

# ارزیابی منحنی شکنندگی سازه قاب خمشی فولادی کوتاه مرتبه تحت اثر خوردگی و پس لرزه پس از زلزله اصلی

محمدحسین رزمخواه<sup>۱</sup>، محسن قادری<sup>۲</sup> و محسن گرامی<sup>۳\*</sup>

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 سازه‌هایی که در اثر زلزله اصلی دچار خسارت شده‌اند ممکن است موجب خرابی گسترده شود. از طرفی سازه‌های فولادی در مناطق شرحی مستعد پدیده خوردگی هستند. اثر هم‌زمان خوردگی، خسارت ناشی از زلزله اصلی و پس لرزه می‌تواند خرابی‌های ایجاد شده را تشدید نماید، اما در آیین‌نامه‌های کنونی اثر پس لرزه و خوردگی را در محاسبات لحاظ نمی‌کنند. در این مقاله به بررسی خرابی حاصل از اثر توأمان خوردگی، پس لرزه و خسارت حاصل از زلزله اصلی با استفاده از منحنی‌های شکنندگی که میزان آسیب‌پذیری سازه را مشخص می‌کند، پرداخته می‌شود. سازه سه طبقه در ابتدا با استفاده از آیین‌نامه‌های طراحی مدل‌سازی شده و سپس برای ستون‌های طبقه اول آن خوردگی متناسب با ۲۰ سال لحاظ شده و تحت تحلیل IDA افزایشی تحت رکورد زلزله اصلی و پس لرزه قرار گرفته و بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقات به‌عنوان تقاضا تعیین می‌شود و سپس در ادامه منحنی‌های شکنندگی برای سازه موردنظر ترسیم می‌شود. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که میزان آسیب‌پذیری 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 نمی‌شود اما در سطوح خرابی شدید میزان آسیب‌پذیری ۱۹٪ و ۳۲٪ افزایش پیدا می‌کند، در ۱۶٪ شکنندگی میزان آسیب‌پذیری به ترتیب؛ در شدت خرابی کم و متوسط تغییری نمی‌کند اما در سطوح خرابی شدید ۲۲٪ و ۳۷٪ افزایش می‌یابد و در سطح خرابی کامل حدود ۳۰٪ و ۵۲٪ افزایش پیدا می‌کند.

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

## ۱- مقدمه

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

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

شکل ۱. انواع خوردگی [۱]

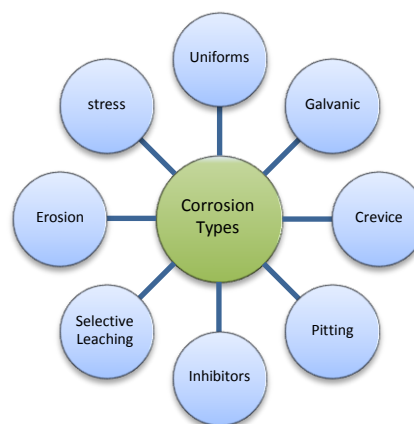


Fig. 1. Types of corrosion [1]

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 خورده شده بیشتر احتمال دارد که دچار آسیب و شکست بشوند. به عنوان نمونه، زلزله ون چوان در چین، زلزله اوزاکا در ژاپن [۱۲]، زلزله نرثریچ در ۱۹۹۴ و زلزله آلاسکا در سال ۱۹۶۴ که در آن سازه‌های خورده شده دچار 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 نتیجه‌گویای 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 تنهایی بیشتر باعث انهدام می‌شود. اتمسفرها را می‌توان به سه دسته صنعتی، دریایی و روستایی تقسیم‌بندی کرد. خوردگی بیشتر به خاطر رطوبت و اکسیژن است ولی به وسیله 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 روستایی هستند، همچنین گاز  $SO_2$  در حضور رطوبت تشکیل سولفوریک اسید می‌دهد که بسیار خورنده است.

خوردگی تهدیدی جدی برای ایمنی 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 ارائه‌شده برای مقاومت عضو خورده شده در استانداردهای ایالات متحده کمتر است [۴].

با افزایش میزان خوردگی ظرفیت باربری جانبی، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی کاهش می‌یابد [۵]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط ونگ<sup>۱</sup> 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 ایمنی 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 هم‌زمان این سه عامل بررسی نشده است.

