

بررسی تاثیر تنش‌های برجا بر پاسخ لرزه‌ای تونل‌ها

مریم بلبلی زارع^{۱*}؛ حمیدرضا نجاتی^۲؛ کامران گشتاسبی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱

چکیده

تونل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های زیرزمینی هستند که امروزه در سرتاسر جهان جهت توسعه مسیرهای ارتباطی ایجاد می‌شوند. با توجه به نیاز جامعه به تونل‌های شهری و بین شهری به جهت تسهیل در عبور و مرور، کاهش بارترافیکی یا کوتاه‌تر شدن مسیرها، اینگونه سازه‌ها در شرایط مختلف ژئوتکنیکی و اعماق مختلف ساخته می‌شوند. با رخداد زلزله‌های ویرانگر در سال‌های اخیر و ایجاد خسارت‌های جدی به چنین سازه‌هایی، بشر را بر آن داشت تا به ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی روی آورد. زلزله به عنوان رویدادی با عدم قطعیت بالا، امکان پیش‌بینی دقیق میزان آسیبی که می‌تواند در سازه ایجاد شود را مشکل می‌کند. در این پژوهش سعی شده است تا با در نظر گرفتن برخی عدم قطعیت‌های موجود، میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده و ساخت منحنی‌های شکنندگی به عنوان یک روش احتمالاتی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای تونل‌های دو قلو، مترو اهواز مورد بررسی قرار گرفته است. پس از ارزیابی لرزه‌ای تونل‌های مورد مطالعه، تحلیل حساسیت پارامترهایی نظیر عمق و نسبت تنش (k) انجام شده است و احتمال ایجاد آسیب در هر سطح PGA بررسی شده است. نتایج مدلسازی عددی و تحلیل احتمالاتی نشان داد که در محدوده ۸ - ۱۵ متری از سطح زمین، آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه افزایش می‌یابد که با توجه به مشخصات ساختگاه می‌توان به عنوان عمق بحرانی سازه در نظر گرفت. با در نظر گرفتن نسبت (k) مختلف، مشخص شد که با کاهش نسبت (k) آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

تحلیل دینامیکی، عمق، تنش برجا، آنالیز دینامیکی فزاینده، منحنی شکنندگی

۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی به عنوان پیچیده‌ترین سازه‌های مهندسی طبقه‌بندی شده‌اند که نیاز به بررسی، طراحی و اجرای بسیار دقیقی دارند. تونل‌ها به عنوان زیرساخت‌های مهم در حمل و نقل عمومی، شبکه‌ی دسترسی، انتقال آب، تاسیسات نظامی و ... به‌ویژه در محیط‌های شهری، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در محیط‌های شهری به دلیل فضای محدود و جمعیت زیاد، محدودیت‌های بسیاری در انتخاب شرایط زمین ساختاری، عمق سازه و سایر مسائل مربوط به طراحی تونل‌ها وجود دارد. از این‌روی طراحی و بررسی این سازه‌ها در شرایط مختلف ژئوتکنیکی و اعماق مختلف بسیار مهم است و نظر محققین این حوزه را به خود جلب کرده است.

با ظهور تکنولوژی‌های جدید این امکان برای بشر فراهم شد که در بسیاری از مصالح خاکی و سنگی و در اعماق مختلف سازه‌های زیرزمینی احداث شوند. سازه‌های زیرزمینی به دلیل اینکه کاملاً توسط محیط دربرگیرنده محصور شده‌اند نسبت به سازه‌های سطحی از ایمنی بیشتری برخوردار هستند اما کاملاً از آسیب مصون نیستند. یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند باعث آسیب به این سازه‌ها شود، زلزله است. زلزله به عنوان یکی از اثرگذارترین رخدادهای طبیعی در ایجاد خرابی و خسارت در سازه‌های مختلف، همواره مورد توجه طراحان سازه بوده است. با وجود زمین‌لرزه‌های فراوان و مخرب (Loma Prieta earthquake, 1989; Kobe earthquake, 1995; Duzce earthquake, 1999; Chi Chi earthquake, 1999; Niigata earthquake, 2004; Wenchuan earthquake, 2008;

لرزه‌ای که به سازه وارد می‌شود را مشخص کرده است [12], [11]. با این حال تاثیر عمق بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی بسیار متفاوت است. در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از روش IDA آسیب لرزه‌ای یک سازه زیرزمینی را در اعماق مختلف و نسبت تنش‌های مختلف ارزیابی شود.

۲- مطالعه موردی

شهر اهواز با جمعیتی در حدود یک میلیون و سیصد هزار نفر (سال ۱۳۹۵) در جنوب غربی کشور ایران و استان خوزستان قرار دارد. پروژه قطار شهری اهواز در سال ۱۳۸۶ شروع شده است، این پروژه شامل ۲۴ کیلومتر تونل دو قلو و ۲۴ ایستگاه است. تونل‌ها با دو دستگاه حفار مکانیزه^۶ نوع فشار تعادلی زمین^۷ در حال حفاری هستند. تونل‌های دوقلوی اهواز دارای قطر خارجی ۷، قطر داخلی ۶/۴ و فاصله مرکز به مرکز ۱۸ متر هستند. مشخصات زمین‌شناسی ساختمان مورد مطالعه در جدول (۱) قابل مشاهده است. سیستم نگهداری استفاده شده در تونلهای قطار شهری اهواز از نوع بتنی پیش ساخته یونیورسال^۸ هستند که شامل یک عدد سگمنت کلید، دو عدد سگمنت همجوار کلید و سه عدد سگمنت استاندارد است. متوسط طول بتن پیش ساخته ۱/۵ متر و ضخامت آن برابر ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات فنی سیستم نگهداری در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مقاومتی و ژئومکانیکی محیط

وزن مخصوص (kg/m ³)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	مدول الاستیسیته (MPa)
2100	11	30	26

جدول ۲- مشخصات سیستم نگهداری [13]

مقاومت فشاری مشخصه بتن (MPa)	ضخامت (m)	وزن مخصوص بتن (kg/m ³)	مدول الاستیسیته بتن (GPa)
۴۰	۰/۳	۲۵۰۰	۳۰
ضریب پواسون	نوع آرماتور	نوع و تعداد سگمنت	
۰/۲	AIII	یونیورسال (۱ کلید، ۲ همجوار و ۳ استاندارد)	

Tohoku earthquake, 2011) و همچنین تلفات مالی و جانی بیشماری که تا به حال اتفاق افتاده است، کماکان نیاز به اطلاعات بیشتری در رابطه با سطح خرابی و ویژگی‌های زمین‌لرزه‌ها وجود دارد. با گزارش این خرابی‌ها، لزوم تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی مناطق لرزه‌خیز از جمله ایران، به شدت احساس می‌شود. محصورشدگی و تنش‌های برجا از جمله پارامترهای بسیار مهمی هستند که در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی اثر گذار هستند. رابطه بین اندازه زمین‌لرزه و خسارت، از ابزار ضروری در ارزیابی و تخمین خرابی است. بنابراین در این تحقیق سعی شده است که آسیب پذیری سازه‌های زیرزمینی در شرایط مختلف بر مبنای روش تحلیل دینامیکی فزاینده^۱ بررسی شود.

وامواتسیکوس و کرنل^۲ یک روش محاسباتی تحت عنوان تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) ارائه داده‌اند که شامل یک سری تحلیل تاریخیچه دینامیکی غیر خطی برای ارزیابی عملکرد سازه تحت بارهای لرزه ای است [1]. مندر و همکاران^۳ جهت آنالیز دینامیکی‌های پل‌های بزرگراه از روش IDA استفاده کردند. در این تحقیق منحنی‌های IDA را در سه کشور مختلف (نیوزیلند، ژاپن و ایالات متحده) ترسیم کرده و دریافتند که پل‌های بزرگراه بر اساس زلزله مبنای طرح با ۱۰٪ احتمال رخداد در ۵۰ سال و با شتاب حداکثر ۰/۴g باعث آسیب گسترده در این کشورها خواهد شد. اما بر اساس بزرگترین رخداد با احتمال ۲٪ در ۵۰ سال باعث آسیب‌های بسیار گسترده و حتی فروریزش خواهد شد [2]. مسائلی و همکاران^۴ با استفاده از نمودارهای IDA بالاترین میزان کج شدگی فونداسیون ساختمان را در بالاترین میزان آسیب اعمالی مشخص کردند و همچنین برای یک ساختمان تک طبقه‌ای غیر الاستیک میزان سطح آستانه آسیب را که سازه می‌تواند در برابر تغییر شکل‌ها مقاومت کند را با نمودارهای IDA مشخص کردند [3]. آندروتی و لای^۵ جهت روشن ساختن نقش روباره در آسیب‌پذیری لرزه‌ای تونل‌های عمیق در سنگ‌های ضعیف از روش آنالیز دینامیکی فزاینده غیرخطی استفاده کردند و در نهایت شکست‌ها و آسیب‌هایی که به سازه در عمق‌های زیاد تحت PGAهای مختلف وارد شده بود را بدست آوردند [4]. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی روی آنالیز لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی در عمق‌های مختلف انجام شده است [5-10]. همچنین تحقیقاتی بر نقش شرایط خاک و لرزه در عملکرد و پاسخ لرزه‌ای تونل استفاده شده است که میزان اهمیت نوع خاک در آسیب

