

ارزیابی آسیب‌پذیری خطوط لوله‌ی فولادی مدفون پیوسته در برابر انتشار امواج لرزه‌یی

وحید جهانگیری (دکتر)

حمزه شکیب* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران - زلزله، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۸۹-۷۹)

در پژوهش حاضر، آسیب‌پذیری خطوط لوله‌ی فولادی مدفون پیوسته در برابر انتشار امواج لرزه‌یی براساس نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی فزاینده ارزیابی شده است. تحلیل‌ها بر روی ۳ لوله‌ی فولادی با نسبت قطر به ضخامت، عمق دفن به قطر و مشخصات خاک مختلف با استفاده از ۱۰ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور انجام شده است. مدل‌سازی با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شده است. کرنش فشاری محوری پیک در بحرانی‌ترین مقطع لوله به‌عنوان پارامتر نیاز مهندسی برای لوله‌ی فولادی مدفون انتخاب شده است. در ادامه، حالت‌های حدی برای سازه‌های مذکور پیشنهاد شده و منحنی‌های شکنندگی لوله‌ها براساس نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده به‌دست آمده است. همچنین رابطه‌یی برای نرخ خرابی لوله‌های مدفون بر حسب کرنش محوری فشاری ارائه شده است. مشاهده شد که با ۲ برابر شدن کرنش ایجاد شده در لوله‌ی ناشی از زلزله، نرخ آسیب آن حدوداً ۱/۸۷ برابر می‌شود. از نتایج دیگر پژوهش می‌توان به افزایش احتمال آسیب‌پذیری خط لوله با افزایش بسامد طبیعی ارتعاش سیستم خاک - لوله اشاره کرد.

واژگان کلیدی: آسیب‌پذیری، خط لوله‌ی فولادی مدفون، روش اجزاء محدود،

منحنی شکنندگی، تحلیل دینامیکی فزاینده.

v.jahangiri@modares.ac.ir
shakib@modares.ac.ir

۱. مقدمه

که رابطه‌ی تجربی بین پارامترهای شدت زلزله و خرابی لوله را مطرح ساختند و از پیشینه‌ی شتاب زمین (PGA)^{۱۲} استفاده کردند و تفاوتی بین حرکت دائمی و گذرای زمین قائل نشدند. برخی دیگر نیز برای اولین بار بین آسیب ناشی از تغییرشکل دائمی زمین و گسترش امواج تفاوت قائل شدند و رابطه‌ی شکنندگی مبتنی بر شدت مرکالی اصلاح‌شده (MMI)^{۱۳} را برای انواع مصالح لوله (مثل: چدن، فولاد با اتصال جوش گازی، فولاد با اتصال جوش قوس الکتریکی و ...) ارائه کردند.^{۱۴}

همچنین در پژوهشی در سال ۱۹۸۸،^{۱۵} از روش آگوشی در فرق‌گذاری بین آسیب‌های تغییرشکل دائمی زمین و گسترش امواج استفاده شد و برای آسیب ناشی از گسترش امواج، نمودار نرخ خرابی در مقابل سرعت افقی پیشینه‌ی ذره رسم و مشخص شد که نسبت آسیب هنگامی که سرعت افقی پیشینه‌ی ذره ۲ برابر می‌شود، با ضریب ۴/۵ افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۳،^{۱۶} نیز با استفاده از داده‌های وسیعی از زلزله‌های مختلف، مصالح مختلف و قطره‌های مختلف لوله، رابطه‌یی برای شکنندگی لوله براساس پیشینه‌ی سرعت افقی ذره ارائه شد و پارامترهای مختلفی که تا قبل از زلزله‌ی نورتریج^{۱۷} (۱۹۹۴) برای بیان ارتباط بین شدت زلزله و آسیب لوله بررسی شدند، عبارت بودند از: شدت مرکالی اصلاح‌شده، شتاب پیشینه‌ی زمین، سرعت پیشینه‌ی زمین (PGV)^{۱۵}، جابه‌جایی پیشینه‌ی زمین (PGD)^{۱۶}، شتاب طیفی (Sa)^{۱۷}، شدت طیف (SI)^{۱۸} و شدت آریاس (AI)^{۱۹}.^{۱۳} مدارک کافی در مورد ارتباط PGD، Sa، SI با خرابی وجود ندارد.^{۱۳} زلزله‌ی نورتریج یک فرصت

خطوط لوله‌ی فولادی مدفون، از جمله شریان‌های حیاتی هستند که نقشی اساسی و حیاتی در زندگی بشر و توسعه‌ی اقتصادی ایفا می‌کنند و مقاومت آن‌ها در برابر رخدادهای شدید، مثل زمین‌لرزه به ویژه زمانی که مقدار قابل توجهی مواد اشتعال‌پذیر حمل می‌کنند، ضروری است و در برابر زلزله بسیار آسیب‌پذیرند.^۱ خطرهای لرزه‌یی وارد بر خطوط لوله‌ی مدفون به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: خطرهای گسترش امواج،^۱ و خطرهای تغییرشکل دائمی زمین (شامل: گسلش، روان‌گرایی خاک ماسه‌یی و زمین لغزش).^۲ از میان زلزله‌هایی که در آن‌ها آسیب لرزه‌یی ناشی از گسترش امواج لرزه‌یی وجود داشته است، می‌توان به زلزله‌های سانفرانسیسکو^۱، کانتو^۲، لانگ بیچ^۳، فوکویی^۴، آلاسکا^۵، پوجت سوند^۶، سانتا رز^۷، سان‌فرانسدو^۸، ماناگوا^۹، کولینگا^{۱۰} و مکزیکوسیتی^{۱۱} اشاره کرد.^{۳-۶} منحنی‌های شکنندگی با ارائه‌ی رابطه بین شدت زمین‌لرزه و میزان خرابی، برای ارزیابی و تخمین آسیب‌پذیری سازه‌ها استفاده می‌شوند.^{۱۲}

مطالعات زیادی در مورد آسیب‌پذیری لرزه‌یی و شکنندگی انواع سازه‌ها انجام شده است. منحنی شکنندگی، احتمال خرابی سازه را تحت بار لرزه‌یی مشخص بیان می‌کند. همچنین برخی پژوهشگران در سال ۱۹۷۵،^۸ جزء اولین کسانی بودند

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۹/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۱۸، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۳۰.

DOI: 10.24200/J30.2019.1432

تحلیل IDA محاسبه شد. برای این منظور، ۳ لوله با مشخصات خاک و لوله‌ی متفاوت براساس دستورالعمل ALA^[۱۶]، برای ناحیه‌ی با لرزه‌خیزی خیلی شدید و خاک نوع (III) مطابق استاندارد ۲۸۰۰^[۲۳] طراحی شدند. لوله‌های مذکور در نرم‌افزار این سیس^[۲۴] مدل شدند و با استفاده از ۱۰ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور تحت تحلیل IDA قرار گرفتند.

۲. طراحی لوله‌ها

لوله‌های مدفون براساس ALA، طراحی شده‌اند.^[۱۶] بعد از تعیین قطر لوله و فشار داخل آن (براساس عملکرد مورد انتظار از خط لوله) ضخامت لوله به دست آمد. تحت اثر بار قائم زمین، خط لوله‌ی مدفون تمایل به بیضوی شدن دارد که باعث تولید تنش‌هایی در جداری لوله می‌شود.^[۱۶] لوله‌های منتخب در مقابل اثر مذکور نیز کنترل شدند. در دستورالعمل ALA، ضوابط مربوط به انتشار امواج لرزه‌ی براساس کرنش محوری موازی محور لوله، که از کرنش زمین ناشی می‌شود، بیان شده است.^[۱۶] لوله‌های مورد استفاده در تحلیل در مقابل انتشار امواج لرزه‌ی نیز طراحی شدند. همچنین لوله‌های مورد مطالعه در برابر بارگذاری حرارتی ناشی از تغییرات دما به اندازه‌ی $\Delta T = 60^\circ C$ نیز کنترل شدند. در مطالعه‌ی حاضر، فرض شده است که لوله‌ها در بالای تراز آب زیرزمینی قرار دارند و به همین دلیل نیروی ناشی از شناوری در طراحی آن‌ها در نظر گرفته نشده است. طراحی در برابر بارهای زنده‌ی سطحی، بارهای ضربه‌ی سطحی، بار ناشی از حفاری زیر لوله، جابه‌جایی‌های دائمی زمین، آثار انفجار، بار سیل و جابه‌جایی خط لوله در حال سرویس به علت عدم فراگیربودن بارگذاری‌های مذکور انجام نشد.^[۱۶] در نهایت، ۳ لوله‌ی مدفون با نسبت قطر به ضخامت (D/t) و عمق دفن به قطر (H/D) مختلف با عنوان مدل‌های عددی در تحلیل دینامیکی فراینده استفاده شدند.

