

معیار شدت مناسب برای ارزیابی خطوط لوله فولادی مدفون پیوسته در چهارچوب مهندسی زلزله عملکردی

حمزه شکیب^{۱*}، وحید جهانگیری^۲

۱. استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشجوی دکتری عمران- زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

shakib @modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۸/۱۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۲/۱۳]

چکیده - بررسی هم بستگی بین پارمترهای نیاز مهندسی و معیارهای شدت مختلف دارای اهمیت زیادی در مهندسی زلزله عملکردی برای تخمین نیاز لرزه ای سازه است. در این پژوهش نیاز لرزه ای خطوط لوله فولادی مدفون پیوسته با توجه به روشی مبتنی بر عملکرد بررسی شده است. تحلیل دینامیکی فزاینده روی دو لوله فولادی مدفون با قطر به ضخامت (D/t)، عمق دفن به قطر (H/D) و فشار داخلی متفاوت و نیز مشخصات خاک مختلف با استفاده از مجموعه ای از رکوردهای زمین لرزه حوزه دور انجام گرفته است. مدلسازی با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شده که در آن از المانی مبتنی بر تئوری تیر تیموشنکو برای مدل سازی لوله استفاده شده و برای مدلسازی خاک از فنرها و میراگرهای معادل استفاده شده است. کرنش فشاری محوری پیک در بحرانی ترین مقطع لوله به عنوان پارامتر نیاز مهندسی برای لوله فولادی مدفون پیوسته انتخاب شده و سپس شانزده معیار شدت زمین لرزه بالقوه در نظر گرفته شده اند. با استفاده از تحلیل رگرسیون، کارایی و کفایت این معیارهای شدت در برآورد پاسخ لرزه ای خطوط لوله فولادی پیوسته مدفون بررسی شده و مشخص شد که مقادیر پاسخ بیشینه (مانند PGV ، PGD ، PGV^2 / PGA و نیز معیارهای شدت طیفی در زمان تناوب اصلی خط لوله (یعنی $(S_d(T_1, 5\%))$ ، $(S_v(T_1, 5\%))$ و $(S_a(T_1, 5\%))$) معیارهای شدت ناکارایی است. در پایان معلوم شد که جذر میانگین مربعات جابه جایی (RMSd) معیار شدت بهینه برای خطوط لوله فولادی مدفون پیوسته است.

واژگان کلیدی: خط لوله مدفون پیوسته، معیار شدت، کارایی، کفایت، مهندسی زلزله عملکردی.

۱- مقدمه

برای انتخاب یک معیار شدت مناسب باید ملاحظات کافی در مورد کارایی^۱ [۳] و کفایت^۲ [۴] آن انجام شود. یک معیار شدت کارا منجر می شود به اینکه پراکندگی کمتری در پاسخ سازه داشته باشیم [۵]. انتخاب معیار شدت کارا تعداد تحلیل های لازم و رکوردهای زلزله مورد نیاز برای تخمین احتمال فراگذشت مقادیر پارامتر نیاز مهندسی به ازای معیار شدت معین را کاهش می دهد. یک معیار شدت با کفایت موجب می شود که پارامتر نیاز مهندسی مستقل از بزرگی زلزله (M) و فاصله منبع تا سایت (R) باشد [۵].

یکی از عناصر کلیدی در مهندسی زلزله عملکردی پیش بینی نیاز لرزه ای است [۱]. به علت نبود قطعیت های موجود در رفتار غیر خطی سازه ها و زمین لرزه ها از روش تحلیل نیاز لرزه ای احتمالاتی استفاده می شود. این روش برای ارزیابی فرکانس سالانه میانگین فراگذشت از یک مقدار مشخص پارامتر نیاز لرزه ای کاربرد دارد. از بین بردن عدم قطعیت ها در چهارچوب طراحی عملکردی با استفاده از معیار شدت انجام می گیرد. از معیارهای شدت، مانند شتاب بیشینه زمین و یا شتاب طیفی، برای مشخص کردن قدرت یک زمین لرزه استفاده می شود [۲].

1 Efficiency

2 Sufficiency

مطالعات قابل توجهی در مورد مشخص کردن معیارهای شدتی که برای پیش بینی پاسخ لرزه ای سازه ها، کارا و باکفایت هستند انجام شده است که در اینجا به پاره ای از آنها اشاره می شود. شوم و همکاران [۶] روی پاسخ غیر خطی یک قاب خمشی فولادی چهار دهانه پنج طبقه مطالعه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از شتاب طیفی در زمان تناوب الاستیک اصلی سازه $(S_a(T_1))$ ، معیار شدت کاراتر و با کفایت تری از شتاب بیشینه زمین^۱ است. مکی و استوجادینویچ [۷ و ۸] نتیجه گرفتند که مقادیر طیفی در زمان تناوب اصلی پل های بزرگراه ها، مثل شتاب، سرعت و تغییر مکان طیفی نتایج بهتری در مقایسه با مقادیر بیشینه زمین لرزه مثل شتاب، سرعت و تغییر مکان بیشینه زمین به دست می دهد. مطالعات آنها نشان داد که جابه جایی (الاستیک) طیفی کاراترین و با کفایت ترین معیار شدت برای این سازه ها است. نتایج کار گیوونال و همکاران [۹] نشان داد که $S_a(T_1)$ برای سازه تک درجه آزادی خیلی کاراتر از شتاب بیشینه زمین است. بیکر و کرنل [۲]، $[S_a(T_1), \varepsilon]$ را به عنوان معیار شدت برداری معرفی کردند که ε عبارت است از تفاضل لگاریتم طبیعی شتاب طیفی حاصل از رابطه کاهندگی و لگاریتم طبیعی شتاب طیفی حاصل از رکورد در تناوب اول تقسیم بر انحراف استاندارد لگاریتمی حاصل از رابطه کاهندگی. سازه ای که آنها در تحلیل استفاده کردند عبارت از یک ساختمان بتنی هفت طبقه با قاب های خمشی ساخته شده در دهه ۶۰ میلادی بود. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از این معیار شدت برداری تعداد فروریزش های سازه ای در مقایسه با استفاده از معیار شدت اسکالر کاهش می یابد. و این مطلب بیانگر بالاتر بودن کفایت این معیار شدت است. توتانگ و لوسو [۱۰] مطالعاتی را در مورد انتخاب معیار شدت مناسب برای سازه ها انجام دادند. آنها شانزده قاب خمشی تک دهانه، چند طبقه و گیردار در پایه را که دارای خواص سازه ای گوناگون بودند در نظر گرفتند. نتایج مطالعات نشان داد که استفاده از جابه جایی طیفی غیر الاستیک برای سازه هایی که اثر مود اول در آنها غالب است نسبت به شتاب طیفی الاستیک و نیز معیار شدت برداری $[S_a(T_1), \varepsilon]$ ارجح است. آنها نشان دادند که برای سازه هایی که اثر مدهای

