



ارزیابی منحنی شکنندگی سازه قاب خمی فولادی کوتاه مرتبا تحت اثر خوردگی و پس لرزه پس از زلزله اصلی

محمدحسین رزمخواه^۱، محسن قادری^۲ و محسن گرامی^{۳*}

۱ دانشجوی دکتری زلزله، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان

۲ دکتری زلزله، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان

۳ استاد گروه زلزله، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان

mgerami@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

چکیده

پس لرزه در سازه هایی که در اثر زلزله اصلی دچار خسارت شده اند ممکن است موجب خرابی گسترده شود. از طرفی سازه های فولادی در مناطق شرچی مستعد پدیده خوردگی هستند. اثر هم زمان خوردگی، خسارت ناشی از زلزله اصلی و پس لرزه می تواند خرابی های ایجاد شده را تشید نماید، اما در آیین نامه های کوتني اثر پس لرزه و خوردگی را در محاسبات لحظه نمی کنند. در این مقاله به بررسی خرابی حاصل از اثر توأم ان خوردگی، پس لرزه و خسارت حاصل از زلزله اصلی با استفاده از منحنی های شکنندگی که میزان آسیب پذیری سازه را مشخص می کند، پرداخته می شود. سازه سه طبقه در ابتدا با استفاده از آیین نامه های طراحی مدل سازی شده و سپس برای ستون های طبقه اول آن خوردگی مناسب با ۲۰ سال لحظه شده و تحت تحلیل IDA افزایشی تحت رکورده زلزله اصلی و پس لرزه قرار گرفته و بیشترین جایه جایی نسبی طبقات به عنوان تقاضا تعیین می شود و سپس در ادامه منحنی های شکنندگی برای سازه مورد نظر ترسیم می شود. با توجه به نتایج مشاهده می شود که میزان آسیب پذیری سازه دچار خوردگی مناسب با ۲۰ سال تحت اثر زلزله و پس لرزه نسبت به سازه فاقد خوردگی تحت زلزله اصلی و همچنین سازه فاقد خوردگی تحت زلزله اصلی و پس لرزه در میانه شکنندگی به ترتیب؛ درشدت خرابی کم و متوسط تقاضت معناداری مشاهده نمی شود اما در سطوح خرابی شدید میزان آسیب پذیری ۱۹٪ و ۳۲٪ افزایش پیدا می کند، در ۱۶٪ شکنندگی میزان آسیب پذیری به ترتیب؛ درشدت خرابی کم و متوسط تغییری نمی کند اما در سطوح خرابی شدید ۲۲٪ و ۳۷٪ افزایش می باید و در سطح خرابی کامل حدود ۳۰٪ و ۵۲٪ افزایش پیدا می کند.

واژگان کلیدی: خوردگی، زلزله اصلی، پس لرزه، منحنی شکنندگی.

۱- مقدمه

یک ماده در اثر واکنش با محیطی که در آن قرار دارد تعریف می کنند [۱، ۲]. انواع خوردگی در شکل (۱) نمایش داده شده است.

تقریباً هر ماده فلزی در صورت وجود محیط مرطوب در معرض خوردگی قرار می گیرد؛ خوردگی را تخریب یا فساد

شکل ۱. انواع خوردگی [۱]

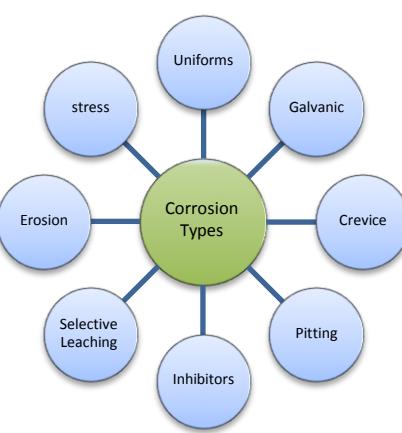


Fig. 1. Types of corrosion [1]

در میان آن‌ها ۶۰ پس‌لرزه دارای بزرگای ۶ و ۳ پس‌لرزه به بزرگای ۷ ریشتر مشاهده شد [۹]. در زلزله تای چی چی ۱۹۹۹، یک ایستگاه گاز پس‌از‌آنکه در زمان زلزله اصلی خسارت دیده بود در پس‌لرزه اتفاق افتاده سقوط کرد و موجب ایجاد آتش‌سوزی و خسارات فراوانی شد [۱۰]. کریستچرچ دومین شهر بزرگ نیوزلند زلزله‌ای به بزرگای ۷ را در ۴ سپتامبر ۲۰۱۰ تجربه کرد، پس از ۵ ماه، پس‌لرزه‌ای به بزرگای ۶,۳ در تاریخ ۲۲ فوریه ۲۰۱۱ رخ داد، این پس‌لرزه منجر به کشته شدن ۱۸۵ و حدود ۹۵ میلیارد دلار هزینه بازسازی شد [۱۱]. تأخیر بین زلزله اصلی و بزرگ‌ترین پس‌لرزه می‌تواند بین چند دقیقه تا چند ماه باشد به گونه‌ای که پیش‌بینی تأخیر دشوار است. ترکیب لرزه اصلی و پس‌لرزه‌ها باعث می‌شود که سازه به قابلیت جذب انرژی بیشتری نیاز داشته باشد. هنگامی که یک زلزله قوی رخ می‌دهد، اعضای فولادی خوردگی شده بیشتر احتمال دارد که چهار آسیب و شکست بشوند. به عنوان نمونه، زلزله ون چوان در چین، زلزله اوزاکا در ژاپن [۱۲]، زلزله نزدیک در ۱۹۹۴ و زلزله آلاسکا در سال ۱۹۶۴ که در آن سازه‌های خوردگی شده چهار خرابی و شکست بیشتری نسبت به سازه‌ها دیگر شده‌اند [۱۳]. روش کاهش ضخامت بال و جان برای شبیه‌سازی اثر خوردگی روی اعضا مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴] و نتیجه گویای آن بوده است که ضخامت ورق عامل مهمی است که بر رفتار مکانیکی تیرهای فولادی H شکل پس از خوردگی تأثیر می‌گذارد و هرچه ضخامت بال یا جان کم‌تر باشد، ظرفیت باربری بیشتر کاهش می‌یابد [۱۵].

در صورت تقسیم‌بندی محیط‌های ایجاد‌کننده خوردگی می‌توان این مورد را در سه حوزه کلی خوردگی در محیط اتمسفری، خوردگی در آب دریا و خوردگی در خاک تقسیم‌بندی نمود. در این مقاله به بررسی خوردگی یکنواخت اتمسفری پرداخته می‌شود. خوردگی ناشی از اتمسفرهای مختلف، از نظر هزینه و مقدار، از هر نوع محیط خوردگی دیگری به تنها یکی بیشتر باعث انهدام می‌شود. اتمسفرها را می‌توان به سه دستهٔ صنعتی، دریایی و روسیابی تقسیم‌بندی کرد. خوردگی بیشتر به خاطر رطوبت و اکسیژن است ولی به وسیلهٔ ناخالصی‌هایی مثل ترکیبات گوگردی و سدیم کلراید مسئله حادتر می‌شود. خوردگی در ساحل دریا ۴۰۰ تا ۵۰۰ برابر خوردگی در یک ناحیه کویری است. اتمسفرهای صنعتی بیشتر به خاطر گازهای گوگرددار حاصل از احتراق سوخت‌ها، خورنده‌تر از اتمسفرهای روسیابی هستند، همچنین گاز SO_2 در حضور رطوبت تشکیل سولفوریک اسید می‌دهد که بسیار خورنده است.

خوردگی تهدیدی جدی برای اینمی سازه‌های عمرانی و سیستم‌های زیرساختی است. برای پل‌های، که به دلیل هزینه نسبتاً کم و سهولت ساخت، نوع پل غالباً فولادی هستند، خوردگی بدون برآورد دقیق، یک تهدید بزرگ برای عمر سازه محسوب می‌شود [۳]. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، مقاومت نهایی فولاد در صورتی که میزان خوردگی در عضو فولادی بیش از ۱۵٪ باشد، از مقادیر پیش‌فرض ارائه شده برای مقاومت عضو خوردگی شده در استانداردهای ایالات متحده کمتر است [۴].