^۱ Incremental dynamic analysis

^۲ Vamvatsikos and Cornell

^۳ Mander et al

^۴ Masaeli et al

^۵ Andreotti and Lai

^۶ Tunnel Boring Machine

^۷ Earth Perssure Balance

^۸ Universal

۳- روش تحقیق

۳-۱- آنالیز دینامیکی فزاینده (IDA)

با پیشرفت مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد و دسترسی روز افزون به نرم افزارهای پیچیده تجزیه و تحلیل سازه‌ای و رایانه‌های سریعتر، تحلیل تاریخیچه زمانی دینامیکی غیرخطی برای طراحی و ارزیابی سازه‌ها بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است [14]. این مفهوم ابتدا توسط برترو^۱ در سال ۱۹۷۷ [15] استفاده شد و در سال‌های بعد توسط محققین دیگر مورد استفاده قرار گرفته است [15-18]. IDA یک روش جدیدی است که نشان دهنده رابطه بین ظرفیت لرزه‌ای و تقاضا^۲ است. مهندسین می‌توانند با توجه به معیار شدت^۳ لرزه (IM) مانند پیک شتاب زمین^۴ (PGA) معیار آسیب^۵ را برحسب پارامترهای تقاضای مهندسی^۶ (EDP) مانند حداکثر انحراف^۷ یا کج شدگی^۸ سازه، تخمین بزنند.

این روش شامل قرار دادن یک مدل سازه‌ای تحت یک یا چند رکورد حرکت است که هر کدام به مقادیر مختلف PGA مقیاس شده‌اند، در نتیجه یک یا چند منحنی از پاسخ سازه در مقابل سطوح مختلف زلزله تولید می‌شوند [19]. روش IDA در حال حاضر روشی چند منظوره و بسیار کاربردی است که اهداف این روش شامل: ۱. درک کامل دامنه پاسخ در برابر دامنه سطوح رکورد زمین لرزه. ۲. فهم بهتر پیامدهای سازه‌ای ناشی از زمین لرزه‌های شدید نادر یا معمول. ۳. درک بهتر از تغییرات در طبیعت پاسخ سازه با افزایش شدت زمین لرزه. ۴. تخمین ظرفیت دینامیکی سیستم سازه. ۵. ارائه یک مطالعه‌ی تحلیل دینامیکی فزاینده چند رکوردی (چندگانه) به منظور درک پایداری سازه [19].

نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده بر اساس دو پارامتر معیار شدت و معیار آسیب بیان می‌شوند. در نمودارهای IDA محور افقی معیار آسیب (DM) یا معیار تقاضای مهندسی (EDP) است و محور قائم معیار شدت لرزه (IM) است. از آنجا که هدف اصلی ثبت مقدار آسیب‌ها در سطوح مختلف PGA است و این نمودارها به صورت پیوسته ترسیم می‌شوند، بنابراین انتخاب این پارامترها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

یکی از بزرگترین مسائل برای انجام IDA، انتخاب رکوردهای مناسب

برای زمین لرزه است. رکوردهای مورد استفاده برای چنین تحلیل‌هایی معمولاً نماینده زلزله‌هایی هستند که ممکن است در سایت مورد نظر رخ بدهد [14]. بنابراین در این پژوهش رکوردهای مورد استفاده با توجه به محیط مورد مطالعه بر اساس سرعت موج برشی ۰ تا ۲۰۰ متر بر ثانیه و همچنین بزرگای زلزله ۴ تا ۹ و فاصله‌ی کمتر از ۲۰ کیلومتر تا ساختگاه انتخاب شدند. تمامی زلزله‌ها از سایت PEER^۹ اتخاذ شده است که در جدول (۳) مشاهده می‌شود.

مسئله مهم دیگر در روش IDA، انتخاب پارامتر حرکت زمین به عنوان معیار شدت (IM) است. PGA یکی از پرکاربردترین و ساده‌ترین پارامترهای معیار شدت است. همچنین برای سازه‌های با ارتفاع کم و دوره تناوب پایین مناسب است [20]؛ همچنین یک معیار مشترک برای نشان دادن خطر لرزه‌ای در اکثر استانداردها است که اغلب به عنوان معیار شدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیار آسیب DM یک مقدار قابل مشاهده است که بخشی از خروجی آنالیز دینامیکی غیرخطی مربوطه است. انتخاب DM به عملکرد و خود سازه بستگی دارد. مقدار DM یک مقدار نامنفی است بنابراین اغلب یا از قدر مطلق استفاده می‌شود و یا مقادیر منفی و مثبت به طور جداگانه بررسی می‌شوند [19].

۳-۲- حدود آسیب (DS)^{۱۰}

به منظور استفاده از نتایج بدست آمده از نمودارهای IDA نیاز به سطوح قابل اعتمادی از آسیب تونل وجود دارد. به همین جهت، نیاز به تعریف یک سری حدود آسیب برای نمایش میزان آسیب لرزه‌ای سازه‌ها وجود دارد. حدود آسیب به صورت کیفی و کمی قابل بیان هستند. حدود آسیب کیفی اغلب بر اساس مشاهدات تجربی تعریف می‌شوند. به عنوان مثال می‌توان به گزارش HAZUS 2003 اشاره کرد که حدود آسیب را به ۵ دسته طبقه بندی کرده است که در جدول (۴) قابل مشاهده است. با استفاده از تغییر شکل‌های ایجاد شده در سازه می‌توان حدود آسیب کیفی را به کمی تبدیل کرد و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها را با استفاده از این مقادیر نمایش داد. یکی از مهم‌ترین تغییر شکل‌ها در فضاها و زیرزمینی تغییر شکل‌های عرضی هستند که در تونل‌های دایره‌ای باعث بیضی‌شدگی^{۱۱} و در تونل‌های مستطیلی باعث تغییر شکل برشی^{۱۲} می‌شود [21].

^۱ Bertero^۲ Demand^۳ Intensity measure^۴ Peak ground acceleration^۵ Damage measure^۶ Engineering demand parameter^۷ Deflection^۸ Drift^۹ The pacific earthquake engineering research

center

^{۱۰} Damage states^{۱۱} Ovaling^{۱۲} Racking

جدول ۴- حدود آسیب ارائه شده برای تونل‌ها (HAZUS 2003)

شرح	حالت آسیب
ترک‌های کوچک در نگهداری (نیاز به تعمیر سطحی)، پرتاب سنگ و یا نشست کم در ورودی تونل.	آسیب کم
ترک‌های متوسط در نگهداری و پرتاب سنگ.	آسیب متوسط
نشست زیاد در ورودی تونل و ترک‌های زیاد در نگهداری تونل.	آسیب شدید
ترک‌های جدی در نگهداری تونل که ممکن است منجر به فروریزش شوند.	آسیب کامل

جدول ۵- تعاریف حدود آسیب (FEMA 356)

توضیحات	حد
بدون آسیب	خدمات رسانی
سطحی که در آن آسیب سازه‌ای اندکی رخ داده و ریسک خطر جانی بسیار محدود است. مقاومت و سختی اجزا نسبی به پیش از زلزله تغییر قابل توجه نداشته و بازسازی خفیف سازه مناسب خواهد بود.	قابلیت استفاده بدون وقفه
سطحی که در آن آسیب قابل توجه به سازه وارد شده که منجر به آسیب جدی در برخی اجزای سازه می‌شود، ولی باعث ایجاد خطر آوار نخواهد شد. ریسک تهدید جانی در حد پایینی قرار دارد اما امکان زخمی شدن در حین زلزله وجود دارد.	ایمنی جانی
سطحی است که شامل آسیب به اجزای سازه می‌شود و سازه توانایی تحمل بارهای گرانش را دارد اما حاشیه‌ای در برابر فروریزش وجود ندارد.	آستانه فروریزش

جدول ۶- حدود عملکرد سازه (اعداد به درصد)