بالاتر در آنها قابل توجه است حتی جابه جایی طیفی غیر الاستیک کافی نیست. برای این سازه ها یک معیار شدت پیشرفته ای که آثار مدهای بالاتر در آن لحاظ شده بود، به وسیله ی پژوهشگران گفته شده پیشنهاد داده شد. وامواتسیکوس و کرنل [۱۱] در مطالعات خود سه سازه را در نظر گرفتند: 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. نتایج نشان داد که برای ساختمان هایی که اثر مدهای بالاتر در آنها قابل چشم پوشی کردن است، شتاب طیفی در یک دوره تناوب بهینه که بزرگتر از دوره تناوب الاستیک معمول است کاراترین معیار شدت است. لوسو و کرنل [۵] چندین معیار شدت جدید معرفی کردند. سازه های مورد مطالعه آنها عبارت از سه قاب خمشی فولادی ۳، ۹ و ۲۰ طبقه بود که بر مبنای UBC94 طراحی شده بودند. در مطالعه آنها نشان داد که برای تمام سازه های بررسی شده، $S_a(T_1)$ به طور کلی ناکارا و بی کفایت (بر حسب بزرگی زلزله) است. بردلی و همکاران [۱۲] بر تعیین کارایی و کفایت معیارهای شدت در مدلسازی پاسخ لرزه ای پی های شمعی تمرکز کردند. نشان داده شد که شدت طیفی سرعت^۲ کاراترین و با کفایت ترین معیار شدت (هم نسبت به بزرگی و هم نسبت به فاصله) است. یانگ و همکاران [۱۳] بر رکوردهای حوزه نزدیک زلزله های چی چی و نورث ریچ متمرکز شدند و تحلیل های غیر خطی روی سازه های یک درجه آزادی دارای زمان تناوب کوتاه، متوسط و بلند انجام دادند. نتایج نشان داد که معیارهای شدت مبتنی بر شتاب، سرعت و جابه جایی به ترتیب برای سازه های با دوره تناوب کوتاه، متوسط و بلند بهتر عمل می کنند. کستیناکیس و همکاران [۱۴] همبستگی بین نوزده معیار شدت زمین لرزه را با خرابی چهار ساختمان بتن مسلح بررسی کردند. نشان داده شد که وقتی پاسخ سازه بر حسب نسبت دریافت بین طبقه ای حداکثر بیان شود به ترتیب معیارهای شدت $S_a(T_1)$ ، شدت طیفی سرعت، سرعت حداکثر زمین و شدت هوزنر^۳، هم بستگی بیشتری با وقوع خرابی دارند و بنابراین کاراتر هستند.

2 Velocity Spectrum Intensity (VSI)

3 Housner Intensity (HI)

1 Peak Ground Acceleration (PGA)

تعریف می‌شوند:

بیشینه نیروی محوری خاک در واحد طول لوله که می‌تواند به خاک منتقل شود به این صورت بیان می‌شود:

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

$$\alpha = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1}$$

که D قطر بیرونی لوله، C چسبندگی خاک اطراف لوله، H فاصله سطح خاک از مرکز لوله، $\bar{\gamma}$ وزن واحد حجم موثر خاک، K_0 ضریب فشار سکون خاک، α ضریب چسبندگی و δ زاویه اصطکاک بین جداره لوله و خاک است. جابه‌جایی Δ_t در T_u که در شکل (۲) نیز نشان داده شده است به ترتیب برابر ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌متر برای ماسه متراکم، ماسه سست و رس نرم مطابق پیشنهاد ALA [۱۵] است.

شکل (۲) فنرهای غیرخطی خاک

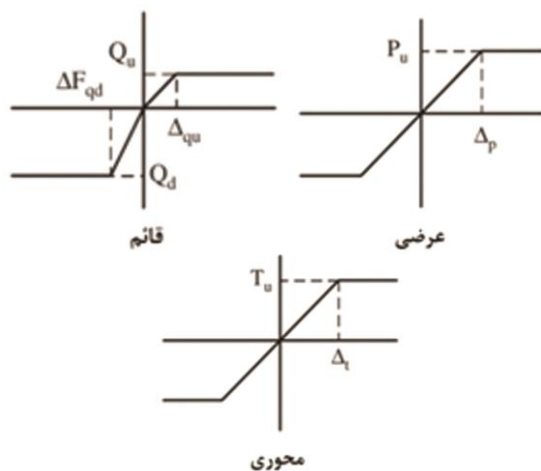


Fig 2. Nonlinear soil springs

حداکثر نیروی جانبی خاک در واحد طول لوله که می‌تواند به لوله منتقل شود به این صورت است

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

$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9 \quad (2)$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$$

که N_{ch} و N_{qh} ضریب ظرفیت باربری افقی به ترتیب برای رس و ماسه است و برحسب زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، نسبت عمق دفن به قطر لوله (H/D) و چندین پارامتر ثابت مطابق جدول (۱) تعیین می‌شوند.

شکل (۱) شکل شماتیک سیستم خاک-لوله و شرایط مرزی

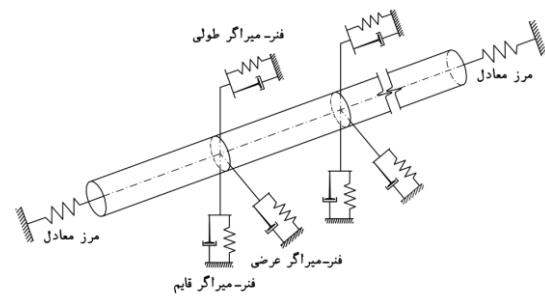


Fig.1. Soil-pipe system and boundary conditions

در این مقاله کارایی و کیفیت مجموعه‌ای از معیارهای شدت مورد نظر برای پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله فولادی مدفون بررسی می‌شود. تحلیل دینامیکی فزاینده^۱ برای دو لوله با مشخصات خاک و لوله متفاوت انجام می‌شود و پاسخ خطوط لوله به دست می‌آید. ابتدا یک پارامتر نیاز لرزه‌ای که دارای توانایی انعکاس پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله مدفون است، انتخاب می‌شود و در نهایت معیارهای شدت پیشنهادی بررسی شده و کیفیت و کارایی آنها در پیش‌بینی پارامتر نیاز مهندسی لوله مدفون ارزیابی می‌شود.

۲- مدل سازی لوله و خاک

مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی غیرخطی لوله مدفون به روش اجزاء محدود انجام شده است. لوله با استفاده از المان‌های سه بعدی دو گرهی مدل‌سازی 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، در جهت‌های محوری، عرضی و قائم از فنرهای دو خطی (الاستو پلاستیک کامل)، که بیانگر سختی خاک است [۱۵]، و نیز میراگرهای معادل که بیانگر میرایی خاک است استفاده شده است. شکل شماتیک سیستم خاک-لوله و شرایط مرزی در شکل (۱) آورده شده است.