۳. مدل‌سازی

۱.۳. مدل‌سازی لوله

مدل‌سازی لوله‌ی مدفون به روش اجزاء محدود و مدل‌سازی لوله با استفاده از المان‌های تیر سه بُعدی دو گره‌ی انجام شده است که هر گره ۶ درجه‌ی آزادی (جابه‌جایی در جهت محورهای x ، y و z و دوران حول آن‌ها) دارد. المان مذکور توانایی در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ و غیرخطی را دارد. از مقطع فایبر^{۲۵} برای مدل‌سازی استفاده شده است. یعنی مقطع دایروی در دو جهت شعاعی و محیطی به فیبرهایی تقسیم و محاسبات برای هر فیبر جداگانه صورت گرفته و سپس انتگرال‌گیری روی مقطع انجام شده است. در مطالعه‌ی حاضر، مصالح اختصاص یافته به المان تیر، مصالح رامبرگ - اسگود^{۲۶} است. به طور کلی در مدل‌سازی سازه‌های فولادی و لوله‌ها به طور خاص از مصالح مذکور استفاده می‌شود.^[۲۵] با توجه به عدم توانایی المان تیر برای در نظر گرفتن فشار، در مطالعه‌ی حاضر از فشار داخلی لوله صرف نظر شده است.

۲.۳. مدل‌سازی خاک

برای مدل‌سازی خاک اطراف لوله، از فنرهای دو خطی (کشسان‌خمیری کامل) که بیانگر سختی خاک هستند،^[۱۶] و نیز میراگرهای معادل که بیانگر میرایی خاک

منحصر به فردی برای توسعه‌ی ارتباط بین آسیب وارده به خط لوله و پارامترهای لرزه‌ی پدید آورد. بعد از زلزله‌ی نورث‌ریج، برخی پژوهشگران،^[۱۴] با بررسی اهمیت آماری^{۲۰} بین پارامترهای لرزه‌ی مختلف و خرابی لوله متوجه شدند پارامتری که به لحاظ آماری بیشترین همبستگی را با خرابی لوله دارد، PGV است. در سال ۲۰۰۰^[۱۵] روابط مختلفی بر حسب نوع مصالح لوله، از جمله لوله‌ی فولادی ارائه و از PGV و قطر لوله به طور هم‌زمان برای منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است. اتحادیه‌ی شریان‌های حیاتی آمریکا (ALA)^[۲۱]،^[۱۶] از داده‌هایی شامل ۱۲ زلزله در آمریکا، ژاپن و مکزیک برای به دست آوردن روابط شکنندگی ناشی از امواج (برای خطوط لوله‌ی آب) استفاده کرده است. در معادلات ALA از میانگین هندسی PGV استفاده شده است. در سال ۲۰۰۳^[۱۷] نیز رابطه‌ی برای نرخ آسیب بر حسب PGV از روی زلزله‌ی مکزیکوسیتی به دست آورده شد. همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۰۴)^[۱۸] دو رابطه‌ی تجربی بر حسب PGV، یکی برای موج رابلی و دیگری برای موج ثانویه ارائه کردند. در پژوهش دیگری (۲۰۰۷)^[۱۹] نیز PGV^2/PGA به عنوان پارامتر شدت لرزه‌ی جدید برای تخمین آسیب خطوط لوله‌ی مدفون ناشی از انتشار امواج ارائه و نشان داده شد که در مورد زلزله‌ی مکزیکوسیتی (برای خاک‌های نرم)، پارامتر مذکور نسبت به PGA و PGV همبستگی بیشتری با خرابی نشان می‌دهد.

اگر چه مطالعات تحلیلی زیادی در مورد پاسخ خطوط لوله به گسترش امواج لرزه‌ی وجود دارد، اما تعداد کمی از آن‌ها تخمین‌های تحلیلی از نسبت خرابی به دست می‌دهند. در سال ۱۹۹۰^[۲] رابطه‌ی تحلیلی برای خرابی ناشی از گسترش امواج برای خطوط لوله‌ی مدفون گسسته با در نظر گرفتن مکانیزم جداشدگی اتصال بیان شد. معیار شدت مورد استفاده، کرنش زمین بود. انتشار موج با جابه‌جا کردن انتهای فنرهایی که نمایانگر خاک بودند، در جهت محوری (طولی لوله) شبیه‌سازی شد؛ یعنی کرنش زمین موازی محور طولی خط لوله فرض شد. نسبت خرابی به دست آمده از رابطه‌ی پیشنهادی با ضریب ۱۷ به ازاء ۲ برابر شدن کرنش زمین افزایش می‌یافت. در پژوهشی در سال ۲۰۰۹^[۲۰] یک رابطه‌ی شکنندگی تحلیلی برای خط لوله‌ی مدفون گسسته ارائه شد و مدل مکانیکی مذکور برای به دست آوردن پاسخ لوله تحت کرنش زمین از قطعات لوله‌ی صلب ساخته شده بود که توسط فنرهای دوخطی در اتصالات به هم وصل و خاک هم با فنرهای کشسان‌خمیری مدل شده بود. همچنین در پژوهش مذکور، توزیع استاندارد کوتاه^{۲۲} برای نیرو و تغییرمکان فرض شد و با دانستن توزیع احتمال برای نیرو و تغییرمکان در اتصال در حالت نشسته و با یک فرایند تکرار، کرنش نظیر زمین به دست آورده شد. نرخ خرابی مورد انتظار به دست آمده از مدل تحلیلی انطباق خوبی با نرخ خرابی تجربی نشان داد. همچنین در سال ۲۰۱۳^[۲۱] آسیب‌پذیری خطوط لوله‌ی مدفون گاز و مایع تحلیل شد. لذا ابتدا داده‌های مربوط به خرابی لوله‌های ناشی از زلزله‌های مختلف جمع‌آوری و سپس برای استخراج منحنی شکنندگی از روابط مربوط به نرخ تعمیر لوله، از توزیع احتمالاتی بواسون استفاده شد. روش دیگری (۲۰۱۴)^[۲۲] نیز برای ارزیابی ریسک لرزه‌ی شبکه‌های توزیع آب ارائه شد، که مبتنی بر تحلیل قابلیت اطمینان مکانیکی شبکه در برابر گسیختگی‌های لوله ناشی از زلزله بود و احتمال خرابی لوله را براساس دستورالعمل ALA در نظر می‌گرفت.^[۱۶] روش پیشنهادی مذکور به صورت مطالعه‌ی موردی برای شبکه‌ی استفاده شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا نرخ آسیب‌پذیری خطوط لوله بر حسب کرنش فشاری محوری لوله ناشی از زلزله با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی فراینده (IDA)^{۲۳} به دست آمده است. در ادامه، حالت‌های حدی برای خطوط لوله‌ی مدفون تعریف شده است. در نهایت، منحنی شکنندگی خطوط لوله‌ی فولادی مدفون پیوسته براساس

هستند، در جهت های محوری، عرضی و قائم استفاده شده است. المان های فنر مورد استفاده برای مدل سازی جابه جایی ها و کرنش های غیرخطی بزرگ مناسب هستند. پارامترهایی مثل نیروی پیشینه ی فنر خاک و جابه جایی نسبی نظیر، همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، برای تعریف فنرهای غیرخطی گسسته ی خاک لازم است. پارامترهای مذکور بر مبنای دستورالعمل ALA^[۱۶] هستند و به این صورت تعریف می شوند: پیشینه ی نیروی محوری خاک که می تواند به لوله منتقل شود، برای واحد طول لوله از رابطه ی ۱ به دست می آید:

$$T_u = \pi D \alpha c + \pi DH \bar{\gamma} \frac{1 + K_s}{\gamma} \tan \delta$$

$$\alpha = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^2 + 1}$$
(۱)

که در آن، D قطر بیرونی لوله، C چسبندگی خاک، H عمق دفن لوله که از مرکز آن اندازه گرفته می شود، $\bar{\gamma}$ وزن مخصوص مؤثر خاک، K_s ضریب فشار خاک در حالت سکون، α ضریب چسبندگی بین خاک و لوله و δ زاویه ی اصطکاک بین لوله و خاک است. جابه جایی Δ_t نظیر نیروی T_u (شکل ۱) برابر ۵، ۳ و ۱۰ میلی متر به ترتیب برای ماسه ی متراکم، ماسه ی سست و رس نرم مطابق ALA، پیشنهاد شده است.^[۱۶] پیشینه ی نیروی جانبی که از خاک به واحد طول لوله می تواند منتقل شود، از طریق رابطه ی ۲ محاسبه می شود:

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

$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^2} \leq 9$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^2 + ex^2$$
(۲)

که در آن، N_{qh} و N_{ch} عبارت از ضریب ظرفیت باربری افقی به ترتیب برای رس و ماسه هستند و برحسب زاویه ی اصطکاک داخلی (ϕ)، نسبت عمق دفن به قطر لوله (H/D) و پارامترهای ثابت a, b, c, d, e تعیین می شوند. پارامترهای مذکور طی جدولی در ALA، ارائه شده اند.^[۱۶] جابه جایی Δ_p نظیر نیروی P_u (شکل ۱) از طریق رابطه ی ۳ محاسبه می شود:

$$\Delta_p = 0.04(H + \frac{D}{\gamma}) \leq 0.10D \sim 0.15D$$
(۳)