با افزایش میزان خوردگی ظرفیت باربری جانبی، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی کاهش می‌یابد [۵]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط ونگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۱ برای اتصال تیر به ستون که با مشخصات ستون به صورت عرض بال ۲۵۰، عمق جان ۲۲۲، ضخامت بال ۱۴ و ضخامت جان ۹ میلی‌متر و همچنین مشخصات تیر به صورت عرض بال ۱۷۵، عمق جان ۳۲۸، ضخامت بال ۱۱ و ضخامت جان ۷ میلی‌متر است؛ میزان خوردگی یکنواخت ۲,۱۳ میلی‌متری به ترتیب میزان مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی را به میزان ۲۸,۲٪ و ۳۲,۱٪ کاهش می‌یابد [۶].

از طرفی احتمال وقوع پس‌لرزه پس از لرزه اصلی دور از انتظار نیست به صورتی که پس از برخی زلزله‌ها، پس‌لرزه‌هایی وجود دارد که دارای پتانسیل ایجاد صدمه شدید به سازه‌ها و تهدید اینمی ساکنین را دارند، حتی اگر سازه در زمان لرزه اصلی آسیب جزئی دیده باشد هم از این قاعده جدا نیست [۷, ۸]. پس از زلزله سال ۲۰۱۱ در توکیو ژاپن، ۵۶۸ پس‌لرزه با بزرگای ۵ ریشتر ثبت شد که

خوردگی، زلزله اصلی و پس لرزه پرداخته شده است که پیش از این اثر هم زمان این سه عامل بررسی نشده است.

شکل ۲. پلان طبقات ساختمان سه طبقه

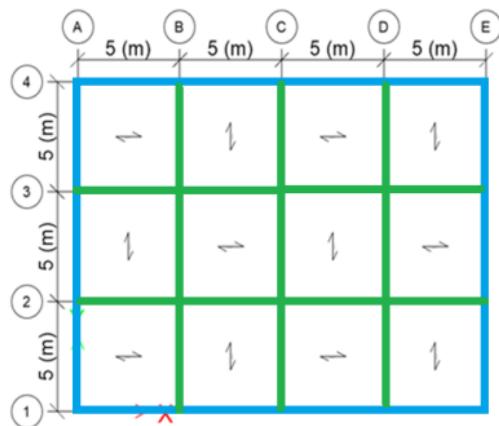


Fig. 2. Floor plan of three-story buildings

مبناه انتخاب میزان کاهش ضخامت ستون برای لحاظ نمودن خوردگی بدین صورت است که فرض می‌شود سازه مورد بررسی در منطقه ساحلی و صنعتی با میزان آلودگی بالای SO₂ (حدود ۲۵۰ میلی‌گرم بر مترمکعب) قرار داد. درنتیجه با توجه به استاندارد ISO9223 دسته‌بندی محیط از لحاظ خورندگی اتمسفری دسته CX محسوب می‌شود. با توجه به آنکه میزان خوردگی ۲۰ سال مدنظر می‌باشد بر اساس استاندارد ISO9224 میزان کاهش ضخامت در اثر خوردگی اتمسفری یکنواخت برابر ۳۳۵۴ میکرومتر می‌باشد که با فرض اینکه ستون‌ها طبقه اول در معرض خوردگی باشند این مقدار از ضخامت فولاد ستون طبقه اول کم می‌شود (شکل ۳).

استانداردهایی که در این مقاله برای بررسی خوردگی استفاده می‌شود استاندارد ISO 9923 و ISO 9224 برای محاسبه میزان خوردگی با توجه به عمر سازه است. استاندارد ISO 9223 به بررسی میزان خوردگی در سال اول در محیط‌های مختلف اتمسفری می‌پردازد. با استفاده از استاندارد ISO 9224 که پیوستی برای استاندارد ISO 9223 می‌باشد می‌توان میزان خوردگی را برای سال‌های بعدی محاسبه کرد.

۲- معرفی مدل مورد بررسی

سازه سه‌بعدی سه‌طبقه در منطقه‌ای با خطر نسبی زیاد و نوع خاک ۳ است با ارتفاع طبقه اول ۲/۸ متر و ارتفاع سایر طبقات ۳/۲ متر و سقف تیرچه‌بلوک با دیافراگم صلب فرض شده است و تنش تسلیم فولاد ۲۴۰۰ kgf/cm² و تنش نهایی فولاد ۳۷۰۰ kgf/cm² در نظر گرفته شده است (شکل ۲). مقاطع تیرها I شکل بوده و مقاطع ستون‌ها قوطی می‌باشد و در جدول (۱) نمایش داده شده است. جدول (۱) تیر با ابعاد ۱۸×۲۰ به معنای تیر با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و عرض بال ۱۸ سانتی‌متر و همچنین ضخامت ۱ سانتی‌متر است و ستون با ابعاد ۲۲×۲۲×۱ به معنای ستون قوطی ۲۲ در ۲۲ سانتی‌متر با ضخامت ۱ سانتی‌متر می‌باشد. محیط‌های مختلف اتمسفری می‌پردازد. با استفاده از استاندارد ISO 9224 که پیوستی برای استاندارد ISO 9223 می‌باشد می‌توان میزان خوردگی را برای سال‌های مختلف به دست آورد. در این مقاله فرض می‌شود که سازه در محیط ساحلی قرار دارد و دسته‌بندی محیط خورندۀ جز دسته CX می‌باشد و میزان خوردگی برای ۲۰ سال مدنظر می‌باشد. درنتیجه مقدار کاهش ضخامت سازه فولادی برای ۲۰ سال برابر ۳۳۵۴ میکرومتر می‌باشد. در این مقاله به بررسی اثر هم زمان

جدول ۱. مشخصات مقاطع تیر و ستون‌های سازه سه‌طبقه

Number of story	Beam selected by green color	Beam selected by blue color	column				
			1-A, 1-B, 1-C, 1-D, 1-E	2-A, 2-D	3-A, 3-D	4-A, 4-B, 4-C, 4-D, 4-E	column
1	20*18*1	20*16*0.8	27*27*1				22*22*1
2	20*18*1	20*16*0.8	25*25*0.8				20*20*0.8
3	20*18*1	20*16*0.8	25*25*0.8				20*20*0.8

Table 1. Specifications of the beams and columns of the three-story structure

قاب انتخاب شده با مقیاس ۱:۸ در دانشگاه بوفالو واقع در نیویورک با رعایت تمام جزئیات ساخته شده است و در شکل (۵) دیده می شود.

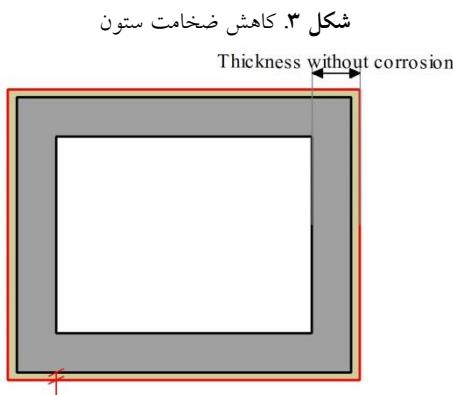


Fig. 3. Reducing the thickness of the column

۳- درستی آزمایی

برای درستی آزمایی نتایج جابه جایی نسبی یک نمونه آزمایشگاهی با مقادیر به دست آمده از نرم افزار OpenSees مقایسه می شود. نمونه آزمایشگاهی درواقع یک قاب خمشی فولادی چهار طبقه دو دهانه دوبعدی با مقیاس ۱:۸ از ساختمان اصلی واقع در شهر لس آنجلس در کشور ایالات متحده آمریکا می باشد این ساختمان دارای کاربری اداری بوده و نوع خاک D می باشد و فاصله محور ستون ها از هم ۹۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ستون طبقه اول ۴۶۰۰ میلی متر و سایر ستون طبقه ها ۳۷۰۰ میلی متر می باشد. این سازه بر اساس استاندارد IBC طراحی شده است [۱۶]. آزمایشگاه با ابعاد کامل در شکل (۴) نمایش داده شده است.

