

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در سال‌های اخیر، ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های موجود به دلیل مشاهده خسارات قابل توجه در سازه‌های نوساز که مطابق آیین‌نامه‌های لرزه‌ای جدید طراحی شده‌اند، اهمیت بیشتری یافته است. این وضعیت ضرورت بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌هایی را که بر اساس ویرایش‌های قدیمی‌تر استاندارد ۲۸۰۰ احداث شده‌اند، برجسته می‌کند. با توجه به اینکه تعداد زیادی از مدارس کشور در دوره‌های زمانی مختلف و با سطح ضوابط متفاوت ساخته شده‌اند، شناخت رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها برای مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی بهسازی ضروری است. هدف این پژوهش، ارائه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای برای ساختمان‌های مدارس استان اصفهان است که بر اساس ویرایش‌های گوناگون استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده و در مناطق با خطر لرزه‌خیزی و تعداد طبقات مختلف قرار دارند. ساختمان‌های مورد مطالعه شامل قاب‌های خمشی بتن آرمه بوده و بر اساس ارتفاع، ویرایش آیین‌نامه، سطح خطر و نوع زمین در ۱۴ گروه طبقه‌بندی شده‌اند. برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزاینده (IDA) بر روی مدل‌های دو بعدی در OpenSees انجام شد. مجموعه داده شامل ۲۲ شتاب‌نگاشت دور از گسل و ۱۲ شتاب‌نگاشت نزدیک گسل بوده و شتاب طیفی در پیوند اصلی سازه با میرایی ۵ درصد به‌عنوان معیار شدت و پیشینه دریافت نسبی طبقات به‌عنوان شاخص خرابی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع، احتمال وقوع خرابی در سازه‌ها بیشتر می‌شود. همچنین احتمال فرورفتن در حالت‌های خرابی در مناطق با خطر متوسط، بیشتر از مناطق با خطر زیاد است که این امر به الزامات سخت‌گیرانه‌تر طراحی در مناطق پرخطر نسبت داده می‌شود.

واژگان کلیدی: ساختمان‌های بتن آرمه قاب خمشی، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزاینده، OpenSees، منحنی شکنندگی لرزه‌ای.

توسعه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمان‌های بتن آرمه مدارس استان اصفهان

علی حیدری بنی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد،
دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

سید محمد متولی امامی (نویسنده مسئول)

استادیار مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد،
دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، sm.emami@iaau.ac.ir
استادیار مهندسی زلزله، مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی
عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۱- مقدمه

می‌شود. ساختمان مدارس بر اساس تقسیم‌بندی ساختمان‌ها با توجه به اهمیت عملکرد سازه در استاندارد ۲۸۰۰ (BHRC, 2014)، مبنای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها در ایران از مراکز با اهمیت زیاد می‌باشند. از منظر مدیریت بحران به دلیل وجود تعداد نسبتاً زیادی از کودکان و نوجوانان در مدارس، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مدارس و به دنبال آن اولویت‌بندی آنها از حیث میزان آسیب‌پذیری اولین گام مؤثر در راستای مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی فضاهای خطرآفرین می‌باشد.

از سوی دیگر این موضوع بی‌شک یکی از مهم‌ترین مطالبات

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های موجود در دهه‌های اخیر به دلیل خسارات جدی وارد شده به ساختمان‌های جدید که بر اساس آیین‌نامه‌های روز طراحی شده‌اند به دلیل وابستگی تلفات جانی و خسارات اقتصادی به رفتار لرزه‌ای سازه‌های موجود بیش‌ازپیش اهمیت یافته است (Rota et al., 2010). طبق آمار و اطلاعات علمی بسیاری از مناطق ایران از جمله شهرهای استان اصفهان در پهنه با خطر نسبی زیاد واقع شده‌اند. میزان اهمیت هر سازه از دیدگاه لرزه‌ای با توجه به نوع کاربری، میزان خسارت مالی و تلفات جانی ناشی از زلزله مشخص

طیف وسیعی از زلزله‌ها با شدت‌های مختلف منعکس می‌کند. منحنی شکنندگی یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای است که امروزه استفاده از آن بسیار رواج یافته و در مطالعات بسیاری (Ibarra, 2004; Bryant, 2005; Ruiz-García & Negrete, 2009; Rezaei et al., 2022) مورد استفاده قرار می‌گیرد، به طوری که ضمن ارزیابی آسیب‌پذیری، در مواردی دیگر از جمله مقایسه میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌های مختلف، برآورد آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری و همچنین برنامه‌ریزی مدیریت بحران مورد استفاده قرار می‌گیرد.

علاوه بر این، منحنی‌های شکنندگی در مؤسسات مدیریت دولتی همچون اداره کل نوسازی مدارس که کار مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی اماکن آموزشی را به عهده دارند نیز قابل استفاده است (Akkar et al., 2005; Ruiz-García & Negrete, 2009).

۲- فراوانی و نحوه تیپ‌بندی ساختمان‌های بتن آرمه مدارس استان اصفهان

بنا به اظهارات مسئولین اداره نوسازی مدارس استان، عمده مدارس با اسکلت بنایی در زمره مدارس تخریبی محسوب شده که فاقد هرگونه ارزش مقاوم‌سازی می‌باشند (مدیرکل نوسازی مدارس استان اصفهان، خبرگزاری مهر، ۱۴۰۳). همچنین از اوایل دهه هشتاد و پس از ابلاغ ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ جهت رعایت ملاحظات ایمنی ساختمان‌ها در برابر زلزله و مواردی همچون ملاحظات اقتصادی، در دسترس بودن مصالح، سهولت اجرایی، افزایش تعداد طراحان و مهندسان این امر، احداث سازه‌های بتن آرمه به‌طور گسترده‌ای در دستور کار اجرای مدارس قرار گرفت به گونه‌ای که از این سال به بعد می‌توان سازه‌های بتن آرمه را به‌عنوان تیپ سازه‌ای قالب مدارس نام برد. حتی سازه‌های فولادی هم به‌صورت محدود و اندک به کار رفته و امروزه تعداد قابل توجهی از مدارس استان اصفهان را ساختمان‌هایی با سازه بتن آرمه به خود اختصاص داده‌اند. فراوانی سیستم‌های مختلف سازه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است.

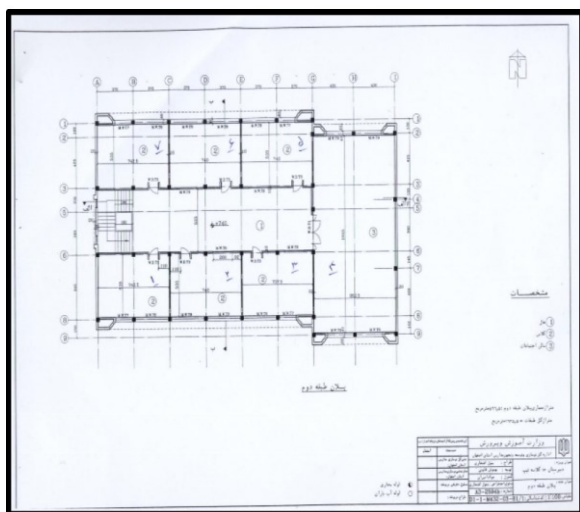
و خواسته‌های مردمی و در نتیجه موجب آرامش روانی آنها نیز می‌باشد. بر اساس اطلاعات موجود در کل استان اصفهان ۴۹۴۲ کلاس درس به‌عنوان کلاس‌های تخریبی و تعداد ۶۲۶۹ کلاس درس جزو کلاس‌های نیازمند مقاوم‌سازی شناسایی شده است (Nasimi, 2021, Heydari Bani & Motovali Emami, 2024). با توجه به اینکه در آینده نزدیک ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ ارائه خواهد شد، عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتن آرمه که با ویرایش دوم و سوم طراحی و اجرا شده‌اند مورد سؤال قرار خواهد گرفت. بدیهی است هرگونه تصمیم‌گیری در خصوص مدیریت و مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها نیازمند یک بانک اطلاعاتی مستند در زمینه عملکرد لرزه‌ای آنها می‌باشد؛ بنابراین در این پژوهش تعدادی از ساختمان‌های منتخب مدارس استان اصفهان با معماری و سازه رایج اسکلت بتن آرمه که مطابق با ویرایش دوم یا سوم استاندارد ۲۸۰۰ طراحی گردیده‌اند.