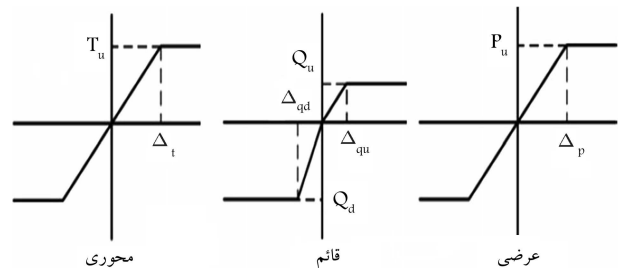
نیروی فنر رو به بالای خاک در واحد طول لوله به صورت رابطه ی ۴ محاسبه می شود:

$$Q_u = N_{cv} c D + N_{qv} \bar{\gamma} H D$$

$$N_{cv} = 2(\frac{H}{D}) \leq 10$$

$$N_{qv} = (\frac{\phi H}{44D}) \leq N_q$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \phi) \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$$
(۴)



شکل ۱. فنرهای غیرخطی خاک.^[۲۷]

از رابطه ی ۵، برای تعیین نیروی فنر قائم تکیه گاهی (رو به پایین) خاک در واحد طول لوله مطابق ALA، استفاده می شود.^[۱۶] در رابطه ی مذکور N_c, N_q و N_γ عبارت از ضرایب ظرفیت باربری هستند و $\bar{\gamma}$ وزن مخصوص کل خاک است. جابه جایی Δ_{qd} نظیر نیروی Q_d (شکل ۱)، برای خاک های دانه یی و چسبنده به ترتیب برابر $0.18D$ و $0.2D$ پیشنهاد شده است.^[۱۶]

$$Q_d = N_{cD} c D + N_{qD} \bar{\gamma} H D + N_{\gamma D} \bar{\gamma} \frac{D^2}{\gamma}$$

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)] \times \{ \exp[\pi \tan(\phi + 0.001)] \tan^2(45 + \frac{\phi + 0.001}{2}) - 1 \}$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \phi) \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

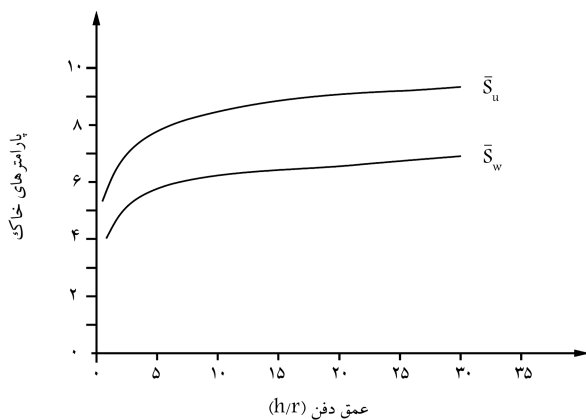
$$N_\gamma = \exp(0.18\phi - 2.0)$$
(۵)

ضرایب لازم برای استفاده در میراگرهای معادل خاک برای جهت های طولی و عرضی لوله ی مدفون در شکل ۲ مشاهده می شوند. منظور از پارامترهای خاک در شکل مذکور، \bar{S}_u و \bar{S}_w است که عبارت اند از ضرایب میرایی بی بُعد و مستقل از بسامد خاک در جهت های طولی و عرضی لوله.^[۲۶] بعد از محاسبه ی ضرایب مذکور از شکل ۲، ضرایب میرایی برای المانی از خاک به طول l در جهت موازی محور لوله و جهت عرضی به ترتیب با استفاده از روابط ۶ (الف و ب) محاسبه می شوند:

$$C_{sa} = G \bar{S}_w \frac{rl}{V_s}$$
(۱۶الف)

$$C_{sl} = G \bar{S}_u \frac{rl}{V_s}$$
(۱۶ب)

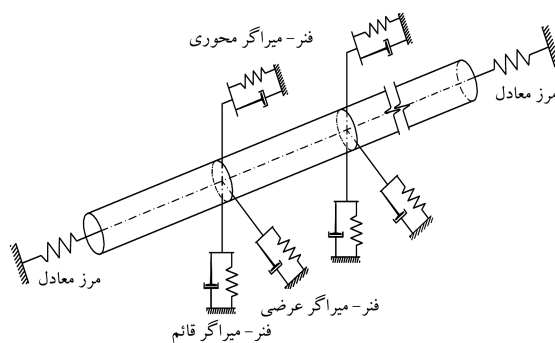
که در آن، G مدول برشی خاک، r شعاع سطح مقطع لوله، l طول المان، h عمق دفن و V_s سرعت موج برشی خاک است. به منظور مدل سازی، هر گره مدل به سه فنر - میراگر در سه جهت مختلف متصل شد. ثابت های فنرها و میراگرها در توزیع خط مرکزی لوله محاسبه شدند و به صورت یکنواخت در بین تمام گره های لوله توزیع شدند. تصویر شماتیک سیستم خاک - لوله و شرایط مرزی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۲. ضرایب میرایی بی بُعد خاک بر حسب h/r .^[۲۶]

طول لوله هستند. U_0 نیز جابه‌جایی نسبی بین خاک و لوله در حالت تسلیم و برای جهت محوری است که در واقع همان Δ_t در شکل ۱ است.^[۲۸]

$$F(\Delta L) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2EAf_s}{\pi} U_0^{-\frac{2}{3}} \Delta L^{\frac{2}{3}}}, & 0 \leq \Delta L \leq U_0 \\ \sqrt{2EAf_s} (\Delta L - \frac{1}{3}U_0), & U_0 \leq \Delta L \leq \frac{\sigma_y A}{\sqrt{2}E f_s} + \frac{U_0}{3} \end{cases} \quad (7)$$



شکل ۳. شکل شماتیک سیستم خاک - لوله و شرایط مرزی.^[۲۷]

۴. زمین‌لرزه‌ها

براساس مطالعاتی در سال ۱۹۹۹،^[۲۹] استفاده از ۱۰ تا ۲۰ رکورد زلزله برای تشکیل منحنی‌های IDA کافی به نظر می‌رسد. از طرف دیگر، استفاده از یک معیار شدت کارا^[۲۷]، تعداد رکوردهای زلزله‌ی موردنیاز برای استفاده در تحلیل IDA و تخمین احتمال فراگذشت مقادیر پارامتر نیاز مهندسی را کاهش می‌دهد.^[۳۰] با مراجعه به نوشتاری در سال ۱۶، ۲۰^[۲۷] که در مورد تعیین IM بهینه برای خطوط لوله مدفون است، مشاهده می‌شود که PGV نسبت به S_a و PGA ، معیار شدت کاراتری است. پس در صورت استفاده از PGV به عنوان معیار شدت، می‌توان از رکوردهای کمتری برای تحلیل IDA بهره جست. در مطالعه‌ی حاضر، به علت زمان بسیار زیاد موردنیاز برای تحلیل IDA لوله‌های مدفون و نیز استفاده از PGV به عنوان معیار شدت، فقط از ۱۰ رکورد زلزله برای تحلیل استفاده شده است.

در نوشتار حاضر، مجموعه‌ی ۱۰ رکورد زلزله‌ی غیرپالس‌گونه^{۲۸} که در جدول ۱ فهرست شده‌اند، براساس نزدیک‌ترین فاصله تا سطح گسیختگی، بزرگی

۳.۳. مدل‌سازی مرزها

برای انجام مدل‌سازی دقیق، باید خط لوله با طول نامحدود شبیه‌سازی شود که البته فرضی زمان‌بر است و موجب مشکلات محاسباتی می‌شود. برای غلبه بر مشکل مطرح‌شده، در مطالعه‌ی حاضر روش مرز معادل^[۲۸] به عنوان شرایط مرزی لوله استفاده شده است. در روش مرز معادل، فرض بر این است که جابه‌جایی‌های نسبی بین خاک و لوله در مرزها به علت اصطکاک خاک و لوله و فقط در جهت محوری است. بنابراین مرزها می‌توانند به عنوان فنر غیرخطی که به دو سر مدل اعمال می‌شوند، در نظر گرفته شوند. رابطه‌ی بین نیروی محوری F و تغییر طول محور ΔL برای فنرهای مذکور به صورت رابطه‌ی ۷ بیان می‌شود که در آن، E مدول کشسانی لوله، A مساحت مقطع لوله، σ_y تنش تسلیم لوله، f_s اصطکاک لغزشی بر واحد

جدول ۱. مجموعه‌ی ۱۰ رکورد زلزله.

