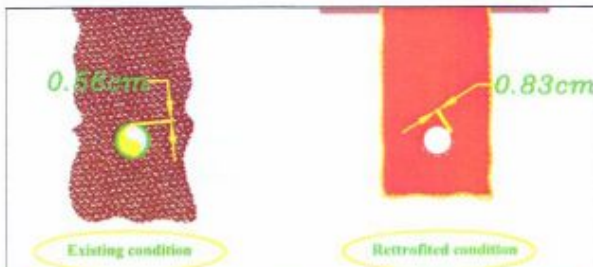
در بخش مطالعه عددی نیز جهت ارزیابی عملکرد خطوط لوله اهداف عملکردی بشرح زیر برای مقاوم سازی خطوط لوله پیشنهاد شده اند:

۱- هدف عملکردی ۱: دست یابی به سطح عملکردی معادل تغییر شکل لوله در حدی که امکان انتقال محتویات درون لوله هر چند به مقداری کمتر از زمان پیش از زلزله و در شرایط اضطرار حفظ شود، در سطح خطر لرزه ای معادل با میانگین جابجایی ماندگار گسل ها.

۲- هدف عملکردی ۲: دست یابی به سطح عملکردی معادل عدم شکست لوله و از دست ندادن قابلیت نگهداری محتویات درون لوله در سطح خطر لرزه ای معادل با بیشینه جابجایی ماندگار گسل ها.



شکل ۹- نقاط تقاطع خطوط لوله گاز شهر تهران با گسل های تهران



لوله ۱۰ اینچ		
مقدار پیشنهادی	مقدار موجود	پارامتر
25°	47°	ضریب اصطکاک داخلی خاک
≈ 16.7 KN/m ²	≈ 19.6 KN/m ²	وزن واحد حجم
≈ 1.2m	≈ 1.2m	عمق دفن
2270 Kg/cm ²	2270 Kg/cm ²	نشی تسلیم لوله
0.83 cm	0.56 cm	ضخامت جداره
27.3 cm	27.3 cm	قطر
60 psi	60 psi	فشار داخلی

شکل ۱۰- طرح پیشنهادی برای مقاوم سازی خط لوله ۱۰ اینچ عبوری از گسل عباس آباد

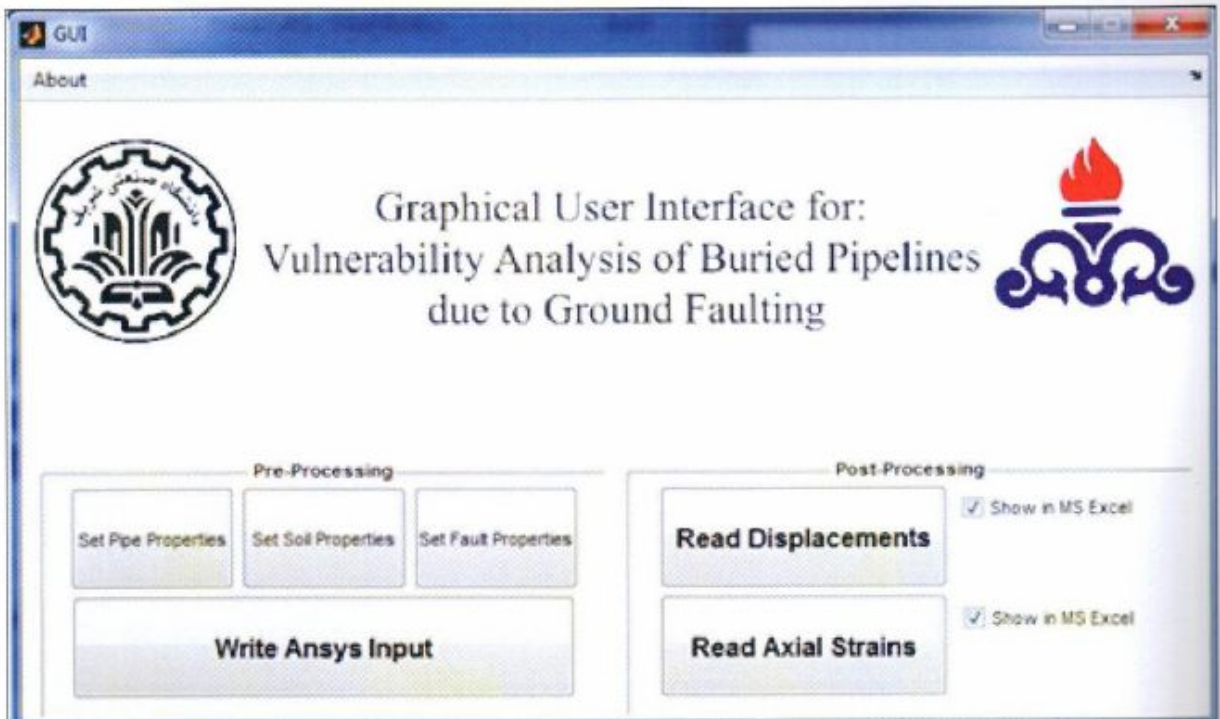
ماندگار زمین در اثر گسلس سطحی نخواهند داشت. بنابراین با توجه به توضیحات و راهکارهای ارائه شده ضروری است نسبت به مقاوم سازی لوله‌ها با تغییر خاک اطراف لوله‌ها و جایگزین کردن آن با ماسه سست و در برخی موارد جایگزینی لوله‌ها با لوله‌های دارای ضخامت بیشتر اقدام گردد. همچنین نتایج تحلیل های انجام شده بر روی تعدادی از لوله‌های توزیع با فشار داخلی ۲۵۰ psi که در تحلیل های پیشین قابل قبول تشخیص داده شدند، نشان داد که با در نظر گرفتن اثر پوسیدگی، آسیب پذیر می گردند. در شکل ۱۰ یکی از راهکارهای ارائه شده برای مقاوم سازی خط لوله ۱۰ اینچ متقاطع با گسل عباس آباد نشان داده شده است.