شکل ۲. پلان طبقات ساختمان سه‌طبقه

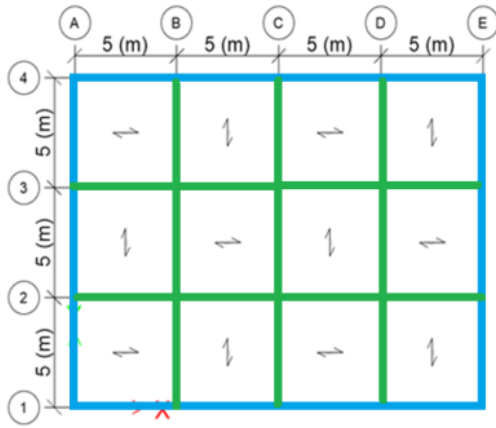


Fig. 2. Floor plan of three-story buildings

مبنای 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 SO<sub>2</sub> (حدود ۲۵۰ میلی‌گرم بر مترمکعب) قرارداد. در نتیجه با توجه به استاندارد ISO9223 دسته‌بندی محیط از لحاظ خوردگی 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 برای 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/cm<sup>2</sup> و تنش نهایی فولاد ۳۷۰۰ kgf/cm<sup>2</sup> 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 20×18×1 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 خوردنده جز دسته CX می‌باشد و میزان خوردگی برای ۲۰ سال مدنظر می‌باشد. در نتیجه مقدار کاهش ضخامت سازه فولادی برای ۲۰ سال برابر 3354 میکرومتر می‌باشد. در این مقاله به بررسی اثر هم‌زمان

جدول ۱. مشخصات مقاطع تیر و ستون‌های سازه سه‌طبقه

Number of story	Beam selected by green color	Beam selected by blue color	column	column
			1-A, 1-B, 1-C, 1-D, 1-E	2-B, 2-C, 2-D
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

### ۳- درستی آزمایی

برای درستی آزمایی نتایج جابه‌جایی نسبی یک نمونه آزمایشگاهی با مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار OpenSees مقایسه می‌شود. نمونه آزمایشگاهی در واقع یک قاب خمشی فولادی چهار طبقه دو دهانه دوبرعی با مقیاس ۱:۸ از ساختمان اصلی واقع در شهر لس‌آنجلس در کشور ایالات متحده آمریکا می‌باشد این ساختمان دارای کاربری اداری بوده و نوع خاک D می‌باشد و فاصله محور ستون‌ها از هم ۹۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ستون طبقه اول ۴۶۰۰ میلی‌متر و سایر طبقه‌ها ۳۷۰۰ میلی‌متر می‌باشد. این سازه بر اساس استاندارد IBC طراحی شده است [۱۶]. ساختمان موردنظر به همراه قاب انتخاب شده برای بررسی در آزمایشگاه با ابعاد کامل در شکل (۴) نمایش داده شده است.

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 می‌شود.

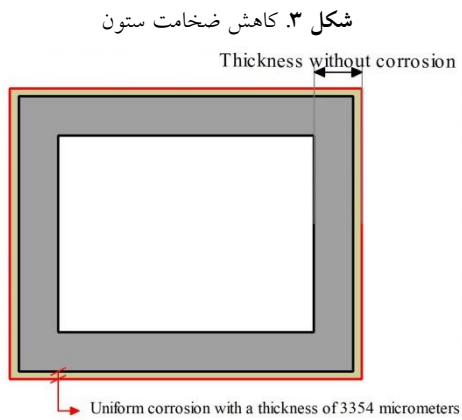


Fig. 3. Reducing the thickness of the column

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

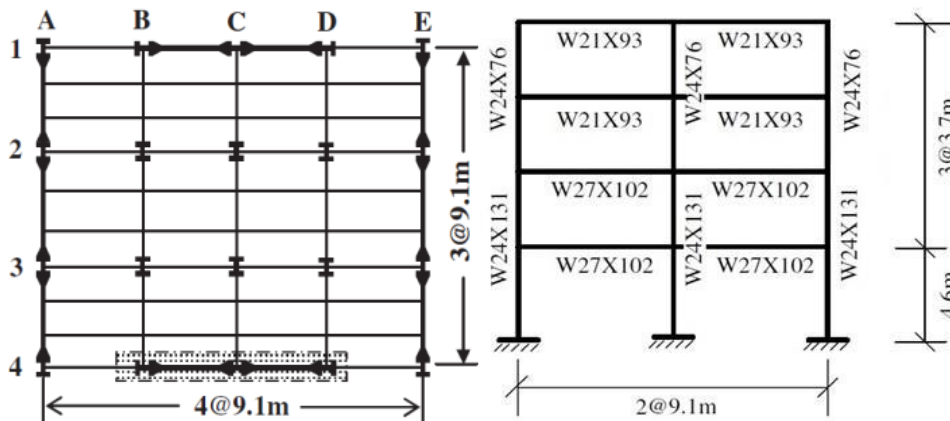


Fig. 4. Details of the frame of the building plan and the frame selected for modeling in the laboratory [۱۷]

