



رفتار لرزه ای مبتنی بر عملکرد خطوط لوله فولادی مدفون پیوسته تحت زلزله های حوزه نزدیک

علیرضا کیانی^۱، مهدی ترابی^{۲*}، سیدمحمد میرحسینی^۱

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
^۲ دانشکده فنی و مهندسی، واحد کنگان، دانشگاه آزاد اسلامی، کنگان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ آبان ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۸ خرداد ۱۳۹۷
پذیرش: ۲۳ خرداد ۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۲۰ شهریور ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

خط لوله ای مدفون پیوسته
زلزله ای حوزه ای نزدیک
تحلیل دینامیکی فزاینده
مهندسی زلزله عملکردی
معیار شدت

چکیده: معیارهای شدت زمین لرزه برای کمی سازی قدرت زلزله ها و ارزیابی پاسخ سازه ها به کار می روند. از آنجایی که این معیارهای شدت به عنوان رابطی بین نیاز لرزه ای و تحلیل خطر لرزه ای عمل می کنند، نقشی اساسی در مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد دارند. تحقیقات زیادی در زمینه تعیین معیار شدت بهینه برحسب کارایی و کفایت انجام شده است. اکثر این مطالعات بر سازه های متداول مثل ساختمان ها و پل ها متمرکز است و تعداد کمی از آنها در مورد خطوط لوله مدفون است. در مطالعه حاضر معیارهای شدت بهینه برای پیش بینی نیاز لرزه ای خطوط لوله فولادی مدفون پیوسته تحت زلزله های پالس گونه ای حوزه ای نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. سه لوله ای فولادی مدفون با قطر به ضخامت (D/t) ، عمق دفن به قطر (H/D) و مقاومت مصالح و نیز مشخصات خاک مختلف تحت تحلیل دینامیکی فزاینده با استفاده از بیست رکورد زلزله قرار گرفتند. از روش اجزاء محدود برای مدل سازی استفاده شده که در طی آن برای مدل سازی خاک از فنرها و میراگرهای معادل و برای مدل سازی لوله از المان پیوسته استفاده شده است. کرنش فشاری محوری حداکثر در بحرانی ترین مقطع لوله به عنوان پارامتر نیاز مهندسی برای لوله ای فولادی مدفون پیوسته انتخاب شده و سپس شانزده معیار شدت زمین لرزه ای بالقوه در نظر گرفته شده اند. در نهایت نتیجه گرفته شد که $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS)_d]$ و سپس حداکثر سرعت پایدار (SMV) معیارهای شدت مناسب برای مطالعه ای خطوط لوله فولادی مدفونی که در معرض زلزله های پالس گونه ای حوزه ای نزدیک قرار دارند، در چهارچوب مهندسی زلزله عملکردی می باشند.

۱- مقدمه

می شود. شوم و همکاران [۲] پاسخ غیر خطی یک قاب خمشی فولادی چهار دهانه ای پنج طبقه را به دست آوردند. نتایج به دست آمده نشان داد که شتاب طیفی در زمان تناوب الاستیک اصلی سازه $(Sa(T_1))$ ، معیار شدت کاراتر و با کفایت تری از شتاب حداکثر زمین^۴ است. واماوتسیکوس و کرنل [۵] سه سازه را مورد مطالعه قرار دادند: یک قاب فولادی پنج طبقه با مهاربند ۸ با زمان تناوب اصلی ۱/۸ ثانیه، یک قاب خمشی فولادی ۹ طبقه با اتصالات شکننده با زمان تناوب اصلی ۲/۴ ثانیه و یک قاب خمشی فولادی ۲۰ طبقه با اتصالات انعطاف پذیر و زمان تناوب اصلی ۴ ثانیه. نشان داده شد که برای ساختمان هایی که از اثر مدهای بالاتر در آن ها می توان صرف نظر کرد، شتاب طیفی در دوره تناوب بهینه ای بزرگتر از دوره تناوب الاستیک مد اول کاراترین معیار شدت است. لوسو و کرنل [۴] معیارهای شدت جدیدی معرفی کردند. سازه های مورد مطالعه ای آنها سه قاب خمشی فولادی ۳، ۹ و ۲۰ طبقه بود. آن ها نشان دادند که برای تمامی سازه های مورد مطالعه، $(Sa(T_1))$ ناکارا و بی کفایت است. توتانگ و لوسو [۶] انتخاب معیار شدت مناسب برای سازه ها را با بررسی شانزده قاب خمشی تک دهانه و چند طبقه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات مشخص نمود که استفاده از

در مهندسی زلزله عملکردی^۱، فرکانس میانگین فراگذشت یک حالت حدی^۲ معین به دست می آید [۱]. عدم قطعیت های موجود در این روش برحسب معیار شدت^۳ بیان می شود [۲]. در PBEE انتخاب یک IM مناسب برای در نظر گرفتن عدم قطعیت زمین لرزه از اهمیت بالایی برخوردار است. ویژگی هایی که در اکثر تحقیقات برای تعیین IM بهینه مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از: کارایی [۳] و کفایت [۴]. یک معیار شدت کارا به پراکندگی کمتری در پاسخ سازه منجر می شود [۴]. تعداد تحلیل های لازم و رکورد های زلزله مورد نیاز برای برآورد احتمال فراگذشت مقادیر پارامتر نیاز مهندسی به ازای معیار شدت معین با انتخاب معیار شدت کارا کاهش می یابد. انتخاب یک معیار شدت با کفایت منجر می شود به اینکه پارامتر نیاز مهندسی مستقل از بزرگی زلزله (M) و فاصله منبع تا سایت (R) باشد [۴]. کارایی و کفایت معیارهای شدت توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به طور خلاصه به تعدادی از آن ها اشاره

*نویسنده عهده دار مکاتبات: mehdi.torabi@iaubushehr.ac.ir

- 1 Performance-Based Earthquake Engineering (PBEE)
- 2 Limit state
- 3 Intensity Measure (IM)

4 Peak Ground Acceleration (PGA)

معرفی شد.

شکیب و جهانگیری [۱۴] تنها از رکوردهای حوزه دور در مطالعه خود استفاده کردند. اما نشان داده شده است که سازه‌های مدفون نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک آسیب‌پذیرتر هستند [۱۵]. بنابراین مطالعه‌ی معیارهای شدت بهینه برای خطوط لوله با در نظر گرفتن رکوردهای زلزله حوزه نزدیک ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله، کفایت و کارایی مجموعه‌ای از معیارهای شدت مورد نظر برای ارزیابی نیاز لرزه‌ای خطوط لوله فولادی مدفون تحت اثر گسترش امواج حوزه نزدیک بررسی شده است. سه لوله‌ی فولادی مدفون پیوسته با مشخصات خاک و لوله متفاوت در این مطالعه در نظر گرفته شده است. کرنش فشاری محوری حداکثر در مقاطع لوله به عنوان پارامتر نیاز مهندسی^۸ در نظر گرفته شده و تحلیل IDA برای به دست آوردن پاسخ لوله در محدوده‌ی وسیعی از پاسخ الاستیک تا ناپایداری دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت معیارهای شدت بهینه برای پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله فولادی مدفون تحت زلزله‌های پالس‌گونه^۹ در بین IM‌های بررسی شده براساس کارایی و کفایت مشخص شده است.