پارامترهایی مثل نیروی حداکثر فنر، خاک و جابه‌جایی نسبی، همان‌گونه که در شکل (۲) دیده می‌شود، برای تعریف فنرهای غیرخطی گسسته خاک لازم است. این پارامترها بر مبنای دستورالعمل ALA [۱۵] و به شرح زیر

جدول (۱) پارامترهای مورد نیاز برای تخمین N_{ch} و N_{qh} [۱۵]

پارامتر	ϕ (°)	x	a	b	C	d	e
N_{ch}	۰	H/D	۶/۷۵۲	۰/۰۶۵	-۱۱/۰۶۳	۷/۱۱۹	-
N_{qh}	۲۰	H/D	۲/۳۹۹	۰/۴۳۰	-۰/۰۳	$-۱/۰۵۹ \times 10^{-۳}$	$-۱/۷۵۴ \times 10^{-۵}$
N_{qh}	۲۵	H/D	۳/۳۳۲	۰/۸۳۹	-۰/۰۹	$۵/۶۰۶ \times 10^{-۳}$	$-۱/۳۱۹ \times 10^{-۴}$
N_{qh}	۳۰	H/D	۴/۵۴۶	۱/۲۳۴	-۰/۰۸۹	$۴/۲۷۵ \times 10^{-۳}$	$-۹/۱۵۹ \times 10^{-۵}$
N_{qh}	۳۵	H/D	۶/۸۱۶	۲/۰۱۹	-۰/۱۴۶	$۷/۶۵ \times 10^{-۳}$	$-۱/۶۸۳ \times 10^{-۴}$
N_{qh}	۴۰	H/D	۱۰/۹۵۹	۱/۷۸۳	۰/۰۴۵	$-۵/۴۲۵ \times 10^{-۳}$	$-۱/۱۵۳ \times 10^{-۴}$
N_{qh}	۴۵	H/D	۱۷/۶۵۸	۳/۳۰۹	۰/۰۴۸	$-۶/۴۴۳ \times 10^{-۳}$	$-۱/۲۹۹ \times 10^{-۴}$

Table 1. The required parameters for calculation of N_{ch} and N_{qh}

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

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)] \{ \exp[\pi \tan(\phi + 0.001)] \tan^2(45 + \frac{\phi + 0.001}{2}) - 1 \} \quad (۵)$$

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

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

که N_c ، N_q و N_γ ضرایب ظرفیت باربری هستند و $\bar{\gamma}$ وزن واحد حجم کل خاک است. جابه‌جایی Δ_{qd} در نیروی Q_d نشان داده شده در شکل (۲) برابر 0.1D و 0.2D به ترتیب برای خاک‌های دانه‌ای و ماسه‌ای پیشنهاد شده است [۱۵].

شکل (۳) تغییرات ضرایب میرایی بی‌بعد خاک با h/r [۱۶]

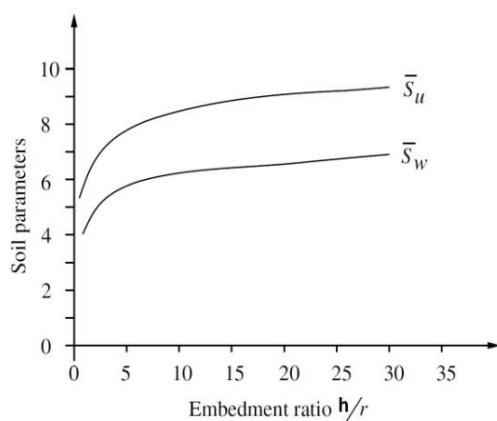


Fig. 3 Variation of dimensionless soil damping parameters with h/r

جابه‌جایی Δ_p در نیروی P_u که در شکل (۲) نشان داده شده به وسیله‌ی رابطه (۳) بیان می‌شود

$$\Delta_p = 0.04(H + \frac{D}{2}) \leq 0.10D \leq 0.15D \quad (۳)$$

معادلات استفاده شده برای به دست آوردن نیروی فنر رو به بالای خاک در واحد طول لوله به این صورت است

$$Q_u = N_{cv} cD + N_{qv} \bar{\gamma} HD$$

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

$$N_{qv} = (\frac{\phi H}{44D}) \leq N_q \quad (۴)$$

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

که N_{cv} و N_{qv} به ترتیب ضرایب برکنش قائم رس و ماسه است. جابه‌جایی q_u نظیر نیروی Q_u نشان داده شده در شکل (۲) برابر 0.01H و 0.02H به ترتیب برای ماسه متراکم و سست و 0.1H و 0.2H به ترتیب برای رس نرم و سفت پیشنهاد شده است [۱۵].

نیروی فنر قائم تکیه‌گاهی (رو به پایین) خاک در واحد طول لوله به وسیله‌ی روابط زیر بیان می‌شود

محوری ΔL این فنرها به صورت زیر بیان می‌شود

$$F(\Delta L) = \begin{cases} \sqrt{\frac{3EAf_s}{2} U_0^{-\frac{1}{6}} \Delta L^{\frac{2}{3}}, 0 \leq \Delta L \leq U_0} \\ \sqrt{2EAf_s(\Delta L - \frac{1}{4}U_0)}, U_0 \leq \Delta L \leq \frac{\sigma_y^2 A}{2Ef_s} + \frac{U_0}{4} \end{cases} \quad (7)$$

که E مدول الاستیسیته لوله، A مساحت سطح مقطع لوله، σ_y تنش تسلیم مصالح لوله، f_s اصطکاک لغزشی بر واحد طول لوله (حداکثر نیروی خاک بر واحد طول لوله که می‌تواند به لوله منتقل شود) است [۱۷].

۳- زمین لرزه‌ها

در این مطالعه، مجموعه‌ای از بیست رکورد زلزله که در جدول (۲) فهرست شده است بر اساس نزدیک ترین فاصله تا سطح گسیختگی، بزرگی زلزله و نوع خاک انتخاب شده است. زمین لرزه‌های انتخابی دارای بزرگی در محدوده ۶/۳ تا ۷/۵ ریشتر و فاصله در محدوده ۲۱ تا ۹۶ کیلومتر است و روی خاک نوع ۳ (بر اساس استاندارد ۲۸۰۰) واقع شده‌اند. به عنوان نمونه شتاب‌نگاشت، طیف شتاب، دامنه فوریه و طیف توان زلزله Friuli در شکل (۴) آورده شده است. هر یک از این رکوردها به شدت‌های مختلف مقیاس شده‌اند و به عنوان تحریک ورودی در تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شدند.

۴- روش بررسی کارایی و کفایت

نیاز لرزه ای را می‌توان به شکل توانی نشان داد [۱۸]

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

که تبدیل می‌شود به

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

این تبدیل امکان تخمین ثابت‌های a و b را با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی در فضای لگاریتمی فراهم می‌سازد. از این رو کارایی با استفاده از تحلیل رگرسیون لگاریتم طبیعی مقادیر پارامتر نیاز مهندسی ($\ln EDP$) روی لگاریتم طبیعی مقادیر معیار شدت نظیر ($\ln IM$) انجام می‌شود. در این تحلیل رگرسیون از تمامی داده‌های (EDP, IM) حاصل از همه رکوردهای استفاده شده در تحلیل استفاده می‌شود.