شکل ۴. جزئیات قاب پلان ساختمان و قاب انتخاب شده برای مدل سازی در آزمایشگاه [۱۷]

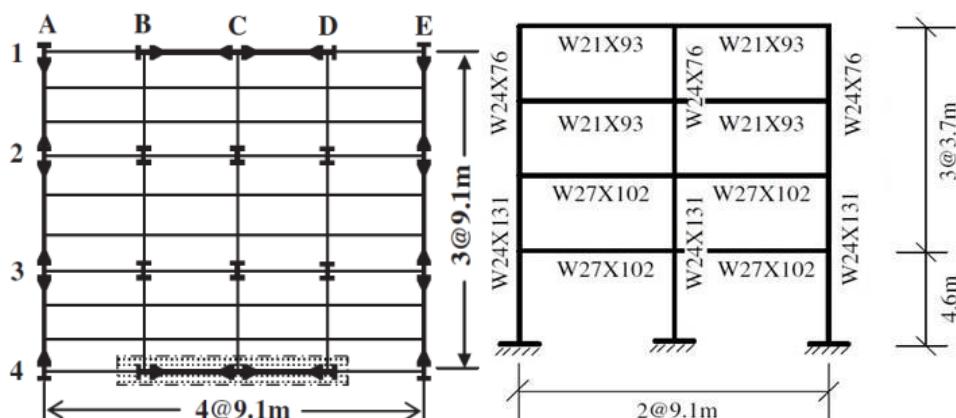


Fig. 4. Details of the frame of the building plan and the frame selected for modeling in the laboratory [۱۷]

شکل ۵. مدل سازی نمونه به مقیاس ۱:۸ در آزمایشگاه دانشگاه بوفالو واقع در شهر لس آنجلس [۱۸]

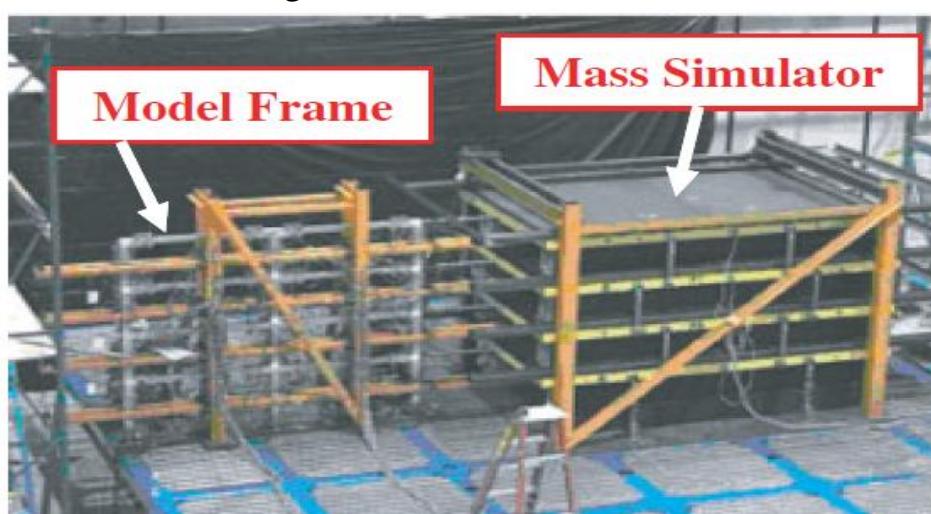


Fig. 5. Modeling of the sample 1:8 in the laboratory of the University of Buffalo located in the city of Los Angeles [۱]

۴- مشخصات ستبل نگاشت‌ها

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده به نوع رکورد زلزله بستگی دارد و برای تعیین پاسخ سازه نیاز به انتخاب ستبل نگاشت‌هایی می‌باشد که بتواند به خوبی همه حالات رفتار سازه را در نظر بگیرد. در این مقاله از 20° رکورد زلزله با پیشینه ستبل زمین (PGA) بیشتر از 4° ستبل ثقل زمین استفاده شده است و همچنین با توجه به آنکه نوع خاک برای مدل‌سازی خاک نوع ۳ است، سرعت موج بررشی رکوردهای انتخابی بین 175m/s تا 375m/s است و از آنجایی که در این مقاله اثر پس‌لرزه نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ رکوردها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دارای پس‌لرزه به بزرگای ۵ ریشتر باشند [۹]. انتخاب پس‌لرزه بدین صورت بوده که رکوردهایی انتخاب شده است که در همان ایستگاه ثبت رکورد گزارش پس‌لرزه با شرایط اینکه پس‌لرزه دارای بزرگی ۵ ریشتر بوده و پس از چند ساعت، چند روز یا چند ماه پس از زلزله اصلی اتفاق افتاده است درحالی که PGA زلزله اصلی در آن ایستگاه بیشتر از 4°g می‌باشد.

رکوردهای انتخابی که از سایت PEER به دست آمده در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد. در حالت واقعی بین زلزله و پس‌لرزه فاصله زمانی وجود دارد و پس‌لرزه معمولاً بلافاصله پس از زلزله اصلی اتفاق نمی‌افتد بر این مبنای 3 پیشنهاد داده است که یک فاصله زمانی 100 ثانیه‌ای بین زلزله اصلی و پس‌لرزه مربوط به آن در نظر گرفته شود [۱۹]، درواقع این فاصله زمانی 100 ثانیه‌ای مدت زمانی را برای سازه فراهم می‌نماید تا بتواند ارتعاش آزاد خود را انجام دهد و هنگام وارد شدن پس‌لرزه سازه تحت زلزله اصلی قرار نگرفته باشد. برای رسم منحنی‌های شکنندگی تمامی رکوردهای زلزله اصلی به 1g مقیاس شده‌اند و همچنین برای واردکردن رکورد زلزله اصلی به همراه پس‌لرزه پس از مقیاس شدن زلزله اصلی، پس‌لرزه مربوط به آن رکورد به نسبت ضرب موردنیاز برای رسیدن زلزله اصلی به مقیاس 1g ضرب می‌شود. شکل (۷) نمونه‌ای از ادغام زلزله اصلی و پس‌لرزه یکی از رکوردها زلزله می‌باشد.

رکورد زلزله ثبت شده نورثربیج در ایستگاه کانوگا پارک ۲ در تاریخ ۱۹۹۴ میلادی با نسبت پیشینه PGA $0,4, 1, 1,5, 2, 2, 2$ و به قاب وارد شده، و پیشینه جایه‌جایی بالای قاب ثبت شده است. برای مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees از مصالح steel 02 استفاده شده است. مدل رفتاری غیرخطی مصالح به صورت پلاستیسیته گسترده در نظر گرفته شده است در این مدل به هر نقطه انگرال‌گیری در طول عضو اجازه تسلیم و جاری شدن داده می‌شود.

شکل ۶. نمودار پوش دینامیکی

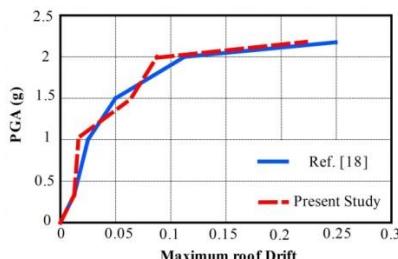


Fig. 6. pushover diagram

در شکل (۶) چهار تحلیل بدین صورت که رکورد زلزله ثبت شده نورثربیج در ایستگاه کانوگا پارک در تاریخ ۱۹۹۴ میلادی، بار اول با مقیاس نمودن ماکریم PGA رکورد به $0,4$ به سازه وارد شده و ماکریم جایه‌جایی بالای قاب ثبت شد. بار دوم بیشترین PGA رکورد به 1 مقیاس شد و دوباره بیشترین جایه‌جایی بالای قاب برای این رکورد ثبت شد، برای بار سوم همین کار برای PGA $1,5$ و بار دیگر برای PGA 2 تکرار شد و نمودار استخراج شد. در شکل (۶) مقدار جایه‌جایی نسبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees در پیشینه PGA $0,4$ برهمنه هماهنگی می‌باشد. در PGA 1 یک نتیجه مدل‌سازی مقدار جایه‌جایی نسبی را در حدود 20% کمتر نسبت به جایه‌جایی نسبی مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در PGA 2 یک و نیم مقدار جایه‌جایی نسبی مدل‌سازی 23% بیشتر از جایه‌جایی نسبی مدل آزمایشگاهی است و در PGA $2,2$ دو مقدار جایه‌جایی نسبی مدل‌سازی 21% کمتر از جایه‌جایی نسبی مدل آزمایشگاهی بوده و در PGA $2,2$ مقدار جایه‌جایی نسبی مدل سازی 14% کمتر از جایه‌جایی نسبی مدل آزمایشگاهی است. در نتیجه بیشترین مقدار اختلاف نمونه مدل‌سازی شده با نمونه آزمایشگاهی 23% در پیشینه PGA برابر یک و نیم می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات رکوردهای زلزله