مرجع	OP	IO	LS	CP
الینگوود ۱۹۹۸	۰/۵	۱	< ۵	> ۵
یوما و همکاران ۲۰۱۱	۰/۵	۰/۱۴	۳/۵	۵/۳
FEMA 356 ASCE-41,2007	-	۱	۲	۴
FEMA 356 ASCE-41,2007	-	۰/۷	۲/۵	۵

جدول ۳- رکوردهای انتخابی با توجه به ساختگاه

شماره	رخداد (سال وقوع)	بزرگا (ریشتر)	فاصله (کیلومتر)	PGA (g)	زمان حرکت شدید (ثانیه)
۱	امپریال ولی ۱۹۷۹	۶/۵۳	۱۰/۷۹	۰/۲۹	۱۳
۲	امپریال ولی ۱۹۷۹	۵/۰۱	۱۴/۵۴	۰/۱۵	۱۲
۳	امپریال ولی ۱۹۷۹	۶/۵۳	۷/۳	۰/۲۶۳	۵
۴	هولیستر ۱۹۷۴	۵/۱۴	۸/۸۵	۰/۱۷	۱۰
۵	مورلند ۱۹۸۱	۵/۹	۷/۵۷	۰/۲	۸/۵
۶	نورث ریچ ۱۹۹۴	۶/۶۹	۱۳/۳۴	۰/۴۷	۸
۷	توتوری ۲۰۰۰	۶/۶۶	۱۶/۶	۰/۱۸	۱۴
۸	پارک فیلد ۲۰۰۴	۶	۱/۶۳	۰/۶۸	۷
۹	نیگاتا ۲۰۰۴	۶/۶۳	۱۷/۵۷	۰/۳۶	۱۳
۱۰	چواتسو ۲۰۰۷	۶/۸	۰	۰/۷۲۶	۶/۵
۱۱	کوبه ۱۹۹۵	۹/۶	۳/۳۱	۰/۵۹۱	۱۳
۱۲	کرایست چرچ ۲۰۱۱	۶/۲	۵/۱۱	۰/۶۹۱	۹

بر اساس تعاریف ذکر شده در جدول (۵) حدود آسیب ارائه شده به صورت کمی تبدیل شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول (۶) سطوح عملکرد سازه متناسب با دریافت ایجاد شده در سازه مشخص شده است [۲۳]. بر اساس حدود آسیب ذکر شده، در این پژوهش حدود آسیب به صورت جدول (۷) انتخاب شده است.

مختلف با توجه به عملکرد لرزه‌ایشان استفاده کردند [30]. در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از منحنی‌های شکنندگی احتمال آسیب وارد شده به سازه تحت تنش‌های برجای مختلف ارزیابی شود.

۴- مدل‌سازی عددی

استفاده از روش‌های عددی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی هستند. در این تحقیق از نرم افزار تفاضل محدود FLAC 2D برای مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی استفاده شده است. با استفاده از نرم افزار، مدل عددی تونل‌های دوقلوی اهواز با توجه به خصوصیات ساختگاه (جدول (۱))، ساخته شده است (شکل (۲)). جهت مدل‌سازی سگمنت برای در نظر گرفتن اثر درزه‌های بین سگمنت‌ها از سختی نرمال و برشی k_n و k_s و همچنین جهت مدل‌سازی ارتباط بین سگمنت و زمین از سختی مماسی و شعاعی k_t و k_r استفاده می‌شود [31]. مقادیر سختی‌های نرمال و برشی، ده برابر سختی معادل نرم‌ترین محیط مجاور در نظر گرفته شده است [32] (رابطه (۲)).

$$K_{eq} = \frac{K + (4/3)G}{\Delta Z_{min}} \quad (2)$$

K مدول بالک، G مدول برشی زمین و ΔZ_{min} برابر کوچکترین عرض محدوده مجاور در جهت نرمال است که در شکل (۳) نحوه تعیین مقدار آن نشان داده شده است. مشخصات سختی‌های نرمال و برشی استفاده شده در جدول (۸) نمایش داده شده است. هدف از انجام مدل‌سازی بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ی زیرزمینی در شرایط مختلف ژئوتکنیکی است. مدل‌ها در اعماق ۶، ۱۰، ۱۳، ۱۸ و ۲۵ متر و همچنین در نسبت‌های مختلف تنش افقی به قائم (k) ۰/۴، ۰/۷ و ۱ ساخته شده‌اند تا درک بهتری از عمق موثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای حاصل گردد. پس از مدل‌سازی استاتیک و به تعادل رسیدن مدل، رکوردهای انتخاب شده به صورت تنش به مدل اعمال می‌شوند. مدل به صورت دینامیکی برای تمامی زلزله‌ها اجرا می‌شود. بدین صورت با اعمال زلزله‌ها و برداشت DM‌های متناظر از تونل سمت چپ در هر سطح PGA،

نمودارهای IDA چندگانه ترسیم می‌شوند (شکل (۴) تا (۸)).

با توجه به تمامی نمودارهای IDA می‌توان دریافت که به طور میانگین زلزله‌های با PGA کمتر از ۰/۱۵g نمی‌توانند هیچگونه آسیبی به سازه وارد کنند و زلزله‌های با PGA بین ۰/۲g تا ۰/۴g در شرایط خدمات رسانی تا قابلیت استفاده بدون وقفه (بدون آسیب تا آسیب جزئی) قرار دارند. همچنین به طور متوسط زلزله‌های با PGA بیشتر از ۱/۲g باعث فروریزش سازه می‌شوند. از این نمودار می‌توان دریافت که ۴۷ درصد زلزله‌های استفاده شده در این تحقیق می‌توانند باعث فروریزش سازه شوند.

جدول ۷- حدود آسیب در نظر گرفته شده برای تونل (اعداد به درصد)

حدود آسیب	OP	IO	LS	CP
دریافت ایجاد شده	۰/۵	۱	۲/۵	۵

۳-۳- منحنی شکنندگی^۱

تابع شکنندگی به صورت، احتمال رخداد یک سطح خاص از آسیب که تابعی از شدت زلزله است تعریف می‌شود [24]. مفهوم تابع شکنندگی در مهندسی زلزله توسط کندی و همکاران^۲ [25] در یک نیروگاه هسته‌ای به کار رفت. به طور گسترده‌تر، می‌توان تابع شکنندگی را به عنوان یک تابع ریاضی تعریف کرد که احتمال وقوع برخی رویدادهای نامطلوب را بیان می‌کند و به عنوان تابعی که برخی تحریکات طبیعی را اندازه‌گیری می‌کند، در نظر گرفت (معمولاً اندازه گیری شتاب، تغییر شکل، و یا نیروی در یک زلزله، طوفان، و یا دیگر شرایط بارگذاری شدید). به طور کلی منحنی‌های شکنندگی یک ابزار قوی برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای سازه‌ها هستند. چهار روش برای بدست آوردن منحنی‌های شکنندگی وجود دارد: روش تجربی^۳، بر اساس قضاوت مهندسی^۴، روش تحلیلی^۵ و روش ترکیبی^۶. تا کنون، منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های زیرزمینی، از جمله تونل‌ها، براساس قضاوت مهندسی یا با استفاده از داده‌های آسیب تونل تحت بارهای لرزه‌ای گذشته انجام شده است که کاربرد محدودی دارند [26]، [27]. منحنی‌های شکنندگی ایجاد شده از روش‌های تحلیلی می‌تواند به راحتی به ترکیبات ساختاری مختلف و مناطق لرزه ای اعمال شود. جمشیدی آوانکی و همکاران از منحنی‌های شکنندگی جهت بررسی اثرات وجود الیاف فولادی در بتن تقویت شده نسبت به آرماتورهای فولادی معمولی در نگهداری‌های سگمنتی تحت بار لرزه‌ای استفاده کردند. با استفاده از این منحنی‌ها محدوده آسیب جزئی برای سگمنت الیافی، با آرماتور و بدون آرماتور را نشان دادند [28]. آرگیرودیس و پیتیلکیس از منحنی‌های شکنندگی جهت بررسی آسیب پذیری لرزه‌ای تونل‌های کم عمق استفاده کردند و تاثیر نوع خاک و شکل مقطع تونل را بر منحنی‌های شکنندگی بررسی کردند [29]. آندروتی و همکاران از منحنی‌های شکنندگی برای ارزیابی احتمالاتی آسیب لرزه‌ای تونل‌های راه و همچنین برای انتخاب از بین دو نوع سیستم نگهداری