شکل ۵. مدل‌سازی نمونه به مقیاس ۱:۸ در آزمایشگاه دانشگاه بوفالو واقع در شهر لس‌آنجلس [۱۸]

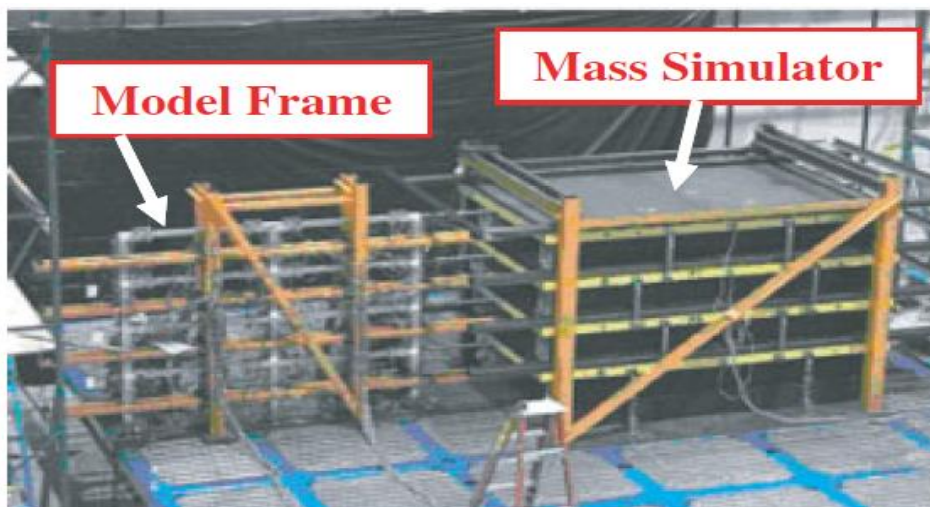


Fig. 5. Modeling of the sample 1:8 in the laboratory of the University of Buffalo located in the city of Los Angeles [۱۹]

## ۴- مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده به نوع رکورد زلزله بستگی دارد و برای تعیین پاسخ سازه نیاز به انتخاب شتاب‌نگاشت‌هایی می‌باشد که بتواند به‌خوبی همه حالات رفتار سازه را در نظر بگیرد. در این مقاله از ۲۰ رکورد زلزله با بیشینه شتاب زمین (PGA) بیشتر از ۰/۴ شتاب ثقل زمین استفاده شده است و همچنین با توجه به آنکه نوع خاک برای مدل‌سازی خاک نوع ۳ است، سرعت موج‌برشی رکوردهای انتخابی بین ۱۷۵m/s تا ۳۷۵ m/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 درحالی‌که PGA زلزله اصلی در آن ایستگاه بیشتر از ۰,۴g می‌باشد.

رکوردهای انتخابی که از سایت PEER به‌دست آمده در جدول (۲) قابل‌مشاهده می‌باشد. در حالت واقعی بین زلزله و پس‌لرزه فاصله زمانی وجود دارد و پس‌لرزه معمولاً بلافاصله پس از زلزله اصلی اتفاق نمی‌افتد بر این مبنا لی<sup>۳</sup> پیشنهاد داده است که یک فاصله زمانی<sup>۴</sup> ۱۰۰ ثانیه‌ای بین زلزله اصلی و پس‌لرزه مربوط به آن در نظر گرفته شود [۱۹]، درواقع این فاصله زمانی ۱۰۰ ثانیه‌ای مدت‌زمانی 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 ۱g 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 ضریب موردنیاز برای رسیدن زلزله اصلی به مقیاس ۱g ضرب می‌شود. شکل (۷) نمونه‌ای از ادغام زلزله اصلی و پس‌لرزه یکی از رکوردها زلزله می‌باشد.

رکورد زلزله ثبت‌شده نورث‌ریچ در ایستگاه کانوگا پارک ۲ در تاریخ ۱۹۹۴ میلادی با نسبت بیشینه PGA، ۰,۴، ۱، ۱,۵، ۲ و ۲,۲ به قاب وارد شده، و بیشینه جابه‌جایی 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 انتگرال‌گیری در طول عضو اجازه تسلیم و جاری شدن داده می‌شود.