۲- معیارهای شدت

بررسی معیارهای شدت مختلف برای تعیین IM مناسب جهت تخمین پاسخ خطوط لوله مدفون به تحریک زلزله، ضروری است. در این مطالعه ۱۸ معیار شدت مورد استفاده در مطالعه شکیب و جهانگیری [۱۴] به عنوان معیارهای شدت بالقوه در نظر گرفته شده که در جدول ۱ فهرست شده‌اند.

۳- پارامتر نیاز مهندسی

در مطالعه حاضر، بر اساس کار شکیب و جهانگیری [۱۴]، کرنش فشاری محوری حداکثر در بحرانی‌ترین مقطع لوله (که از این به بعد با ε_{max} نشان داده خواهد شد) به عنوان EDP برای خطوط لوله‌ی فولادی مدفون پیوسته در نظر گرفته شده است.

جابه‌جایی طیفی غیر الاستیک برای سازه‌هایی که اثر مود اول در آنها غالب است نسبت به شتاب طیفی الاستیک بهتر است. مهانی [۷] یک معیار شدت وابسته به شکل طیف را پیشنهاد داد که اثر افزایش دوره تناوب^۱ را در نظر می‌گیرد. او تعداد زیادی سازه تک درجه آزادی با دوره‌های تناوب مختلف را از طریق تحلیل تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار داد. نتایج حاکی از کارایی معیار شدت پیشنهادی بود. بیانچینی و همکاران [۸] IM جدیدی مبتنی بر میانگین هندسی شتاب طیفی پیشنهاد دادند. آن‌ها سه قاب خمشی را در معرض تحلیل دینامیکی فرآینده^۲ قرار دادند. نتایج نشان داد که IM پیشنهادی برای سازه‌های حساس به اثر مدهای بالاتر نتایج مطلوب‌تری به دست می‌دهد. ملایلی [۹] معیار شدت جدیدی مبتنی بر شدت طیفی سرعت^۳ در مورد سازه‌های جداسازی شده از پایه پیشنهاد داد. نشان داده شد که IM پیشنهادی بهترین در میان معیارهای شدت مورد بررسی است. دیبازو [۱۰] معیار شدتی مبتنی بر شتاب طیفی را معرفی کرد که رفتار غیر خطی سازه را در نظر می‌گیرد. نشان داده شد که IM پیشنهاد شده کاراترین و با کفایت‌ترین معیار شدت می‌باشد.

همه‌ی مطالعات فوق‌الذکر در مورد بررسی IM بهینه برای پاسخ سازه‌های ساختمانی است. مطالعاتی نیز در مورد IM‌های مناسب جهت ارزیابی سازه‌های توزیع شده مکانی^۴ نظیر پل‌ها، شمع‌ها و خطوط لوله انجام شده است. مکی و استوجادینیویج [۱۱] نشان دادند که مقادیر طیفی شتاب، سرعت و تغییر مکان در زمان تناوب اصلی پل‌های بزرگراه‌ها در مقایسه با مقادیر شتاب، سرعت و تغییر مکان حداکثر زمین^۵ نتایج بهتری به دست می‌دهد. نشان داده شد که جابه‌جایی طیفی کاراترین و با کفایت‌ترین معیار شدت برای این سازه‌ها است. پجت و دزروچس [۱۲] پاسخ لرزه‌ای نوعی از پل‌های چند دهانه بزرگراه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. آشکار شد که PGA و سرعت مطلق تجمعی^۶ با کفایت‌ترین IM به ترتیب برای رکوردهای مصنوعی و ثبت شده زلزله هستند. بردلی و همکاران [۱۳] کارایی و کفایت معیارهای شدت برای پاسخ لرزه‌ای پی‌های شمعی را مورد مطالعه قرار دادند. نشان داده شد که برای این سازه‌ها VSI کاراترین و با کفایت‌ترین معیار شدت (هم نسبت به بزرگی و هم نسبت به فاصله) می‌باشد. شکیب و جهانگیری [۱۴] کفایت و کارایی مجموعه‌ای از معیارهای شدت را در ارزیابی پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله فولادی مدفون مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه گرفته شد که برای لوله‌های مدفون در خاک‌های با سختی محوری کم، $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS)_d]$ و سپس جذر میانگین مربعات جابه‌جایی^۷ معیارهای شدت بهینه هستند. برای لوله‌های مدفون در خاک با سختی محوری بالا، PGD^2/RMS_d به عنوان تنها معیار شدت با کفایت و کارا

1 Period elongation

2 Incremental Dynamic Analysis (IDA)

3 Velocity Spectrum Intensity (VSI)

4 Spatially distributed structures

5 Peak Ground displacement (PGD)

6 Cumulative Absolute Velocity (CAV)

7 Root Mean Square of Displacement (RMSd)

8 Engineering Demand Parameter (EDP)

9 Pulse-like ground motions

جدول ۱. معیارهای شدت در نظر گرفته شده

Table 1. Considered intensity measures

ردیف	معیار شدت	ردیف	معیار شدت
۱	شتاب حداکثر زمین، PGA	۱۰	سرعت مطلق تجمعی، CAV
۲	سرعت حداکثر زمین، PGV	۱۱	شدت شتاب طیفی، ASI
۳	جابه جایی حداکثر زمین، PGD	۱۲	شدت سرعت طیفی، VSI
۴	PGV ² /PGA	۱۳	حداکثر شتاب پایدار، SMA
۵	جذر میانگین مربعات شتاب، RMSa	۱۴	حداکثر سرعت پایدار، SMV
۶	جذر میانگین مربعات سرعت، RMSv	۱۵	شتاب طیفی، Sa(T1, 5%)
۷	جذر میانگین مربعات جابه جایی، RMSd	۱۶	سرعت طیفی، Sv(T1, 5%)
۸	شدت آریاس، Ia	۱۷	جا به جایی طیفی، Sd(T1, 5%)
۹	PGD ² /RMS _d	۱۸	$\sqrt{VSI[\omega_1(PGD+RMS_d)]}$

۴- روش

۴-۱- کارایی معیار شدت

نشان داده شده است که رابطه بین نیاز لرزه‌ای و معیار شدت به صورت توانی است [۱۶]

$$EDP = a(IM)^b \quad (1)$$

که معادله فوق تبدیل می‌شود به:

$$\ln(EDP) = \ln(a) + b\ln(IM) \quad (2)$$

این تبدیل امکان محاسبه ثابت‌های a و b را با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی بر روی $\ln EDP$ و $\ln IM$ فراهم می‌سازد. کارایی بر حسب انحراف استاندارد مانده‌ها مشخص می‌شود. انحراف استاندارد مانده‌ها معادل خطای استاندارد برآورد است و به صورت رابطه (۳) محاسبه شده است.

$$\sigma_{\ln EDP|IM} = \sqrt{\frac{\sum (\ln(EDP) - \ln(a \cdot IM^b))^2}{n-2}} \quad (3)$$

پراکندگی کمتر نسبت به خط برازش رگرسیون (σ) برای یک معیار شدت معین نشانگر کاراتر بودن آن در بین سایر معیارهای شدت است.