^۱ Fragility curve

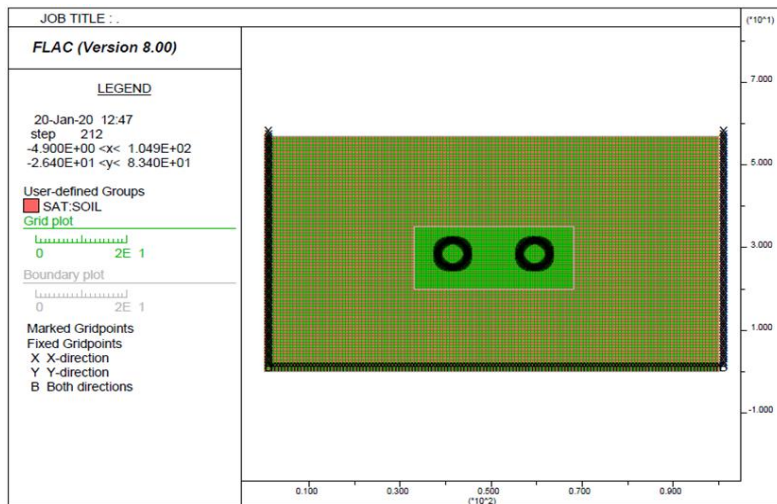
^۲ Kennedy et al

^۳ Empirical method

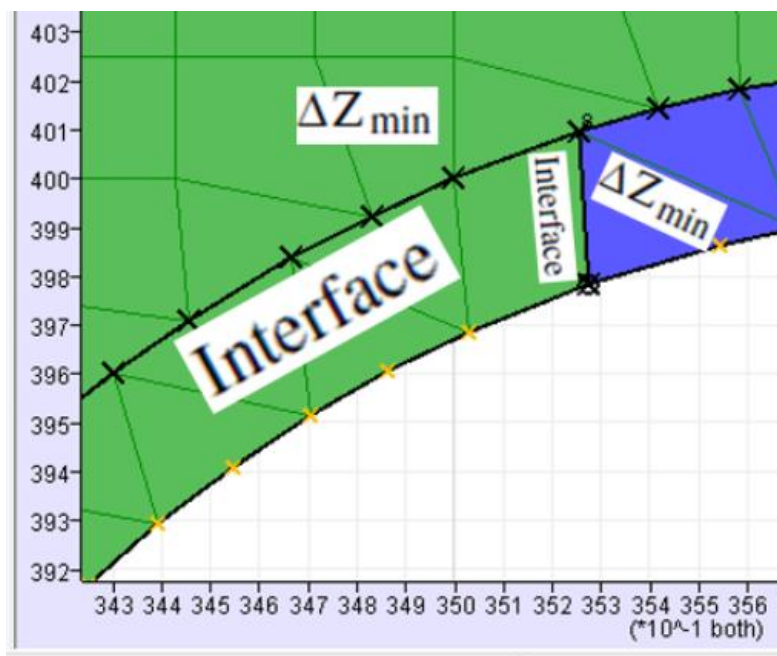
^۴ Judgemental approach

^۵ Analytical method

^۶ Hybrid approach

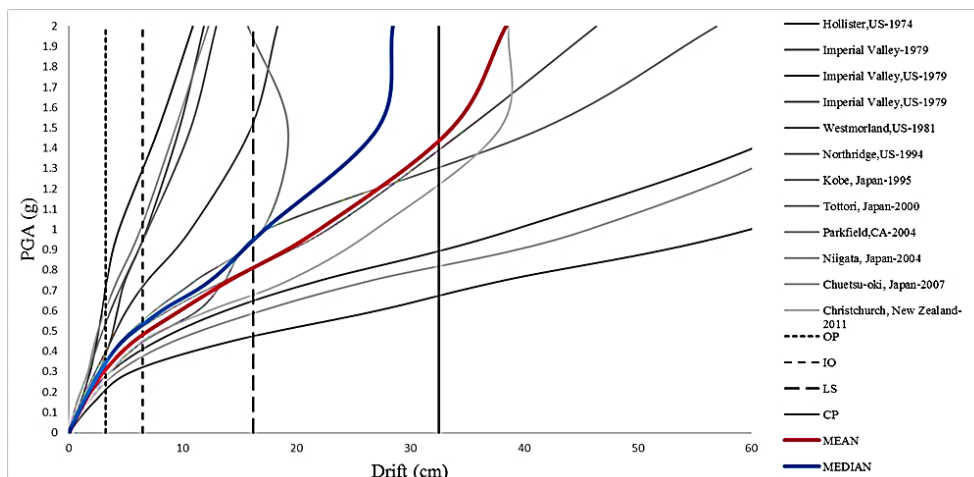


شکل ۱- مدل ساخته شده از تونل‌های دوقلوی اهواز در عمق ۲۵ متری از سطح زمین

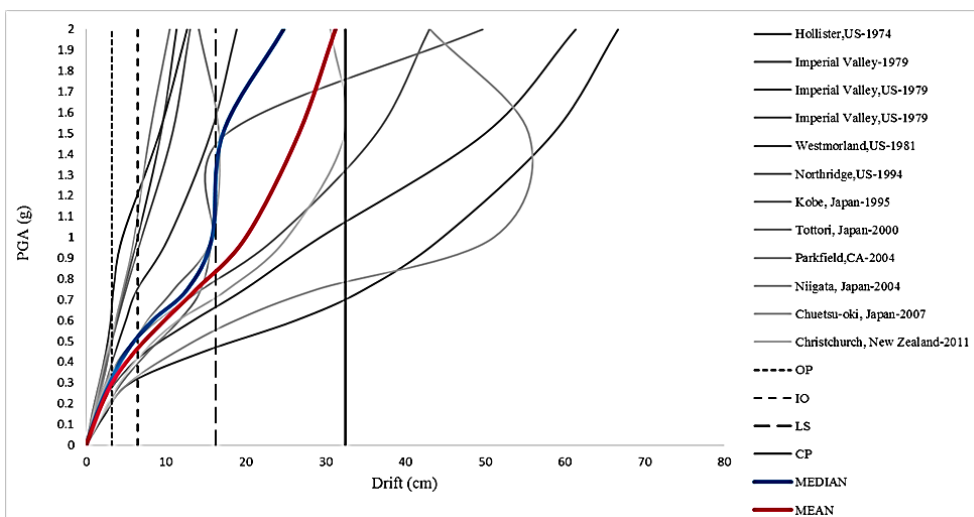

 شکل ۲- تعیین ΔZ_{min} در مدل‌های ایجاد شده

جدول ۸- سختی‌های برشی و نرمال در نظر گرفته شده برای فصل مشترک سگمنت-سگمنت و سگمنت-خاک

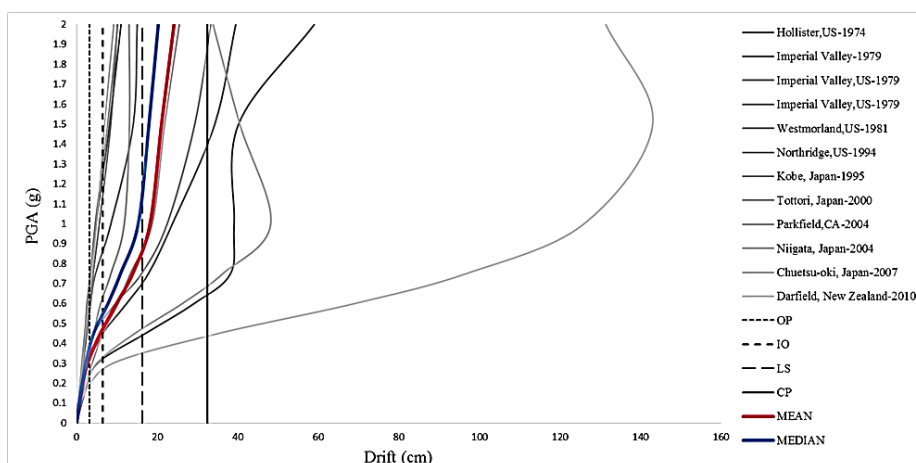
سگمنت-سگمنت	سگمنت-خاک	
$9/53 \times 10^{11}$	$1/9 \times 10^9$	$K_n = K_s \text{ (Pa/m)}$
$1/25 \times 10^{10}$	$9/15 \times 10^6$	$G \text{ (Pa)}$
$1/67 \times 10^{10}$	$5/42 \times 10^7$	$K \text{ (Pa)}$
$0/35$	$0/35$	$\Delta Z_{min} \text{ (m)}$
0	0	$C \text{ (Pa)}$
45	30	$\phi \text{ (Degree)}$
0	0	$\sigma_t \text{ (Pa)}$