Record number	Record name	Station name	Soil type	Magnitude of main shock	PGA(g) of main shock	Rjb (km)	Date of the main earthquake	Date of the after shock	Magnitude of after shock
1	Chalfant valley	Zack Brothers Ranch	III	6.19	0.447	7.58	7/21/1986	7/31/1986	5.44
2	Coalinga	Oil-City	III	5.77	0.464	8.46	7/22/1983	5/9/1983	5.09
3	Northridge	Sun Valley - Roscoe Blvd	III	6.69	0.604	10.05	1/17/1994	3/20/1994	5.28
4	Imperial Valley	El Centro Array #11	III	6.53	0.37	12.56	10/15/1979	10/15/1979	5.01
5	Coalinga	14Th & Elm (Old CHP)	III	5.77	0.84	10.78	7/22/1983	7/22/1983	4.89
6	Imperial Valley	Bonds Corner	III	6.53	0.776	2.66	10/15/1979	10/16/1979	5.01
7	Mammoth lakes	Convict Creek	III	6.06	0.444	6.63	5/25/1980	5/27/1980	5.31
8	Mammoth lakes	Fish & Game (FIS)	III	5.94	0.376	12.39	5/25/1980	6/28/1980	4.85
9	Mammoth lakes	Mammoth Lakes H. S	III	6.06	0.44	9.12	5/25/1980	5/25/1980	5.69
10	Managua-Nicaragua	Managua-Esso	III	6.24	0.371	4.06	12/12/1972	12/23/1972	5.2
11	Northridge	Northridge - 17645 Saticoy St	III	6.69	0.459	12.09	1/17/1994	3/20/1994	5.28
12	Northridge	Canoga Park - Topanga Can	III	6.69	0.392	14.7	1/17/1994	3/20/1994	5.28
13	Northridge	Jensen Filter Plant Administrative Building	III	6.69	0.617	5.43	1/17/1994	3/20/1994	5.28
14	Northridge	La - Sepulveda Va Hospital	III	6.69	0.93	8.44	1/17/1994	3/20/1994	5.28
15	Northridge	Newhall - Fire Sta	III	6.69	0.59	5.92	1/17/1994	3/20/1994	5.2
16	Northridge	Rinaldi Receiving Sta	III	6.69	0.87	6.5	1/17/1994	3/20/1994	5.28
17	Imperial Valley	El Centro Array #4	III	6.53	0.48	7.05	10/15/1979	10/15/1979	5.01
18	Imperial Valley	El Centro Array #5	III	6.53	0.53	3.95	10/15/1979	10/15/1979	5.01
19	Imperial Valley	El Centro Array #7	III	6.53	0.57	0.56	1979	10/15/1979	5.01
20	Imperial Valley	El Centro Array #8	III	6.53	0.61	3.86	1979	10/15/1979	5.01

Table 2. Characteristics of earthquake records

شکل ۷. شتاب نگاشت زلزله و پس لرزه مقیاس شده رکورد Mammoth Lakes-Convict Creek

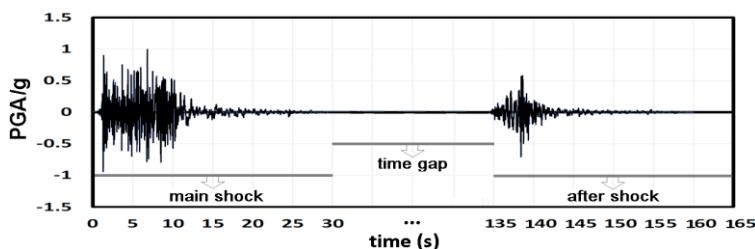


Fig. 7. Accelerometer of the reported earthquake and aftershock of the Mammoth Lakes-Convict Creek

جدول ۲. دسته‌بندی محیط‌های خورنده اتمسفری بر اساس استاندارد [۲۰] ISO 9223

Corrosivity category	Corro sivity	Typical environments - Examples	
		indoor	Outdoor
C1	Very low	Heated spaces with low humidity and insignificant pollution, e.g. offices, schools, museums	Dry or cold zone, atmospheric environment with very low pollution and time of wetness, e.g. certain deserts, Central Arctic/Antarctica
C2	Low	Unheated spaces with varying temperature and relative humidity. Low frequency of condensation and low pollution, e.g. storage, sport halls	Temperate zone, atmospheric environment with low pollution ($\text{SO}_2 < 5\text{mg/m}^3$), e.g. rural areas, small towns Dry or cold zone, atmospheric environment with short time of wetness, e.g. deserts, subarctic areas
C3	Medi um	Spaces with moderate frequency of condensation and moderate pollution from production process, e.g. food-processing plants, laundries, breweries, dairies	Temperate zone, atmospheric environment with low pollution ($\text{SO}_2: 5\text{mg/m}^3$ to 30mg/m^3) or some effects of chlorides, e.g. urban area, coastal area with low deposition of chlorides Subtropical and tropical zone, atmosphere with low pollution
C4	High	Spaces with high frequency of condensation and high pollution from production processing plants, swimming pools	Temperate zone, atmospheric environment with low pollution ($\text{SO}_2: 30\text{mg/m}^3$ to 90mg/m^3) or substantial effect of chlorides, e.g. polluted urban area, industrial areas, costal area without spray of salt water or exposure to strong effect of de-icing salts Subtropical and tropical zone, atmosphere with medium pollution
C5	Very high	Spaces with very high frequency of condensation and/or with high pollution from production process, e.g. mines, caverns for industrial purposes, unventilated sheds in subtropical and tropical zones	Temperate and subtropical zone, atmospheric environment with very high pollution ($\text{SO}_2: 90\text{mg/m}^3$ to 250mg/m^3) and/or significant effect of chlorides, e.g. industrial area, costal area, sheltered positions on coastline
CX	Extre me	Spaces with almost permanent condensation or extensive humidity effects and/or with high pollution from production process, e.g. unventilated sheds in humid tropical zones with penetration of outdoor pollution including airborne chlorides and corrosion-simulating particulate matter	Subtropical and tropical zone (very high time of wetness), atmospheric environment with very high SO_2 pollution (higher than 250 mg/m^3) including accompanying and production factors and/or strong effect of chlorides, e.g. extreme industrial areas, costal and offshore areas, occasional contact with salt spray

Table 3. Classification of atmospheric corrosive environments based on ISO 9223 [18]

جدول ۴. مقدار خوردگی برای شرایط محیطی مختلف اتمسفری بر حسب میکرومتر بر اساس استاندارد ISO 9224 [۲۱]

Metal	Crrosivity category	Exposure time years				
		1	2	5	10	15
Carbon steel	C1	1.3	1.9	3	4.3	5.4
	C2	25	36	58	83	103
	C3	50	72	116	167	206
	C4	80	115	186	267	330
	C5	200	287	464	667	824
	CX	700	1006	1624	2334	2885

Table 4. The amount of corrosion for different atmospheric environmental conditions in micrometers based on the ISO 9224 standard [19]

جدول ۵. میزان جابه‌جایی نسبی برای سطوح مختلف خرابی بر اساس آئین نامه HAZUS-MHMR-5 [۲۲]

Building type	Inter-Story Drift Ratio			
	Slight damage	Moderate damage	Extensive damage	Complete damage
Three story steel moment frame	0.006	0.0104	0.0235	0.06

Table 5. The amount of relative displacement for different damage levels based on HAZUS-MHMR-5 regulations [۲۲]

۶- تعریف سطوح خرابی

برای مشخص کردن میزان آسیب وارد شده به سازه آئین نامه HAZUS-MHMR-5 چهار سطح خرابی را بر اساس میزان تعییر مکان نسبی معرفی کرده است که شامل سطوح خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل می‌شود. در جدول (۵) میزان تعییر مکان نسبی بین طبقات یا همان جابه‌جایی نسبی را برای سطوح مختلف خرابی نشان می‌دهد.