ردیف	رخداد	بزرگی	فاصله	PGA	PGV	V_s
۱	امپریال ولی-۰۶ (دلتا) ^۱ (۱۹۷۹)	۶٫۵	۲۲	۰٫۳۵	۳۳	۲۴۲
۲	لوما پریتا (کاپیتولا) ^۲ (۱۹۸۹)	۶٫۹	۱۵	۰٫۵۱	۳۸	۲۸۹
۳	نورث‌بریج-۰۱ (لا-فلچر دی آر) (دلتا) ^۳ (۱۹۹۴)	۶٫۷	۲۷	۰٫۲۴	۲۴	۳۲۹
۴	کوبه، ژاپن (کاکوگاوا) ^۴ (۱۹۹۵)	۶٫۹	۲۳	۰٫۳۲	۲۷	۳۱۲
۵	قوجاعلی، ترکیه (دوزجه) ^۵ (۱۹۹۹)	۷٫۵	۱۵	۰٫۳۶	۵۶	۲۸۲
۶	لندرز (یرمو فایر استیشن) ^۶ (۱۹۹۲)	۷٫۳	۲۴	۰٫۲۴	۳۹	۳۵۴
۷	سوپرستیشن هیلز-۰۲ (سنت) (۱۹۸۷) ^۷	۶٫۵	۱۸	۰٫۳۶	۴۸	۱۹۲
۸	اسپیتاک، اسپیتاک، ارمنستان، ۱۹۸۸ (گوکاسیان) ^۸	۶٫۸	۲۴	۰٫۲۰	۲۸	۳۴۴
۹	طبس، ایران (بشروییه) ^۹ (۱۹۷۸)	۷٫۳	۲۹	۰٫۱۰	۱۳	۳۲۵
۱۰	چی چی، تایوان (هالس ولی) ^{۱۰} (۱۹۹۹)	۷٫۶	۱۶	۰٫۲۷	۴۲	۲۳۳

^۱ Imperial Valley-۰۶, ۱۹۷۹ (Delta)

^۲ Loma prieta, ۱۹۸۹ (Capitola)

^۳ Northridge-۰۱, ۱۹۹۴ (LA - Fletcher Dr)

^۴ Kobe, Japan, ۱۹۹۵ (Kakogawa)

^۵ Kocaeli, Turkey, ۱۹۹۹ (Duzce)

^۶ North Landers, ۱۹۹۲ (Yermo Fire Station)

^۷ Superstition Hills-۰۲, ۱۹۸۷ (El Centro Imp. Co. Cent)

^۸ Spitak, Armenia, ۱۹۸۸ (Gukasian)

^۹ Iran, Tabas, ۱۹۷۸ (Boshrooyeh)

^{۱۰} Chi-Chi, Taiwan, ۱۹۹۹ (Halls Valley)

۸. تعریف حالت‌های حدی

منظور از حالت حدی، وضعیتی از عملکرد لوله است که با عبور از آن، دیگر معیارهای طراحی برآورده نمی‌شود (و به عنوان خرابی تلقی می‌شود).^[۳۸] همان‌طور که در بخش اخیر ذکر شد، شکستگی لوله برای یک حالت حدی مشخص تعریف می‌شود. بنابراین لازم است که در بخش حاضر، حالت‌های حدی لوله تعریف شود.

۱.۸. حالت حدی عملکردی (OL) ۳۲

در حالت حدی عملکردی، هیچ خرابی نباید اتفاق بیفتد و عملکرد بلافاصله بعد از زلزله از سر گرفته شود.^[۳۲] البته ممکن است مقداری تغییر شکل خمیری در لوله رخ دهد، اما با این حال خط لوله قادر خواهد بود نیازهای عملکردی خود را برآورده سازد.^[۳۹] براساس دستورالعمل ALA،^[۱۶] حد کرنش فشاری برای این حالت حدی از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{cr} = 0.175 \left[0.5 \left(\frac{t}{D'} \right) - 0.0025 + 3000 \left(\frac{pD}{2Et} \right)^2 \right] \quad (10)$$

که در آن، t ضخامت جداره‌ی لوله، D قطر لوله، D' قطر لوله بعد از بیضوی شدن و p فشار داخل لوله است. اگر از جملات دوم و سوم داخل کروشه (که مثبت و منفی نیز هستند) با فرض اینکه اثر همدیگر را خنثی می‌کنند، صرف‌نظر شود و با فرض معقول اینکه بیشینه‌ی مجاز بیضوی شدن در این سطح عملکرد برابر ۲۵٪ باشد (یعنی $D' = 0.9375D$) مقدار حاصل از رابطه‌ی ۱۱ به عنوان کرنش فشاری نظیر حالت حدی عملکردی استفاده شده است که دقیقاً منطبق بر مقدار توصیه‌شده‌ی یورکد ۸،^[۳۲] نیز است:

$$\varepsilon_{cr} = 0.14 \frac{t}{D} \quad (11)$$

۲.۸. حالت حدی یکپارچگی فشار (PI) ۳۳

در این حالت حدی مورد انتظار است که لوله دچار تغییر شکل‌های بزرگ شود، ولی محتویات آن نشت پیدا نکند.^[۳۳] بر مبنای دستورالعمل ALA،^[۱۶] و دستورالعمل لوزه‌ی PRCI PR-268-9823،^[۳۶] برای خطوط لوله‌ی نفت و گاز، معیار پذیرش برای حالت حدی یکپارچگی فشار از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{cr} = 1.76 \frac{t}{D} \quad (12)$$

۳.۸. حالت حدی نهایی (UL) ۳۴

حالت حد نهایی، نظیر فروریزش سازه‌ی تعریف می‌شود.^[۳۲] بعضی از پژوهشگران،^[۴۰] حالت حدی نهایی را با عنوان ظرفیت لوله اسم می‌برند. برای ترکیب فشار داخلی و نیروی محوری، براساس نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود، ظرفیت برابر تنش محوری در گسیختگی در نظر گرفته می‌شود که با $(SMYS + SMTS)$ ۰٫۵ مساوی خواهد بود. $SMTS$ ، تنش نظیر کرنش ۲۰٪ و $SMYS$ تنش نظیر کرنش ۰٫۵٪ در نظر گرفته می‌شود.^[۴۰] بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بر مبنای مطالعات ذکر شده،^[۴۰] کرنش نظیر گسیختگی، حدوداً برابر ۱۰٪ است. بنابراین در مطالعه‌ی حاضر، کرنش فشاری نظیر حالت حدی نهایی برابر ۱۰٪ در نظر گرفته شده است.

زلزله و نوع خاک از پایگاه پیر^[۲۹]،^[۳۱] انتخاب شده‌اند. زمین لرزه‌های انتخابی با بزرگی در محدوده‌ی ۶٫۵ تا ۷٫۶ و فاصله در محدوده‌ی ۱۵ تا ۲۹ کیلومتر بوده و بر روی خاک نوع (III) براساس استاندارد (۲۸۰۰) واقع شده‌اند. هر یک از رکوردهای مذکور به شدت‌های مختلف مقیاس و به عنوان تحریک ورودی در تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شده‌اند. در جدول مذکور واحد PGA برابر g ، واحد PGV برابر سانتی‌متر بر ثانیه، واحد فاصله، کیلومتر و سرعت موج برشی با V_s (متر بر ثانیه) نشان داده شده‌اند.

۵. پارامتر نیاز مهندسی برای خطوط لوله‌ی مدفون

در پژوهشی در سال ۱۹۷۹،^[۲۶] نشان داده شد که تنش‌های خمشی ایجاد شده در لوله ناشی از انتشار امواج یک مرتبه 3^0 (برابر کوچک‌تر از تنش‌های محوری هستند. همچنین در برخی آیین‌نامه‌های طراحی خطوط لوله‌ی مدفون،^[۳۶-۳۲، ۱۶] کنترل کرنش لوله براساس کرنش محوری انجام می‌گیرد. از طرف دیگر، کرنش‌های فشاری منجر به کماتش، خیلی کوچک‌تر از کرنش‌های کششی هستند، که باعث گسیختگی کششی می‌شوند. از این رو در نوشتار حاضر، همانند مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۶،^[۲۷] کرنش محوری فشاری بیشینه در بحرانی‌ترین مقطع لوله (که از این به بعد با ε_{max} نشان داده خواهد شد) به عنوان پارامتر نیاز مهندسی (EDP)^[۳۱] لوله‌ی مدفون در نظر گرفته شده است؛ به خصوص که مستقیماً با وقوع خرابی لوله در ارتباط است.

۶. معیار شدت مورد استفاده

اولین گام در تعیین پاسخ لرزه‌ی سازه‌ها، اندازه‌گیری صحیح سطح لرزش محل احداث سازه است. همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، بسیاری از روابط شکستگی بر حسب PGV هستند و حتی نشان داده شده است که به لحاظ آماری PGV ، همبستگی بیشتری با خرابی لوله دارد؛^[۱۴] بنابراین در پژوهش حاضر، بیشینه‌ی سرعت زمین به عنوان معیار شدت لرزه‌ی در نظر گرفته شده است.

۷. رابطه‌ی بین معیار شدت و معیار پاسخ

رابطه‌ی بین نیاز و پاسخ لرزه‌ی را می‌توان به شکل توانی (رابطه‌ی ۸) نشان داد:^[۲۷]

$$EDP = a(IM)^b \quad (8)$$

که به رابطه‌ی ۹ قابل تبدیل است:

$$\ln(EDP) = a + b \ln(IM) \quad (9)$$

این تبدیل تعیین ثابت‌های a و b را با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی در فضای لگاریتمی ممکن می‌سازد. بدین منظور باید تحلیل رگرسیون لگاریتم طبیعی مقادیر پارامتر نیاز مهندسی ($\ln(EDP)$) روی لگاریتم طبیعی مقادیر معیار شدت نظیر ($\ln(IM)$) انجام شود. در تحلیل مذکور، رگرسیون از تمامی داده‌های (EDP, IM) حاصل از همه‌ی رکوردهای مورد استفاده در تحلیل استفاده می‌شود.

جدول ۲. مقایسه‌ی تنش محوری بیشینه‌ی لوله‌ها.

پارامتر هندسی لوله			تنش محوری بیشینه (مگاپاسکال)		
$t(mm)$	$D(cm)$	D/t	مقاله [۲۶]	نرم افزار [۲۲]	اختلاف (%)
۶	۱۳۱٫۶	۲۱٫۳	۳۴۷	۳۳۸٫۴	۲٫۵
۱۱٫۱	۱۳۱٫۶	۱۱٫۳	۳۰۸	۳۰۱٫۲	۲٫۲
۱۷٫۱	۱۳۱٫۶	۷٫۷	۲۷۷	۲۷۲٫۱	۱٫۸

جدول ۳. مشخصات مدل‌های در نظر گرفته‌شده برای تحلیل.