شکل (۳) ضرایب لازم برای استفاده در میراگرهای معادل خاک را برای جهت‌های طولی و عرضی لوله مدفون نشان می‌دهد. بعد از به دست آوردن ضرایب یاد شده از شکل (۳)، ضرایب میرایی با استفاده از روابط زیر مورد محاسبه قرار می‌گیرند:

$$c_{sl} = G \bar{S}_u \frac{rl}{V_s}, c_{sa} = G \bar{S}_w \frac{rl}{V_s} \quad (6)$$

که l طول المان، r شعاع سطح مقطع لوله، h عمق دفن و V_s سرعت موج برشی خاک است.

هنگام مدل‌سازی، هر گره مدل به سه فنر-میراگر در سه جهت مختلف متصل شد. ثوابت فنرها و میراگرها در تراز خط مرکزی لوله مورد محاسبه قرار گرفتند و به صورت یکنواخت در بین تمام گره‌های لوله توزیع شدند.

طراحی لوله مدفون بر اساس ALA [۱۵] انجام شده است. بعد از انتخاب قطر لوله و فشار داخل آن (بر اساس عملکرد مورد انتظار از خط لوله) ضخامت لوله محاسبه می‌شود. خط لوله مدفون تمایل به بیضوی شدن تحت بار قائم زمین دارد. ناشی از این بیضوی شدن تنش‌هایی در جداره لوله تولید می‌شود [۱۵]. لوله‌های انتخاب شده برای این اثر نیز کنترل شدند. در ALA ضوابط مربوط به انتشار امواج لرزه‌ای براساس کرنش محوری طولی، یعنی کرنش موازی محور لوله که از کرنش زمین ناشی می‌شود، ارائه شده است [۱۵]. لوله‌های استفاده شده در تحلیل برای آثار انتشار امواج لرزه‌ای نیز طراحی شدند. در نهایت دو لوله مدفون با نسبت قطر به ضخامت (D/t) و عمق دفن به قطر (H/D) مختلف به عنوان مدل‌های عددی در تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شدند.

در این مطالعه روش مرز معادل [۱۷] به عنوان شرایط مرزی دو انتهای لوله مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش فرض می‌شود که جابه‌جایی‌های نسبی بین خاک و لوله در مرزها تنها در جهت محوری و به علت اصطکاک خاک و لوله در آن جهت است. بنابراین مرزها می‌توانند به عنوان المان فنر غیر خطی که به دو سر مدل اعمال می‌شوند، مدل‌سازی شوند. رابطه بین نیروی محوری F و تغییر طول

جدول (۲) مجموعه بیست رکورد زلزله مورد استفاده

ردیف	رخداد	بزرگی	R(km)	PGA(g)	Vs (m/s)
۱	Borrego Mtn, 1968 (117 El Centro Array #9)	۶/۸	۴۶	۰/۱۳	۲۱۳
۲	Friuli, 1976 (Codroipo)	۶/۵	۳۳	۰/۰۹	۲۷۴
۳	Imperial Valley, 1979 (Delta)	۶/۵	۲۲	۰/۳۵	۲۷۴
۴	Kobe, 1995 (OSAJ)	۶/۹	۲۱	۰/۰۸	۲۵۶
۵	Kobe, 1995 (Kakogawa)	۶/۹	۲۲	۰/۳۴	۳۱۲
۶	Kocaeli, 1990 (Izmit)	۷/۵	۳۱	۰/۱۴	۲۷۴
۷	Landers, 1992 (Palm Springs Airport)	۷/۳	۳۶	۰/۰۹	۲۰۷
۸	Landers, 1992 (Riverside Airport)	۷/۳	۹۶	۰/۰۴	۳۷۱
۹	Landers, 1992 (Boron Fire Station)	۷/۳	۹۰	۰/۱۲	۳۵۴
۱۰	Loma Prieta, 1989 (APEEL 2E Hayward Muir Sch)	۶/۹	۵۳	۰/۱۷	۲۷۱
۱۱	Loma Prieta, 1989 (Emeryville - 6363 Christie)	۶/۹	۷۷	۰/۲۶	۱۹۹
۱۲	Loma Prieta, 1989 (Palo Alto - 1900 Embarc.)	۶/۹	۳۱	۰/۲۱	۲۹۵
۱۳	San Fernando, 1971 (LA - Hollywood Stor FF)	۶/۶	۲۳	۰/۲۱	۳۱۶
۱۴	San Fernando, 1971 (Colton - So Cal Edison)	۶/۶	۹۶	۰/۰۴	۳۰۲
۱۵	Spitak, 1988 (Gukasian)	۶/۸	۲۴	۰/۲۰	۲۷۴
۱۶	Coalinga, 1983 (Parkfield - Gold Hill 2E)	۶/۴	۳۳	۰/۰۷	۳۳۸
۱۷	Coalinga, 1983 (Parkfield - Cholame 5W)	۶/۴	۴۹	۰/۱۵	۲۳۷
۱۸	Irpinia, 1980 (Boovino)	۶/۴	۴۶	۰/۰۵	۳۵۶
۱۹	Victoria, 1980 (SAHOP Casa Flores)	۶/۳	۳۹	۰/۱۰	۲۶۰
۲۰	Superstn Hills(B), 1987, 5061 Calipatria Fire Station	۶/۷	۲۸	۰/۲۵	۲۰۶

Table 2 The suite of the twenty ground motion records

یک معیار شدت معین انجام می‌شود. کفایت با استفاده از اهمیت آماری^۱ خط برازش مانده‌های حاصل از تحلیل رگرسیون بین پارامتر نیاز مهندسی و M یا R تعیین می‌شود. در این تحلیل رگرسیون از تمامی داده‌های حاصل از همه رکوردهای استفاده شده در تحلیل استفاده می‌شود. برای این منظور، مقدار P-value حاصل از F-test به عنوان معیار کمی اهمیت آماری تخمین رگرسیون استفاده می‌شود.

کارایی بر حسب پراکندگی مانده‌ها مشخص می‌شود. پراکندگی کمتر نسبت به خط برازش رگرسیون (σ) برای یک معیار شدت معین نشانگر کاراتر بودن آن در بین سایر معیارهای شدت است. مانده عبارت است از اختلاف بین مقادیر پارامتر نیاز مهندسی به دست آمده از تحلیل دینامیکی فزاینده و مقادیر پارامتر نیاز مهندسی پیش بینی شده از خط برازش رگرسیون. فرآیند تعیین کفایت معیار شدت با استفاده از تحلیل رگرسیون تک پارامتری کرنش محوری فشاری حداکثر روی M یا R برای

1 Statistical Significance

مهندسی استفاده می‌شود که از نوع پارامتر نیاز مهندسی کلی است. به علت اینکه رابطه بین گسیختگی موضعی و پارامترهای نیاز مهندسی کلی ممکن است مورد به مورد متفاوت باشد و به علاوه پارامترهای نیاز مهندسی موضعی پاسخ سازه را دقیق‌تر می‌تواند بیان کند، استفاده از پارامترهای نیاز مهندسی موضعی (مثل تنش و کرنش مصالح) برای لوله‌های مدفون در این مطالعه ترجیح داده شده است. در زمین لرزه‌های قوی تغییر شکل‌های غیرالاستیک بزرگی به خط لوله تحمیل می‌شود. از این روی، بیان پاسخ لرزه ای خط لوله بر حسب کرنش به جای تنش بهتر به نظر می‌رسد.