تحت رکوردهای زلزله که از لحاظ ویژگی‌های ساختگاهی، فاصله از گسل و بزرگ‌ها با محل احداث بنا مشابهت دارند تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی فراینده قرار گرفت. پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها به هنگام وقوع زلزله بسیار پیچیده است. یکی از روش‌های جدید که در اغلب آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌هایی همچون FEMA 350 و FEMA P695 مورد استفاده قرار گرفته است، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزاینده (IDA)^۱ است. در این تحلیل، شتاب‌نگاشت‌ها به گونه‌ای به‌صورت افزایشی مقیاس و به سازه اعمال می‌شوند که بتوانند محدوده رفتار خطی، غیرخطی و در نهایت فروریزش سازه را تحت پوشش قرار دهند.

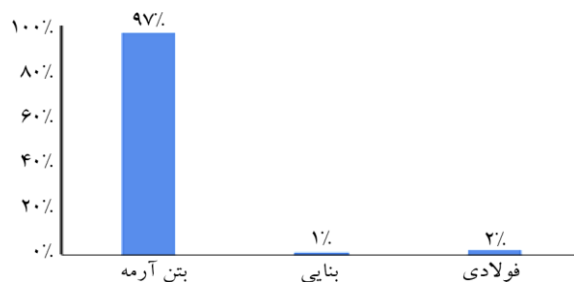
هدف اصلی این روش به دست آوردن پاسخ‌های سازه برای مقادیر مختلف شدت زلزله می‌باشد (Vamvatsikos & Cornell, 2002). روش تحلیل دینامیکی افزایشی، یک روش کاملاً کاربردی، چندمنظوره و واقعی است که این روش علاوه بر بررسی رفتار لرزه‌ای سازه، ظرفیت سازه را نیز در اختیار قرار می‌دهد. همچنین نتایج استفاده از تحلیل IDA در کارهای تحقیقاتی متنوع ثابت کرده است که این روش، کارایی بسیار مناسبی در ارزیابی عملکردی سازه‌ها دارد و رفتار سازه را در

۳- مشخصات مدارس مورد بررسی

در این تحقیق، برای تهیه منحنی‌های شکنندگی ساختمان‌های بتن‌آرمه مدارس استان همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است به‌صورت موردی پس از طبقه‌بندی پلان معماری، شناسه فضایی و نقشه‌های اجرایی موجود مدارس و ۱۴ ساختمان با سیستم مقاوم جانبی قاب خمشی بتن‌آرمه مطابق شکل (۴) طبق مشخصات ذکر شده در جدول (۱) مورد بررسی قرار گرفتند. دلیل انتخاب این نوع ساختمان‌ها همان‌طور که ذکر شد عمومیت آنها بوده است. به دلیل وجود مشخصات مصالح مورد استفاده در نقشه‌های اجرایی کلیه ساختمان‌های مورد مطالعه در آرشیو اطلاعاتی سازمان نوسازی مدارس، از این مشخصات برای مدل‌سازی سازه‌های مورد مطالعه استفاده شده است.

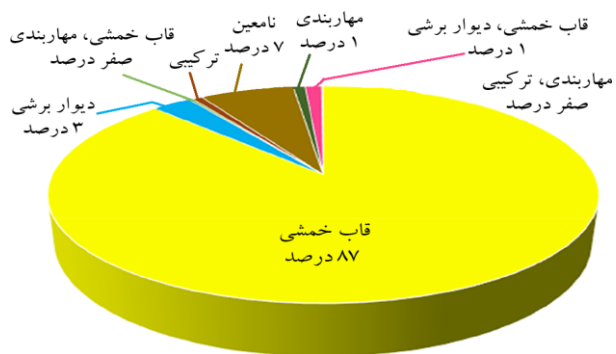


شکل (۳): نما به همراه نمونه‌ای از پلان معماری مدارس مورد مطالعه.



شکل (۱): فراوانی تقریبی انواع سازه‌های مدارس استان اصفهان از سال ۱۳۸۰-۱۴۰۲ (DRES, 2023).

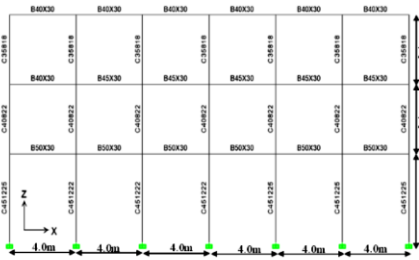
بدین‌منظور در این تحقیق با تمرکز بر روی ساختمان‌های بتن‌آرمه مدارس استان اصفهان، ابتدا فراوانی نوع سیستم مقاوم جانبی استفاده شده در ساختمان‌های بتن‌آرمه مدارس بر اساس آرشیو اطلاعات سازمان نوسازی مدارس کل استان اصفهان تعیین شد. سپس منحنی‌های شکنندگی هر یک از ساختمان‌های منتخب محاسبه و با یکدیگر از حیث تعداد طبقات، ویرایش آیین‌نامه و خطر نسبی زلزله بر رفتار لرزه‌ای مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، سیستم مقاوم جانبی از نوع قاب خمشی با ۸۷ درصد، بیشترین میزان فراوانی در سطح مدارس بتن‌آرمه استان را دارا می‌باشد (Esfahan Organization for Development, Renovation and Equipping Schools, 2023). دیگر سیستم‌های مقاوم جانبی به‌صورت موردی و در تعداد اندکی فضای آموزشی یا رفاهی، اداری خاص اجرا و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مطالعه با توجه به فراوانی سیستم قاب خمشی بتن‌آرمه که بخش عظیمی از جامعه آماری را در بر گرفته و می‌توان از آن به‌عنوان الگوی قالب پرتکرار یاد کرد، مورد مطالعه قرار می‌گیرند.



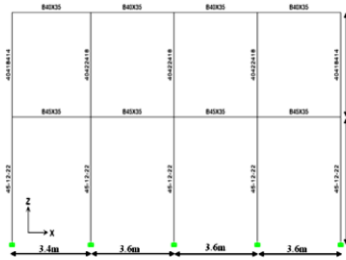
شکل (۲): فراوانی انواع سیستم‌های مقاوم جانبی به کار رفته در سازه‌های بتن‌آرمه مدارس استان اصفهان (DRES, 2023).

جدول (۱): مشخصات ساختمان‌های مدارس مورد بررسی برای هر تیپ (DRES, 2023).