۷- منحنی IDA سازه‌ها تحت زلزله اصلی و پس‌لرزه

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی (IDA) یک روش تحلیل لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد سازه است و قادر است که رفتار سازه را در طیف وسیعی از شدت‌های مختلف زلزله توصیف کند، با کمک تحلیل IDA، احتمال فروپاشی و درصد گذرا از یک حد خاص آسیب را می‌توان شناسایی کرد. شدت یک زلزله را می‌توان با روش‌های مختلفی تعریف نمود به عنوان نمونه می‌توان از بیشینه شتاب زمین (PGA) بیشینه سرعت زمین (PGV) و شتاب طیفی مود اول سازه که قابلیت مقیاس‌پذیری دارند استفاده نمود. در این مقاله برای شدت زلزله از معیار PGA استفاده شده است. از جمله دیگر قابلیت‌های تحلیل IDA می‌توان به معرفی مصالح با رفتار غیرخطی و انجام تحلیل به صورت دینامیکی اشاره نمود که متهی به

با استفاده از استاندارد ISO 9223 که پیوستی برای استاندارد ISO 9224 می‌باشد می‌توان میزان خوردگی را برای سال‌های مختلف به دست آورد. در جدول (۴) میزان خوردگی برای فولاد کربنی برای سال‌های مختلف بر اساس دسته‌بندی محیط خورنده آورده شده است.

میزان خوردگی که برای این مقاله در نظر گرفته شده است متناسب با ۲۰ سال خوردگی در محیط خورنده با دسته‌بندی CX می‌باشد که مربوط به منطقه نیمه گرم‌سیری با شرایط رطوبت بالا و آلودگی SO2 زیاد می‌باشد (جدول (۳) مشاهده گردد) (میزان ۲۵۰ میلی گرم بر مترمکعب).

در این پژوهه در ابتدا سازه سه‌طبقه سه‌بعدی بدون اثر خوردگی که در بخش ۲ معرفی شد تحت رکوردهای زلزله اصلی قرار می‌گیرد و تحلیل IDA برای آن انجام گرفته و منحنی‌های شکنندگی با توجه به مطالب ارائه شده در بخش‌های ۶ استخراج می‌شوند و سپس همان سازه تحت اثر رکوردهای زلزله اصلی و پس‌لرزه قرار گرفته و منحنی شکنندگی برای آن استخراج به دست می‌آید. در ادامه سازه سه‌طبقه سه‌بعدی که در بخش ۲ معرفی شد با آثار خوردگی یکنواخت روی ستون‌های طبقه اول متناسب با ۲۰ سال خوردگی در شرایط محیطی CX تحت رکوردهای زلزله اصلی و پس‌لرزه قرار گرفته و منحنی شکنندگی برای آن به دست می‌آید و سپس مورد میزان تعییر آسیب‌پذیری بحث می‌شود.

ظرفی هدف این مقاله نشان دادن بیشترین حد خرابی ممکن است که این مورد با مقایسه سازه خورده نشده تحت زلزله اصلی به عنوان مینا و سازه دچار خوردگی تحت زلزله و پس لرزه به دست می آید و اختلاف این دو را می توان به عنوان حاشیه ایمنی برای سازه هایی که در معرض خوردگی قرار دارند لحاظ نمود.

با توجه به نتایج منحنی های IDA که در شکل (۸) نمایش داده شده است؛ می توان نتیجه گرفت سازه های که فقط تحت زلزله اصلی بوده در برابر سازه های که هم تحت زلزله اصلی و هم پس لرزه قرار گرفته در PGA بیشتری به نسبت جابه جایی متناظر برای رکورد با پس لرزه می رسد. هنگامی که خوردگی در ستون طبقه اول سازه منظور می شود مقدار آسیب وارد بر سازه که همان طور که بیان شد مقدار جابه جایی نسبی است با مقدار PGA کمتری آسیب متناظر با سازه تحت زلزله اصلی و همچنین سازه تحت زلزله اصلی و پس لرزه را تجربه می کند.

دقت بیشتر نسبت به تحلیل پوش آور می شود [۲۳]. ملاک توقف تحلیل IDA در هریک از موارد رسیدن مقدار بیشینه جابه جایی نسبی طبقات به مقدار جابه جایی نسبی خرابی کامل می باشد که مقدار آن 0.6^+ و در استاندارد Hazus برای مقدار جابه جایی نسبی خرابی کامل سازه های کوتاه مرتبه مشخص شده است.

انتخاب شاخص خرابی مناسب بستگی زیادی به کاربری سازه، نوع سازه و اهمیت آن دارد. در این مقاله بیشترین شتاب زمین به عنوان پارامتر معرف شدت زلزله و مقدار بیشینه جابه جایی نسبی بین طبقات به عنوان پارامتر معرف شاخص خرابی در نظر گرفته شده است. سازه های که دچار خوردگی می شود در یک روند طولانی مدت پدیده خوردگی را تجربه می کند که در این مقاله ۲۰ سال برای خوردگی در نظر گرفته شده است، در نتیجه سازه های که دچار خوردگی شده است با توجه به عمر زیاد آن احتمال اینکه هم تحت زلزله اصلی و هم تحت پس لرزه که معمولاً طی مدت چند ساعت الی چند ماه پس از زلزله اصلی اتفاق می افتد، بسیار زیاد است. از

شکل ۸ منحنی IDA مدل سه طبقه (الف) بدون خوردگی تحت زلزله اصلی (ب) بدون خوردگی تحت زلزله اصلی و پس لرزه (ج) با خوردگی سال در ستون های طبقه اول تحت زلزله و پس لرزه

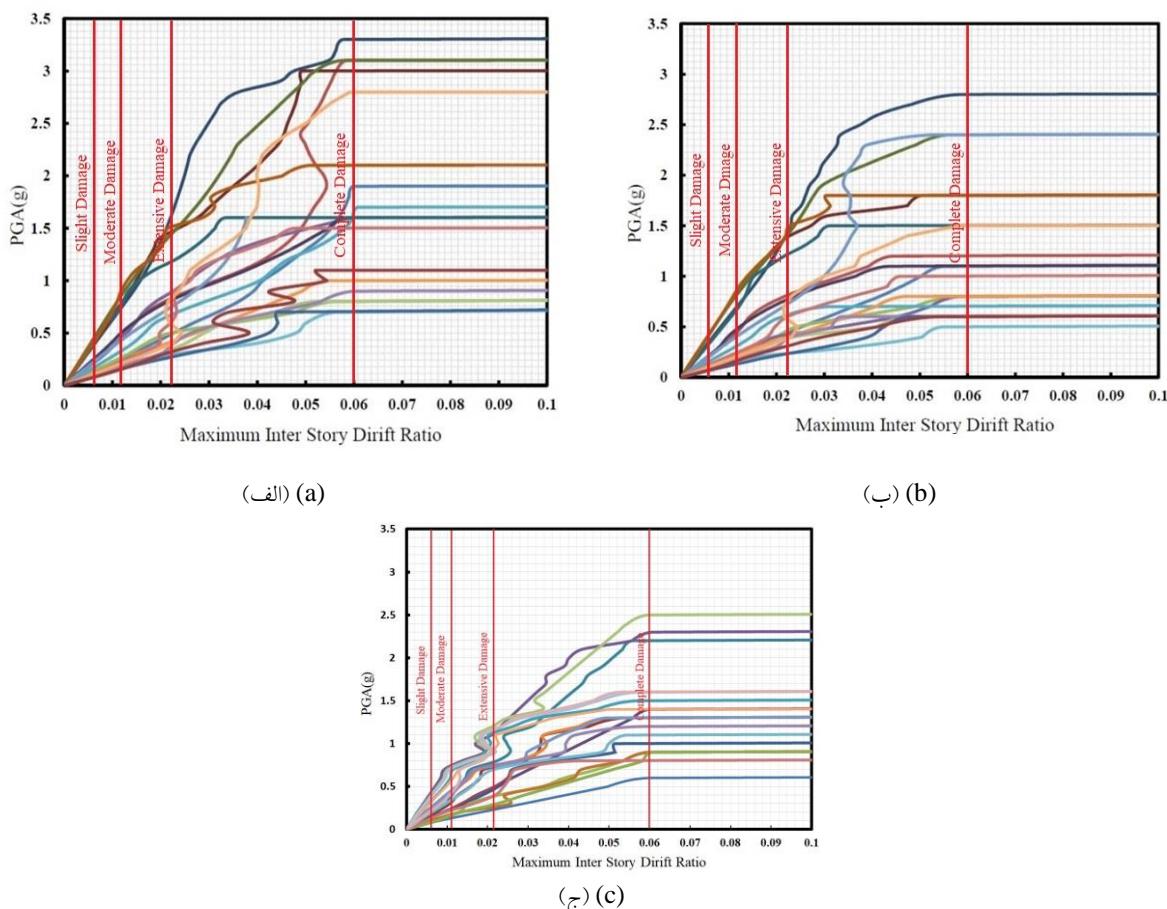


Fig. 8. IDA curve of the three-story model (a) without corrosion under the influence of the main shocks (b) with 20 years of corrosion in the columns of the first floor under the main shocks and aftershocks