مدهای گسیختگی معمول خطوط لوله مدفون پیوسته عبارتند از کماتش خط لوله ناشی از کرنش‌های فشاری و یا گسیختگی کششی [۱۵]. کرنش‌های فشاری که موجب کماتش می‌شوند خیلی کوچک‌تر از کرنش‌های کششی است که باعث گسیختگی کششی می‌گردند. از این رو به نظر می‌رسد که کرنش محوری فشاری بیشینه در بحرانی ترین مقطع لوله (که از این به بعد با ϵ_{max} نشان داده خواهد شد) آشکارترین گزینه برای استفاده به عنوان پارامتر نیاز مهندسی لوله مدفون است، به ویژه که مستقیماً با وقوع خرابی لوله در ارتباط است.

۶- معیارهای شدت

بررسی معیارهای شدت^۲ مختلف برای تعیین معیار شدت بهینه برای تخمین پاسخ خطوط لوله مدفون به تحریک زلزله، ضروری است. در ادبیات فنی حداقل هفت معیار شدت در مطالعات مربوط به توابع شکنندگی خطوط لوله استفاده شده است [۲۰]. این معیارهای شدت عبارتند از شتاب بیشینه زمین (PGA)، سرعت بیشینه زمین (PGV)، جابه‌جایی بیشینه زمین (PGD)، شدت آریاس (I_a)، شتاب طیفی (S_a)، شدت طیفی سرعت (VSI) و پارامتر ترکیبی PGV^2/PGA . در این مطالعه ۱۶ معیار شدت مختلف که شامل معیارهای شدت گفته شده نیز می‌شود به عنوان معیارهای شدت بالقوه در نظر گرفته شده و در جدول (۳) فهرست شده‌اند. معانی معیارهای شدت مورد استفاده را می‌توان در کار ریدل [۲۱] یافت.

شکل (۴) زلزله Friuli, 1976 (Codroipo): الف- شتاب‌نگاشت ب-

طیف شتاب ج- دامنه فوریه د- طیف توان

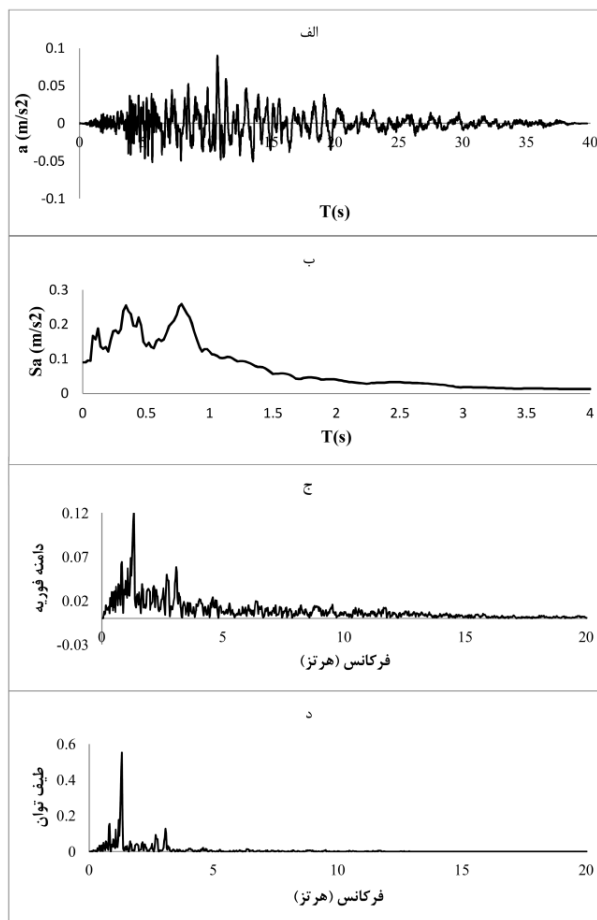


Fig 4. Friuli, 1976 (Codroipo) earthquake: a- Accelerogram b- Spectral acceleration c- Fourier amplitude d- Power spectrum

معیارهای شدتی که به اهمیت آماری بالا منجر می‌شوند (مقادیر کم P-value، کمتر از حدود 0.05) به عنوان معیارهای شدت بی کفایت تلقی می‌شوند و معیارهای شدت با مقادیر P-value بالا به عنوان با کفایت‌ترین معیارهای شدت محسوب می‌شوند. [۱۹]

۵- انتخاب پارامتر نیاز مهندسی مناسب برای خطوط لوله مدفون

پارامترهای نیاز مهندسی^۱ معمولاً به دو دسته کلی و موضعی تقسیم می‌شوند. در ارزیابی مبتنی بر عملکرد سازه‌ها، به طور معمول دریافت بین طبقه‌ای حداکثر به عنوان پارامتر نیاز

2 Intensity Measure (IM)

1 Engineering Demand Parameter (EDP)

جدول (۳) معیارهای شدت استفاده شده در تحلیل

معیار شدت (IM)	ردیف	معیار شدت (IM)	ردیف
سرعت مطلق تجمعی، CAV	۹	PGA، شتاب بیشینه زمین،	۱
شدت شتاب طیفی، ASI	۱۰	سرعت بیشینه زمین، PGV	۲
شدت سرعت طیفی، VSI	۱۱	جابه‌جایی بیشینه زمین، PGD	۳
بیشینه شتاب پایدار، SMA	۱۲	PGV ² /PGA	۴
بیشینه سرعت پایدار، SMV	۱۳	جذر میانگین مربعات شتاب، RMSa	۵
شتاب طیفی، Sa(T ₁ , 5%)	۱۴	جذر میانگین مربعات سرعت، RMSv	۶
سرعت طیفی، Sv(T ₁ , 5%)	۱۵	جذر میانگین مربعات جابه‌جایی، RMSd	۷
جابه‌جایی طیفی، Sd(T ₁ , 5%)	۱۶	شدت آریاس، Ia	۸

Table 3 Intensity measures used in the analyses

جدول (۴) مشخصات مدل‌های در نظر گرفته شده در تحلیل

مدل		پارامتر
M ₂	M ₁	
۴۰۶	۶۱۰	D(mm)
۷/۱	۶/۴	t(mm)
۵۷	۹۵	D/t
۱/۱	۱/۵	H(m)
۳/۷	۲/۵	H/D
۲۵۰	۷۵۰	P(psi)
۰	۴۰	Φ(°)
۱۵	۰	C (Kpa)
۱۶۰۰	۲۰۰۰	γ(kg/m ³)
۱۲۰	۱۵۰	G(Mpa)
۲۷۵	۲۷۵	Vs(m/s)
۴۴۹۰۳۶	۶۸۰۵۳۱	CsI(Ns/m ²)
۳۲۹۶۷۲	۴۹۹۰۵۶	Csa(Ns/m ²)

Table 4 The models considered in the analysis

این لوله‌ها تحت تحلیل دینامیکی فزاینده در نرم افزار ANSYS V5.5 [۲۳] قرار گرفتند. نمایش گرافیکی مش‌بندی مدل لوله M1 در نرم افزار بالا در شکل (۶) آمده است. از بیست رکورد زلزله حوزه دور با گام‌های 0.1g برای تحلیل IDA استفاده شد. ابتدا رکوردهای زلزله به PGA برابر 1g مقیاس شدند و سپس در هر مرحله ضریب ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و... آنها برای تحلیل دینامیکی استفاده شد. تحلیل‌های IDA تا رسیدن به کرنش فشاری محوری حداکثر برابر 15% در لوله انجام شده است.