شکل ۶. نمودار پوش دینامیکی

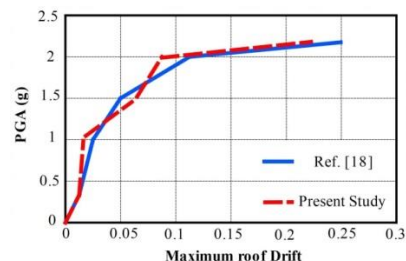


Fig. 6. pushover diagram

در شکل (۶) چهار تحلیل بدین‌صورت که رکورد زلزله ثبت شده نورث‌ریچ در ایستگاه کانوگا پارک در تاریخ ۱۹۹۴ میلادی، بار اول با مقیاس نمودن ماکزیمم PGA رکورد به ۰,۴ به سازه وارد شده و ماکزیمم جابه‌جایی بالای قاب ثبت شد. بار دوم بیشترین PGA رکورد به ۱ مقیاس شد و دوباره بیشترین جابه‌جایی بالای قاب برای این رکورد ثبت شد، برای بار سوم همین کار برای PGA ۱,۵ و بار دیگر برای PGA ۲ تکرار شد و نمودار استخراج شد. در شکل (۶) مقدار جابه‌جایی نسبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees در بیشینه PGA ۰,۴ برهم هماهنگی می‌باشند. در PGA یک نتیجه مدل‌سازی مقدار جابه‌جایی نسبی را در حدود ۲۰٪ کمتر نسبت به جابه‌جایی نسبی مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در PGA یک و نیم مقدار جابه‌جایی نسبی مدل‌سازی ۲۳٪ بیشتر از جابه‌جایی نسبی مدل آزمایشگاهی است و در PGA دو مقدار جابه‌جایی نسبی مدل‌سازی ۲۱٪ کمتر از جابه‌جایی نسبی مدل آزمایشگاهی بوده و در PGA ۲,۲ مقدار جابه‌جایی نسبی مدل‌سازی ۱۴٪ کمتر از جابه‌جایی نسبی مدل آزمایشگاهی است. در نتیجه بیشترین مقدار اختلاف نمونه مدل‌سازی شده با نمونه آزمایشگاهی ۲۳٪ در بیشینه PGA برابر یک و نیم می‌باشد.

3 Li

4 Time gap

2 Canoga park

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. شتاب‌نگاشت زلزله و پس‌لرزه مقیاس شده رکورد Mammoth Lakes-Convict Creek

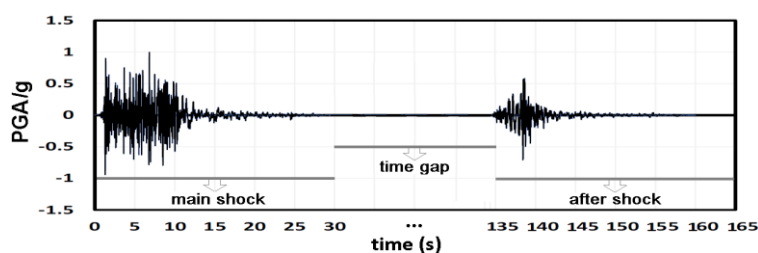


Fig. 7. Accelerometer of the reported earthquake and aftershock of the Mammoth Lakes-Convict Creek

جدول ۳. دسته‌بندی محیط‌های خوردنده اتمسفری بر اساس استاندارد ISO 9223 [۲۰]

Corrosivity category	Corrosivity	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 ( $SO_2 < 5 \text{ mg/m}^3$ ), e.g. rural areas, small towns Dry or cold zone, atmospheric environment with short time of wetness, e.g. deserts, subarctic areas
C3	Medium	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 ( $SO_2: 5 \text{ mg/m}^3$ to $30 \text{ mg/m}^3$ ) 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 ( $SO_2: 30 \text{ mg/m}^3$ to $90 \text{ mg/m}^3$ ) 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 ( $SO_2: 90 \text{ mg/m}^3$ to $250 \text{ mg/m}^3$ ) and/or significant effect of chlorides, e.g. industrial area, costal area, sheltered positions on coastline
CX	Extreme	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 $250 \text{ mg/m}^3$ ) 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 برحسب میکرومتر بر اساس استاندارد ISO 9224 [۲۱]

Metal	Corrosivity category	Exposure time years					
		1	2	5	10	15	20
Carbon steel	C1	1.3	1.9	3	4.3	5.4	6.2
	C2	25	36	58	83	103	120
	C3	50	72	116	167	206	240
	C4	80	115	186	267	330	383
	C5	200	287	464	667	824	958
	CX	700	1006	1624	2334	2885	3354

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 آیین‌نامه 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 آیین‌نامه HAZUS-MHMR-5 چهار سطح خرابی را بر اساس میزان تغییر مکان نسبی معرفی کرده است که شامل سطوح خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل می‌شود. در جدول (۵) میزان تغییر 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 گذر 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 منتهی 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 خوردنده آورده شده است.

میزان خوردگی که برای این مقاله در نظر گرفته شده است متناسب با ۲۰ سال خوردگی در محیط خوردنده با دسته‌بندی CX می‌باشد که مربوط به منطقه نیمه گرمسیری با شرایط رطوبت بالا و آلودگی SO<sub>2</sub> زیاد می‌باشد (جدول (۳) مشاهده گردد) (میزان SO<sub>2</sub> بیشتر از ۲۵۰ میلی‌گرم بر مترمکعب).