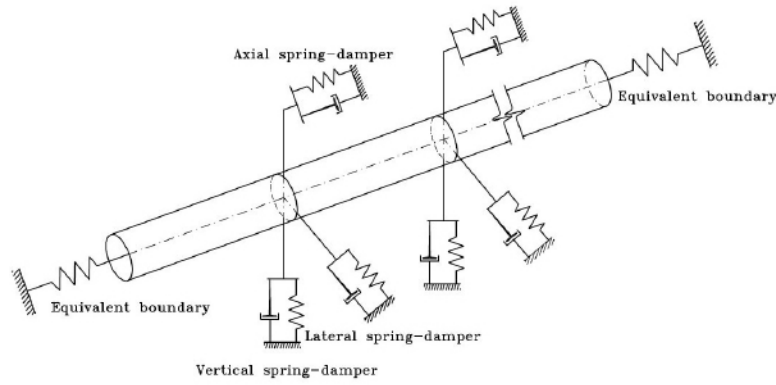
۴-۲- کفایت معیار شدت

تعیین کفایت معیار شدت با استفاده از تحلیل رگرسیون EDP روی R یا M برای یک معیار شدت معین انجام می‌شود. کفایت از روی اهمیت

آماره χ^2 خط برازش مانده‌های حاصل از تحلیل رگرسیون بین پارامتر نیاز مهندسی و M یا R تعیین می‌شود. مقدار P -value حاصل از F -test به عنوان معیار کمی اهمیت آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیارهای شدتی که دارای اهمیت آماری بالا هستند (مقادیر کم P -value، کمتر از حدود ۰/۰۵) معیارهای شدت بی‌کفایت در نظر گرفته می‌شوند و معیارهای شدت با مقدارهای P -value بالا به عنوان با کفایت‌ترین معیارهای شدت تلقی می‌شوند [۱۷].

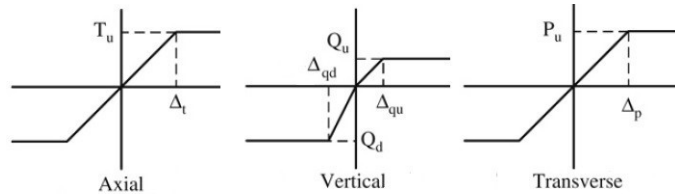
۵- مدل‌سازی لوله‌ی مدفون

مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی لوله‌ی مدفون با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شده است. مدل‌سازی لوله با استفاده از المانهای سه بعدی دو گرهی انجام شده است که در هر گره دارای شش درجه آزادی (جابه‌جایی در جهت محورهای x ، y و z و دوران حول آن‌ها) است. برای مدل‌سازی خاک اطراف لوله، از فنرهای دو خطی که بیانگر سختی خاک در جهت‌های محوری، عرضی و قائم هستند [۱۸]، و نیز برای در نظر گرفتن میرایی خاک از میراگرهای معادل استفاده شده است. تصویر شماتیک مدل لوله‌ی مدفون و شرایط مرزی را در شکل ۱ مشاهده می‌شود. برای مشخص کردن فنرهای غیرخطی خاک لازم است نیروی حداکثر فنر خاک و جابه‌جایی نسبی نظیر شکل ۲ مشخص شود. این پارامترها با استفاده از دستورالعمل ALA [۱۸] و به صورت زیر تعیین می‌شوند:



شکل ۱. تصویر شماتیک سیستم خاک-لوله [۱۴]

Fig. 1. Schematic representation of the soil-pipe system



شکل ۲. فنرهای غیرخطی خاک [۱۴]

Fig. 2. Nonlinear soil springs

که N_{ch} و N_{qh} ضریب ظرفیت باربری افقی به ترتیب برای رس و ماسه هستند و برحسب زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) ، نسبت عمق دفن به قطر لوله (H/D) و چندین پارامتر ثابت مطابق $ALA [18]$ تعیین می‌شوند. جابه‌جایی Δ_p در نیروی P_u که در شکل ۲ قابل مشاهده است، توسط رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$\Delta_p = 0.04(H + \frac{D}{2}) \leq 0.10D \sim 0.15D \quad (6)$$

نیروی که از خاک به واحد طول لوله به سمت بالا اعمال می‌شود با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} Q_u &= N_{cv}cD + N_{qv}\bar{\gamma}HD \\ N_{cv} &= 2(\frac{H}{D}) \leq 10 \\ N_{qv} &= (\frac{\phi H}{44D}) \leq N_q \\ N_q &= \exp(\pi \tan \phi) \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) \end{aligned} \quad (7)$$

که N_{cv} و N_{qv} به ترتیب عبارتند از ضریب برکنش قائم رس و ماسه. جابه‌جایی q_u نظیر نیروی Q_u نشان داده شده در شکل ۲ برابر $H \cdot 0.1$ و $H \cdot 0.2$ به ترتیب برای ماسه متراکم و سست و $H \cdot 0.1$ و $H \cdot 0.2$ به ترتیب برای رس نرم و سفت توصیه شده است [18].

حداکثر نیروی محوری که می‌تواند از خاک به واحد طول لوله منتقل شود عبارت است از:

$$\begin{aligned} T_u &= \pi D \alpha c + \pi DH \bar{\gamma} \frac{1 + K_0}{2} \tan \delta \\ \alpha &= 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

که D قطر خارجی لوله، C چسبندگی خاک، H عمق دفن مرکز لوله، $\bar{\gamma}$ وزن موثر واحد حجم خاک، K_0 ضریب فشار سکون خاک، α ضریب چسبندگی و δ زاویه اصطکاک بین لوله و خاک می‌باشد. جابه‌جایی Δ_t در T_u که در شکل ۲ نیز آمده است، به ترتیب برابر ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌متر برای ماسه‌ی متراکم، ماسه‌ی سست و رس نرم مطابق توصیه $ALA [18]$ می‌باشد.

حداکثر نیروی جانبی که از خاک به واحد طول لوله می‌تواند منتقل شود برابر است با:

$$\begin{aligned} P_u &= N_{ch}cD + N_{qh}\bar{\gamma}HD \\ N_{ch} &= a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9 \\ N_{qh} &= a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \end{aligned} \quad (5)$$

در جدول ۲ فهرست شده‌اند بر اساس بزرگی زلزله، نزدیک‌ترین فاصله تا سطح گسیختگی و شرایط خاک محلی انتخاب شدند. این زمین لرزه‌ها دارای بزرگی در محدوده ۶ تا ۷/۶ و فاصله در محدوده ۰ تا ۱۴ کیلومتر می‌باشند و بر روی خاک نوع ۳ (بر اساس استاندارد ۲۸۰۰) واقع شده‌اند. در جدول فوق Tp تناوب پالس رکورد می‌باشد. رکوردهای انتخاب شده به شدت‌های مختلف مقیاس شده‌اند و به عنوان بارگذاری ورودی در تحلیل دینامیکی فزاینده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۶-۲- مدل‌سازی، صحت‌سنجی و تحلیل عددی

در این مطالعه از معادله‌ی رامبرگ-اسگود^۱ برای بیان رابطه تنش- کرنش مصالح لوله استفاده شده است. این معادله معمولاً جهت مدل‌سازی رفتار مصالح فولادی در حالت بارگذاری لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱]. معادله‌ی رامبرگ-اسگود به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود [۲۱].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + a \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (11)$$

که E مدول الاستیسیته، σ_0 مساوی $E\varepsilon_0$ ، کرنش تسلیم و a مساوی σ_0/E است [۲۱]. α و n ثوابتی هستند که به گرید فولاد بستگی دارند. مقادیر پارامترهای مذکور در جدول ۳ ذکر شده است.