۲- مطالعات عددی

در این پژوهش دو لوله فولادی API 5L Grade X65، که معمولاً در صنایع نفت و گاز استفاده می‌شود، و مشخصاتشان در جدول (۴) با M1 و M2 ارائه شده است بررسی شدند که P فشار داخل لوله است. همان‌گونه که در بخش مدل سازی لوله و خاک توضیح داده شد ضخامت هر یک از لوله‌ها با استفاده از ضوابط طراحی موجود در ALA [۱۵] به دست آمد. در مقالات گفته شده است که بیشتر خطوط لوله در عمق ۱ تا ۲ متر دفن می‌شوند [۲۲]؛ با مراجعه به جدول (۴) دیده می‌شود که عمق‌های دفن انتخابی در محدوده بالا قرار دارد.

در این پژوهش از دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی استفاده شده است. از آنجایی که رکوردهای مورد استفاده در تحلیل IDA انجام گرفته در این مطالعه روی خاک نوع ۳ ثبت شده اند، پس

1Sustained Maximum Acceleration

استخراج شد. منحنی‌های معیار شدت- پارامتر نیاز مهندسی حاصل از تحلیل IDA برای مدل M1 به عنوان نمونه در شکل (۷) آمده است. سپس با استفاده روش مبتنی بر تحلیل رگرسیون که به تفصیل در بخش (۴) توضیح داده شد کفایت و کارایی شانزده معیار شدت بالقوه بررسی شد.

شکل (۶) مدل M1 ساخته شده در نرم افزار ANSYS

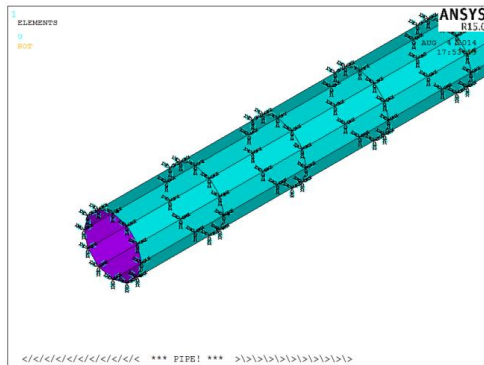


Fig 6. The M1 model representation in ANSYS

شکل (۵) نمودار تنش کرنش فولاد، استفاده شده در تحلیل

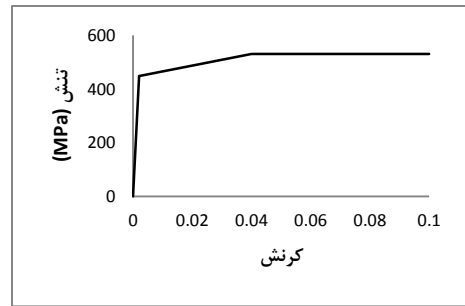


Fig 5. Stress-Strain Curve for Steel

اگر قبل از رسیدن به کرنش 15% تحلیل دچار مشکل عدم همگرایی می‌شد، با ریز کردن گام‌های اعمال بار تا مرتبه $1e-6$ سعی شده است که این عدم همگرایی مرتفع شود، اگر با یک میلیون برابر ریز کردن گام‌های اعمال بار مشکل همگرایی حل نمی‌شد نقطه مذکور به عنوان ناپایداری کلی تلقی شده و از آن نقطه به بعد منحنی به صورت افقی رسم شده است. بعد از انجام IDA مقادیر پارامتر نیاز مهندسی از نتایج تحلیل‌ها

شکل (۷) منحنی‌های IDA برای مدل M1

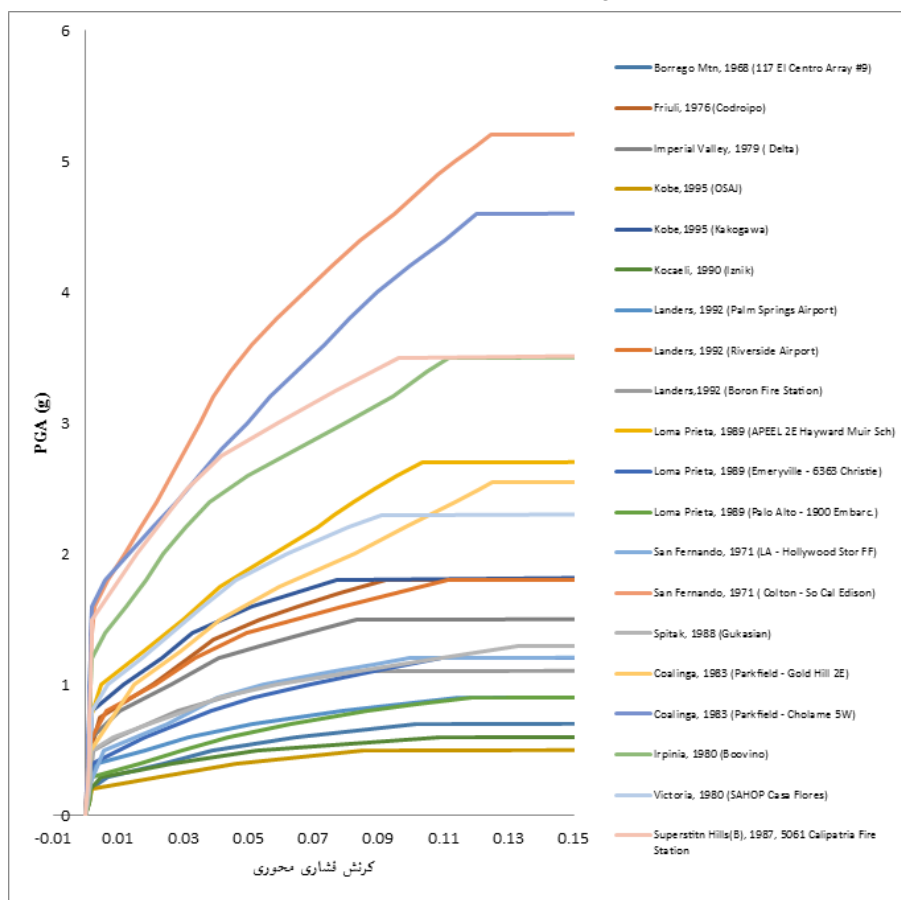


Fig 7. IDA curves of M1 model

جدول (۵) مشخصات فنرهای غیر خطی خاک استفاده شده در مدلسازی

جابه‌جایی نسبی لوله و خاک نظیر بیشینه نیروی وارد از خاک بر لوله (mm)				سختی اولیه در واحد طول لوله (N/mm ²)				مدل
جهت قائم		جهت محوری	جهت عرضی	جهت قائم		جهت محوری	جهت عرضی	
به سمت بالا	به سمت پایین			به سمت بالا	به سمت پایین			
۱۵	۶۱	۳	۷۲/۲	۴۰/۹۱	۱۳۰/۳۲	۲۶/۹۴	M1	
۸۱/۲	۸۱/۲	۱۰	۴۰/۶	۳۸/۵۷	۳۳	۳۸/۱۴	M2	

Table 5 Specifications of Non-linear soil springs used in modeling

۸- تفسیر و تشریح نتایج

نتایج تحلیل رگرسیون و انحراف معیارهای محاسبه شده برای همه معیارهای شدت برای مدل‌های M1 و M2، به دست آمده از همه رکوردهای استفاده شده در تحلیل، در جدول (۶) آمده است.