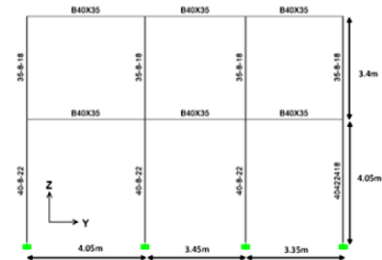
شماره ردیف	شماره تیپ	ویرایش آیین‌نامه	خطر نسبی زلزله بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰	ارتفاع (متر)	تعداد طبقه	نام‌نظمی در ارتفاع و پلان	نام پروژه	نوع سقف	نوع کاربری	تیپ خاک
۱	I	۲	متوسط	۷/۴۵	۲	ندارد	مدرسه ابتدایی شهید اکرمی گوگرد گلپایگان	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۲	II	۲	زیاد	۷/۴۵	۲	ندارد	دبستان ۶ کلاسه علی دایی واقع در کاشان	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۳	III	۲	متوسط	۱۱/۱۵	۳	ندارد	دبیرستان ۱۲ کلاسه تیپ	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۴	IV	۲	زیاد	۱۱	۳	ندارد	دبستان ۱۰ کلاسه تیپ شاهین شهر	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۵	V	۲	متوسط	۱۳/۹۵	۴	ندارد	هنرستان کار دانش واقع در نجف‌آباد	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۶	VI	۳	متوسط	۳/۹	۱	ندارد	دبستان ۳ کلاسه رسول جم ۱	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۷	VII	۳	زیاد	۴/۱	۱	ندارد	مدرسه ۳ کلاسه متوسطه حاج عباسعلی کرمی واقع در دهاقان	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۸	VIII	۳	متوسط	۸/۴	۲	ندارد	مدرسه ۶ کلاسه حاج آقا جاری در روستای اصغرآباد خمینی شهر	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۹	IX	۳	متوسط	۷/۴	۲	ندارد	دبستان ۹ کلاسه صارمیه شماره ۱۰ واقع در شهرک قدس فلاورجان	تیرچه‌بتنی	آموزشی	۳
۱۰	X	۳	زیاد	۸/۴۵	۲	ندارد	ساختمان شماره ۲ هنرستان کار دانش آیت‌الله خامنه‌ای واقع در داران	تیر بتنی تیرچه بتنی	آموزشی	۳
۱۱	XI	۳	متوسط	۱۰/۸	۳	ندارد	مدرسه راهنمایی ۱۲ کلاسه دکتر فیض واقع در ناحیه ۲ اصفهان	تیرچه بتنی	آموزشی	۳
۱۲	XII	۳	زیاد	۱۱	۳	ندارد	دبیرستان ۱۲ کلاسه حکیم فرزانه واقع در شهر رضا	تیر بتنی تیرچه بتنی	آموزشی	۳
۱۳	XIII	۳	متوسط	۱۴/۲	۴	ندارد	دبیرستان ۱۸ کلاسه شهید احسانی واقع در ناحیه ۳	تیر بتنی تیرچه بتنی	آموزشی	۳
۱۴	XIV	۳	زیاد	۱۴/۴	۴	ندارد	دبیرستان ۱۲ کلاسه بنت‌الهدی واقع در شهر رضا	تیرچه بتنی	آموزشی	۳



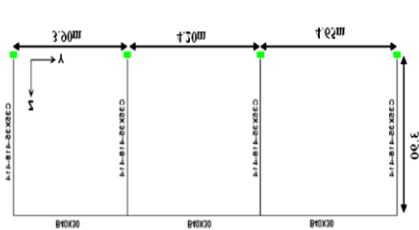
III قاب تیپ (پ)



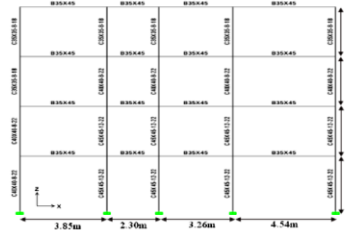
II قاب تیپ (ب)



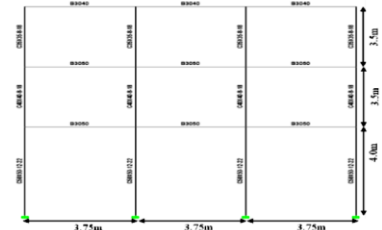
I قاب تیپ (الف)



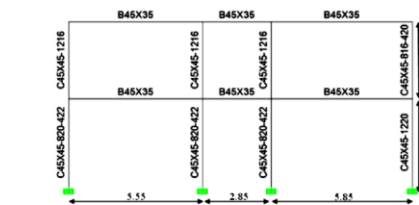
VI قاب تیپ (ج)



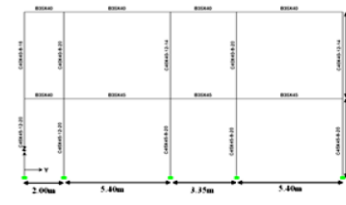
V قاب تیپ (ث)



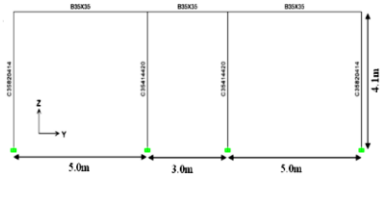
IV قاب تیپ (ت)



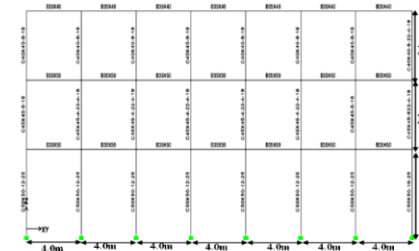
IX قاب تیپ (خ)



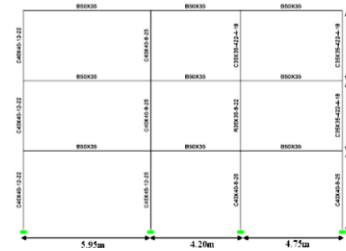
VIII قاب تیپ (ح)



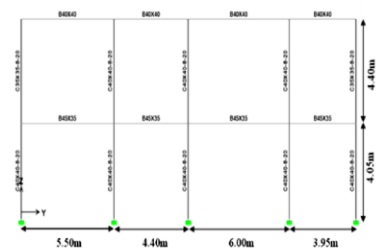
VII قاب تیپ (چ)



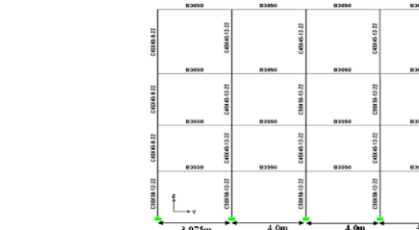
XII قاب تیپ (ر)



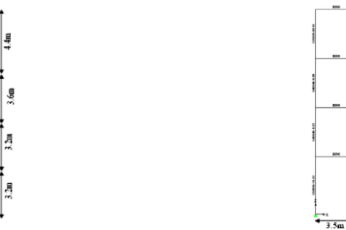
XI قاب تیپ (ذ)



X قاب تیپ (د)



XIV قاب تیپ (س)



XIII قاب تیپ (ز)

شکل (۴): مشخصات هندسی ساختمان‌های مدارس مورد بررسی برای هر تیپ (DRES, 2023).

۴- انتخاب رکوردهای زلزله

فاصله تا گسل از مهم‌ترین پارامترهای زلزله هستند که در انتخاب رکوردهای زلزله باید ملاک انتخاب قرار داد، زیرا بسیاری خواص زلزله همچون دامنه، محتوای فرکانسی و مدت‌زمان زلزله به این پارامترها وابسته‌اند (Pitilakis et al., 2013). در انتخاب رکوردها توجه به مشابهت نوع خاک محل ثبت رکوردهای زلزله

انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب برای رسیدن به نتایج با دقت قابل قبول از جمله مهم‌ترین نیازهای انجام یک تحلیل دینامیکی غیرخطی است؛ زیرا منحنی‌های به‌دست‌آمده از تحلیل IDA به شدت به مشخصات رکوردها وابسته هستند. بزرگا، خاک منطقه و

مواردی همچون بزرگا، فاصله تا گسل، حداکثر شتاب زمین و... از ۳۴ شتاب‌نگاشت مختلف (با انتخاب مؤلفه ماکزیمم مربوط به هر رکورد) که معرف زلزله‌های مناطق مورد مطالعه‌اند، استفاده شد و در جدول‌های (۲) و (۳) خلاصه‌ای از اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل ارائه شده است. بر اساس پیشنهاد FEMA-P695 مرز ۱۰ کیلومتر معیار تفکیک حوزه دور و نزدیک از گسل از یکدیگر قرار گرفت.