در این پژوهش در ابتدا سازه سه طبقه سه بعدی 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 سه طبقه سه بعدی 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 تغییر آسیب‌پذیری بحث می‌شود.



طرفی هدف این مقاله نشان دادن بیشترین حد خرابی ممکن است که این مورد با مقایسه سازه خورده نشده تحت زلزله اصلی به عنوان مبنا و سازه دچار خوردگی تحت زلزله و پس لرزه به دست می‌آید و اختلاف این دو را می‌توان به عنوان حاشیه ایمنی برای سازه‌هایی که در معرض خوردگی قرار دارند لحاظ نمود.

با توجه به نتایج منحنی‌های IDA که در شکل (۸) نمایش داده شده است؛ می‌توان نتیجه گرفت سازه‌ای که فقط تحت زلزله اصلی بوده در برابر سازه‌ای که هم تحت زلزله اصلی و هم پس لرزه قرار گرفته در PGA بیشتری به نسبت جابه‌جایی متناظر برای رکورد با پس لرزه می‌رسد. هنگامی که خوردگی در ستون طبقه اول سازه منظور می‌شود مقدار آسیب وارد بر سازه که همان‌طور که بیان شد مقدار جابه‌جایی نسبی است با مقدار PGA کمتری آسیب متناظر با سازه تحت زلزله اصلی و همچنین سازه تحت زلزله اصلی و پس لرزه را تجربه می‌کند.

دقت بیشتر نسبت به تحلیل پوش آور می‌شود [۲۳]. ملاک توقف تحلیل IDA در هریک از موارد رسیدن مقدار بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات به مقدار جابه‌جایی نسبی خرابی کامل می‌باشد که مقدار آن ۰.۰۶ و در استاندارد Hazus برای مقدار جابه‌جایی نسبی خرابی کامل سازه‌های 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 جابه‌جایی نسبی بین طبقات به عنوان پارامتر معرف شاخص خرابی در نظر گرفته شده است. سازه‌ای که دچار خوردگی می‌شود در یک روند طولانی مدت پدیده خوردگی را تجربه می‌کند که در این مقاله ۲۰ سال برای خوردگی در نظر گرفته شده است، در نتیجه سازه‌ای 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 می‌افتد، 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 ۲۰ سال در ستون‌های طبقه اول تحت زلزله و پس لرزه