مشخصات فنرهای غیرخطی در قالب حداکثر نیروی منتقل شده از خاک به واحد طول لوله و جابه‌جایی‌های نظیر برای مدل‌های مورد مطالعه بر اساس بخش ۵ این مقاله محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

برای مدل‌سازی لوله از المان Shell181 [۲۲] استفاده شده است. این المان دارای چهار گره است که در هر گره دارای شش درجه آزادی می‌باشد. این درجات آزادی عبارتند از جابه‌جایی در جهت X و Y و Z دوران حول محورهای فوق. المان فوق‌الذکر برای کاربردهایی مثل تغییر شکل‌ها و کرنش‌های بزرگ و کمانش قابل استفاده است. برای مدل‌سازی فنر و میراگر جایگزین خاک از المان COMBIN14 [۲۲] استفاده شده است. این المان توسط دو گره، ضریب فنر و ضریب میرایی تعریف می‌شود. تصویر مش‌بندی مدل لوله M2 در نرم‌افزار ANSYS V5.5 [۲۲] به عنوان نمونه در شکل ۳-الف آمده است. اختصاص فنر-میراگرها به مدل مذکور در شکل ۳-ب آمده است.

نیروی فنر قائم تکیه‌گاهی (رو به پایین) که از طرف خاک به واحد طول لوله اعمال می‌شود توسط روابط زیر به دست می‌آید:

$$Q_d = N_c cD + N_q \bar{\gamma} HD + N_{\gamma} \bar{\gamma} \frac{D^2}{2}$$

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)] \{ \exp[\pi \tan(\phi + 0.001)] \tan^2(45 + \frac{\phi + 0.001}{2}) - 1 \} \quad (8)$$

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

$$N_{\gamma} = \exp(0.18\phi - 2.5)$$

که N_c ، N_q و N_{γ} ضرایب ظرفیت باربری هستند و $\bar{\gamma}$ وزن واحد حجم خاک می‌باشد. جابه‌جایی Δ_{qd} در نیروی Q_d که در شکل ۲ نشان داده شده برابر $0.1D$ و $0.2D$ به ترتیب برای خاک‌های دانهای و ماسه‌ای توصیه شده است [۱۸].

با استفاده از رابطه (۹) ضرایب میرایی میراگرهای معادل برای جهت‌های عرضی و طولی محاسبه می‌شوند.

$$c_{sl} = G \bar{S}_u \frac{rl}{V_s}, c_{sa} = G \bar{S}_w \frac{rl}{V_s} \quad (9)$$

که I طول المان، r شعاع لوله، h عمق دفن، V_s سرعت موج برشی خاک است و \bar{S}_u و \bar{S}_w ضرایب بدون بعد میرایی خاک [۱۹] هستند.

هنگام ساخت مدل عددی لوله مدفون، هر گره مدل به سه فنر-میراگر در سه راستای مختلف وصل گردید. ثابت‌های فنرها و میراگرها در تراز خط مرکزی لوله مورد محاسبه قرار گرفتند و سپس به صورت یکنواخت در بین گره‌های لوله توزیع گردیدند.

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی شرایط مرزی دو انتهای لوله از روش مرز معادل [۲۰] استفاده شده است. روش مرز معادل فرض می‌کند که جابه‌جایی نسبی بین خاک و لوله در مرزها ناشی از اصطکاک خاک و لوله و فقط در جهت طولی است. این مرزها را می‌توان به صورت المان فنر غیر خطی در دو سر مدل اعمال کرد. رابطه بین نیروی محوری F و تغییر طول محوری ΔL این فنرها به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

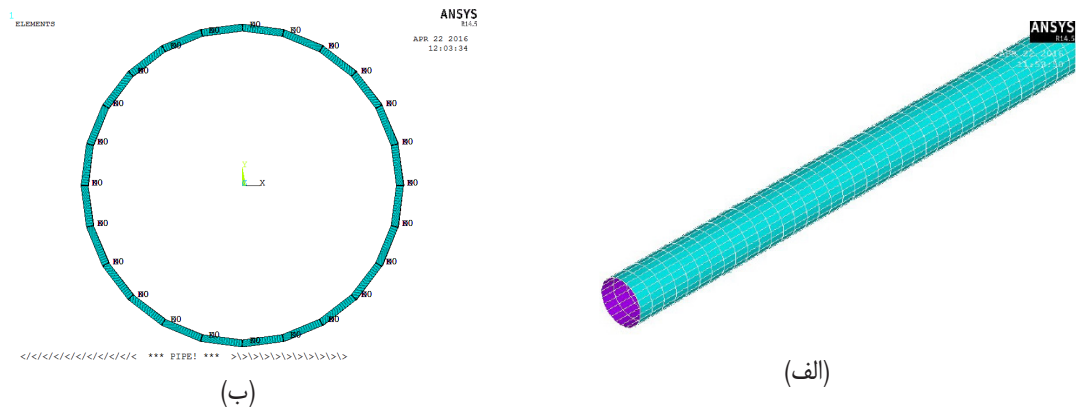
$$F(\Delta L) = \begin{cases} \sqrt{\frac{3EAf_s}{2} U_0^{-\frac{1}{6}} \Delta L^{\frac{2}{3}}}, 0 \leq \Delta L \leq U_0 \\ \sqrt{2EAf_s (\Delta L - \frac{1}{4}U_0)}, U_0 \leq \Delta L \leq \frac{\sigma_y^2 A}{2Ef_s} + \frac{U_0}{4} \end{cases} \quad (10)$$

که E مدول کشسانی مصالح لوله، A مساحت سطح مقطع لوله، σ_y تنش تسلیم مصالح لوله و f_s اصطکاک لغزشی در واحد طول لوله که برابر با حداکثر نیرویی است که خاک به واحد طول لوله اعمال می‌کند، می‌باشند [۲۰].