پارامتر	مدل		
	$M3$	$M2$	$M1$
گرید	X۶۵	X۶۰	X۸۰
$F_y(MPa)$	۴۴۸	۴۱۳	۵۵۱
$F_u(MPa)$	۵۳۰	۵۱۷	۶۲۰
α	۱٫۲۹	۱٫۴۸	۰٫۸۶
n	۲۵٫۵۸	۱۸٫۹۹	۳۷
$D(mm)$	۶۱۰	۵۰۸	۹۱۴
$t(mm)$	۶٫۴	۱۱٫۱	۷٫۹
D/t	۹۵٫۳	۴۵٫۸	۱۱۵٫۷
$H(m)$	۲٫۷۵	۱٫۵	۱٫۶۹
H/D	۴٫۵	۳	۱٫۸
$\phi(^{\circ})$	۳۳	۰	۲۹
$C(KPa)$	۰	۷۵	۰
$\gamma(kg/m^3)$	۱۹۰۰	۱۸۰۰	۱۷۰۰
$G(MPa)$	۷۵	۱۵۰	۵۵
$V_s(m/s)$	۱۹۹	۲۸۸	۱۸۰
تعریف خاک [۲۲]	ماسه‌ی نسبتاً چگال	رس سفت	ماسه‌ی سست
$C_{s1}(NS/m^3)$	۹۴۴۱۰۷	۱۰۸۲۲۵۵	۱۰۸۹۹۷۵
$C_{sa}(NS/m^3)$	۷۱۳۸۳۷	۷۶۵۴۹۷	۸۱۰۴۹۴
$\omega_1(rad/S)$	۱۵٫۸	۱۳٫۷	۷٫۶

ترتیب نظیر ضخامت ۶، ۱۱٫۱ و ۱۷٫۱ میلی‌متر هستند، در نظر گرفته شد. تحلیل لوله‌های مذکور در نرم‌افزار این سیس، انجام شد. [۲۲] مدل‌سازی خاک و لوله مطابق توضیحات بخش ۳ و تحلیل با استفاده از جایگزینی خاک با فتر - میراگر انجام شد. ضرایب میرایی و سختی فترها به المان‌های فتر - میراگر، که به صورت منفرد در گره‌ها تعریف شده بودند، اعمال شد. تنش محوری بیشینه‌ی سه لوله‌ی مذکور از نرم‌افزار به دست آمده و با مطالعه‌ی ذکر شده، مقایسه شده است. [۲۶] همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از نرم‌افزار انطباق خوبی با مطالعه‌ی مذکور دارد. بعد از اطمینان از صحت مدل‌سازی، در بخش بعد به مطالعات عددی پرداخته شده است.

۱۱. مطالعات عددی

در مطالعه‌ی حاضر، سه لوله‌ی فولادی API 5L که معمولاً در صنایع نفت و گاز استفاده می‌شوند، و مشخصاتشان در جدول ۳ با نام‌های $M1$ تا $M3$ ارائه شده است، بررسی شده‌اند. همان‌طور که در بخش مدل‌سازی لوله توضیح داده شد، لوله‌های مذکور براساس ضوابط AIA، [۱۶] طراحی شدند. لوله‌های طراحی شده که

۹. منحنی شکنندگی

شکنندگی لوله برای یک حالت حدی مشخص به صورت احتمال شرطی عبور از ظرفیت حالت حدی برای سطح مشخصی از شدت زمین‌لرزه (به صورت خلاصه: احتمال شرطی خرابی) تعریف می‌شود. اگر شدت زمین‌لرزه با IM نشان داده شود، شکنندگی به صورت رابطه‌ی ۱۳ تعریف می‌شود: [۲۱]

$$F_{LS}(im) = P [IM \geq IM^C | IM = im] = P [IM^C \leq im] \quad (13)$$

که در آن، $F_{LS}(im)$ شکنندگی سازه در معیار شدت مشخص im برای حالت حدی LS و IM^C معیار شدت نظیر ظرفیت (حالت حدی) مدنظر است. معادله‌ی ۱۳ نشان می‌دهد که شکنندگی سازه به صورت احتمال اینکه متغیر تصادفی IM^C کمتر یا مساوی مقدار مشخص im باشد، بیان می‌شود. به عبارت دیگر، شکنندگی تابع توزیع تجمعی ظرفیت تصادفی IM^C است. اگر فرض شود که توزیع احتمال ظرفیت معیار شدت IM^C ، لوگ - نرمال 25 با میانه‌ی IM^C و انحراف استاندارد لگاریتم طبیعی برابر β_{IM^C} است، شکنندگی را می‌توان به صورت تابع توزیع گوسی استاندارد شده بیان کرد: [۲۱]

$$F_{LS}(im) = P [IM^C \leq im] = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{im}{IM^C} \right)}{\beta_{IM^C}} \right] \quad (14)$$

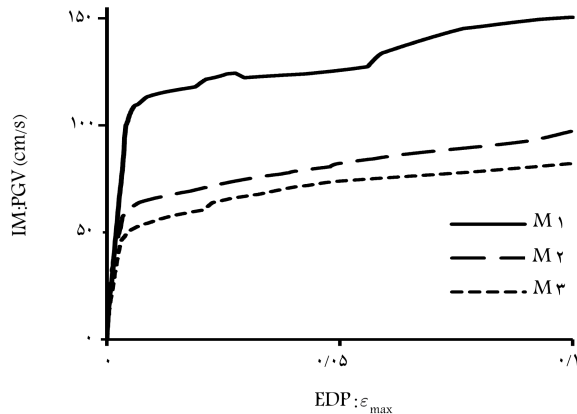
از معادله‌ی ۱۴ می‌توان مشاهده کرد که شکنندگی سازه‌ی بی برای حالت حدی LS را می‌توان به صورت تابعی از معیار شدت انتخابی ترسیم کرد. برای حالت حدی مشخص، یک «منحنی شکنندگی» اکیداً صعودی قابل ترسیم است.

۱۰. صحت‌سنجی مدل‌سازی

قبل از انجام مطالعات عددی لازم است که از صحت مدل‌سازی اطمینان حاصل شود. بدین منظور در بخش حاضر، صحت‌سنجی براساس نوشتاری در سال ۱۹۷۹، انجام شده است. [۲۶] در نوشتار مذکور، شعاع لوله برابر ۰٫۶۸۵ متر، طول لوله ۵۴۸٫۶ متر، عمق دفن تا مرکز لوله ۳۰ برابر شعاع لوله، سرعت موج برشی برابر ۶۸٫۶ متر بر ثانیه، و چگالی خاک ۱۶۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده و شرایط لوله به صورت دوسر آزاد بوده است. تحریک لرزه‌ی که در مطالعه‌ی مذکور استفاده شده است، عبارت از مؤلفه‌ی SVE زلزله‌ی سان فرناندو ولی ۳۶ (۱۹۷۱) ثبت شده در ایستگاه ۱۲۲ است که PGA برابر ۲٫۶۵۷ متر بر مجذور ثانیه و PGV مساوی ۰٫۳۰۴۸ متر بر ثانیه داشته است. برای مدل‌سازی لوله، نویسندگان نوشتار مذکور از المان تیر و جرم متمرکز در دو انتها با سه درجه آزادی در هر جرم استفاده کرده‌اند. برای صحت‌سنجی، زاویه‌ی تحریک با لوله برابر صفر درجه (تحریک به موازات محور طولی لوله) و سه نسبت قطر به ضخامت مختلف ۲۱۹، ۱۸ و ۷۷ که به

جدول ۴. مشخصات فنرهای غیرخطی خاک مورد استفاده در مدل‌سازی.

مدل	سختی اولیه‌ی خاک در واحد طول لوله (نیوتن بر میلی‌متر مربع)				جابه‌جایی نسبی لوله و خاک نظیر بیشینه‌ی نیروی وارد از خاک بر لوله (میلی‌متر)			
	جهت محوری	جهت عرضی	جهت قائم به سمت بالا	جهت قائم به سمت پایین	جهت محوری	جهت عرضی	جهت قائم به سمت بالا	جهت قائم به سمت پایین
M1	۷,۱	۱,۹	۱	۵,۹	۵	۸۵,۹	۳۳,۸	۶۱
M2	۱۲,۴	۴,۸	۲,۲	۲,۱	۸	۵۰,۸	۱۰,۲	۱۰,۲
M3	۱۲,۴	۴,۹	۲,۶	۱۵,۴	۴	۷۶,۵	۴۱,۳	۶۱



شکل ۴. منحنی IDA میان‌ی لوله‌های مورد مطالعه.