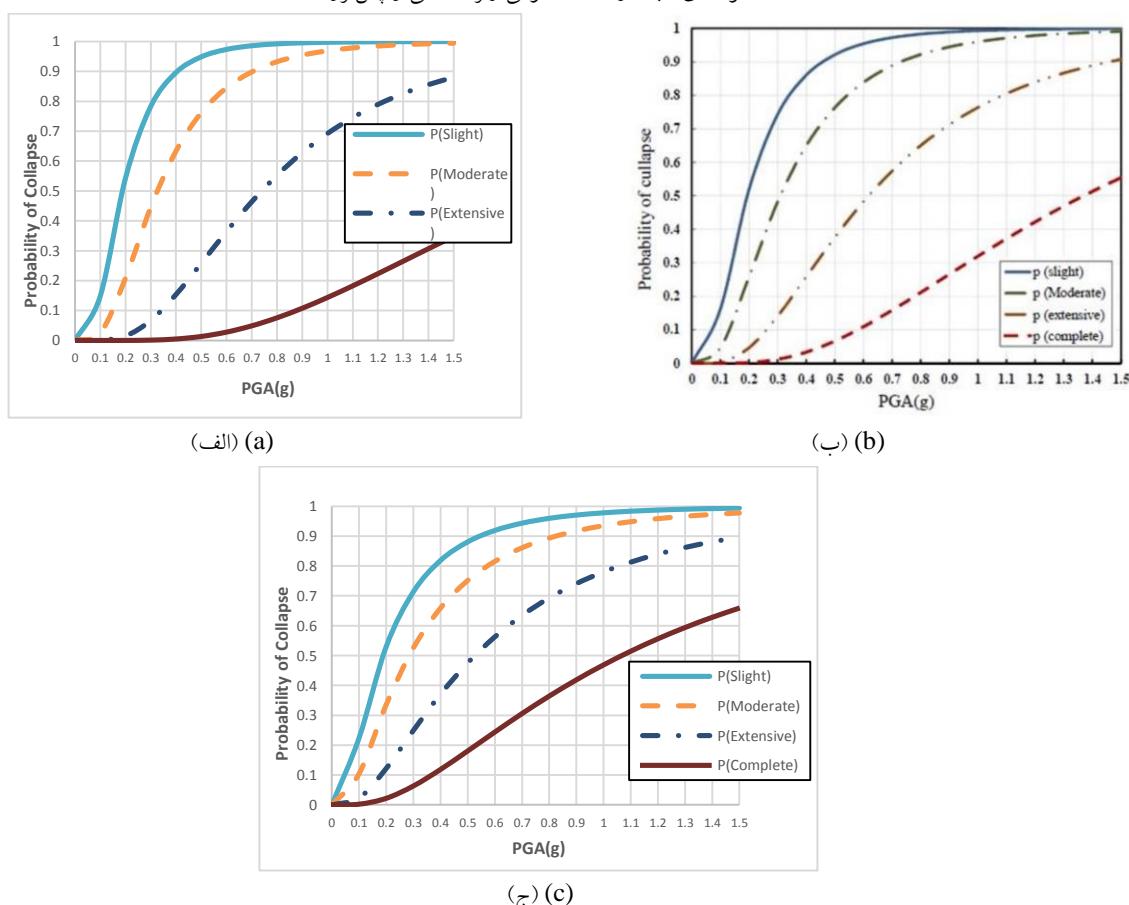
۸- ترسیم منحنی شکنندگی

از منحنی‌های شکنندگی برای بررسی احتمال فرا گذشت از یک سطح خرابی مشخص در مقابل شاخص شدت سازه استفاده می‌شود و به عنوان یکی از ابزارهای مفید برای ارزیابی احتمالاتی خرابی سازه‌ها به شمار می‌رود. شدت یک زلزله را می‌توان با روش‌های مختلفی تعریف نمود به عنوان نمونه می‌توان از بیشینه شتاب زمین (PGA) بیشینه سرعت زمین (PGV) و شتاب طیفی مود اول سازه که قابلیت مقیاس پذیری دارند استفاده نمود. در این مقاله برای شدت زلزله از معیار PGA استفاده شده است. برای تولید منحنی شکنندگی نیاز به استفاده از یک توزیع احتمال برای محاسبه پارامترهای تقاضای مهندسی که از تحلیل IDA به دست می‌آید است، در این مقاله از توزیع لوگ نرمال استفاده شده است. در رابطه با عدم قطعیت‌ها فرض می‌شود که جزیيات اتصالات تیر به ستون‌ها قادر نقص می‌باشد و خرابی از این نواحی آغاز نمی‌شود.

این نشان می‌دهد سازه دچار خوردگی تحت اثر پس لرزه با مقدار شتاب کوچکتری ناشی از زلزله به مقدار جابه‌جایی نسبی مشخص شده در استاندارد که مشخص کننده خرابی در سازه است می‌رسد درنتیجه سازه دچار خوردگی نسبت به سازه آسیب‌نديده مستعد خرابی‌های بیشتری می‌باشد.

مشاهده می‌شود که نمودارهای IDA تا رسیدن به جابه‌جایی نسبی ۰،۶ درصد، رفتارهای متفاوت از خود نشان نمی‌دهند زیرا هنوز سازه وارد حوزه غیرخطی نشده است (مرز ورود به حوزه غیرخطی نسبت جابه‌جایی یک درصد است). در برخی از منحنی‌ها رفتاری مشاهده می‌شود که نرم‌شدنگی سازه برای آن رکورد به سرعت اتفاق می‌افتد و سپس منحنی به سمت تغییر شکل‌های بزرگ شتاب می‌گیرد تا به نقطه فروریزش برسد و در بعضی کاهش سختی به صورت تدریجی اما غیریکنواخت است و نمودار رفتار بازگشتی از خود نشان می‌دهند که به معنای نرم شدنگی و سخت شدنگی مجدد سازه است.

شکل ۹. منحنی شکنندگی (الف) سازه سه طبقه تحت زلزله اصلی (ج) سازه سه طبقه دچار خوردگی در ستون‌های طبقه اول تحت توالی زلزله اصلی و پس لرزه



1. Fragility curve (a) Three-story structure under the main shock (b) Three-story structure under the main shock and aftershock.
(c) The three-story structure with corrosion in the columns of the first floor under the main shock and the aftershock

همچنین نقطه احتمال فرا گذشت ۱۶٪ و ۸۴٪ نیز روی محور قائم نمودار منحنی های شکنندگی برای بررسی بهتر منحنی ها رسم می شود، تا هریک از منحنی ها را قطع نماید، سپس از محور افقی عدد متناظر با محل تقاطع خط رسم شده با منحنی شکنندگی قرائت می شود که این عدد، شدت زلزله موردنیاز برای عبور از احتمال ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ برای سطح خرابی موردنظر را نشان می دهد.

مقادیر احتمال فرا گذشت ۱۶٪، ۵۰٪ (میانه شکنندگی) و ۸۴٪ برای سازه تحت زلزله اصلی و همچنین سازه تحت زلزله و پس لرزه و درنهایت سازه دچار خوردگی متناسب با ۲۰ سال در ستون های طبقه اول آن تحت زلزله و پس لرزه در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

۱۰- نتیجه گیری

در سازه های فلزی، خوردگی امری طبیعی محسوب می شود و نیاز به بررسی سازه های دچار خوردگی برای تعیین ظرفیت آن ها می باشد از طرفی وجود پس لرزه پس از زلزله اصلی شدت خرابی ها را افزایش می دهد، از این رو بررسی منحنی شکنندگی سازه با توجه به در نظر گرفتن عدم قطعیت ها و همچنین جامع بودن پاسخ سازه در این تحلیل، بهترین روش برای بررسی کامل سازه تحت اثر خوردگی و پس لرزه می باشد.