۶- مطالعات عددی

۶-۱- زمین‌لرزه‌ها

مجموعه‌ای از بیست رکورد زلزله غیرپالس‌گونه‌ی حوزه‌ی نزدیک که



شکل ۳. مدل در نرم افزار ANSYS، الف) مش بندی ب) اختصاص فنر-میراگرها به مدل

Fig. 3. Finite element representation of Model M2 : (a) Meshing, (b) Allocation of the springs and dampers

جدول ۲. رکوردهای زلزله مورد استفاده در تحلیل

Table 2. Earthquake records used in the analysis

TP (S)	Vs (m/s)	PGA (g)	R (km)	بزرگی	رخداد	ردیف
۵/۳	۲۵۹	۰/۴۱	۱۰	۷/۶	Chi-Chi, Taiwan, 1999 (CHY101)	۱
۰/۹	۲۹۴	۰/۸۲	۱۲	۷/۱	Duzce, Turkey, 1999 (Bolu)	۲
۹/۴	۲۹۳	۰/۲۳	۱۴	۷	Darfield, New Zealand, 2010 (Riccarton High School)	۳
۲/۳	۲۴۲	۰/۳	۱	۶/۵	Imperial Valley-06, 1979 (Agrarias)	۴
۶/۳	۲۰۲	۰/۳۵	۵	۶/۵	Imperial Valley-06, 1979 (El Centro Differential Array)	۵
۴/۴	۱۹۲	۰/۳۸	۷	۶/۵	Imperial Valley-06, 1979 (EC County Center FF)	۶
۳/۴	۲۶۵	۰/۳۸	۰	۶/۵	Imperial Valley-06, 1979 (El Centro - Meloland Geot. Array)	۷
۴/۸	۲۰۹	۰/۳۷	۷	۶/۵	Imperial Valley-06, 1979 (El Centro Array #4)	۸
۴/۱	۲۰۶	۰/۳۸	۴	۶/۵	Imperial Valley-06, 1979 (El Centro Array #5)	۹
۳/۸	۲۰۳	۰/۴۴	۱	۶/۵	Imperial Valley-06, 1979 (El Centro Array #6)	۱۰
۱/۸	۳۱۲	۰/۶۶	۰	۶/۹	Kobe, Japan, 1995 (Takarazuka)	۱۱
۵	۲۹۷	۰/۲۸	۵	۷/۵	Kocaeli, Turkey, 1999 (Yarimca)	۱۲
۵/۷	۳۴۸	۰/۲۸	۹	۶/۹	Loma Prieta, 1989 (Saratoga - W Valley Coll)	۱۳
۳	۲۵۱	۰/۶۴	۵	۶/۷	Northridge-01, 1994 (Sylmar - Converter Sta)	۱۴
۱/۴	۲۶۹	۰/۷۰	۶	۶/۷	Northridge-01, 1994 (Newhall - Fire Sta)	۱۵
۳/۰	۲۸۶	۰/۴۱	۵	۶/۷	Northridge-01, 1994 (Newhall - W Pico Canyon Rd).	۱۶
۱/۳	۲۸۲	۰/۸۸	۷	۶/۷	Northridge-01, 1994 (Rinaldi Receiving Sta)	۱۷
۳/۵	۳۷۱	۰/۸۴	۵	۶/۷	Northridge-01, 1994 (Sylmar - Converter Sta East)	۱۸
۱	۲۳۱	۰/۵۵	۴	۶	Parkfield-02, CA, 2004 (Parkfield - Cholame 3W)	۱۹
۱/۱	۳۱۲	۸۶	۱	۶/۹	Kobe, Japan, 1995 (KJMA)	۲۰

جدول ۳. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در تحلیل

Table 3. Characteristics of the models used in the analysis

مدل			پارامتر
M3	M2	M1	
X80	X65	X60	گرید
۵۵۱	۴۴۸	۴۱۳	F_y (MPa)
۶۲۰	۵۳۰	۵۱۷	F_u (MPa)
۰/۸۶	۱/۲۹	۱/۴۸	α
۳۷	۲۵/۵۸	۱۸/۹۹	n
۹۱۴	۵۰۸	۵۰۸	D(mm)
۷/۹	۸/۷	۱۱/۱	t(mm)
۱۱۶	۵۸	۴۶	D/t
۱/۷	۲	۱/۵	H(m)
۱/۸	۳/۹	۳	H/D
۲۹	.	.	Φ (°)
.	۳۷	۷۵	C (Kpa)
۱۷۰۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰	γ (kg/m ³)
۵۵	۶۰	۱۵۰	G(Mpa)
۱۸۰	۲۰۰	۲۸۸	Vs(m/s)
۱۰۸۹۹۷۵	۶۳۲۴۶۰	۱۰۸۲۲۵۵	Csl(Ns/m ²)
۸۱۰۴۹۴	۴۵۷۲۰۰	۷۶۵۴۹۷	Csa(Ns/m ²)

جدول ۴. حداکثر نیروی وارد بر واحد طول لوله و جابه‌جایی نظیر

Table 4. Maximum force applied per unit length of the pipes and corresponding displacement

جابه‌جایی نسبی حداکثر لوله و خاک (mm)				حداکثر نیروی وارد از خاک بر واحد طول لوله (N/mm)				مدل
جهت قائم		جهت قائم		جهت قائم		جهت قائم		
به سمت پایین	به سمت بالا	جهت عرضی	جهت محوری	به سمت پایین	به سمت بالا	جهت عرضی	جهت محوری	
۱۰/۱/۶	۱۰/۱/۶	۵۰/۸	۸	۲۱۰/۳	۲۲۴/۵	۲۴۱/۸	۹۹/۳	M1
۱۰/۱/۶	۱۰/۱/۶	۶۳/۵	۹	۱۱۱/۸	۱۴۸/۳	۱۲۴/۵	۵۸/۱	M2
۹۱/۴	۳۳/۸	۸۵/۹	۵	۵۳۹/۳	۳۲/۱	۱۶۲/۳	۳۵/۴	M2

در ادامه و بعد از اطمینان از صحت مدل‌سازی، لوله‌های مورد مطالعه تحت تحلیل IDA با استفاده از نرم افزار ANSYS V5.5 [۲۲] قرار گرفتند. از بیست رکورد زلزله‌ی حوزه نزدیک با گام اولیه و نمو گامی برابر $0.1g$ برای PGA (مطابق با مطالعه شکیب و جهانگیری [۱۴]) در تحلیل IDA استفاده شد. تحلیل‌های دینامیکی فرآینده تا زمانی که کرنش فشاری محوری حداکثر لوله به 1.5% برسد ادامه یافته‌اند (مطابق مطالعه جهانگیری و شکیب [۲۳]). اگر قبل از رسیدن به کرنش مذکور عدم همگرایی در تحلیل اتفاق می‌افتاد با کوچک تر کردن گام‌های اعمال بار تا مرتبه $6-10$ تلاش شده است که عدم همگرایی برطرف شود. اگر باز مشکل همگرایی حل نمیشد نقطه مذکور به عنوان ناپایداری کلی تلقی شده است. بعد از انجام IDA، مقادیر EDP از نتایج تحلیل به دست آمد. سپس با استفاده تحلیل رگرسیون و توضیحات بخش ۴ کفایت و کارایی IM‌های بالقوه مورد مطالعه قرار گرفت. نرم‌افزار مورد استفاده برای کارهای آماری SigmaPlot [۲۴] بوده است.

۷- نتایج و بحث

۷-۱- منحنی‌های IDA

منحنی‌های IDA لوله‌های M1 تا M3 را در شکل ۵ مشاهده می‌کنید. در این منحنی‌ها PGA به عنوان IM می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در صورت استفاده از PGA به عنوان IM شاهد پراکندگی زیادی در منحنی‌های IDA هستیم و این مسأله ضرورت تعیین IM بهینه را برای این سازه‌ها هنگامی که در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک قرار دارند به خوبی نشان می‌دهد.