$\Delta t/T_n$ قابل افزایش است که Δt گام اعمال بار و T_n دوره‌ی تناوب اصلی سازه است.^[۲۵]

Δt مورد استفاده در پژوهش حاضر برابر 0.05 در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن کوچک‌ترین T_n که مربوط به لوله‌ی M3 و برابر 15.8 ثانیه است، بزرگ‌ترین مقدار $\Delta t/T_n$ مورد استفاده در پژوهش حاضر برابر 0.13 به دست آمد. با توجه به اینکه مقدار $\Delta t/T_n \leq 0.1$ برای حصول نتایج قابل قبول توصیه شده است،^[۲۴] مقدار 0.13 برای دستیابی به دقت لازم، قابل قبول است. تحلیل‌های IDA تا رسیدن به کرنش فشاری محوری بیشینه برابر 1% در لوله انجام شده است. اگر قبل از رسیدن به کرنش 1% ، تحلیل دچار مشکل عدم هم‌گرایی حل^{۴۵} می‌شد، با ریز کردن گام‌های اعمال بار تا مرتبه‌ی $6 - 1e$ سعی شده است که این عدم هم‌گرایی مرتفع شود، اگر با یک میلیون برابر ریز کردن گام‌های اعمال بار مشکل هم‌گرایی حل نمی‌شد، نقطه‌ی مذکور به عنوان ناپایداری کلی تلقی شده است. بعد از انجام IDA مقادیر پارامتر نیاز مهندسی از نتایج تحلیل‌ها استخراج شد. منحنی IDA میان‌ی مدل‌های مورد مطالعه در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

بعد از انجام تحلیل دینامیکی فزاینده با استفاده از نتایج آن می‌توان منحنی‌های شکنندگی را برای حالت‌های حدی مختلف محاسبه کرد. به این نحو که ابتدا برای هر حالت حدی، معیار شدت نظیر بر روی منحنی‌های IDA محاسبه می‌شود، سپس انحراف استاندارد لگاریتم طبیعی معیارهای شدت نظیر سطح عملکرد مرتبط به دست می‌آید. همچنین معیار شدت نظیر ظرفیت بر روی منحنی IDA میان‌ی نیز محاسبه می‌شود. با در دست داشتن مقادیر مذکور و با استفاده از روش توضیح داده‌شده در بخش ۹، منحنی‌های شکنندگی لوله‌های M1 تا M3 برای حالت‌های حدی UL، NO، PI در ادامه به دست آمده است.

نسبت‌های قطر خارجی به ضخامت (D/t) و عمق دفن به قطر (H/D) مختلف دارند، به عنوان مدل‌های عددی در تحلیل IDA مطابق جدول ۳ استفاده شده‌اند. شرایط خاک فرض‌شده در مطالعه‌ی حاضر مثل زاویه‌ی اصطکاک داخلی ϕ ، چسبندگی خاک C ، سرعت موج برشی V_s ، مدول برشی خاک G و چگالی خاک γ در جدول ۳ برای همه‌ی مدل‌ها ارائه شده است. مقادیر مذکور برگرفته از راهنمای دستورات این سیس،^[۲۴] هستند.

از آنجایی که رکوردهای مورد استفاده در تحلیل IDA بر روی خاک نوع III ثبت شده‌اند، لذا مشخصات خاک‌های در نظر گرفته‌شده در مطالعه‌ی حاضر به گونه‌ی بی‌اساس سرعت موج برشی ذکر شده در جدول ۳، جزء خاک نوع III محسوب می‌شوند و سرعت موج برشی آن‌ها در محدوده‌ی 180 تا 288 متر بر ثانیه قرار دارد. میرایی در واحد طول لوله در جهات محوری C_{ca} و عرضی C_{sl} که براساس معادلات (۶ الف و ب) محاسبه شده است، در جدول ۳ ارائه شده است. بسامدهای طبیعی اصلی مدل‌ها (ω_1) که براساس تحلیل عددی به دست آمده‌اند در جدول ۳ ذکر شده‌اند. همچنین تنش تسلیم F_y و تنش گسیختگی F_u و پارامترهای منحنی تنش کرنش رامبرگ - اسگود (n و α) مصالح لوله مطابق جدول ۳ است. سختی اولیه‌ی خاک‌ها در واحد طول لوله و نیز جابه‌جایی‌های نظیر بیشینه‌ی نیروی وارد از خاک به لوله، مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول ۴ نشان داده شده است.

لوله‌های مذکور تحت تحلیل دینامیکی فزاینده با استفاده از 10 رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور در نرم‌افزار این سیس، قرار گرفتند.^[۲۴] مقیاس‌سازی رکوردها برای استفاده در تحلیل IDA براساس PGA با گام‌های $0.1g$ انجام شده است. اما در رسم نمودار IDA به جای PGA از PGV نظیر که قابل استخراج از رکورد زلزله است، به عنوان معیار شدت استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان در راستایی به موازات محور طولی لوله به طور هم‌زمان به انتهای تمامی فنرها اعمال شد. ابتدا رکوردهای زلزله به شتاب بیشینه برابر $1g$ مقیاس شدند و سپس در هر مرحله ضریب 0.1 ، 0.2 ، 0.3 و ... آن‌ها برای تحلیل دینامیکی استفاده شد. در پژوهش حاضر، از نمو انرژی^{۳۷} به عنوان معیار کنترل هم‌گرایی استفاده شد. هم‌گرایی در روش نمو انرژی مبتنی بر کنترل انرژی نامتعادل سیستم است.^[۲۴] اختلاف مجاز^{۳۸} و تعداد تکرار^{۳۹} در نظر گرفته شده برای کنترل هم‌گرایی به ترتیب برابر $8 - 1e$ و 100 بود. از روش انتگرال‌گیری عددی نیومارک - بتا برای حل معادلات استفاده شد. مقادیر بتا و گام‌های در نظر گرفته‌شده به ترتیب برابر 0.5 و 0.25 بود که به آن روش شتاب میانگین ثابت^{۴۰} نیز گفته می‌شود. روش انتگرال‌گیری مذکور به صورت نامشروط پایدار^{۴۱} است.^[۲۴] و دقت آن در دو بخش قابل بررسی است: دقت دامنه^{۴۲} و دقت تناوب^{۴۳}. روش شتاب ثابت هیچ خطای دامنه‌ی^{۴۴} تولید نمی‌کند. دقت تناوب با کاهش

۱۲. بحث و بررسی

۱.۱۲. رابطه‌ی بین آسیب‌پذیری لوله و کرنش ایجادشده در آن

با توجه به مطالب بخش ۷، رابطه‌ی بین کرنش محوری فشاری لوله و بیشینه‌ی سرعت زمین برای لوله‌های مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر به صورت رابطه‌ی ۱۵ به دست آمده که در آن PGV برحسب سانتی‌متر بر ثانیه است. رابطه‌ی مذکور بیانگر این مطلب است که با ۲ برابر شدن PGV ، بیشینه‌ی کرنش ایجادشده در لوله حدوداً ۵/۷ برابر می‌شود.

$$\varepsilon = 2,5e - \gamma (PGV)^{2,5} \quad (15)$$

نرم‌افزار هازوس-ام اچ^[۴۶]، نرخ تعمیر (RR) خط لوله را که عبارت از تعداد خرابی در یک کیلومتر از خط لوله است، برای آسیب ناشی از انتشار امواج لرزه‌یی به صورت رابطه‌ی ۱۶ بیان کرده است. با قبول رابطه‌ی مذکور برای بیان میزان آسیب لوله و توجه به این مطلب که کرنش ایجادشده در لوله، رابطه‌ی مستقیمی با خرابی آن دارد،^[۴۷] با مساوی قرار دادن PGV حاصل از روابط ۱۵ و ۱۶ می‌توان به رابطه‌ی ۱۷ که میزان آسیب‌پذیری لوله را به کرنش فشاری محوری آن مرتبط می‌کند، دست یافت. رابطه‌ی ۱۷ نشان می‌دهد که با ۲ برابر شدن کرنش ایجادشده در لوله‌ی ناشی از زلزله، نرخ آسیب آن حدوداً ۱/۸۷ برابر می‌شود.