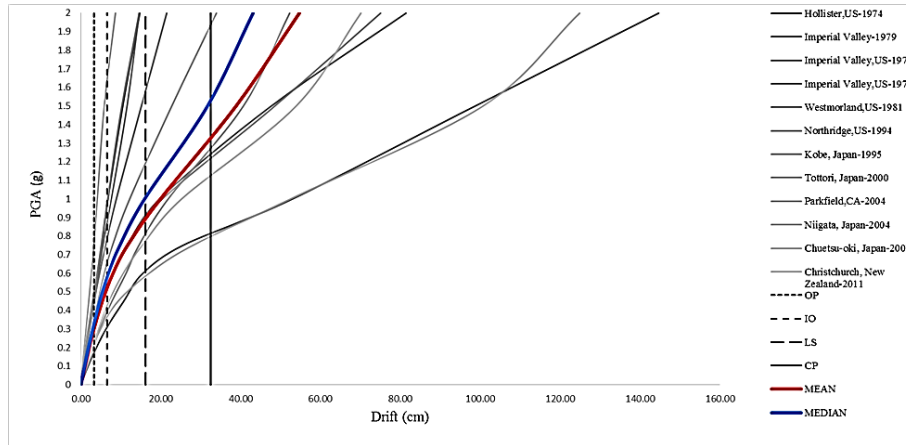
شکل ۳ - منحنی‌های IDA تونل مورد مطالعه در نسبت تنش $k=0.4$ و عمق ۶ متر از سطح زمین



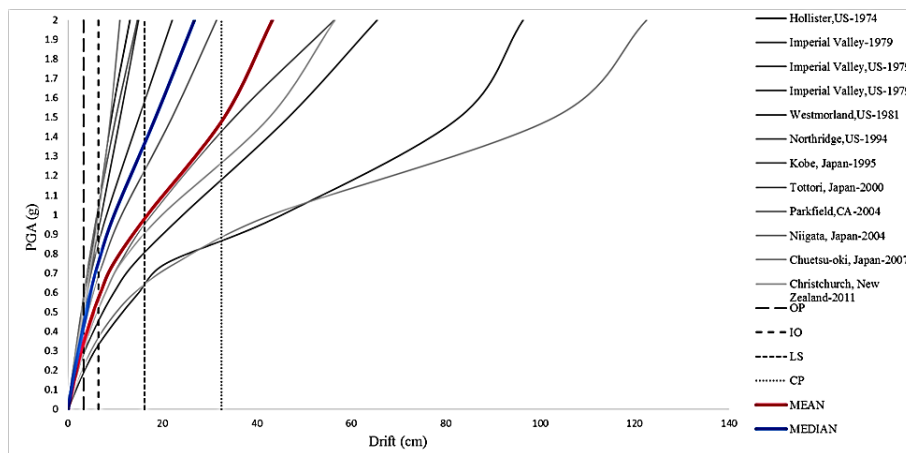
شکل ۴ - منحنی‌های IDA تونل مورد مطالعه در نسبت تنش $k=0.4$ و عمق ۱۰ متر از سطح زمین



شکل ۵ - منحنی‌های IDA تونل مورد مطالعه در نسبت تنش $k=0.4$ و عمق ۱۳ متر از سطح زمین



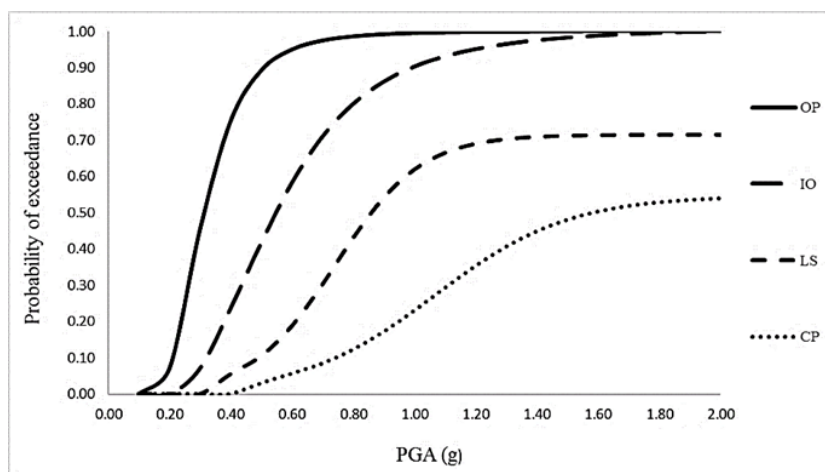
شکل ۶ - منحنی‌های IDA تونل مورد مطالعه در نسبت تنش $k=0.4$ و عمق ۱۸ متر از سطح زمین



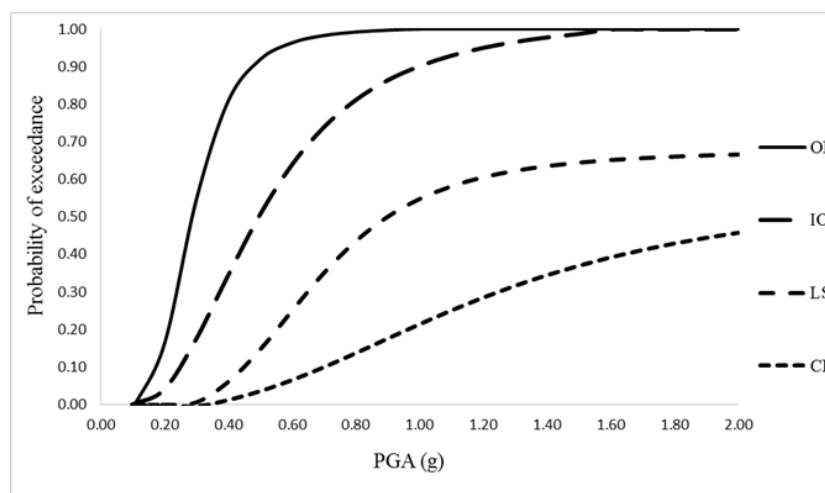
شکل ۷ - شکل ۸ - منحنی‌های IDA تونل مورد مطالعه در نسبت تنش $k=0.4$ و عمق ۲۵ متر از سطح زمین

شکل‌های (۹) تا (۱۳) ارائه شده‌اند. نمودارها احتمال رخداد هر یک از سطوح آسیب را در هر عمق به خوبی نشان می‌دهد اما جهت درک بهتر اثر عمق تونل در رفتار لرزه‌ای تونل منحنی شکنندگی در سطوح آسیب ایمنی جانی و فروریزش برای تمامی عمق‌های ذکر شده در $k=0.4$ ترسیم شده است که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود. با توجه به منحنی‌های شکنندگی رسم شده، می‌توان دریافت که روند کلی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها با افزایش عمق، کاهشی می‌باشد. همانطور که از نمودارهای بدست آمده مشخص است با افزایش شدت PGA احتمال رخداد سطوح آسیب نیز افزایش می‌یابد.

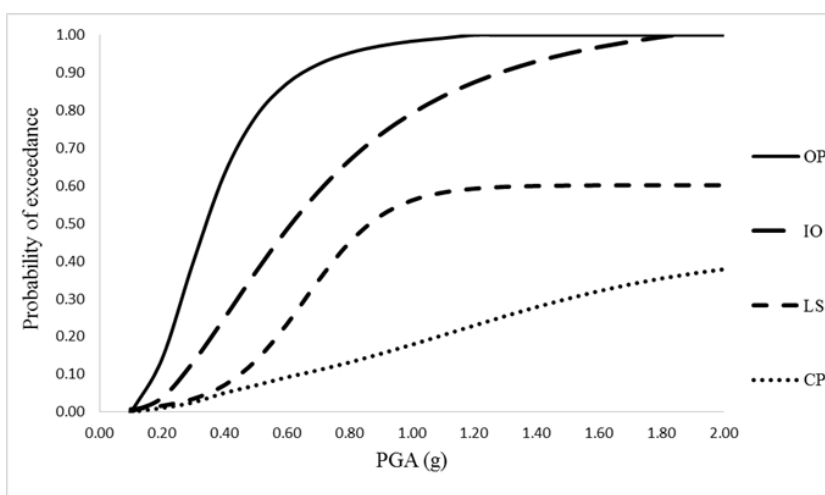
همانطور که پیش از این اشاره شد، تابع شکنندگی یک تابع ریاضی است که احتمال رخداد یک واقعه ناگوار (حد آسیب) را به عنوان تابعی از تحریک محیط بیان می‌کند. با توجه به پراکندگی نتایج ناشی از عدم قطعیت‌های زمین لرزه‌ها، توابع شکنندگی به عنوان یک روش ساده و ابزاری مناسب برای تحلیل رفتار سازه به کار می‌روند. منحنی‌های شکنندگی مهم‌ترین دستاورد نمودارهای IDA هستند. بنابراین با توجه به حالات حدی پیشتر ذکر شده، درصد فراگذشت هر شدت از زلزله در محل تلاقی با حدود آسیب برای تمامی اعماق استخراج شد و در نهایت منحنی‌های شکنندگی برای هر کدام از حدود برای عمق‌های ذکر شده در $k=0.4$ ترسیم شدند که در