با نظیر آن در ساختگاه مورد مطالعه ضروری است. در این تحقیق با توجه به اینکه خاک محل احداث سازه‌ها بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ از نوع تیپ III می‌باشد، انتخاب رکوردها از وب‌سایت PEER نیز به صورتی بود که سرعت موج برشی و حتی مکانیسم شکست گسل‌های رکوردهای انتخابی با ساختگاه‌های مورد مطالعه تطابق داشته باشد. همچنین جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی فزاینده قاب‌های مورد مطالعه با در نظر گرفتن

جدول (۲): مشخصات شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل.

ردیف	نام زلزله	سال	بزرگا	حداکثر شتاب PGA (g)	حداکثر سرعت PGV (سانتی‌متر بر ثانیه)	Mechanism ساختار	R _{rup} (کیلومتر)	R _{jb} (کیلومتر)	V _{s30} (متر بر ثانیه)	NEHRP Class کلاس خاک	Site Condition ۲۸۰۰ تیپ خاک
۱	"Whittier Narrows-01"	۱۹۸۷	۵/۹۹	۰/۲۲۷۱	۱۷/۰۶۵	مورب معکوس	۲۱/۴۱	۲۵/۸۶	۳۱۶/۰۲	D	۳
۲	"Whittier Narrows-01"	۱۹۸۷	۵/۹۹	۰/۳۹۷۵	۱۸/۶۲۳	مورب معکوس	۱۸/۲۳	۲۳/۲۹	۳۰۱	D	۳
۳	"Northern Calif-03"	۱۹۵۴	۶/۵	۰/۲۰۳۳	۲۶/۲۰۹	امتداد لغز	۲۶/۷۲	۲۷/۰۲	۲۱۹/۳۱	D	۳
۴	"Coalinga-01"	۱۹۸۳	۶/۳۶	۰/۲۷۳۹	۲۸/۱۴۴	معکوس	۲۸/۱۱	۲۹/۴۸	۲۴۶/۰۷	D	۳
۵	"Chi-Chi_Taiwan-03"	۱۹۹۹	۶/۲	۰/۳۴۸	۲۷/۲۸۵	معکوس	۲۵/۱۷	۲۶/۰۵	۳۰۵/۸۵	D	۳
۶	"Joshua Tree_CA "	۱۹۹۲	۶/۱	۰/۴۰۷	۵۳/۰۷	امتداد لغز	۲۵/۰۴	۲۵/۵۳	۲۹۲/۱۲	D	۳
۷	"Superstition Hills-02"	۱۹۸۷	۶/۵۴	۰/۴۵۷	۴۱/۱۶۹	امتداد لغز	۱۱/۱۶	۱۱/۱۶	۳۱۶/۶۴	D	۳
۸	"San Fernando"	۱۹۷۱	۶/۶۱	۰/۲۲۴۷	۲۱/۷۱۸	معکوس	۲۲/۷۷	۲۲/۷۷	۳۱۶/۴۶	D	۳
۹	"Superstition Hills-02"	۱۹۸۷	۶/۵۴	۰/۲۵۷۳	۴۸/۰۷	امتداد لغز	۱۸/۲	۱۸/۲	۱۹۲/۰۵	D	۳
۱۰	"Imperial Valley-06"	۱۹۷۹	۶/۵۳	۰/۲۳۵۶	۲۶/۳۴۲	امتداد لغز	۲۲/۰۳	۲۲/۰۳	۲۴۲/۰۵	D	۳
۱۱	"Kobe_Japan"	۱۹۹۵	۶/۹	۰/۲۲۵	۳۱/۳۲۷	امتداد لغز	۱۹/۱۴	۱۹/۱۵	۲۵۶	D	۳
۱۲	"Northridge-01"	۱۹۹۴	۶/۶۹	۰/۲۳۱۳	۱۸/۲۱۸	معکوس	۱۹/۷۳	۲۴/۰۳	۳۱۶/۴۶	D	۳
۱۳	"Northridge-01"	۱۹۹۴	۶/۶۹	۰/۲۴۴۵	۲۴/۳۸	معکوس	۲۵/۶۶	۲۷/۲۶	۳۲۹/۰۶	D	۳
۱۴	"Spitak_Armenia"	۱۹۸۸	۶/۷۷	۰/۲	۲۸/۳۵۵	معکوس- مورب	۲۳/۹۹	۲۳/۹۹	۳۴۳/۵۳	D	۳
۱۵	"Chuetsu-oki_Japan"	۲۰۰۷	۶/۸	۰/۲۵۲۹	۴۳/۸۸۸	معکوس	۲۰/۷۱	۲۲/۱۸	۳۴۲/۷۴	D	۳
۱۶	"Chuetsu-oki_Japan"	۲۰۰۷	۶/۸	۰/۲۷۳۹	۴۰/۴۱۱	معکوس	۲۵/۶۸	۲۷/۹	۲۹۴/۷۱	D	۳
۱۷	"Chuetsu-oki_Japan"	۲۰۰۷	۶/۸	۰/۳۲۲۸	۲۹/۰۰۶	معکوس	۱۵/۸۹	۲۳/۱۸	۲۷۸/۱۲	D	۳
۱۸	"Loma Prieta"	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۳۶۹۹	۶۲/۹۹۸	معکوس	۲۷/۶۷	۲۷/۹۳	۲۸۲/۱۴	D	۳
۱۹	"Loma Prieta"	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۲۴۶۲	۳۸/۹۰۳	معکوس- مورب	۲۷/۳۳	۲۷/۶	۱۹۸/۷۷	D	۳
۲۰	"Loma Prieta"	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۲۶۸۹	۴۴/۲۴۶	معکوس- مورب	۲۴/۵۲	۲۴/۸۲	۲۱۵/۵۴	D	۳
۲۱	"Kobe_Japan"	۱۹۹۵	۶/۹	۰/۲۳۰۹	۲۴/۷۷۶	امتداد لغز	۲۴/۸۵	۲۴/۸۵	۲۵۶	D	۳
۲۲	"Kobe_Japan"	۱۹۹۵	۶/۹	۰/۳۲۴۲	۲۶/۷۸۳	امتداد لغز	۲۲/۵	۲۲/۵	۳۱۲	D	۳

جدول (۳): مشخصات شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک گسل.

ردیف	نام زلزله	سال	بزرگا	PGA (g)	PGV (متر بر ثانیه)	سازوکار	R_{jb} (کیلومتر)	R_{rup} (کیلومتر)	V_{s30} (متر بر ثانیه)	کلاس خاک	Site Condition ۲۸۰۰
۱	"Coyote Lake"	۱۹۷۹	۵/۷۴	۰/۲۵	۳۱/۹۳۲۸	امتداد لغز	۸/۴۷	۹/۰۲	۲۷۰/۸	D	۳
۲	"Mammoth Lakes-06"	۱۹۸۰	۵/۹۴	۰/۳۷۶	۱۷/۷۲۲	امتداد لغز	۶/۴۵	۱۲/۳۹	۳۷۳/۲	D	۳
۳	"Westmorland"	۱۹۸۱	۹.۵	۰/۳۷۷	۴۴/۱۴۲	امتداد لغز	۶/۱۸	۶/۵	۱۹۳/۷	D	۳
۴	"Coalinga-05"	۱۹۸۳	۵/۷۷	۰/۵۲	۲۹/۵۹	معکوس	۷/۰۲	۱۰/۷۸	۲۸۶/۴	D	۳
۵	"Chalfant Valley-01"	۱۹۸۶	۵/۷۷	۰/۲۷۲	۲۳/۵۲۹	امتداد لغز	۶/۰۷	۶/۳۹	۳۱۶/۲	D	۳
۶	"Parkfield"	۱۹۶۶	۶/۱۹	۰/۴۴۴	۲۵/۰۵۰۷	امتداد لغز	۹/۵۸	۹/۵۸	۶.۲۸۹	D	۳
۷	"Coalinga-01"	۱۹۸۳	۶/۳۶	۰/۳۰	۳۹/۴	معکوس	۷/۶۹	۸/۴۱	۲۵۷/۴	D	۳
۸	"Christchurch New Zealand"	۲۰۱۱	۶/۲	۰/۳۱۲	۷۴/۵۲	معکوس	۵/۵۸	۵/۶	۲۰۷	D	۳
۹	"Parkfield-02_CA"	۲۰۰۴	۶	۰/۲۵۱	۱۸/۳۹۸	امتداد لغز	۶/۲۷	۶/۸۷	۲۳۶/۶	D	۳
۱۰	"Parkfield-02_CA"	۲۰۰۴	۶	۰/۳۷۷	۱۷/۲۳	امتداد لغز	۸/۱۶	۸/۶۶	۲۵۱/۶	D	۳
۱۱	"Parkfield-02_CA"	۲۰۰۴	۶	۰/۵۷۶	۴۲/۳۳	امتداد لغز	۸/۴۵	۸/۸۱	۲۴۶/۱	D	۳
۱۲	"Parkfield-02_CA"	۲۰۰۴	۶	۰/۳۰۸	۲۳/۷۷۴	امتداد لغز	۸/۶۵	۹/۱۴	۳۴۱/۷	D	۳