۷-۲- کارایی

انحراف استاندارد لگاریتمی مانده‌ها به دست آمده از تحلیل رگرسیون مدل‌های M1 تا M3 در جدول ۶ آمده است. با توجه به جدول دیده می‌شود که مقدار σ برای مدل M1 در محدوده 0.8 تا 1.59 قرار دارد. کمترین مقدار پراکندگی بین همه IM‌ها برای مدل فوق متعلق به PGV ، SMV ، $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$ و RMS_v می‌باشد که به ترتیب عبارتند از 0.9 ، 0.89 ، 0.8 و 0.97 . با توجه به جدول ۶ می‌توان مشاهده کرد که

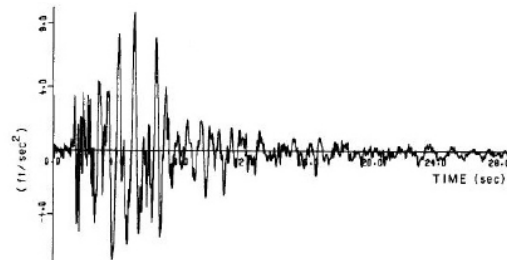
جدول ۵. نتایج صحت سنجی

Table 5. Validation results

پارامتر هندسی لوله			تنش محوری حداکثر (مگاپاسکال)		
t(mm)	D(cm)	D/t	مقاله [۱۹]	ANSYS	اختلاف (%)
۶	۱۳۱/۶	۲۱۹/۳	۳۴۷	۳۳۸/۴	۲/۵
۱۱/۱	۱۳۱/۶	۱۱۸/۳	۳۰۸	۳۰۱/۲	۲/۲
۱۷/۱	۱۳۱/۶	۷۷	۲۷۷	۲۷۲/۱	۱/۸

1 San Fernando Valley

قبل از انجام تحلیل‌های دینامیکی فرآینده جهت اطمینان از فرآیند مدل‌سازی، صحت‌سنجی انجام گرفته است. صحت‌سنجی بر اساس مقاله هیندی و نواک [۱۹] انجام یافته است. در این مقاله نتایج تحلیل عددی برای خط لوله با مشخصات زیر ارائه شده است: شعاع بیرونی لوله $0.685m$ ، طول لوله $548/6m$ ، عمق دفن (از سطح زمین تا مرکز لوله) سی برابر شعاع لوله، نسبت میرایی لوله برابر ۵ درصد برای همه مودها. سرعت موج برشی خاک برابر $68/6m/s$ ، چگالی جرمی خاک برابر $1605 kg/m^3$ و ضریب پواسون برابر 0.25 در نظر گرفته شده است. شرایط انتهایی لوله به صورت دو سر آزاد بوده است. تحریک لرزه‌ای که در مطالعه‌ی مورد استفاده قرار گرفته است عبارت است از مولفه‌ی S70E زلزله‌سان فراندو ولی^۱ که در سال ۱۹۷۱ در ایستگاه ۱۲۲ ثبت شده است. نمودار تاریخچه‌ی زمانی مربوط به جابه‌جایی و شتاب زلزله فوق در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴. نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌سان فراندو [۱۹]
Fig. 4. Acceleration time history of San Fernando earthquake

برای صحت‌سنجی، زاویه‌ی تحریک با لوله برابر صفر درجه (تحریک به موازات محور طولی لوله) و سه نسبت قطر به ضخامت مختلف ۲۱۹، ۱۱۸ و ۷۷ که به ترتیب نظیر ضخامت ۶، ۱۱/۱ و ۱۷/۱ میلی‌متر هستند، در نظر گرفته شد. تنش محوری حداکثر سه لوله مذکور از نرم افزار ANSYS V5.5 [۲۲] به دست آمده و با مطالعه‌ی هیندی و نواک [۱۹] مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود نتایج به دست آمده از نرم‌افزار انطباق خوبی با مطالعه‌ی مذکور دارد.

جدول ۶. انحراف استاندارد لگاریتمی مانده‌ها

Table 6. Logarithmic standard deviation of the residuals

σ (انحراف معیار)			IM
M3	M2	M1	
۱/۵۹	۱/۸۰	۱/۵۵	PGA
۱/۱۴	۱/۲۲	۰/۹	PGV
۱/۰۹	۱/۳۹	۱/۱۲	PGD
۱/۱۷	۱/۳۴	۱/۱۱	PGV ² /PGA
۱/۴۵	۱/۶۴	۱/۳۸	RMS _a
۱/۱۱	۱/۲۵	۰/۹۷	RMS _v
۱/۲۸	۱/۵۸	۱/۳۶	RMS _d
۱/۴	۱/۵۸	۱/۲۸	I _a
۱/۳۳	۱/۵۱	۱/۱۷	CAV
۱/۵۴	۱/۷۶	۱/۴۹	ASI
۱/۴۲	۱/۵۶	۱/۳۱	VSI
۱/۴۲	۱/۶۵	۱/۳۷	SMA
۱/۰۴	۱/۲۹	۰/۸۹	SMV
۱/۶	۱/۷۶	۱/۵۵	S _a
۱/۶۳	۱/۸۴	۱/۵۹	S _v
۱/۶۰	۱/۷۶	۱/۵۶	S _d
۱/۲۳	۱/۵۲	۱/۲۶	PGD ² /RMS _d
۱/۰۳	۱/۱۵	۰/۸	$\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$

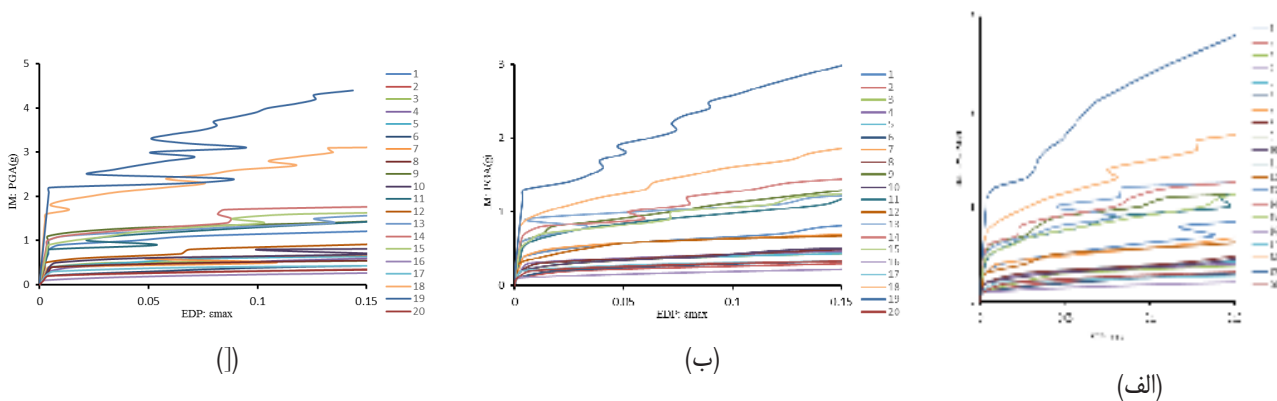
محدوده σ برای مدل M2 برابر است با ۱/۱۵ تا ۱/۸. معیارهای شدت $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$ ، PGV، RMS_v، SMV دارای کمترین مقدار انحراف استاندارد برای M2 می‌باشند که به ترتیب عبارتند از ۱/۱۵، ۱/۲۲، ۱/۲۵ و ۱/۲۹. جدول مذکور نشان می‌دهد که برای مدل M3 محدوده σ برابر با ۱/۰۳ تا ۱/۶۳ است. برای این مدل کمترین مقادیر پراکندگی برابر است با ۱/۰۳، ۱/۰۴، ۱/۰۹ و ۱/۱۱ که به ترتیب متعلق است به $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$ ، SMV، PGD، RMS_v.