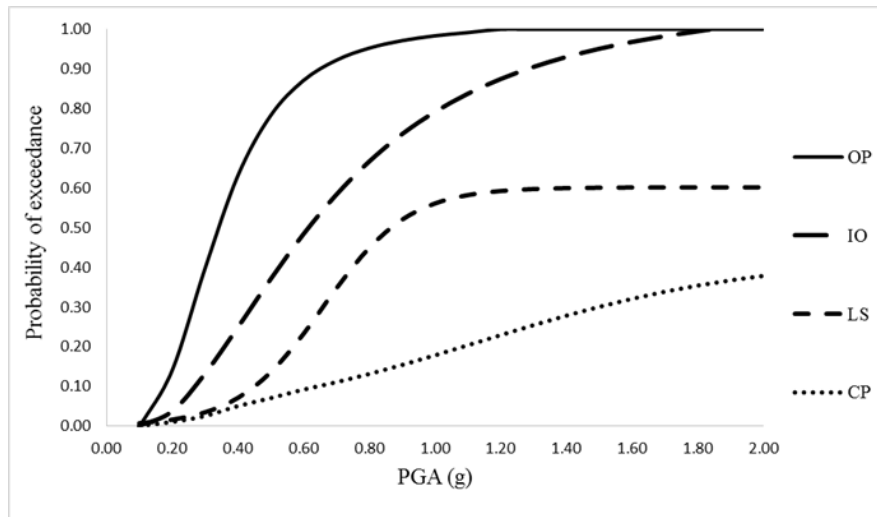
شکل ۹ - منحنی‌های شکنندگی در نسبت $k=0/4$ در عمق ۶ متر



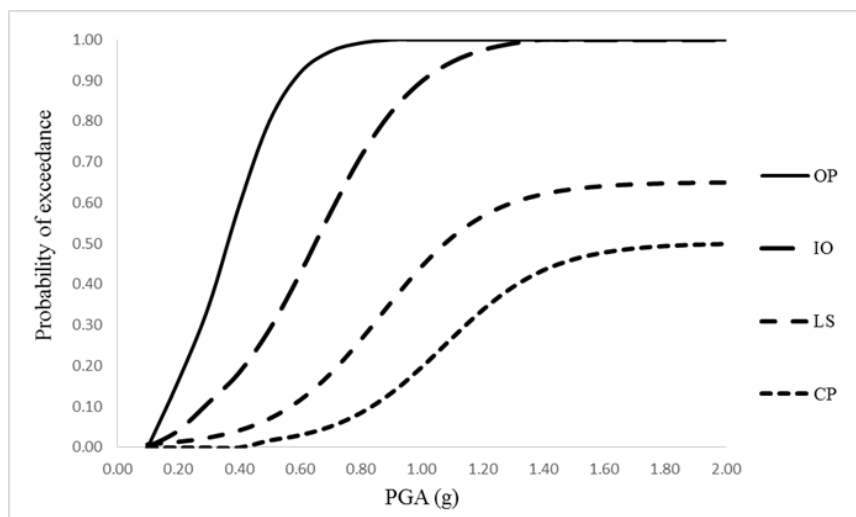
شکل ۱۰ - منحنی‌های شکنندگی در نسبت $k=0/4$ در عمق ۱۰ متر



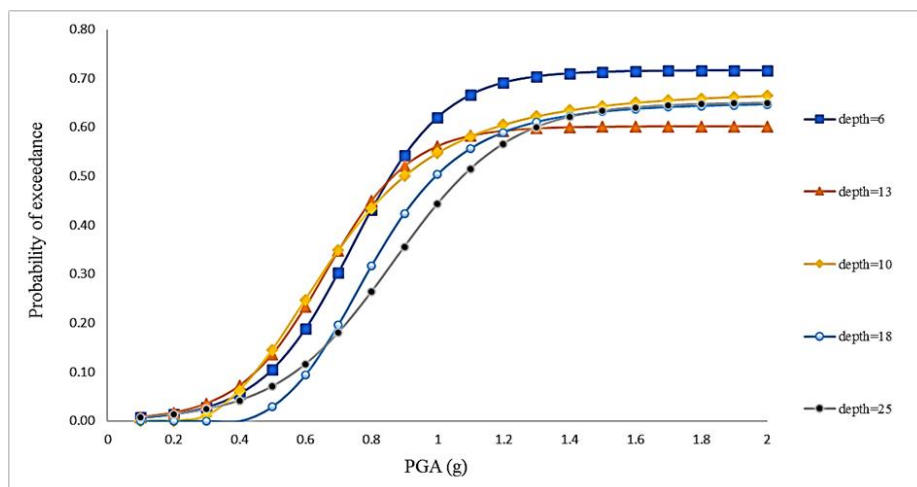
شکل ۱۱ - منحنی‌های شکنندگی در نسبت $k=0/4$ در عمق ۱۳ متر



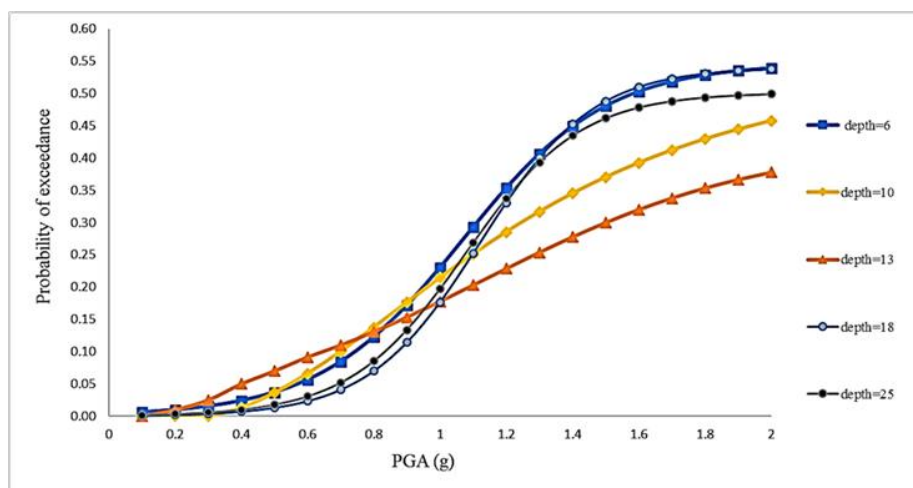
شکل ۱۲ - منحنی‌های شکنندگی در نسبت $k=0/4$ در عمق ۱۸ متر



شکل ۱۳- منحنی‌های شکنندگی در نسبت $k=0/4$ و الف) ۶ متر؛ ب) ۱۰ متر؛ پ) ۱۳ متر؛ ت) ۱۸ متر؛ ج) ۲۵ متر



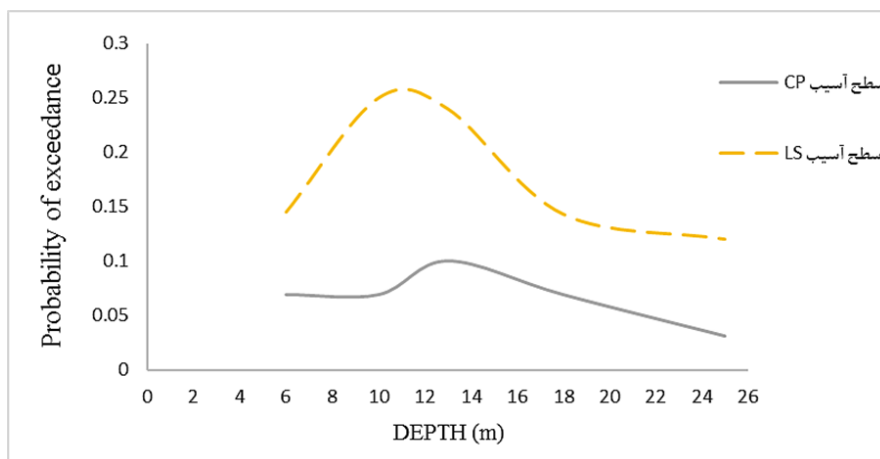
شکل ۱۴- منحنی‌های شکنندگی مربوط به اعماق ۶، ۱۰، ۱۳، ۱۸ و ۲۵ در سطح آسیب ایمنی جانی (LS).