۵- شاخص‌های خرابی و معیارهای شدت لرزه‌ای

شدت لرزه‌ای برداری تعریف نمودند و نشان دادند که با استفاده

از این بردار IM پراکندگی داده‌ها بسیار پایین تر خواهد آمد.

در این مطالعه با توجه به مدل‌های تحلیلی مورد استفاده (مدارس با تعداد طبقات کمتر از ۶) که در دسته ساختمان‌های بلند با پریردهای بالا قرار نمی‌گیرند شتاب طیفی مود اول به‌عنوان معیار شدت لرزه‌ای کارآمد و کارا برای شاخص شدت لرزه‌ای انتخاب شد. همچنین سازه با مود اول غالب به‌شدت به محتوای فرکانسی نزدیک به فرکانس مود اول حساس است که این مطلب را شتاب طیفی مود اول به‌خوبی در نظر می‌گیرد (Vamvatsikos & Cornell, 2002).

شاخص خرابی یا خسارت (DM)^۲، یک مقدار عددی مثبت اسکالر بین صفر تا بی‌نهایت است که خصوصیات پاسخ یک سازه در برابر بارهای لرزه‌ای وارده را مشخص می‌کند. انتخاب یک DM مناسب به نوع سازه و خرابی مورد نظر بستگی دارد. همچنین منجر به پراکندگی کمتر در پاسخ ایجاد شده در سازه توسط زلزله‌های گوناگون می‌شود. معرفی و انتخاب DM مناسب با توجه به عملکرد سازه اهمیت پیدا می‌کند، لذا موارد مختلفی را

یک گام اساسی هنگام تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای سیستم‌های مختلف، ایجاد ارتباط میان خطر لرزه‌ای و خرابی وارد به سیستم سازه‌ای تحت بررسی می‌باشد. مشخصه‌های زمین‌لرزه‌ها به‌عنوان خطر لرزه‌ای که بر عملکرد و انسجام سازه‌ها تأثیر می‌گذارند عبارتند از: شدت، محتوای فرکانسی و مدت زمین‌لرزه (Pitilakis et al., 2013). یکی از شاخص‌های لرزه‌ای که به مشخصات سازه مربوط می‌شود، شتاب طیفی متناظر با مود اول سازه می‌باشد که آن را با $S_a(T_1, 5\%)$ نمایش می‌دهند. این شاخص شدت یا لرزه‌ای (IM)^۲ به دلیل وابستگی به طیف پاسخ زمین کارا تر و مؤثرتر از شاخص‌هایی همچون PGA است، چون باعث می‌شود پراکندگی داده‌ها بسیار کمتر شده و جامعه آماری منظم‌تری از داده‌های تحلیل IDA در اختیار قرار گیرد (Vamvatsikos & Cornell, 2002). در این راستا بیکر و آلین کورنل (Baker & Allin Cornell, 2005) با انجام یک سری تحلیل‌های ریسک برای منطقه پارامتر ε را به‌عنوان پارامتری که با $S_a(T_1, 5\%)$ یک بردار را تشکیل می‌دهد به‌عنوان شاخص

بی وقفه (IO)، عملکرد ایمنی جانی (LS) و سطح عملکرد آستانه فروپاشی (CP) که با گذشتن دریفت حداکثر سازه از این مقدار سازه دچار فروریزش خواهد شد (Venture & Committee, 2000).

۲- کاهش شیب نمودار IDA به ۲۰ درصد شیب اولیه نمودار یا شیب الاستیک نمودار IDA (Venture & Committee, 2000)
۳- فراتر رفتن حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای از مقدار ۰/۱

از دیگر معیارهای فروریزش سازه می‌توان به عدم همگرایی در آنالیز یا به تعبیری ناپایداری دینامیکی (Ibarra, 2004) اشاره کرد.

می‌توان به عنوان شاخص شدت در نظر گرفت. حداکثر برش پایه، چرخش‌های گره‌ای، حداکثر شکل‌پذیری طبقه، اندیس‌های مختلف ارائه شده برای خسارت (مانند انرژی پسماند تجمعی کل، شاخص پارک یا شاخص پایداری)، حداکثر جابه‌جایی بام، حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقه و یا حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات، از جمله پارامترهایی است که به عنوان شاخص خسارت می‌تواند در نظر گرفته شود. در این مطالعه از جابه‌جایی نسبی طبقات یا نسبت دریفت بین طبقه‌ای بیشینه به عنوان شاخص خرابی استفاده شده است. این شاخص نمونه‌ای از شاخص‌های محلی غیر تجمعی می‌باشد که در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است (Baniassadi, 2010).

۷- صحت‌سنجی مدل

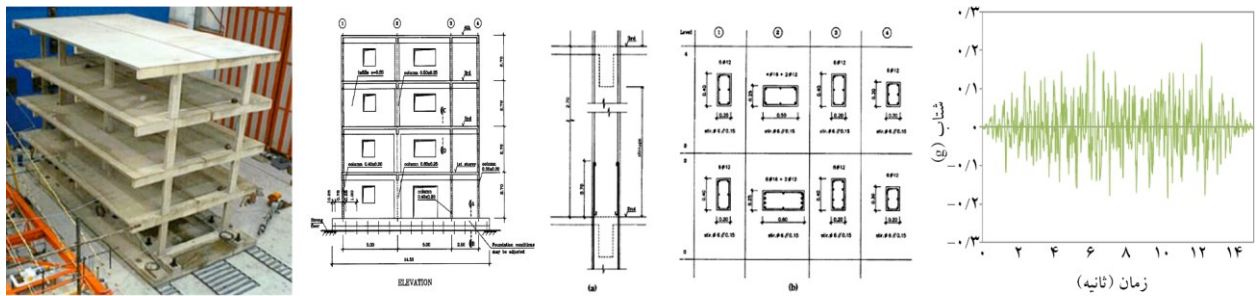
در این تحقیق، مدل‌سازی قاب‌های مورد پژوهش در نرم‌افزار OpenSees با استفاده از پژوهش آزمایشگاهی صورت گرفته توسط پینتو و همکاران (Pinto et al., 2002) برای مرکز تحقیقات مشترک اروپا و تحقیق پینهو و النشایی (Pinho & Elnashahi, 2000) صحت‌سنجی انجام شده است. در پژوهش پینتو و همکاران مدل‌سازی یک قاب ۴ طبقه بتن آرمه به صورت دو بعدی در آزمایشگاه ارزیابی سازه‌ای اروپا (ELSA) تحت دو بارگذاری شبه‌دینامیکی Acc-475 و Acc-975 مورد آزمایش قرار گرفته است. مشخصات کلی ساختمان و رکورد اعمالی در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. جهت راستی‌آزمایی قاب‌های مدل شده در نرم‌افزار OpenSees پس از مدل‌سازی مشخصات مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار OpenSees تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت مصنوعی دوره بازگشت ۴۷۵ ساله انجام شد. نمودار جابه‌جایی بام- زمان برای مدل آزمایشگاهی و تحقیق حاضر در شکل (۵-ب) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است تطابق بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی وجود دارد و می‌توان از صحت نتایج تحلیل این پژوهش اطمینان حاصل نمود.