با توجه به جدول (۶) دیده می‌شود که مقادیر σ برای SMV، VSI و RMS_v برای مدل M1 به ترتیب برابر با ۰/۸۳۶، ۰/۸۶۸ و ۰/۸۳۸ و برای مدل M2 به ترتیب برابر با ۰/۶۷۹، ۰/۶۹۶ و ۰/۶۹۶ است. از این روی می‌توان نتیجه گرفت که برای مدل‌های بررسی شده در این پژوهش معیارهای شدت فوق‌الذکر کاراترین معیارهای شدت است. نتایج قابل اشاره دیگری را می‌توان با استفاده از جدول فوق به دست آورد. از جمله این که مقادیر پاسخ پیک (مثل PGA، PGV، PGD و PGV^2/PGA) معیارهای شدت ناکارایی است. و به طور مشابه دیده می‌شود که معیارهای شدت طیفی در زمان تناوب اصلی خط لوله (یعنی $S_a(T_1, 5\%)$ ، $S_v(T_1, 5\%)$ و $S_d(T_1, 5\%)$) تمایل کمتری برای همبستگی با کرنش فشاری محوری بیشینه لوله دارند.

مقادیر P-value همه معیارهای شدت مورد بررسی برای هر دو مدل M1 و M2، به دست آمده از همه رکوردهای مورد استفاده در تحلیل، در جدول (۷) آمده است. همان‌گونه که از جدول مزبور دیده می‌شود مقادیر P-value معیار شدت RMS_d برای M و R به ترتیب برای مدل M1 برابر ۰/۱۵۵ و ۰/۲۵۱ و برای مدل M2 به ترتیب برابر ۰/۲۶۹ و ۰/۰۹۲ است.

از این روی می‌توان نتیجه گرفت که برای مدل‌های بررسی شده در این مطالعه RMS_d با کفایت‌ترین معیار شدت در بین

همه IM ها است. همچنین دیده می‌شود که مقادیر p-value معیار شدت S_v برای M و R برای مدل M1 به ترتیب برابر ۰/۱۹۹ و ۰/۲۰۸ و برای مدل M2 به ترتیب برابر ۰/۰۰۳ و ۰/۱۹۳ است. از این روی می‌توان گفت که سرعت طیفی برای مدل M1 هم نسبت به M و هم نسبت به R و برای مدل M2 فقط نسبت به R با کفایت است.

جدول (۶) نتایج تحلیل رگرسیون کارایی معیارهای شدت

σ (انحراف معیار)		IM
M ₂	M ₁	
۰/۸۶۸	۱/۱۵۶	PGA
۰/۸۷۶	۱/۰۶۳	PGV
۰/۸۵۹	۰/۹۳۸	PGD
۱/۲۱۳	۱/۳۹۳	PGV^2/PGA
۰/۹۶۱	۱/۲۴۳	RMS_a
۰/۶۹۶	۰/۸۳۸	RMS_v
۰/۹۵۷	۱/۰۹	RMS_d
۰/۸۴۲	۱/۱۰۹	I_a
۰/۸۶۲	۱/۰۹۶	CAV
۰/۹۴۱	۱/۲۳۶	ASI
۰/۶۹۶	۰/۸۶۸	VSI
۰/۸۸۵	۱/۱۶۸	SMA
۰/۶۷۹	۰/۸۳۶	SMV
۰/۸۷۶	۱/۱۴۱	S_a
۱/۱۳۹	۱/۳۱۴	S_v
۰/۸۷۶	۱/۱۴۱	S_d

Table 6. Regression analysis results for the efficiency of IMs

جدول (۷) مقادیر P-value همه معیارهای شدت

P-value				IM
M2		M1		
R	M	R	M	
۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	PGA
۰/۹۲۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	PGV
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰	PGD
۰/۰۰۱	۰/۰۲۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱۹	PGV^2/PGA
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	RMS_a
۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	RMS_v
۰/۰۹۲	۰/۲۶۹	۰/۲۵۱	۰/۱۵۵	RMS_d
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۴۸	I_a
۰/۱۹۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۵	CAV
۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	ASI
۰/۶۱۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	VSI
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	SMA
۰/۱۱۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	SMV
۰/۰۵۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	S_a
۰/۱۹۳	۰/۰۰۳	۰/۲۰۸	۰/۱۹۹	S_v
۰/۰۳۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	S_d

Table 7 P-values of all IMs

شدت مبتنی بر سرعت مثل شدت طیفی سرعت (VSI)، بیشینه سرعت تحمل شده (SMV) و جذر میانگین مربعات سرعت (RMSv) کاراترین معیار شدت است.

• مقادیر پاسخ پیک (مثل PGA, PGV, PGD و PGV^2/PGA) معیارهای شدت ناکارایی است.

• معیارهای شدت طیفی در زمان تناوب اول خط لوله (یعنی $S_d(T_1, 5\%)$ ، $S_v(T_1, 5\%)$ و $S_a(T_1, 5\%)$) تمایل کمتری برای همبستگی با کرنش فشاری محوری حداکثر لوله دارند.

• شدت طیفی سرعت (VSI)، حداکثر سرعت تحمل شده (SMV) و جذر میانگین مربعات سرعت (RMSv) بر خلاف کارایی خوبشان، معیارهای شدت بی کفایتی است.

• جذر میانگین مربعات جابه‌جایی (RMSd) با کفایت ترین معیار شدت است اگر چه از نظر کارایی متوسط است.

• سرعت طیفی در تناوب اول را می‌توان معیار شدت با کفایتی به حساب آورد ولی از نظر کارایی وضعیت نامطلوبی دارد.

• با توجه به هر دو مفهوم کارایی و کفایت می‌توان نتیجه گرفت که معیار شدت بهینه برای خطوط لوله فولادی مدفون پیوسته مطالعه شده در این پژوهش عبارت است از جذر میانگین مربعات جابه‌جایی (RMSd).