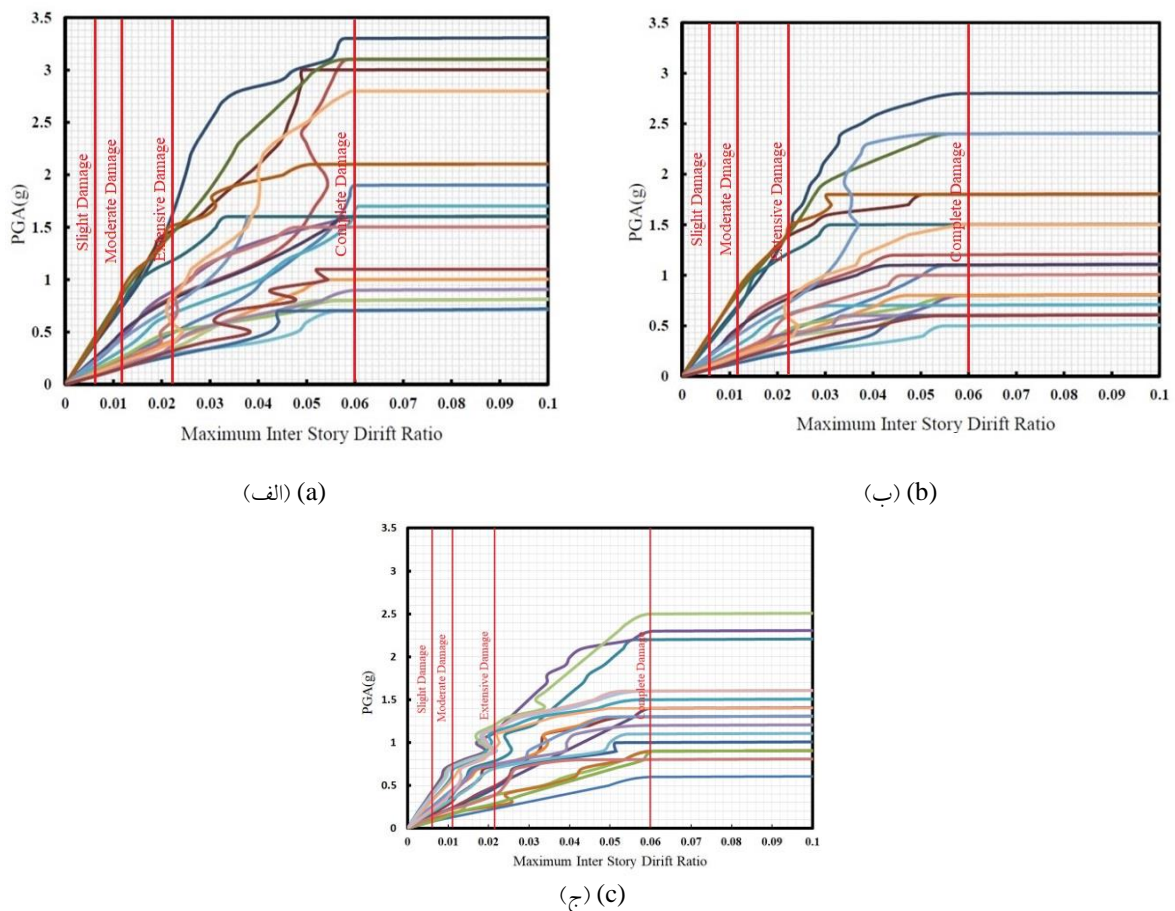


Fig. 8. IDA curve of the three-story model (a) without corrosion under the influence of the main shocks (b) with 20 years of corrosion in the columns of the first floor under the main shocks and aftershocks

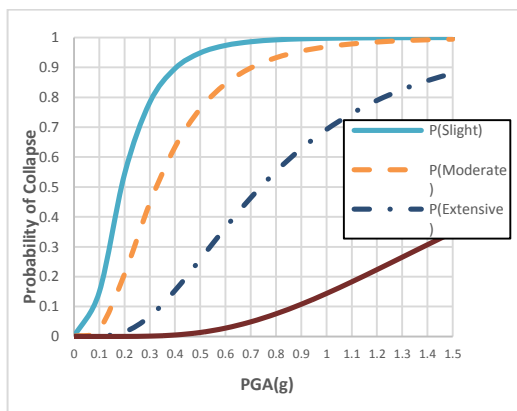
### ۸- ترسیم منحنی شکنندگی

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 مقیاس‌پذیری 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 جزییات اتصالات تیر به ستون‌ها فاقد نقص می‌باشد و خرابی از این نواحی آغاز نمی‌شود.

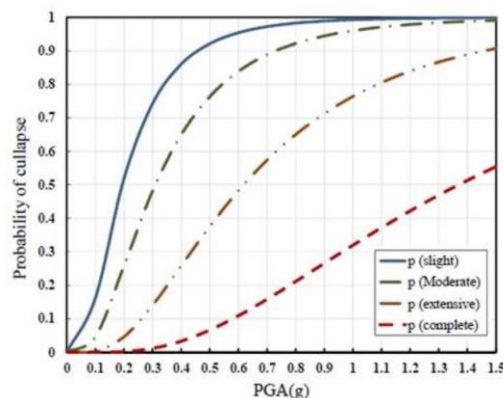
این نشان می‌دهد سازه دچار خوردگی تحت اثر پس‌لرزه با مقدار شتاب کوچک‌تری ناشی از زلزله به مقدار جابه‌جایی نسبی مشخص شده در استاندارد که مشخص‌کننده خرابی در سازه است می‌رسد در نتیجه سازه دچار خوردگی نسبت به سازه آسیب‌نندیده مستعد خرابی‌های بیشتری می‌باشد.

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 نرم‌شدگی 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 نرم‌شدگی و سخت‌شدگی مجدد سازه است.

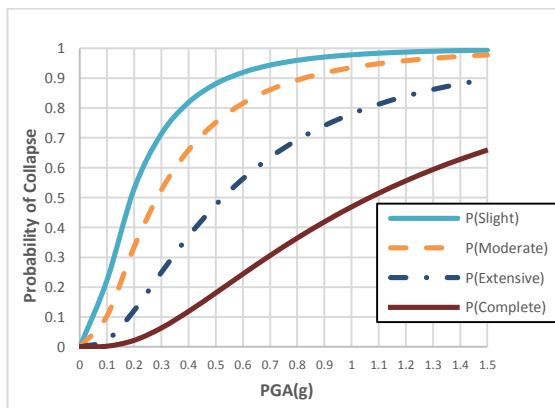
شکل ۹. منحنی شکنندگی (الف) سازه سه طبقه تحت زلزله اصلی (ج) سازه سه طبقه تحت زلزله اصلی و پس‌لرزه (ب) ستون‌های طبقه اول تحت توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه



(الف) (a)



(ب) (b)



(ج) (c)

۱. 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 منحنی‌های شکنندگی برای بررسی بهتر منحنی‌ها رسم می‌شود، تا هریک از منحنی‌ها را قطع نماید، سپس از محور افقی عدد متناظر با محل تقاطع خط رسم شده با منحنی شکنندگی قرائت می‌شود که این عدد، شدت زلزله موردنیاز برای عبور از احتمال ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ برای سطح خرابی موردنظر را نشان می‌دهد.