۶- معیار فروریزش و شتاب فروریزش

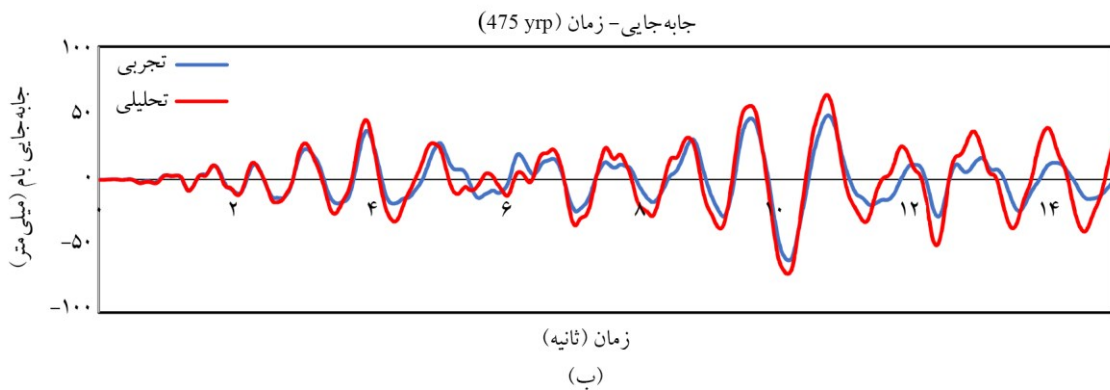
با توجه به افزایش معیار شدت در تحلیل‌های IDA، این تحلیل‌ها سرانجام به فروریزش سازه منجر می‌شوند. برای به دست آوردن ضریب مقیاس یا به تعبیری شتاب فروریزش در یک سازه ابتدا باید معیار یا معیارهایی در پروسه تحلیل تعریف نمود تا به هنگام رسیدن به آن معیار آنالیز IDA قطع شده و شتاب نهایی به عنوان شتاب سطح فروریزش معرفی گردد. بنا بر توصیه دستورالعمل FEMA350 برای بررسی ظرفیت فروریزش سازه می‌توان از تحلیل IDA استفاده کرد. ظرفیت حالت حدی فروریزش را طبق این دستورالعمل می‌توان مطابق با وقوع یکی از حالات زیر در نظر گرفت (FEMA, 2013).

۱- رسیدن به دریفت بین طبقاتی سطح فروریزش تعریف شده در FEMA356

در دستورالعمل FEMA356 برای سازه‌های مختلف با سیستم و تعداد طبقات متفاوت برای سطوح عملکرد آستانه فروریزش (CP)^۴، ایمنی جانی (LS)^۵ و قابلیت استفاده بی وقفه (IO)^۶ دریفتی تعیین شده که با عبور دریفت حداکثر سازه از این دریفت، عملکرد سازه از عملکرد معادل آن دریفت عبور خواهد کرد. بر اساس پیشنهاد دستورالعمل FEMA356 برای قاب‌های بتن آرمه مقادیر ۱، ۲ و ۴ درصد به ترتیب برای سطح عملکرد استفاده



(الف)



جابه‌جایی - زمان (475 یتر)

زمان (ثانیه)

(ب)

شکل (۵): (الف): مشخصات مدل آزمایشگاهی و رکورد اعمالی به سازه و (ب): مقایسه جابه‌جایی بام- زمان حاصل از شبیه‌سازی عددی OpenSees با نتایج آزمایشگاهی تحت رکورد Acc475.

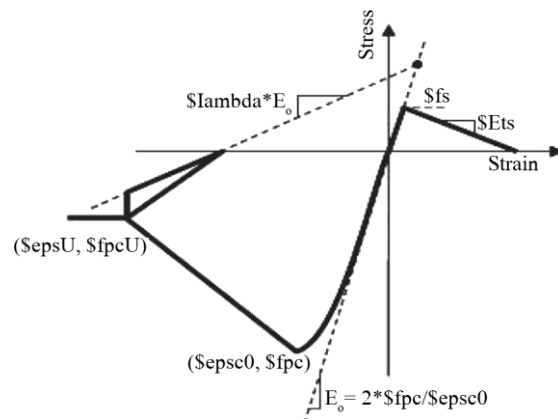
۸- مدل‌سازی

از روش ستون متکی^۷ استفاده می‌شود. در این روش یک دهانه اضافی به سازه اضافه می‌شود و بارهای ثقلی حذف شده به این ستون‌ها وارد می‌شود که با توجه به اینکه مقاومت خمشی این ستون‌ها توسط فنرهای خمشی با مقاومت خمشی ناچیز حذف می‌شود. بنابراین این ستون‌ها به سازه اصلی تکیه کرده و از این طریق نیروی اضافی به سازه اصلی وارد می‌کنند. بار وارد بر ستون‌های متکی فقط برای در نظر گرفتن اثر پی دلتا خواهد بود و بار آن برابر با بار قاب‌های ثقلی حذف شده خواهد بود. بدیهی است که بارهای ثقلی مساحت بارگیر قاب اصلی به ستون‌های قاب اصلی نیز وارد می‌شود. المان تیر واصل این ستون به قاب اصلی از نوع Truss تعیین می‌شود که مقاومت خمشی نداشته باشد. از طرفی همان‌طور که گفته شد ستون‌های متکی نیز توسط فنرهای دورانی با سختی خمشی ناچیز به هم متصل می‌شود تا لنگری توسط آنها جذب نشود. برای تعریف بتن از ماده بتن با نرم‌شوندگی کششی خطی (concrete02) مطابق شکل (۶) استفاده شده است.

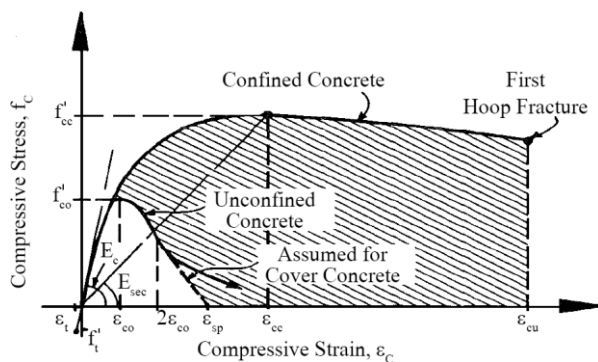
در این مطالعه سازه بتن‌آرمه ۱۴ مدرسه ۱ الی ۴ طبقه موجود در پهنه‌های با خطر لرزه‌خیزی متوسط و زیاد که بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۲ با سیستم مقاوم جانبی قاب خمشی طراحی شدند مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که عمده ساختمان‌های مورد مطالعه به لحاظ خصوصیات کالبدی در پلان و ارتفاع منظم محسوب می‌شوند. با توجه به اینکه تحلیل دینامیکی افزایشی تحلیلی زمان‌بر است، سازه‌های سه‌بعدی موجود برای تحلیل دینامیکی افزایشی دو بعدی مدل شده‌اند. به‌طور معمول برای ساده‌سازی و راحت‌تر تبدیل کردن سازه‌های سه‌بعدی موجود به مدل‌های دو بعدی بهتر است از تکنیک قاب‌های محیطی بهره‌بردار. در این تکنیک از قاب‌هایی در اطراف پلان بهره می‌برند که هیچ کدام از قاب‌ها دارای عضو مشترک نیستند و کاملاً مستقل عمل می‌نمایند؛ بنابراین در مدل دو بعدی فقط قابی که به نحو کافی و مؤثر نماینده مدل سه‌بعدی است در OpenSees مدل گردید. در راستای لحاظ کردن اثرات P-Delta

پیش‌بینی شده است، در حالی که محصورشدگی باعث افزایش تنش و کرنش نهایی بتن می‌گردد.