۸- تعمیم نتایج و دستاوردها به کل کشور

جهت بررسی مورد به مورد هر پروژه در آینده نرم افزاری تهیه شده که با وارد کردن اطلاعات ورودی از قبیل مشخصات لوله، خاک و بردار لغزش گسل، فایل ورودی نرم افزار ANSYS را تهیه کرده و با استفاده از آن می توان لوله را تحلیل نموده و پس از آن نیز با استفاده از نرم افزار تهیه شده عملیات پس پردازش انجام گیرد. بدین ترتیب جهت مطالعات آینده در کل کشور، می توان با استفاده از نرم افزار ارائه شده، لوله های متقاطع با گسل ها را تحلیل نموده و آسیب پذیری آن ها را بررسی نمود. شایان ذکر است که طرح های ارائه شده در خصوص مقاوم سازی لوله ها تحت اثر گسلس معکوس، قابل تعمیم به گسلس امتداد لغز نیز می باشند. در گسلس معکوس حرکت در صفحه قائم رخ می دهد. در این حالت سختی

علاوه بر روش های فوق در حالتیکه لوله تحت اثر نیروهای کششی و لنگر خمشی قرار می گیرد، می توان از سایر روش ها مانند استفاده از غلاف کامپوزیت یا غلاف فولادی جهت مقاوم سازی لوله استفاده نمود. بنابراین جهت مقاوم سازی لوله های تحت اثر گسلش امتداد لغزی که منجر به تنش های فشاری می گردد، استفاده از روش های عنوان شده و در حالتیکه منجر به تنش های کششی می گردد، استفاده از روش های عنوان شده به اضافه استفاده از ورق های کامپوزیت و غلاف های فولادی توصیه می گردد.

قائم خاک بالا و پایین لوله با هم متفاوت است. در حالتیکه تحت اثر گسلش امتداد لغز، حرکت در صفحه افقی رخ می دهد و سختی جانبی دو طرف خاک یکسان می باشد. بنابراین، رفتار لوله تحت اثر این دو نوع حرکت گسل متفاوت خواهد بود. همچنین در حالت گسلش معکوس لوله تحت اثر نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی قرار می گیرد. در حالت گسلش امتداد لغز لوله بسته به زاویه لوله و گسل، لوله ممکن است تحت نیروی فشاری یا کششی و لنگر خمشی قرار می گیرد. برای حالتیکه لوله تحت اثر گسلش امتداد لغز قرار گیرد، روش های عنوان شده صادق است.



شکل ۱۱- نرم افزار تهیه شده برای تحلیل خطوط لوله مدفون تحت اثر گسلش