با توجه به نتایج مشاهده می شود که میزان آسیب پذیری سازه دچار خوردگی متناسب با ۲۰ سال تحت اثر زلزله و پس لرزه نسبت به سازه فاقد خوردگی تحت زلزله اصلی و همچنین سازه فاقد خوردگی تحت زلزله اصلی و پس لرزه در میانه شکنندگی به ترتیب؛ در شدت خرابی کم و متوسط تفاوت معناداری مشاهده نمی شود اما در سطوح خرابی شدید میزان آسیب پذیری ۱۹٪ و ۳۲٪ افزایش پیدا می کند. در ۱۶٪ شکنندگی میزان آسیب پذیری به ترتیب؛ در شدت خرابی کم و متوسط تفاوت معناداری مشاهده نمی شود اما در سطوح خرابی شدید ۲۲٪ و ۳۷٪ افزایش پیدا می کند و در سطح خرابی کامل حدود ۳۰٪ و ۵۲٪ افزایش پیدا می کند. در ۸۴٪ شکنندگی به ترتیب؛ تفاوت معناداری در میزان افزایش خرابی مشاهده نمی شود. می توان بیان کرد که سطوح خرابی کم و متوسط اثر وجود خوردگی و پس لرزه تأثیری بسزایی ندارند اما در سطوح خرابی زیاد و کامل تأثیر مخرب وجود خوردگی و پس لرزه به روشنی مشاهده می شود و نیاز به تمهداتی برای کاهش

برای ترسیم منحنی های شکنندگی در این مقاله، سازه در نرم افزار OpenSees یکبار تحت ۲۰ رکورد زلزله با مقیاس ۰/۱g تا ۰/۱۵ g و بار دیگر تحت ۲۰ رکورد زلزله اصلی به همراه پس لرزه با همان مقیاس ۰/۱g تا ۰/۱۵ g جدول (۲) مورد تحلیلی قرار گرفت و خروجی نرم افزار که تعییر مکان جانبی نسبی یا همان جابه جایی نسبی بود به دست می آید، سپس به کمک قاعده حد مرکزی می توان نشان داد، زمانی ظرفیت سازه ای و تقاضای لرزه ای دو پارامتری باشند که از توزیع نرمال پیروی کنند، عملکرد مرکب حاصل شده دارای توزیع لگاریتمی نرمال خواهد بود؛ بنابراین منحنی های شکنندگی را می توان مطابق رابطه (۱) بیان نمود:

$$P(D > C | IM) = \Phi\left(\frac{\ln(S_d) - \ln(S_C)}{\beta_{sd}}\right) \quad (1)$$

در رابطه فوق P احتمال فرا گذشت از حالت خرابی D (بیشینه تعییر مکان بین طبقه ای یا همان جابه جایی نسبی)، β_{sd} انحراف معیار لگاریتم نرمال، S_C مقدار متوسط حالت حدی مجاز و S_d متوسط مقدار نیاز لرزه ای می باشد.

منحنی های شکنندگی سازه های خوردده نشده تحت زلزله اصلی و سازه های خوردده نشده تحت زلزله اصلی و پس لرزه و همچنین سازه دچار خوردگی تحت زلزله و پس لرزه در شکل (۹) نمایش داده شده است. می توان مشاهده کرد که با اتفاق افتادن پس لرزه بعد از زلزله اصلی و همچنین وجود خوردگی در سازه، خطوط نمودارها به سمت چپ حرکت می کند که نشان از آن دارد که نسبت به سازه های که فقط تحت زلزله اصلی بوده است خرابی بیشتری در سازه اتفاق می افتد و به بیان دیگر یک سطح خرابی مشخص، در PGA کمتری نسبت به سازه خوردده نشده که فقط تحت زلزله اصلی قرار دارد اتفاق می افتد.

۹- بررسی منحنی های شکنندگی

عملکرد سازه سه طبقه تحت زلزله اصلی و همچنین سازه سه طبقه دچار خوردگی متناسب با ۲۰ سال در ستون های طبقه اول آن تحت زلزله و پس لرزه با استفاده از مقادیر میانه شکنندگی این سازه برای سطوح مختلف خرابی بررسی می شود. میانه شکنندگی، میزان شدت زلزله موردنیاز برای عبور از احتمال فرا گذشت ۵۰٪ برای هریک از سطوح خرابی را مشخص می کند.

نیز به عنوان یکی از گونه‌های مخرب خوردگی بررسی شود و اثر خوردگی حفره‌ای و پس‌لرزه بررسی شود.

خوردگی مانند استفاده از پوشش اپوکسی در قسمت‌هایی از سازه فولادی که در معرض خوردگی است می‌باشد. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود که انواع دیگری از خوردگی مانند خوردگی حفره‌ای

شکل ۱۰. نمودارهای مربوط به مقادیر (الف) ۱۶٪ شکنندگی، (ب) میانه شکنندگی و (ج) ۸۴٪ شکنندگی برای سازه سه‌طبقه در چهار حالت خرابی کم، متوسط، زیاد و فروپاشی کامل در سه حالت سازه تحت زلزله اصلی، سازه تحت زلزله اصلی و پس‌لرزه و سازه دچار خوردگی تحت اثر زلزله و پس‌لرزه

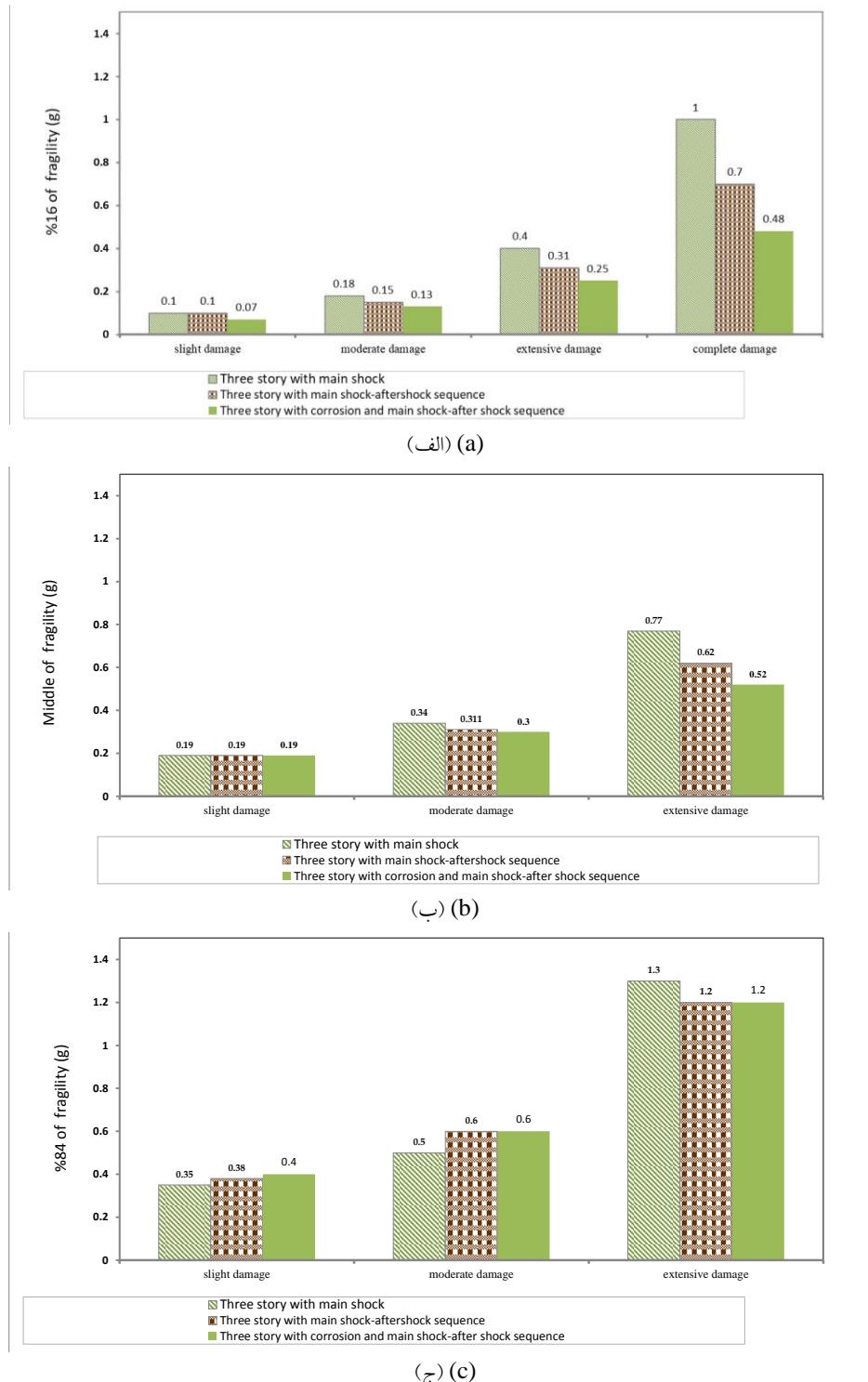


Fig. 10. Diagram of amount (a) %16 of fragility, (b) Midian of fragility, and (c) %84 of fragility curve for a three-story structure in four states of slight, moderate, extensive, and complete damage in three states under the effect of an earthquake, earthquake and aftershocks, and the structures are under the effect of earthquakes and aftershocks with crossing