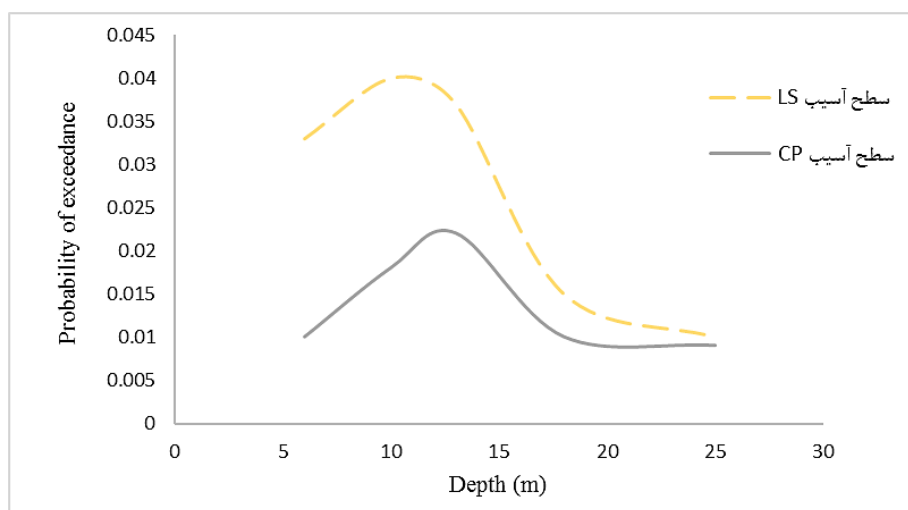
شکل ۱۵ - منحنی‌های شکنندگی اعماق ۶، ۱۰، ۱۳، ۱۸ و ۲۵ متر در سطح آسیب فروریزش (CP).

بنابراین می‌توان محدوده ۸ - ۱۵ متر را تحت عنوان عمق بحرانی سازه‌هایی با شرایط خاکی مشابه در نظر گرفت و جهت تامین ایمنی سازه، در این عمق بحرانی تمهیدات طراحی و اجرایی را اندیشید. جهت بررسی اثر نسبت تنش افقی به قائم (k) بر عملکرد لرزه‌ای تونل منحنی‌های شکنندگی در دو عمق ۶ و ۲۵ متر برای مقادیر k برابر با ۰/۴، ۰/۷ و ۱ در سطح ایمنی جانی با استفاده از نمودارهای IDA ترسیم شده است (شکل ۱۸)). با توجه به هر دو منحنی شکنندگی مشخص شد، زمانی که نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰/۴ است، بیشترین احتمال رخداد سطح ایمنی جانی وجود دارد. با افزایش نسبت تنش افقی به قائم از ۰/۴ به ۱، حدود ۲۰٪ احتمال آسیب‌پذیری سازه کاهش یافته است. بنابراین می‌توان دریافت که با افزایش نسبت تنش افقی به قائم، آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه کاهش می‌یابد. بنابراین اندازه‌گیری دقیق نسبت تنش افقی به قائم در ملاحظات لرزه‌ای سازه‌ها اهمیت زیادی دارد.

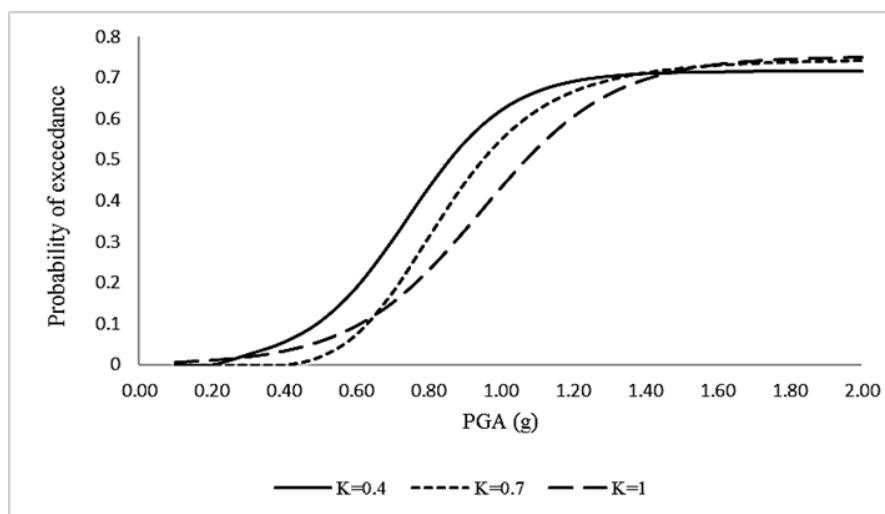
اما به منظور بررسی دقیق‌تر اثر عمق، در شدت لرزش برابر با $0.6g$ و زمین با مدول الاستیسیته ۲۶ مگاپاسکال شکل (۱۶) ترسیم شده است. منحنی‌ها نشان می‌دهد که احتمال آسیب لرزه‌ای سازه با افزایش عمق ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. شکل (۱۶) نشان می‌دهد که برای زلزله‌های با مشخصات متفاوت، عمق با بیشترین احتمال آسیب لرزه‌ای مقدار ثابتی نیست ولیکن در محدوده‌ای از عمق آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه افزایش می‌یابد. محدوده عمقی ۸ تا ۱۵ متر، سطح آستانه فروریزش پایینتری داشته و به همین دلیل احتمال فروریزش سازه در این محدوده عمق بیشتر می‌باشد. جهت ارزیابی دقیق‌تر، شرایط خاک دربرگیرنده تغییر داده شد و تحت خاک با مدول الاستیسیته ۵۰ مگاپاسکال مدلسازی‌ها تکرار شده است. نتایج این مدلسازی‌ها (شکل ۱۷)) نیز بیانگر این مسئله است که محدوده عمق ۸ تا ۱۵ متر به عنوان عمق بحرانی سازه مورد مطالعه می‌باشد. چائوما و همکاران^۱ [10] نیز با روشی متفاوت به بررسی اثر عمق بر پاسخ لرزه‌ای سازه زیرزمینی پرداختند و نشان دادند که بیشترین آسیب لرزه‌ای در محدوده عمق ۸ - ۱۵ متری از سطح زمین رخ می‌دهد.



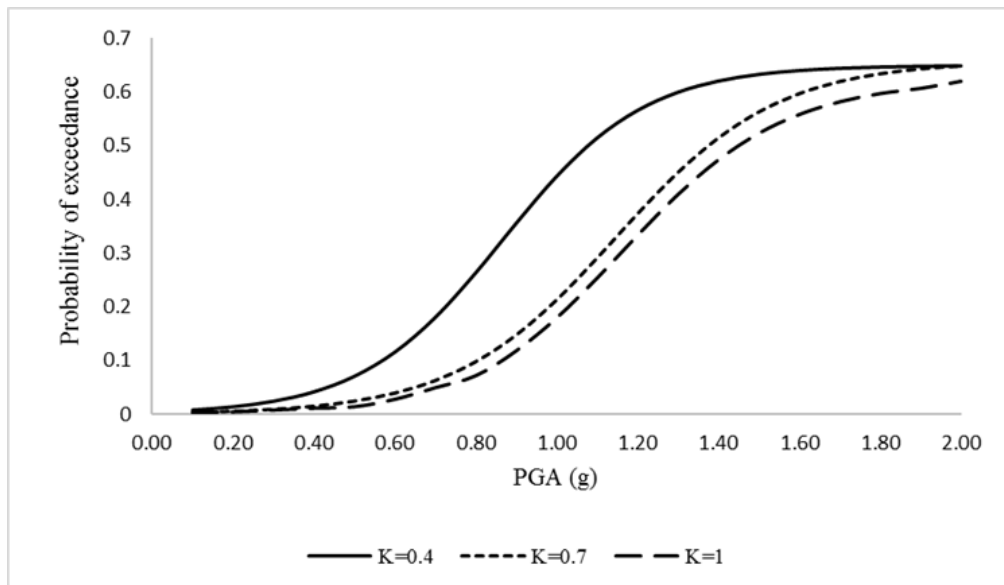
شکل ۱۶- بررسی احتمال رخداد سطوح آسیب ایمنی جانی و فروریزش با عمق سازه در محیط با مدول الاستیسیته ۲۶ مگاپاسکال.



شکل ۱۷ - بررسی احتمال رخداد سطوح آسیب ایمنی جانی و فروریزش با عمق سازه در محیط با مدول الاستیسیته ۵۰ مگاپاسکال.



شکل ۱۸- منحنی شکنندگی اثر نسبت تنش افقی به قائم در سطح ایمنی جانی در عمق ۱۳ متر



شکل ۱۹ - منحنی شکنندگی اثر تنش‌های برجا در عمق ۲۵ متر در سطح آسیب ایمنی جانی

نشان داد که در محدوده عمق ۸ تا ۱۵ متر از سطح زمین، با نسبت تنش‌های برجا برابر با ۰/۴، بیشترین آسیب لرزه‌ای در تونل‌های دوقلوی اهواز رخ خواهد داد. بنابراین این محدوده عمق را می‌توان به عنوان عمق بحرانی معرفی کرد و تمهیدات لازم جهت مقابله با آسیب‌های احتمالاتی در این محدوده از عمق اندیشیده شود.