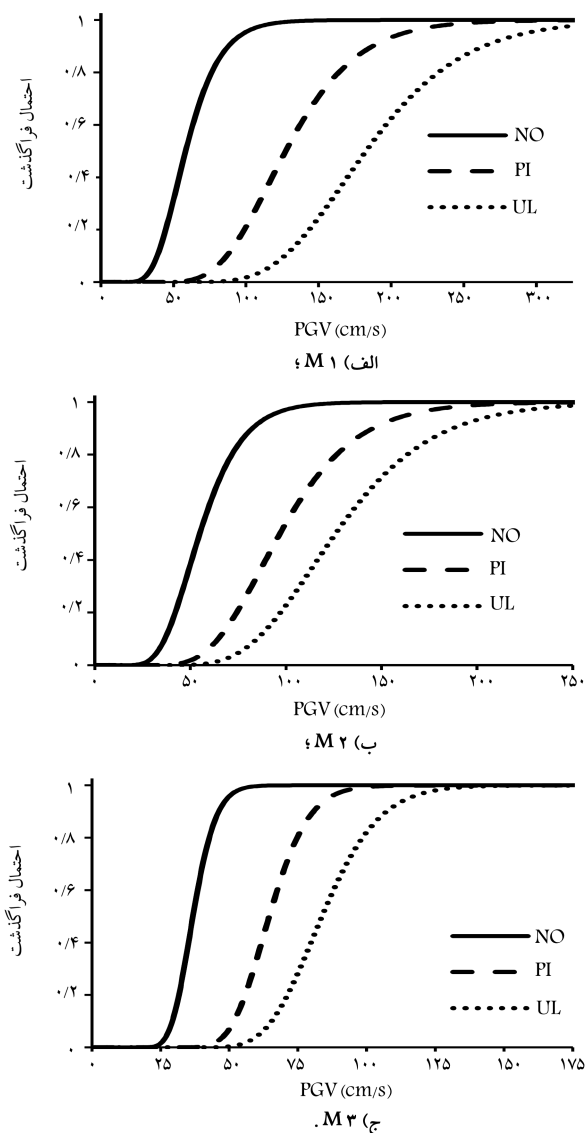
$$RR = 0,0001 (PGV)^{2,25} \quad (16)$$

$$RR = 87,469 (\varepsilon)^{0,9} \quad (17)$$

۲.۱۲. منحنی‌های شکنندگی لوله‌ها

پارامترهای توزیع لوگ - نرمال، که برای محاسبه‌ی منحنی شکنندگی استفاده شده است، در جدول ۵ مشاهده می‌شود. منحنی‌های شکنندگی لوله‌ها با استفاده از پارامترهای جدول مذکور محاسبه و نتایج در شکل ۵ ارائه شده است که مطابق آن، به ترتیب برای لوله‌های $M1$ تا $M3$ منحنی شکنندگی به سمت چپ حرکت کرده است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که آسیب‌پذیری به ترتیب برای لوله‌های $M1$ ، $M2$ و $M3$ افزایش یافته است. همچنین در جدول ۳ مشاهده می‌شود که بسامد طبیعی ارتعاش به ترتیب برای سیستم‌های لوله - خاک $M1$ ، $M2$ و $M3$ افزایش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که با افزایش صلبیت (افزایش بسامد طبیعی ارتعاش مد اول) لوله‌ها، احتمال آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر زلزله نیز افزایش می‌یابد.

برای بررسی جزئی‌تر، احتمال خرابی لوله‌ها برای حالت‌های حدی مختلف بررسی شده است. بدین منظور ابتدا با توجه به بخش ۷، کرنش نظیر حالت‌های مختلف حدی لوله‌ها به دست آمد و سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱۵، PGV نظیر کرنش‌های به دست آمده که در واقع PGV نظیر وقوع حالت‌های مختلف حدی است، مطابق جدول ۶ محاسبه شد که در آن، PGV برحسب سانتی‌متر بر ثانیه است. سپس احتمال خرابی لوله‌ها برای حالت‌های حدی مختلف از روی منحنی‌های شکنندگی



شکل ۵. منحنی‌های شکنندگی.

مطابق جدول‌های ۷ تا ۹ به دست آمده است که در آن‌ها، واحد PGV سانتی‌متر بر ثانیه است.

با توجه به جدول‌های ۷ الی ۹ مشاهده می‌شود که تقریباً برای هر ۳ لوله، احتمال خرابی PI از NO و احتمال خرابی UL از PI بیشتر است. این مسئله با توجه به تعریف حالت‌های خرابی کاملاً منطقی است. فقط برای لوله‌ی $M1$ ، احتمال خرابی PI برخلاف انتظار کمتر از NO است. با توجه به جدول‌های مذکور مشاهده می‌شود که احتمال خرابی حالت حدی NO برای لوله‌های $M1$ ، $M2$ و

جدول ۵. مقادیر پارامترهای توزیع لوگ - نرمال برای محاسبه‌ی منحنی شکنندگی.

مدل	UL		PI		NO	
	β_{PGVC}	$\ln(PGV^{\hat{C}})$	β_{PGVC}	$\ln(PGV^{\hat{C}})$	β_{PGVC}	$\ln(PGV^{\hat{C}})$
$M1$	۰,۲۹	۵,۲۰۷	۰,۳۰	۴,۸۴۶	۰,۳۳	۴,۰۶۸
$M2$	۰,۳۱	۴,۸۳۵	۰,۳۲	۴,۵۲۷	۰,۳۳	۴,۰۰۵
$M3$	۰,۱۹	۴,۴۲۷	۰,۱۷	۴,۱۶۶	۰,۱۸	۳,۶۰۵

جدول ۶. مقادیر کرنش و PGV نظیر حالت های حدی.

مدل	حالت حدی					
	UL		PI		NO	
	PGV	ϵ	PGV	ϵ	PGV	ϵ
$M1$	۱۷۴	۰٫۱	۸۲	۰٫۱۵۲	۴۵	۰٫۰۰۳۵
$M2$	۱۷۴	۰٫۱	۱۱۹	۰٫۰۳۸۴	۶۶	۰٫۰۰۰۸۷
$M3$	۱۷۴	۰٫۱	۸۹	۰٫۱۸۵	۴۹	۰٫۰۰۰۴۲

جدول ۷. احتمال عبور از حالت های حدی برای $M1$.

حالت حدی	PGV نظیر	احتمال خرابی
NO	۴۵	۰٫۲۱
PI	۸۲	۰٫۱۴
UL	۱۷۴	۰٫۴۳

جدول ۸. احتمال عبور از حالت های حدی برای $M2$.

حالت حدی	PGV نظیر	احتمال خرابی
NO	۶۶	۰٫۷۲
PI	۱۱۹	۰٫۷۴
UL	۱۷۴	۰٫۹۷

جدول ۹. احتمال عبور از حالت های حدی برای $M3$.

حالت حدی	PGV نظیر	احتمال خرابی
NO	۴۹	۰٫۹۵
PI	۸۹	۰٫۹۷
UL	۱۷۴	۱

$M3$ به ترتیب برابر $۰٫۲۱$ ، $۰٫۷۲$ و $۰٫۹۵$ است. احتمال خرابی برای حالت حدی PI برای لوله های $M1$ ، $M2$ و $M3$ به ترتیب برابر $۰٫۱۴$ ، $۰٫۷۴$ و $۰٫۹۷$ است. همچنین احتمال خرابی برای حالت حدی UL برای لوله های مذکور به ترتیب برابر $۰٫۲۴$ ، $۰٫۷۴$ و $۰٫۹۷$ است. بنابراین می توان گفت که احتمال خرابی لوله ها برای حالت های حدی مختلف به ترتیب برای لوله های $M1$ ، $M2$ و $M3$ افزایش می یابد. همان طور که پیشتر گفته شد، این مسئله را می توان به افزایش بسامد ارتعاشی خطوط لوله ای مدفون مذکور نسبت داد. همچنین لوله های مورد مطالعه براساس دستورالعمل ALA، در برابر انتشار امواج لرزه ای طراحی شده اند.^[۱۶] ولی مشاهده می شود که لوله های $M2$ و $M3$ ، احتمال عبور از حالت های حدی بالایی دارند. به عنوان مثال، احتمال اینکه لوله ای $M2$ از حالت حدی عملکرد نرمال عبور کند، ۷۲% و احتمال اینکه لوله ای $M3$ از حالت حدی عملکرد نهایی عبور کند، ۱۰۰% است. بنابراین با

در نظر گرفتن فرضیات مدل سازی انجام شده در پژوهش حاضر، آیین نامه ای ALA کفایت لازم برای طراحی لرزه ای بعضی از لوله های مدفون را ندارد که البته مسئله ای ذکر شده نیاز به بررسی جامع تری دارد.

۱۳. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، آسیب پذیری خطوط لوله ای فولادی مدفون پیوسته در برابر انتشار امواج لرزه ای براساس نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی فزاینده ارزیابی شده است. سه لوله با مشخصات خاک و پارامترهای متفاوت براساس دستورالعمل ALA برای ناحیه ای با لرزه خیزی خیلی شدید و خاک نوع III طراحی شدند. لوله های طراحی شده در نرم افزار این سیس مدل شدند و با استفاده از ۱۰ رکورد زلزله ای حوزه ای دور تحت تحلیل IDA قرار گرفتند. در ادامه، حالت های حدی برای ارزیابی عملکردی لوله های فولادی مدفون پیشنهاد شد و منحنی های شکنندگی برای حالات خرابی مذکور به دست آمد. در مطالعه ای حاضر، این نتایج به دست آمده اند:

۱. برای بررسی خطوط لوله ای فولادی مدفون در چهارچوب مهندسی زلزله ای عملکردی باید حالت های حدی برای آن ها مشخص شود. با توجه به ادبیات فنی موضوع، حالت های حدی عملکرد نرمال، یکپارچگی فشار، و حد نهایی برای سازه های مذکور در مطالعه ای حاضر در نظر گرفته شده است. کرنش بیشینه ای مجاز برای هر یک از حالت های حدی ذکر شده به ترتیب $۰٫۴(t/D)$ ، $۱٫۷۶(t/D)$ و $۰٫۱$ پیشنهاد شده است.
۲. با برابر شدن PGV ، بیشینه ای کرنش محوری فشاری ایجاد شده در لوله حدوداً $۵٫۷$ برابر می شود.
۳. با فرض رابطه ای $RR = (PGV)^{۲٫۲۵}$ برای نرخ خرابی خط لوله در واحد طول آن، از روی نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی رابطه ای $RR = (ε)^{۰٫۹}$ برای نرخ خرابی خط لوله بر حسب کرنش فشاری محوری آن به دست آمد.
۴. با برابر شدن کرنش ایجاد شده ناشی از زلزله در لوله، نرخ آسیب آن حدوداً $۱٫۸۷$ برابر می شود.
۵. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی فزاینده می تواند جهت تولید منحنی شکنندگی خطوط لوله به صورت تحلیلی استفاده شود.
۶. احتمال وقوع خرابی برای حالت حدی PI از NO و برای حالت حدی UL از PI بیشتر است.
۷. با افزایش بسامد طبیعی ارتعاش سیستم خاک - لوله، احتمال آسیب پذیری آن برای حالت های مختلف حدی افزایش می یابد.
۸. ضوابط آیین نامه ای ALA، کفایت لازم برای طراحی لرزه ای بعضی از لوله های مدفون (لوله های مدفون با بسامد ارتعاشی بالا)، را با در نظر گرفتن فرضیات مدل سازی انجام شده در پژوهش حاضر ندارد که این مسئله نیاز به بررسی جامع تری دارد.