بنابراین می‌توان گفت که در صورت استفاده از معیارهای شدت $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$ ، SMV و PGV برای لوله‌های مورد مطالعه در این مقاله، شاهد کم‌ترین پراکندگی در بین منحنی‌های IDA خواهیم بود. از جمله نتیجه دیگری که می‌توان با استفاده از جدول فوق به دست آورد این است که معیارهای شدت طیفی (S_d و S_a) در زمان تناوب اصلی خط لوله IM‌های ناکارایی هستند.

۷-۳- کفایت

کفایت همه IM‌های مورد مطالعه برای M1 تا M3 بر حسب مقادیر P-value نسبت به M و R در جدول ۷ آمده است. مطابق جدول در مورد مدل M1، کفایت PGV^2/PGA و RMS_d تنها نسبت به M خوب است. کفایت SMA، VSI، ASI، CAV، I_a، RMS_a، RMS_v، PGV، PGA، S_d، S_v، S_a و SMV $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$ تنها نسبت به R برای M1 بالا است. IM با کفایت نسبت به هر دوی M و R عبارت است از PGD.

با توجه به جدول مذکور دیده می‌شود که برای لوله M2 همه معیارهای شدت نسبت به هر دوی M و R از کفایت بسیار بالایی برخوردارند. در مورد M3، کفایت تنها نسبت به M بالا است. کفایت معیارهای شدت SMA، VSI، ASI، I_a، RMS_a، RMS_v، PGV، PGA و $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$ تنها نسبت به R برای لوله M3 بالاست.



شکل ۵. منحنی‌های IDA، الف) لوله M1، ب) لوله M2 و ج) لوله M3

Fig. 5. IDA curves: (a) M1 Model, (b) M2 Model, and (c) M3 Model

حوزه‌ی نزدیک است. بدین منظور سه لوله مدفون با ویژگی‌های مختلف خاک و لوله بر اساس ALA [۱۸] طراحی شد. این لوله‌ها تحت تحلیل دینامیکی فزاینده با استفاده از بیست رکورد زلزله حوزه نزدیک قرار گرفتند. شانزده معیار شدت انتخاب شدند و کارایی و کفایت آن‌ها با استفاده از تحلیل رگرسیون مورد بررسی قرار گرفت. از مطالعه حاضر می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

برای مدل‌های مطالعه شده در این مقاله معیارهای شدت $\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$ ، SMV و PGV کاراترین معیارهای شدت هستند. معیارهای شدت تغییرمکان، سرعت و شتاب طیفی در زمان تناوب اول خط لوله، معیارهای شدت ناکارایی هستند. PGD با کفایت‌ترین معیار شدت در بین سایر معیارهای شدت است.

برای این لوله معیارهای شدت $PGD, RMS_d, CAV, SMV, S_a, S_v, S_d$ نسبت به هر دوی M و R با کفایت هستند.

با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌شود که معیار شدت PGD برای همه لوله‌ها هم نسبت به M و هم نسبت به R با کفایت است. بنابراین می‌توان گفت که PGD با کفایت‌ترین معیار شدت در بین سایر معیارهای شدت در تحقیق حاضر است. یعنی در صورت استفاده از PGD به عنوان معیار شدت خطوط لوله فولادی مدفون که در معرض تحریک زلزله‌های حوزه نزدیک واقع هستند، می‌توان از اثرات بزرگی و فاصله زلزله در انتخاب رکوردهای زلزله و انجام تحلیل دینامیکی فزاینده صرف نظر کرد.

۸- نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه بررسی کارایی و کفایت معیارهای شدت مدنظر در ارزیابی پاسخ لرزه‌های خطوط لوله فولادی مدفون تحت زلزله‌های پالس‌گونه‌ی

جدول ۷. مقادیر P-value همه معیارهای شدت
Table 7. P-values of the all intensity measures

P-value						IM
M3		M2		M1		
R	M	R	M	R	M	
۰/۷۲۶	۰/۰۱۴	۰/۹۷۲	۰/۹۵۳	۰/۰۶۰۵	۰/۰۰۱	PGA
۰/۱۷۳	۰/۰۰۱	۰/۸۶۷	۰/۶۹۳	۰/۱۰۴	۰/۰۰۰	PGV
۰/۳۴۰	۰/۱۵۱	۰/۹۴۶	۰/۹۵۶	۰/۶۹۹	۰/۱۶۵	PGD
۰/۰۰۳	۰/۲۹۰	۰/۶۳۸	۰/۹۲۳	۰/۰۳۸	۰/۲۷۴	PGV ² /PGA
۰/۲۹۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹۴	۰/۸۶۳	۰/۳۴۲	۰/۰۰۰	RMS _a
۰/۳۵۰	۰/۰۰۰	۰/۹۹۹	۰/۶۰۰	۰/۷۲۲	۰/۰۰۰	RMS _v
۰/۱۲۴	۰/۹۰۱	۰/۶۵۹	۰/۹۰۶	۰/۰۰۹	۰/۸۸۴	RMS _d
۰/۳۷۱	۰/۰۱۵	۰/۹۴۱	۰/۹۶۸	۰/۲۳۱	۰/۰۰۲	I _a
۰/۶۹۳	۰/۱۷۳	۰/۹۶۹	۰/۹۲۲	۰/۴۶۱	۰/۰۳۲	CAV
۰/۵۴۲	۰/۰۱۹	۰/۹۴۹	۰/۹۹۷	۰/۴۱۰	۰/۰۰۱	ASI
۰/۳۹۸	۰/۰۲۹	۰/۹۴۵	۰/۸۲۵	۰/۲۶۲	۰/۰۰۵	VSI
۰/۱۰۷	۰/۰۰۲	۰/۹۳۴	۰/۹۸۴	۰/۰۸۹	۰/۰۰۰	SMA
۰/۱۲۵	۰/۰۷۸	۰/۹۷۹	۰/۹۱۶	۰/۱۱۷	۰/۰۲۹	SMV
۰/۷۶۸	۰/۱۲۳	۰/۹۶۰	۰/۹۷۹	۰/۳۸۰	۰/۰۰۳	S _a
۰/۶۰۰	۰/۰۸۶	۰/۹۴۵	۰/۹۳۷	۰/۲۳۴	۰/۰۰۶	S _v
۰/۷۶۷	۰/۱۲۳	۰/۹۶۱	۰/۹۷۸	۰/۳۷۷	۰/۰۰۳	S _d
۰/۰۰۱	۰/۰۲۸	۰/۹۵۰	۰/۹۰۸	۰/۰۰۳	۰/۰۲۰	PGD ² /RMS _d
۰/۲۳۳	۰/۰۱۰	۰/۹۲۹	۰/۸۲۸	۰/۲۹۵	۰/۰۰۲	$\sqrt{VSI}[\omega_1(PGD+RMS_d)]$