یکی از مدل‌های رفتاری مرسوم برای مصالح بتنی مدل بتن مندر و همکارانش (Mander et al., 1988) می‌باشد که در سال ۱۹۸۸ توسعه داده شده است (شکل ۷). این مدل از دقت بسیار مناسبی برخوردار است. این مدل در سال ۲۰۱۱ توسط کارتیگ و مندر (Karthik & Mander, 2011) اصلاح شده و مدل دقیق‌تری توسعه داده شد.



شکل (۶): منحنی رفتار Concrete 02 (Mazzoni, 2006).



شکل (۷): منحنی تنش کشش بتن مندر (Mander et al., 1988).

در این مدل به منظور محاسبه تأثیر محصورشدگی روی نمودار تنش-کرنش با اعمال تغییراتی تعیین شده است که به شرح زیر است:

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_1}{f'_c}} - 2 \frac{f_1}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (1)$$

که در آن f'_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده، f' مقاومت فشاری بتن غیر محصور، f_1 فشار محصورکننده مؤثر که توسط خاموت یا ماریچ اعمال می‌شود. کرنش متناظر با مقاومت فشاری بتن محصور شده نیز توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_c \left(1 + 5 \frac{f_1}{f'_c} \right) \quad (2)$$

که در آن ϵ_c کرنش بتن غیر محصور در مقاومت فشاری آن می‌باشد. برای تعریف فولاد از مصالح steel02 مطابق شکل (۸) استفاده شده است. با توجه به وجود مشخصات مصالح مورد استفاده در سازه‌ها در نقشه‌های اجرایی کلیه ساختمان‌های مورد مطالعه مقاومت تسلیم f_y برای میلگردهای مصرفی از نوع آجدار

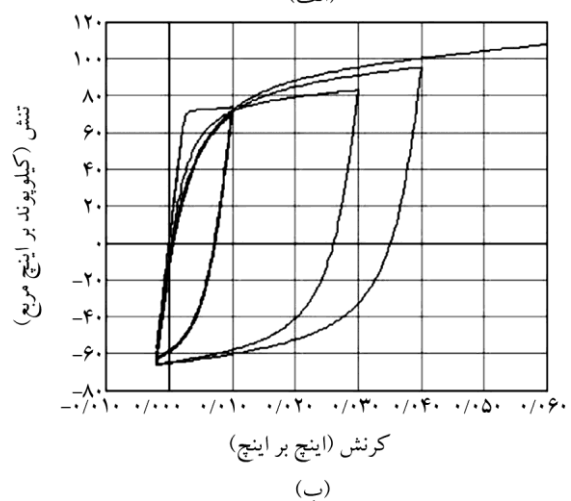
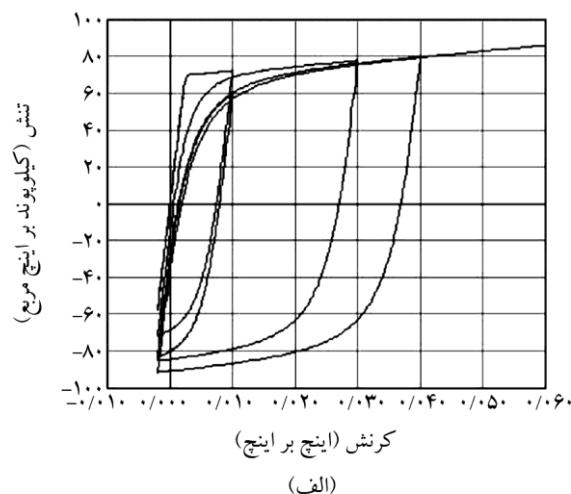
ماده بتن یک‌بعدی با در نظر گرفتن ناحیه کششی بتن و نرم شوندگی کششی خطی در ناحیه کششی است. منحنی رفتاری این مصالح مطابق مطالعه کنت-پارک (Kent & Park, 1971) بوده که شکل رفتاری این مصالح مطابق شکل (۶) می‌باشد. در مواردی بتن توسط مصالحی مانند دورگیر فولادی احاطه شود، مقاومت فشاری و شکل‌پذیری بتن به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. در این حالت بتن را بتن محصور می‌گویند و بسته به تنش تسلیم و هندسه مصالح محصورکننده، خواص مکانیکی بتن در مقایسه با بتن محصور نشده به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. برای مدل‌سازی دقیق بتن محصور شده، خواص مکانیکی بهبود یافته باید در تحلیل سازه‌های غیرخطی و همچنین در مدل‌سازی اجزای محدود غیرخطی در نظر گرفته شود. در این تحقیق به منظور افزایش دقت نتایج تحلیل غیرخطی، از بتن محصور شده^۹ یا بتن هسته^۹ استفاده شده است تا رفتار مصالح بتنی به‌درستی مدل‌سازی شوند. محصورشدگی باعث تغییر رفتار بتن محصور شده، در مقایسه با بتن نامحصور می‌شود و این تغییر رفتار باعث تغییر رفتار غیرخطی کل ساختمان می‌شود. رفتار غیرخطی را می‌توان به دو صورت روش مفصل پلاستیک و روش فایبر اعمال کرد. چنان که از شکل (۶) مشخص است، رفتار بتن نامحصور شامل دو بخش است: یک ناحیه افزایشی که به‌صورت سهمی است و شامل مرحله ارتجاعی (تا ترک خوردگی، جاری شدن و رسیدن به حداکثر مقاومت) می‌باشد، و یک ناحیه غیر ارتجاعی یا شاخه نزولی که به‌صورت خط مستقیم با شیب معادل رفتار نرم

شش نقطه انتگرال‌گیری در طول المان استفاده شده است. انتگرال‌گیری به کمک روش نیومارک با مقادیر $\gamma=0/5$ و $\beta=0/25$ انجام شده است. برای تبدیل سختی و نیروهای مقاوم المان تیر از سیستم مختصات محلی المان‌ها به سیستم مختصات سراسری، نیاز به یک تبدیل هندسی می‌باشد. برای المان‌های تیر از تبدیل خطی و برای المان‌های ستون به‌منظور در نظر گرفتن اثرات پی‌دلته، از تبدیل پی‌دلته استفاده شده است. همچنین از الگوریتم‌ها و پارامترهای مختلفی همچون نیوتن و نیوتن اصلاح شده برای انجام تحلیل استفاده شده تا همگرایی در تحلیل حاصل شود.

۹- تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشنده و منحنی‌های (IDA)

روش تحلیل دینامیکی افزایشنده در سال ۱۹۷۷ برای اولین بار توسط برترو (Bertero, 1977) بیان گردید. این روش به‌طور جامع و به شکل قانون‌مند در سال ۲۰۰۲ توسط وامواتسیکوس و کورنل (Vamvatsikos & Cornell, 2004) مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در دهه اخیر این روش توسط آژانس مدیریت بحران فدرال آمریکا FEMA پذیرفته شده و در راهنماهای FEMA-350 و FEMA-351 (FEMA, 2000) برای تعیین ظرفیت فروریزش کلی سازه مورد توجه قرار گرفته است. تحلیل دینامیکی افزایشنده یک تحلیل چندمنظوره و یک روش پرکاربرد با اهداف مختلفی می‌باشد. در این روش تحلیلی، مدل سازه‌ای تحت یک یا چند رکورد شتاب‌نگاشت که به سطوح مختلف مقیاس شدند قرار می‌گیرد. از این رو یک یا چند منحنی از پاسخ‌های لرزه‌ای سازه در مقابل شدت تحریک حاصل می‌شوند. در هر گام مقیاس کردن، مدل سازه‌ای تحت نگاشت‌های مورد نظر تحلیل شده و یک یا چند منحنی از پاسخ خسارت بر حسب شدت حاصل می‌شود. در این روش از یک گام به گام بعدی با فواصل ثابت هر گام زمانی، ماتریس سختی و میرایی می‌تواند تغییر کند و پاسخ مدل تحت شتاب زلزله به روش‌های عددی و برای هر گام زمانی محاسبه می‌شود (Vamvatsikos & Cornell, 2002). در این مطالعه از تحلیل دینامیکی افزایشنده با گام شدت $0/1g$ استفاده شده است.