پانویس ها

1. San Francisco (1906)
2. Kanto (1923)

3. Long Beach (1933)
4. Fukui (1948)
5. Alaska (1964)
6. Puget Sound (1964)

7. Santa Rose (1969)
8. San Fernando (1971)
9. Managua (1972)
10. Coalinga (1983)
11. Mexico City (1985)
12. peak ground acceleration
13. modified mercalli intensity
14. Northridge
15. peak ground velocity
16. peak ground displacement
17. spectral acceleration
18. spectrum intensity
19. arias intensity
20. statistical significance
21. american lifelines allaince
22. truncated standard distributions
23. incremental dynamic analysis
24. OpenSees^{Y.f.ϕ}
25. fiber section
26. ramberg-osgood
27. efficient
28. no pulse-like
29. Peer
30. an order of magnitude
31. engineering demand parameter
32. operable limit
33. pressure integrity
34. ultimate limit
35. Log-normal
36. San Fernando Valley
37. energy increment
38. tolerance
39. iteration
40. constant average acceleration
41. unconditionally stable
42. amplitude accuracy
43. period accuracy
44. amplitude error
45. solution convergence
46. Hazus-MH
47. repair ratio

(References) منابع

1. Mashaly, E.-S.A. and Datta, T.K. "Seismic risk analysis of buried pipelines", *J. Transp. Eng.*, **115**(3), pp. 232-252 (1989).
2. Nasira, Y. and Rajaei H. "Three-dimensional asymmetric seismic analysis of buried pipes considering slip between pipe and soil", *Sharif Journal: Civil Engineering*, **4**, pp. 73-82 (In Persian) (2012).
3. Elhmadi, K. and O'Rourke M.J. "Seismic damage to segmented buried pipelines", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **19**(4), pp. 529-539 (1990).
4. Ariman, T. and Muleski, G.E. "A review of the response of buried pipelines under seismic excitations", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **9**(2), pp. 133-152 (1981).
5. Lee, L., Ariman, T. and Chen C. "Elastic-plastic buckling of buried pipelines by seismic excitation", *Int. J. Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **3**(4), pp. 168-173 (1984).
6. O'Rourke, M.J. "Earthquake and buried pipelines: Mexico city 1985 and beyond", In *Earthquake Hazards Reduction Series*, US Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1987).
7. Anagnos, T., Rojahn, C. and Kiremidjian, A.S. "NCEER-ATC joint study on fragility of buildings", Technical Report NCEER-95-0003, National Center for Earthquake Engineering Research (1995).
8. Katayama, T., Kubo, K. and Sato, N. "Earthquake damage to water and gas distribution systems", In *Proceedings of the US National Conference on Earthquake Engineering*, Michigan (1975).
9. Eguchi, R., Philipson, L.L., Legg, M.R. and et al. "Earthquake vulnerability of water supply systems", In *Lifeline Earthquake Engineering: The Current State of Knowledge*, ASCE (1981).
10. Eguchi, R., Taylor, C. and Hasselman, T. "Seismic component vulnerability models for lifeline risk analysis", Technical Report No. 82-1396-2c, J.H. Wiggins Company, Redondo Beach, CA (1983).
11. Barenberg, M.E. "Correlation of pipeline damage with ground motions", *J. Geotech. Eng.*, **114**(6), pp. 706-711 (1988).
12. O'Rourke, M. and Ayala, G. "Pipeline damage due to wave propagation", *J. Geotech. Eng.*, **119**(9), pp. 1490-1498 (1993).
13. Pineda-Porras, O. and Najafi, M. "Seismic damage estimation for buried pipelines: Challenges after three decades of progress", *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, **1**(1), pp. 19-24 (2010).
14. O'Rourke, T.D., Toprak, S. and Sano, Y. "Factors affecting water supply damage caused by the Northridge earthquake", In *Proceeding of the 6th US National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, Washington (1998).
15. O'Rourke, T. and Jeon, S. "Seismic zonation for lifelines and utilities", In *Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation*, Palm Springs, CA (2000).
16. American Lifelines Alliance. "Guidelines for the design of buried steel pipe", American Society of Civil Engineers (2005).
17. Pineda-Porras, O. and Ordaz-Schroeder, M. "Seismic vulnerability function for highdiameter buried pipelines: Mexico City's primary water system case", *New Pipeline Technologies, Security, and Safety*, pp. 1145-1154 (2003).
18. O'Rourke, M. and Deyoe, E. "Seismic damage to segmented buried pipe", *Earthq. Spectra*, **20**(4), pp. 1167-1183 (2004).
19. Pineda-Porras, O. and Ordaz, M. "A new seismic intensity parameter to estimate damage in buried pipelines due to seismic wave propagation", *J. Earthquake Eng.*, **11**(5), pp. 773-786 (2007).
20. O'Rourke, M. "Analytical fragility relation for buried segmented pipe", *Proceedings of the TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, pp. 771-780 (2009). E.Salzano^bF.Santucci de Magistris^aG.Fabbrocino^a.
21. Lanzano, G., Salzano, F., Santucci de Magistris, F. and et al. "Seismic vulnerability of gas and liquid buried pipelines", *J. Loss Prev. Process Ind.*, **28**, pp. 72-78 (2013).

22. Laucelli, D., Laucelli, D., Beradi, L. and et al. "Seismic reliability assessment of water distribution networks", *Procedia Eng.*, 70, pp. 998-1007 (2014).
23. Standard No. 2800-Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, 3ed Revision, Building and Housing Research Center, Tehran (2007).
24. Mazzoni, S. and et al. "OpenSees users manual", PEER, University of California Berkeley (2004).
25. Bruneau, M., Uang, C.-M. and Sabelli, S.R. "Ductile design of steel structures", McGraw Hill Professional (2011).
26. Hindy, A. and Novak, M. "Earthquake response of underground pipelines", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 7(5), pp. 451-476 (1979).
27. Shakib, H. and Jahangiri, V. "Intensity measures for the assessment of the seismic response of buried steel pipelines", *Bull. Earthquake Eng.*, 14(4), pp. 1265-1284 (2016).
28. Liu, A.-w., Hu, Y.-X., Zhao, F.-X. and et al. "An equivalent-boundary method for the shell analysis of buried pipelines under fault movement", *Acta Seismol. Sin.*, 17(1), pp. 150-156 (2004).
29. Shome, N. and Cornell C.A. "Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures, in reliability of marine structures", Program Report No. RMS-35 1999, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California (1999).
30. Luco, N. and Cornell C.A. "Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions", *Earthq. Spectra*, 23(2), pp. 357-392 (2007).
31. Chiou, B. and et al. "NGA project strong-motion database", *Earthq. Spectra*, 24(1), pp. 23-44 (2008).
32. Eurocode 8, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines, European Standard EN (1998).
33. JG(G)-206-03, Seismic Design Codes for High Pressure Pipelines, The Japan Gas Association (2004).
34. Veritas, D.N. "Offshore Standard DNV-OS-F101", Submarine Pipeline Systems (2000).
35. CSA-Z662-99, Oil and Gas Pipeline Systems, Canadian Standards Association (1999).
36. Honegger, D.G., Gailing, R.W. and Nyman, D.J. "PRCI PR-268-9823, Guidelines for the seismic design and assessment of natural gas and liquid hydrocarbon pipelines", Pipeline Research Council International (PRCI) (2000).
37. Cornell, C.A., Jalayer, F., Hamburger, R.O. and et al. "Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines", *J. Struct. Eng.*, 128(4), pp. 526-533 (2002).
38. Eurocode: Basis of Structural Design, Institution of British Standard (2002).
39. Liu, B., Liu, X. and Zhang, H. "Strain-based design criteria of pipelines", *J. Loss Prev. Process Ind.*, 22(6), pp. 884-888 (2009).
40. Bai, Y., *Pipelines and Risers*, 3, Elsevier, 520 p. (2001).
41. Jalayer, F. and Cornell, C.A. "A technical framework for probability-based demand and capacity factor (DCFD) seismic formats", Rep. No. RMS-43, RMS Program, Stanford Univ., Stanford, California (2003).
42. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H. and et al. "OpenSees command language manual", Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center (2006).
43. <http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Patch.Command>, "The open system for earthquake engineering simulation" (2015).
44. Clough, R.W. and Penzien, J. "Dynamics of structures", Copyright of Applied Mechanics & Materials (1993).
45. Craig, R.R. and Kurdila, A.J., *Fundamentals of Structural Dynamics*, John Wiley & Sons (2006).
46. HAZUS MH MR4 Technical Manual, FEMA (2003).