۹- نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه بررسی خطوط لوله مدفون در چهار چوب مهندسی زلزله عملکردی است. یکی از گام‌های مهم در مهندسی زلزله عملکردی انتخاب معیار شدت بهینه است. از این رو در این مطالعه کارایی و کفایت معیارهای شدت مدنظر در ارزیابی پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله فولادی مدفون پیوسته مورد بررسی قرار گرفت. دو لوله مدفون با خصوصیات متفاوت خاک و لوله طراحی شد. این لوله‌ها تحت تحلیل دینامیکی فزاینده با استفاده از ده رکورد زلزله حوزه دور قرار گرفتند. شانزده معیار شدت بالقوه محتمل انتخاب شدند و کارایی و کفایت این معیارهای شدت با استفاده از تحلیل رگرسیون بررسی شد. نتایج زیر را می‌توان از این مطالعه به دست آورد:

• برای مدل‌های در نظر گرفته شده در این مطالعه، معیارهای

References

۱۰- مراجع

- [۱] Moehle J, Deierlein GG. A framework methodology for performance-based earthquake engineering. Proceedings of the 13th World conference on earthquake engineering 2004. p. 3812-4.
- [۲] Baker JW, Allin Cornell C. A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2005;34:1193-217.
- [۳] Luco N. Probabilistic seismic demand analysis, SMRF connection fractures, and near-source effects, Ph.D. Thesis. Dept. of Civil and Environmental Eng., Stanford University, California 2002.
- [۴] Shome N, Cornell C.A. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures. Reliability of Marine Structures Program Report No RMS-35. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California 1999.
- [۵] Luco N, Cornell CA. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions. Earthquake Spectra.

- [۱۴]Kostinakis K, Athanatopoulou A, Morfidis K. Correlation between ground motion intensity measures and seismic damage of 3D R/C buildings. *Engineering Structures*. 2015;82:151-67.
- [۱۵]Alliance AL. Guidelines for the design of buried steel pipe. American Society of Civil Engineers; 2001.
- [۱۶]Hindy A, Novak M. Earthquake response of underground pipelines. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1979;7:451-76.
- [۱۷]Liu A-w, Hu Y-x, Zhao F-x, Li X-j, Takada S, Zhao L. An equivalent-boundary method for the shell analysis of buried pipelines under fault movement. *Acta Seismologica Sinica*. 2004;17:150-6.
- [۱۸]Cornell CA, Jalayer F, Hamburger RO, Foutch DA. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. *Journal of Structural Engineering*. ۲۳-۱۲۸:۵۲۶;۲۰۰۲ .
- [۱۹]Alfredo H-SA, Wilson H. Probability concepts in engineering planning and design. John Wily and Sons. 1975.
- [۲۰]Pineda-Porras O, Najafi M. Seismic damage estimation for buried pipelines: Challenges after three decades of progress. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2010;1:19-24.
- [۲۱]Riddell R. On ground motion intensity indices. *Earthquake Spectra*. 2007;23:147-73.
- [۲۲]Yun H, Kyriakides S. Model for beam-mode buckling of buried pipelines. *Journal of Engineering Mechanics*. 1985;111:235-53.
- [۲۳]ANSYS AU\$MR. 5.5, ANSYS. Inc, Canonsburg, Pennsylvania. 1998.
- 2007;23:357-92.
- [۲]Shome N, Cornell CA, Bazzurro P, Carballo JE. Earthquakes, records, and nonlinear responses. *Earthquake Spectra*. 1998;14:469-500.
- [۷]Mackie K. Stojadinovic B. Seismic Demands for Performance-Based Design of Bridges. PEER Report 2003/16 Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, CA.
- [۸]Mackie K. Stojadinovic B. Fragility Basis for California Highway Overpass Bridge Seismic Decision Making. PEER Report 2005/12 Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, CA.
- [۹]Giovenale P, Cornell CA, Esteva L. Comparing the adequacy of alternative ground motion intensity measures for the estimation of structural responses. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2004;33:951-79.
- [۱۰]Tothong P, Luco N. Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2007;36:1837.
- [۱۱]Vamvatsikos D, Cornell CA. Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2005;34:1573-600.
- [۱۲]Bradley BA, Cubrinovski M, Dhakal RP, MacRae GA. Intensity measures for the seismic response of pile foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009;29:1046-58.
- [۱۳]Yang D, Pan J, Li G. Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2009;38:1257-80.

Suitable Intensity Measures for Evaluation of Continues Buried Steel Pipelines in Performance-Based Context

H. Shakib^{1*}, V. Jahangiri²

1- Prof., Earthquake Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- PhD Candidate in Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

shakib @modares.ac.ir

Abstract:

Investigation of the correlation between engineering demand parameter (EDP) and intensity measures (IMs) has received substantial attention in performance-based earthquake engineering for prediction of seismic demand of structures. In this study the seismic demands of buried steel pipelines are investigated in a performance-based context. Several nonlinear dynamic analyses of two buried steel pipe models with different D/t, H/D ratios and different soil properties and different pressures, performed under a suite of far-field earthquake ground motion records were scaled to several intensity levels to investigate the behavior of buried pipeline from elastic response to failure. Several scalar ground motion intensity measures (IMs) are used to investigate their correlation with engineering demand parameter (EDP) which is measured in terms of peak axial compressive strain in critical section. Using the regression analysis the efficiency and sufficiency of candidate IMs is investigated.

To investigate the effects of different material and geometrical properties, two buried pipeline of API 5L Grade X65 models with different pipe and soil properties are considered. To simulate soil effects on pipe in axial, transverse and vertical directions bilinear force displacement curves (elastic-perfectly plastic) representation of soil are employed based on suggestions of the American Lifeline Alliance. The FEM was used in the analyses. The buried pipeline and the surrounding soil are modeled using shell, spring and damper elements. Each node of the model was connected to three spring-dashpots.

Before deciding which ground motion IMs correlate well with seismic demand on buried pipes the first question to be answered is: how is the seismic demand measured? Usual failure modes of continuous buried pipelines are tensile ruptures or buckling because of compressive strains. Compressive strains that result in buckling are smaller than strains induce tensile failure. Therefore, the peak axial compression strain at the critical section would seem the obvious candidate to use for EDP of buried pipe. It is necessary to examine a wide range of potential IMs for determining the best IM for evaluating the buried pipe response. Therefore a total of 16 different IMs are considered.

Using an efficient IM results in smaller variability in the structural response for any given IM. Choosing an efficient IM causes the number of analyses and earthquake records needed to evaluate the probability of exceedance of each value of EDP given the value of IM to be reduced. In this paper, a one-parameter log-log linear regression of peak axial compressive strain on IM is utilized in evaluating the efficiency of each alternative IM. A sufficient IM results in EDP conditionally independent, for a given IM, of earthquake magnitude M and the source to site distance R . Using a sufficient IM, yields ignoring the effects of magnitude and distance in accurately predicting of EDP. Quantifying the sufficiency of IM is done by using the one-parameter regression of peak axial compressive strain on M or R for a given IM. Among the models investigated in this study it was seen that RMSd is the optimal IM for buried steel pipelines based on efficiency and sufficiency conceptions.

Keywords: Continues Buried Pipeline, Intensity measure, Efficiency, Sufficiency, Performance-based earthquake engineering.