علائم یونانی

α	ضریب چسبندگی
γ	وزن واحد حجم خاک، N/mm^3
δ	زاویه اصطکاک بین لوله و خاک، درجه
σ_y	تنش تسلیم مصالح لوله، MPa
ε_0	کرنش تسلیم
φ	زاویه اصطکاک داخلی خاک، درجه

مراجع

- [1] N. Luco, P. Mai, C. Cornell, G. Beroza, Probabilistic seismic demand analysis, SMRF connection fractures, and near-source effects, (2002).
- [2] N. Shome, C.A. Cornell, P. Bazzurro, J.E. Carballo, Earthquakes, records, and nonlinear responses, Earthquake Spectra, 14(3) (1998) 469-500.
- [3] N. Shome, Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures, 1999.
- [4] N. Luco, C.A. Cornell, Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions, Earthquake Spectra, 23(2) (2007) 357-392.
- [5] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information, Earthquake engineering & structural dynamics, 34(13) (2005) 1573-1600.
- [6] P. Tothong, N. Luco, Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36(13) (2007) 1837.
- [7] S.S. Mehanny, A broad-range power-law form scalar-based seismic intensity measure, Engineering Structures, 31(7) (2009) 1354-1368.
- [8] M. Bianchini, P. Diotallevi, J. Baker, Prediction of inelastic structural response using an average of spectral accelerations, in: Proc. of the 10th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR09), Osaka, Japan, 2009, pp. 13-17.
- [9] F. Mollaioli, A. Lucchini, Y. Cheng, G. Monti, Intensity measures for the seismic response prediction of base-isolated buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 11(5) (2013) 1841-1866.
- [10] M. De Biasio, S. Grange, F. Dufour, F. Allain, I. Petre-Lazar, A simple and efficient intensity measure to account for nonlinear structural behavior, Earthquake Spectra, 30(4) (2014) 1403-1426.

معیارهای شدت SMV ، $VSI[\omega_1(PGD+RMS)_d]$ و \sqrt{PGV} علاوه بر اینکه کارا هستند، معیارهای شدت با کفایتی نیز محسوب می‌شوند. کفایت SMV بیشتر از $VSI[\omega_1(PGD+RMS)_d]$ و کفایت $VSI[\omega_1(PGD+RMS)_d]$ نیز بیشتر از PGV است. با در نظر گرفتن توأمان کارایی و کفایت می‌توان نتیجه گرفت که معیار شدت مناسب برای خطوط لوله فولادی مدفون پیوسته مطالعه شده در این تحقیق که در معرض زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک قرار دارند عبارت است از $VSI[\omega_1(PGD+RMS)_d]$ و سپس SMV . یعنی در صورت استفاده از معیارهای شدت فوق می‌توان مطمئن بود که اولاً پراکندگی کمتری در منحنی‌های IDA لوله‌های فولادی مدفون تحت زلزله‌ی حوزه نزدیک خواهیم داشت و ثانیاً از اثرات بزرگی و فاصله زلزله‌ها در انجام این تحلیل می‌توان صرف‌نظر کرد. نتیجه‌ی حاصل متفاوت از معیارهای شدت بهینه معرفی شده توسط شکیب و جهانگیری [۱۴] برای خطوط لوله تحت انتشار امواج حوزه دور است و همین مطلب مؤید ضرورت انجام تحقیق حاضر می‌باشد.

۹- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت سطح مقطع لوله، mm^2
C	چسبندگی خاک، KPa
D	قطر، mm
E	مدول الاستیسیته، MPa
F_y	تنش تسلیم لوله، MPa
f_s	اصطکاک لغزشی در واحد طول لوله، N/mm
F_u	تنش گسیختگی لوله، MPa
g	شتاب ثقل، m/s^2
H	عمق دفن، m
K_0	ضریب فشار سکون خاک
I	طول المان، m
M	بزرگی زلزله، ریشتر
N_{ch}	ضریب ظرفیت باربری افقی برای رس
N_{cv}	ضریب برکنش قائم رس
N_{qh}	ضریب ظرفیت باربری افقی برای ماسه
N_{qv}	ضریب برکنش قائم ماسه
R	فاصله سایت تا منبع، km
r	شعاع لوله، m
t	ضخامت، mm
T_p	پالس رکورد زلزله، ثانیه
V_s	سرعت موج برشی خاک، m/s

- [17] H.-S.A. Alfredo, H. Wilson, Probability concepts in engineering planning and design, John Wily and Sons, (1975).
- [18] A.L. Alliance, Guidelines for the design of buried steel pipe, in, American Society of Civil Engineers, 2001.
- [19] A. Hindy, M. Novak, Earthquake response of underground pipelines, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 7(5) (1979) 451-476.
- [20] A.-w. Liu, Y.-x. Hu, F.-x. Zhao, X.-j. Li, S. Takada, L. Zhao, An equivalent-boundary method for the shell analysis of buried pipelines under fault movement, Acta Seismologica Sinica, 17(1) (2004) 150-156.
- [21] M. Bruneau, C.-M. Uang, S.R. Sabelli, Ductile design of steel structures, McGraw Hill Professional, 2011.
- [22] A.U.s.M.R. ANSYS, 5.5, ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, (1998).
- [23] V. Jahangiri, H. Shakib, Seismic risk assessment of buried steel gas pipelines under seismic wave propagation based on fragility analysis, Bulletin of Earthquake Engineering, 16(3) (2018) 1571-1605.
- [24] SigmaPlot., SigmaPlot for Windows. Ver. 10, in, Systat Software Point Richmond, CA, 2006.
- [11] B. Mackie K. Stojadinovic, Seismic Demands for Performance-Based Design of Bridges, University of California, Berkeley, CA.
- [12] J.E. Padgett, R. DesRoches, Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridges, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37(8) (2008) 1157-1174.
- [13] B.A. Bradley, M. Cubrinovski, R.P. Dhakal, G.A. MacRae, Intensity measures for the seismic response of pile foundations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(6) (2009) 1046-1058.
- [14] H. Shakib, V. Jahangiri, Intensity measures for the assessment of the seismic response of buried steel pipelines, Bulletin of Earthquake Engineering, 14(4) (2016) 1265-1284.
- [15] C. Davis, J. Bardet, Seismic analysis of large-diameter flexible underground pipes, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 124(10) (1998) 1005-1015.
- [16] C.A. Cornell, F. Jalayer, R.O. Hamburger, D.A. Foutch, Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines, Journal of Structural Engineering, 128(4) (2002) 526-533.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Kiani, M. Torabi, S. M. Mirhosseini, Performance-Based Seismic Response of Continues Buried Steel Pipelines Under Near-Field Ground Motion Effects, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(4) (2019) 619-630.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13581.5444