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

## ۱۰- نتیجه‌گیری

در سازه‌های فلزی، خوردگی امری طبیعی محسوب می‌شود و نیاز به بررسی سازه‌های دچار خوردگی برای تعیین ظرفیت آن‌ها می‌باشد از طرفی وجود پس‌لرزه پس از زلزله اصلی شدت خرابی‌ها را افزایش می‌دهد، از این‌رو بررسی منحنی شکنندگی سازه با توجه به در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و همچنین جامع بودن پاسخ سازه در این تحلیل، بهترین روش برای بررسی کامل سازه تحت اثر خوردگی و پس‌لرزه می‌باشد.

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که میزان آسیب‌پذیری سازه دچار خوردگی متناسب با ۲۰ سال تحت اثر زلزله و پس‌لرزه نسبت به سازه فاقد خوردگی تحت زلزله اصلی و همچنین سازه فاقد خوردگی تحت زلزله اصلی و پس‌لرزه در میانه شکنندگی به ترتیب؛ در شدت خرابی کم و متوسط تفاوت معناداری مشاهده نمی‌شود اما در سطوح خرابی شدید میزان آسیب‌پذیری ۱۹٪ و ۳۲٪ افزایش پیدا می‌کند. در ۱۶٪ شکنندگی میزان آسیب‌پذیری به ترتیب؛ در شدت خرابی کم و متوسط تفاوت معناداری مشاهده نمی‌شود اما در سطوح خرابی شدید ۲۲٪ و ۳۷٪ افزایش پیدا می‌کند و در سطح خرابی کامل حدود ۳۰٪ و ۵۲٪ افزایش پیدا می‌کند. در ۸۴٪ شکنندگی به ترتیب؛ تفاوت معناداری در میزان افزایش خرابی مشاهده نمی‌شود. می‌توان بیان کرد که سطوح خرابی کم و متوسط اثر وجود خوردگی و پس‌لرزه تأثیری بسزایی ندارند اما در سطوح خرابی زیاد و کامل تأثیر مخرب وجود خوردگی و پس‌لرزه به روشنی مشاهده می‌شود و نیاز به تمهیداتی برای کاهش

برای ترسیم منحنی‌های شکنندگی در این مقاله، سازه در نرم‌افزار OpenSees یک‌بار تحت ۲۰ رکورد زلزله با مقیاس ۰/۱g تا ۱/۵ g و بار دیگر تحت ۲۰ رکورد زلزله اصلی به همراه پس‌لرزه با همان مقیاس ۰/۱g تا ۱/۵ g جدول (۲) مورد تحلیلی قرار گرفت و خروجی نرم‌افزار که تغییر مکان جانبی نسبی یا همان جابه‌جایی نسبی بود به دست می‌آید، سپس به کمک قاعده حد مرکزی می‌توان نشان داد، زمانی ظرفیت سازه‌ای و تقاضای لرزه‌ای دو پارامتری باشند که از توزیع نرمال پیروی کنند، عملکرد مرکب حاصل‌شده دارای توزیع لگاریتمی نرمال خواهد بود؛ بنابراین منحنی‌های شکنندگی را می‌توان 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 تغییر مکان بین طبقه‌ای یا همان جابه‌جایی نسبی)،  $\beta_{sd}$  انحراف معیار لگاریتم نرمال،  $S_c$  مقدار متوسط حالت حدی مجاز  $S_d$  متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای می‌باشد.

منحنی‌های شکنندگی سازه‌های خورده نشده تحت زلزله اصلی و سازه‌های خورده نشده تحت زلزله اصلی و پس‌لرزه و همچنین سازه دچار خوردگی تحت زلزله و پس‌لرزه در شکل (۹) نمایش داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که با اتفاق افتادن پس‌لرزه بعد از زلزله اصلی و همچنین وجود خوردگی در سازه، خطوط نمودارها به سمت چپ حرکت می‌کند که نشان از آن دارد که نسبت به سازه‌ای که فقط تحت زلزله اصلی بوده است خرابی بیشتری در سازه اتفاق می‌افتد و به بیان دیگر یک سطح خرابی مشخص، در PGA کمتری نسبت به سازه خورده نشده که فقط تحت زلزله اصلی قرار دارد اتفاق می‌افتد.