مراجع

- [۱۰] M. Lew, F. Naeim, S. C. Huang, H. K. Lam, and L. D. Carpenter, "Geotechnical and geological effects of the 21 September 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan," *The Structural Design of Tall Buildings*, vol. 9, no. 2, pp. 89-106, 2000.
- [۱۱] M. Parker and D. Steenkamp, "The economic impact of the Canterbury earthquakes," *Reserve Bank of New Zealand Bulletin*, vol. 75, no. 3, pp. 13-25, 2012.
- [۱۲] G. A. MacRae and K. Kawashima, "Seismic behavior of hollow stiffened steel bridge columns," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 110-119, 2001.
- [۱۳] J. C. Anderson and R. G. Johnston, "Performance of steel frame building which experienced intense ground motion," *Journal of performance of constructed facilities*, vol. 12, no. 4, pp. 186-198, 1998.
- [۱۴] R. Rahgozar, "Remaining capacity assessment of corrosion damaged beams using minimum curves," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, no. 2, pp. 299-307, 2009.
- [۱۵] C. Shi, H. Karagah, M. Dawood, and A. Belarbi, "Numerical investigation of H-shaped short steel piles with localized severe corrosion," *Engineering structures*, vol. 73, pp. 114-124.
- [۱۶] B. Trombly, "The international building code (IBC)," *CMGT 564-Term Paper*, 2006.
- [۱۷] D. G. Lignos, H. Krawinkler, and A. S. Whittaker, "Prediction and validation of sidesway collapse of two scale models of a 4-story steel moment frame," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 40, no. 7, pp. 807-825, 2011.
- [۱۸] Krawinkler and Whittaker, "Sidesway Collapse of Deteriorating Structural Systems Under Seismic Excitation," *NEES Inc*, 2007.
- [۱۹] Y. Li, R. Song, and W. Van De Lindt John, "Collapse Fragility of Steel Structures Subjected to Earthquake Mainshock-Aftershock Sequences," *Journal of Structural Engineering*, vol. 140, no. 12, p. 04014095, 2014/12/01 2014, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001019.
- [۲۰] ISO 9223:2012, I. STANDARD, Published in Switzerland 2012. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/53499.html>
- [۲۱] ISO 9224, I. STANDARD, 2012.
- [۲۲] HAZUS MH-MR5, F. N. methodology, Washington DC, USA, 2003 .
- [۲۳] S. Jalali, M. Banazadeh, A. Abolmaali, and E. Tafakori, "Probabilistic seismic demand assessment of steel moment frames with side-plate connections," *Scientia Iranica*, vol. 19, no. 1, pp. 27-40, 2012.
- [۱] M. G. Fontana, *Corrosion Engineering* (McGraw-Hill). Singapore, 1987.
- [۲] M. H. Razmkhah, M. Ghaderi, and M. Gerami, "Experimental Investigation on Ductile Failure in Heat Retrofitted Connections by Ultra-Low Cycle Fatigue Method," *International Journal of Steel Structures*, 2023/01/20 2023, doi: 10.1007/s13296-023-00712-8.
- [۳] X. Han, D. Y. Yang, and D. M. Frangopol, "Optimum maintenance of deteriorated steel bridges using corrosion resistant steel based on system reliability and life-cycle cost," *Engineering Structures*, vol. 243, p. 112633, 2021/09/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112633>.
- [۴] H. Wang, Z. Zhang, H. Qian, Y. Liu, N. Hu, and F. Fan, "Galvanic corrosion induced localized defects and resulting strength reduction of circular steel tubes under axial compression: An experimental study," *Thin-Walled Structures*, vol. 154, p. 106881, 2020/09/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106881>.
- [۵] X. Zhang, S. Zheng, and X. Zhao, "Experimental and numerical study on seismic performance of corroded steel frames in chloride environment," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 171, p. 106164, 2020/08/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106164>.
- [۶] H. Wang, Y. Wang, Z. Zhang, X. Liu, and S. Xu, "Cyclic behavior and hysteresis model of beam-column joint under salt spray corrosion environment," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 183, p. 106737, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106737>.
- [۷] C.-H. Zhai, W.-P. Wen, Z. Chen, S. Li, and L.-L. Xie, "Damage spectra for the mainshock-aftershock sequence-type ground motions," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 45, pp. 1-12, 2013.
- [۸] H. Kouhestanian, M. H. Razmkhah, J. Shafeai, H. Pahlavan, and M. Shamekhi Amiri , "Probabilistic Evaluation of Seismic Performance of Steel Buildings with Torsional Irregularities in Plan and Soft Story under Mainshock-Aftershock Sequence," *Shock and Vibration*, vol. 2023, 2023.
- [۹] Y. Li, R. Song, and J. W. Van De Lindt, "Collapse fragility of steel structures subjected to earthquake mainshock-aftershock sequences," *Journal of Structural Engineering*, vol. 140, no. 12, p. 04014095, 2014.

Probabilistic Seismic Assessment of Low Rise Moment Resisting Steel Buildings Considering Effect of Main Shock -After Shock and Corrosion

M H Razmkhah, M Ghaderi, M Gerami*

Department of Civil Engineering Faculty, University of Semnan

mgerami@semnan.ac.ir

Abstract

An earthquake refers to a sudden slip on a fault and the resulting ground shaking and radiated seismic energy caused by volcanic, magmatic activities, or other sudden stress changes in the earth. Earthquakes are likely to occur worldwide and cause great life and financial losses. It is impossible to predict and prevent earthquakes. However, its casualties can be minimized by designing and constructing safe structures and detecting and improving unsafe buildings. Moderate and excessive earthquakes are usually accompanied by aftershocks. Aftershocks in structures damaged by the main earthquake may cause extensive damage. On the other hand, steel structures in humid regions are prone to corrosion. The standards used in this research to check corrosion are ISO 9923 and ISO 9224 standards for calculating the amount of corrosion according to the life of the structure. The ISO 9223 standard examines the corrosion rate in the first year in different atmospheric environments, and ISO 9224 standard is used to calculate the corrosion rate for the following years.

The simultaneous effect of corrosion, main earthquake, and aftershock can aggravate the damage, but in the current regulations, the effect of aftershock and corrosion are not included in the calculations. In this research, damage resulting from the combined effect of corrosion, aftershock, and the main earthquake is investigated using fragility curves that determine the level of vulnerability of the structure. The three-story steel moment structure was initially modeled using the design regulations, and then the corrosion corresponding to 20 years was taken into account for the columns of the first floor, and it was subjected to incremental IDA analysis under the record of the main earthquake and aftershock, and the maximum drift of the floors was determined as the demand, and then in the following curves Fragility is drawn for the desired structure. The seismic fragility curves were calculated for four damage levels by selecting the relative displacement capacity at seismic performance levels of slight, moderate, extensive, and complete damage from the US Hazus code. The analysis was done using structural reliability relationships and incremental dynamic analysis (IDA) with the OpenSees software platform. According to the results, it can be seen that the corroded structure corresponding to 20 years with aftershock has no significant effect on the structure in the slight and moderate damage, but it increases by 32% in extensive damage levels, which shows that it has the destructive effect of corrosion combined with the aftershock effect.

In the end, it can be stated that if the intensity of the earthquake is low, the presence of aftershocks and corrosion corresponding to 20 years will not affect the performance of the structure, but if the intensity of the earthquake is high, the presence of corrosion and aftershocks can have destructive effects on the structure and even cause the complete collapse of the structure. Considering the mentioned cases and the seismicity of Iran, there is a need to retrofit corroded metal structures.

Keywords: Corrosion, Main shock, Aftershock, Fragility Curve