- صرف نظر از محدوده عمق ۸ - ۱۵ متر که به عنوان عمق بحرانی سازه مورد مطالعه معرفی شده است، با افزایش عمق سازه‌های زیرزمینی، میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای کاهش می‌یابد.
- با افزایش نسبت تنش برجا از ۰/۴ به ۱ حدود ۲۰٪ احتمال آسیب به سازه در جریان رخدادهای لرزه‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان خاطر نشان کرد که با افزایش نسبت تنش‌های برجا، آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش آنالیز دینامیکی فزاینده (IDA) و منحنی‌های شکنندگی، تاثیر تنش برجا بر عملکرد لرزه‌ای تونل بررسی شده است تا میزان آسیب‌های وارد شده به سازه در عمق‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. مدل‌ها در نرم‌افزار FLAC 2D، در عمق‌های ۶، ۱۰، ۱۳، ۱۸ و ۲۵ متر و در نسبت تنش افقی به قائم ۰/۴، ۰/۷ و ۱ ساخته شده و تحت ۱۲ رکورد زلزله قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح زیر می‌باشند.

- بررسی منحنی‌های IDA چندگانه برای عمق‌های ۶، ۱۰، ۱۳، ۱۸ و ۲۵ متر نشان می‌دهد که زلزله‌های با PGA کمتر از ۰/۱۵g نمی‌توانند هیچ‌گونه آسیبی به سازه وارد کنند. زلزله‌های با PGA، ۰/۲g تا ۰/۴g شرایط بدون آسیب تا آسیب جزئی را به سازه تحمیل می‌کنند.
- بررسی منحنی‌های شکنندگی در PGA برابر با ۰/۶g

۶- منابع‌ها

- [1] D. Vamvatsikos and C. Allin Cornell, "Incremental dynamic analysis," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 31, no. 3, pp. 491–514, 2002.
- [2] J. B. Mander, R. P. Dhakal, N. Mashiko, and K. M. Solberg, "Incremental dynamic analysis applied to seismic financial risk assessment of bridges," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 10, pp. 2662–2672, 2007.
- [3] H. Masaeli, F. Khoshnoudian, and S. Musician, "Incremental dynamic analysis of nonlinear rocking soil-structure systems," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 104, no. September 2017, pp. 236–249, 2018.
- [4] G. Andreotti and C. G. Lai, "The role of overburden stress on the seismic vulnerability of deep tunnels," *Geotech. Eng. Infrastruct. Dev. - Proc. XVI Eur. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ECSMGE 2015*, vol. 2, pp. 393–399, 2015.
- [5] E. Debiassi, A. Gajo, and D. Zonta, "On the seismic response of shallow-buried rectangular structures," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 38, pp. 99–113, Sep. 2013.
- [6] H. Zhuang, Z. Hu, X. Wang, and G. Chen, "Seismic responses of a large underground structure in liquefied soils by FEM numerical modelling," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 13, no. 12, pp. 3645–3668, Dec. 2015.
- [7] U. Cilingir and S. P. G. Madabhushi, "Effect of depth on seismic response of circular tunnels," *Can. Geotech. J.*, vol. 48, no. 1, pp. 117–127, Jan. 2011.
- [8] C.-H. Chen, T.-T. Wang, F.-S. Jeng, and T.-H. Huang, "Mechanisms causing seismic damage of tunnels at different depths," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 28, pp. 31–40, Mar. 2012.
- [9] J. Mohammed, "Numerical Modelling for Circle Tunnel Under Static and Dynamic Loads for Different Depth," *Res. J. Min.*, vol. 1, no. January, pp. 1–11, 2017.
- [10] C. Ma, D. Lu, X. Du, and C. Qi, "Effect of buried depth on seismic response of rectangular underground structures considering the influence of ground loss," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 106, no. January, pp. 278–297, 2018.
- [11] S. A. Argyroudis and K. D. Pitilakis, "Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 35, pp. 1–12, 2012.
- [12] C. Osmi, S. Khadijah, and S. M. Ahmad, "Seismic Fragility Curves for Shallow Circular Tunnels under Different Soil Conditions," *Int. J. Civil, Environ. Struct. Constr. Archit. Eng.*, vol. 10, no. 10, pp. 1281–1287, 2016.
- [13] ش. کیسون, "گزارش روش اجرایی تونل, روش اجرایی تولید و انتقال سگمنت," ۱۳۸۹.
- [14] R. Shahi, N. T. K. Lam, E. F. Gad, and I. Saifullah, "Choice of Intensity Measure in Incremental Dynamic Analysis," 2014.
- [15] V. B.-S. engineering and and undefined 1977, "Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments," *Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ*.
- [16] P. Bazzurro and C. A. Cornell, "Seismic Hazard Analysis of Nonlinear Structures. II: Applications," *J. Struct. Eng.*, vol. 120, no. 11, pp. 3345–3365, Nov. 1994.
- [17] S.-Y. Yun, R. O. Hamburger, C. A. Cornell, and D. A. Foutch, "Seismic Performance Evaluation for Steel Moment Frames," *J. Struct. Eng.*, vol. 128, no. 4, pp. 534–545, Apr. 2002.
- [18] N. Luco and C. A. Cornell, "Effects of Connection Fractures on SMRF Seismic Drift Demands," *J. Struct. Eng.*, vol. 126, no. 1, pp. 127–136, Jan. 2000.
- [19] C. A. Vamvatsikos, Dimitrios; Cornell, "Seismic Performance , Capacity and Reliability of Structures As Seen Through Incremental Dynamic Analysis," 2005.
- [20] L. Ye, Q. Ma, Z. Miao, H. Guan, and Y. Zhuge, "Numerical and comparative study of earthquake intensity indices in seismic analysis," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 22, no. 4, pp. 362–381, Mar. 2013.
- [21] Y. M. A. Hashash, J. J. Hook, B. Schmidt, and J. I-Chiang Yao, "Seismic design and analysis of underground structures," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 247–293, 2001.
- [22] J. N. Wang and G. A. Munfakh, "Seismic design of tunnels," *Adv. Earthq. Eng.*, vol. 9, pp. 589–598, 2001.
- [23] ک. گشتاسبی, and فر. ح. نجاتی‌آرشام, مویدی [23] ها با استفاده از تحلیل دینامیکی ای تونلی لرزه, مطالعه فزاینده, "دانشگاه تربیت مدرس, ۱۳۹۷.
- [24] B. R. Ellingwood, D. V. Rosowsky, Y. Li, and J. H. Kim, "Fragility assessment of light-frame wood construction subjected to wind and earthquake hazards," *J. Struct. Eng.*, vol. 130, no. 12, pp. 1921–1930, Dec. 2004.
- [25] R. P. Kennedy, C. A. Cornell, R. D. Campbell, S. Kaplan, and H. F. Perla, "Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 59, no. 2, pp. 315–338, Aug. 1980.
- [26] A. J. Kappos, "An overview of the development of the hybrid method for seismic vulnerability assessment of buildings," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 12, no. 12, pp. 1573–1584, Dec. 2016.
- [27] A. H. M. Muntasir Billah and M. Shahria Alam, "Seismic fragility assessment of highway bridges: a

state-of-the-art review,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 11, no. 6, pp. 804–832, Jun. 2015.

[28] M. Jamshidi Avanaki, A. Hoseini, S. Vahdani, C. de Santos, and A. de la Fuente, “Seismic fragility curves for vulnerability assessment of steel fiber reinforced concrete segmental tunnel linings,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 78, no. April, pp. 259–274, 2018.

[29] S. Argyroudis, K. Pitilakis, N. Boussoulas, and F. Nakou, “Vulnerability Assessment of Shallow Metro Tunnels in Greece,” *4th Int. Conf. Earthq. Geotech. Eng.*, no. 1693, p. Paper No. 1693, 2007.

[30] G. Andreotti and C. G. Lai, “Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 91, no. March, p. 103008, 2019.

[31] A. Salemi, M. Esmacili, and F. Sereshki, “Normal and shear resistance of longitudinal contact surfaces of segmental tunnel linings,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 77, pp. 328–338, Jul. 2015.

[32] I. Itasca Consulting Group, “Itasca (2012) FLAC-2D ver. 7 (fast Lagrangian analysis of continua): user’s guide,” *itasca*. 2012.