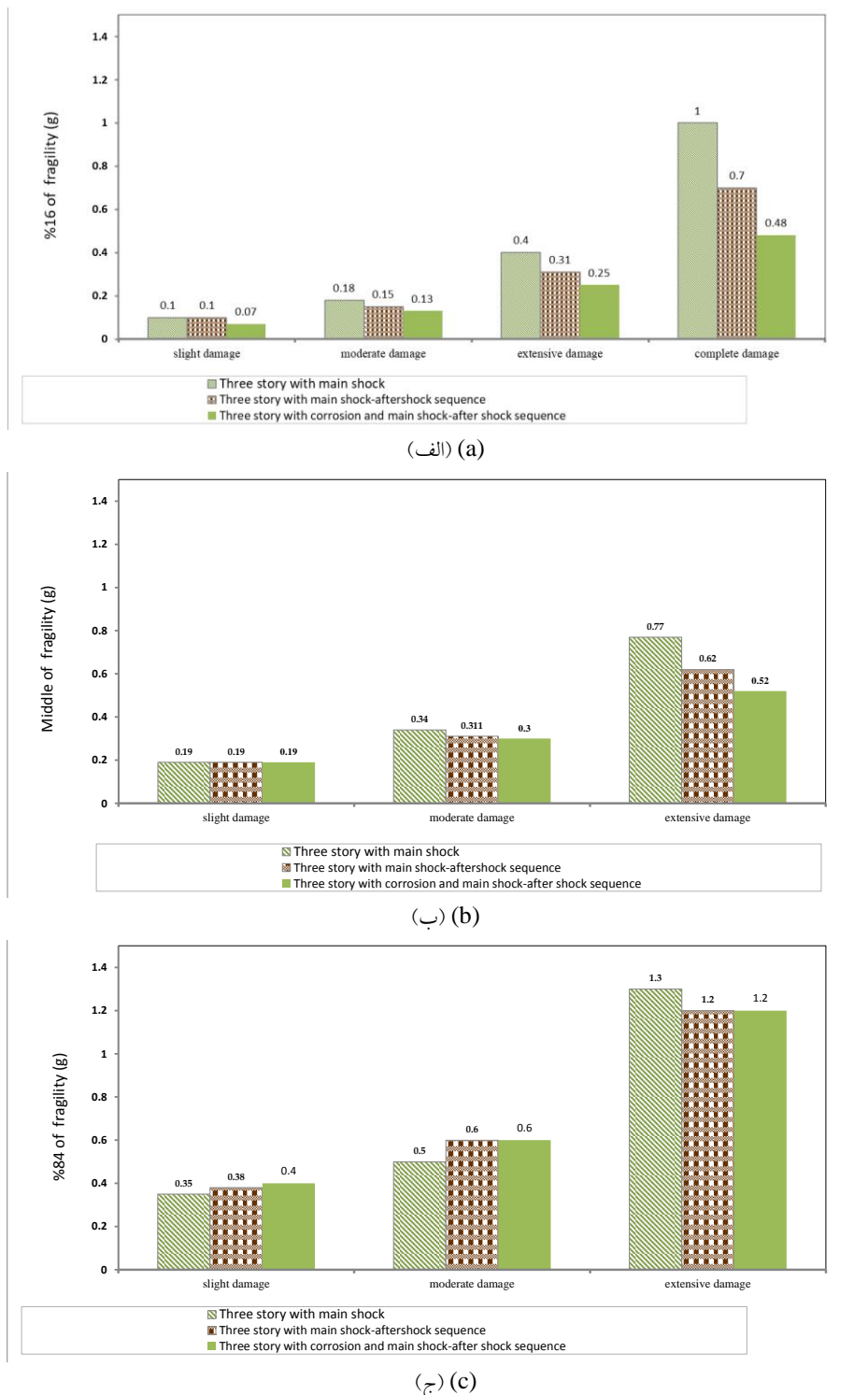
## ۹- بررسی منحنی‌های شکنندگی

عملکرد سازه سه‌طبقه تحت زلزله اصلی و همچنین سازه سه‌طبقه دچار خوردگی متناسب با ۲۰ سال در ستون‌های طبقه اول آن تحت زلزله و پس‌لرزه با استفاده از مقادیر میانه شکنندگی این سازه برای سطوح مختلف خرابی بررسی می‌شود. میانه شکنندگی، میزان شدت زلزله موردنیاز برای عبور از احتمال فرا گذشت ۵۰٪ برای هریک از سطوح خرابی را مشخص می‌کند.

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 سه طبقه 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, 2014.
- [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. Shafaei, 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