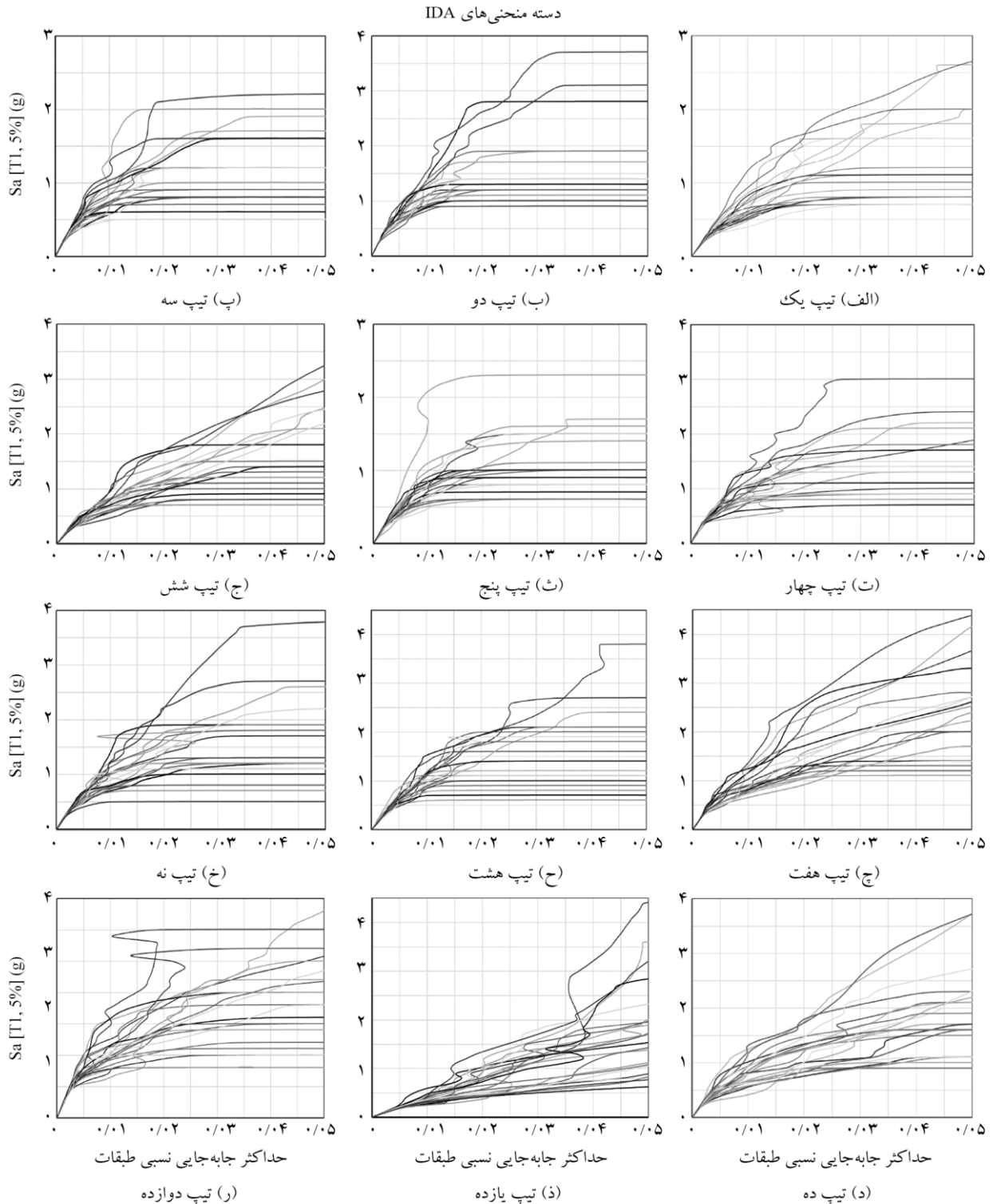
با اعمال هر ضریب مقیاس، یک تحلیل دینامیکی تاریخچه



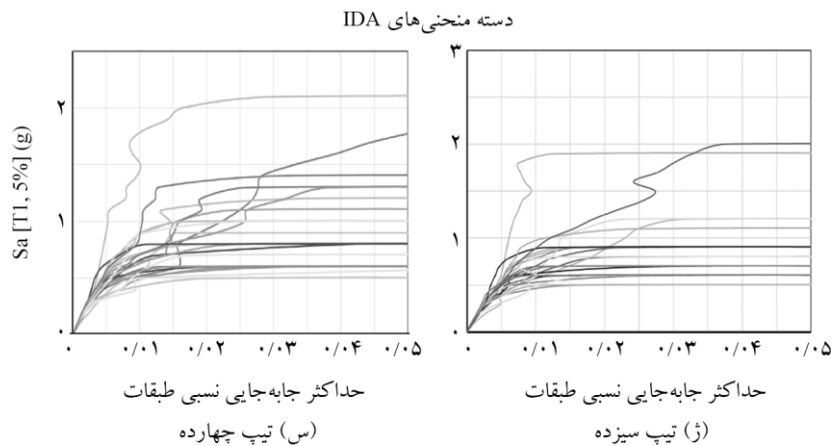
شکل (۸): رفتار هیسترسیک steel02 با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک در فشار (الف) و کشش (ب) (Mazzoni et al., 2006).

AIII ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و برای میلگردهای مصرفی از نوع آجدار AII ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. به‌منظور تعریف مقاطع در این مطالعه از مقطع فایبر استفاده شده است. در مقاطع Fiber سطح مقطع به انواع مش‌ها تقسیم‌بندی می‌شود و با تعیین نقاط مختلف روابط تنش-کرنش و مصالح مختلف مربوط به هر یک تعریف می‌شود که مزیت آن در مدل کردن آرماتورها در مقطع بتنی است؛ بدین معنی که از طریق منحنی تنش-کرنش هر مقطع که آن‌هم از فیبرهای هر مقطع گزارش می‌گیرد می‌توان نیروهایی در دو سر المان و هر نقطه از المان تعیین کرد (Mazzoni et al., 2006). در این مطالعه برای مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان تیر ستون غیرخطی بر مبنای جابه‌جایی (DispBeamColumn) با در نظر گرفتن توزیع پلاستیسیته و تعداد

زمانی غیرخطی انجام شده و حداکثر خروجی‌های مورد نظر از جمله حداکثر نسبت دررفت میان طبقه‌ای ثبت گردید. برای به دست آوردن منحنی‌های IDA در مجموع بیش از ۲۰۰۰۰ تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام شده تا منجر به فروریزش سازه‌ها شده است. بعد از انجام تحلیل IDA دسته‌ای از منحنی‌ها به دست می‌آید. شکل (۹) منحنی‌های چند رکورده IDA برای قاب‌های منتخب هر تیپ برای مجموعه رکورد دور از گسل و در شکل (۱۰) برای مجموعه رکورد نزدیک گسل ارائه شده است.



شکل (۹): مجموعه منحنی‌های IDA برای رکوردهای دور از گسل.

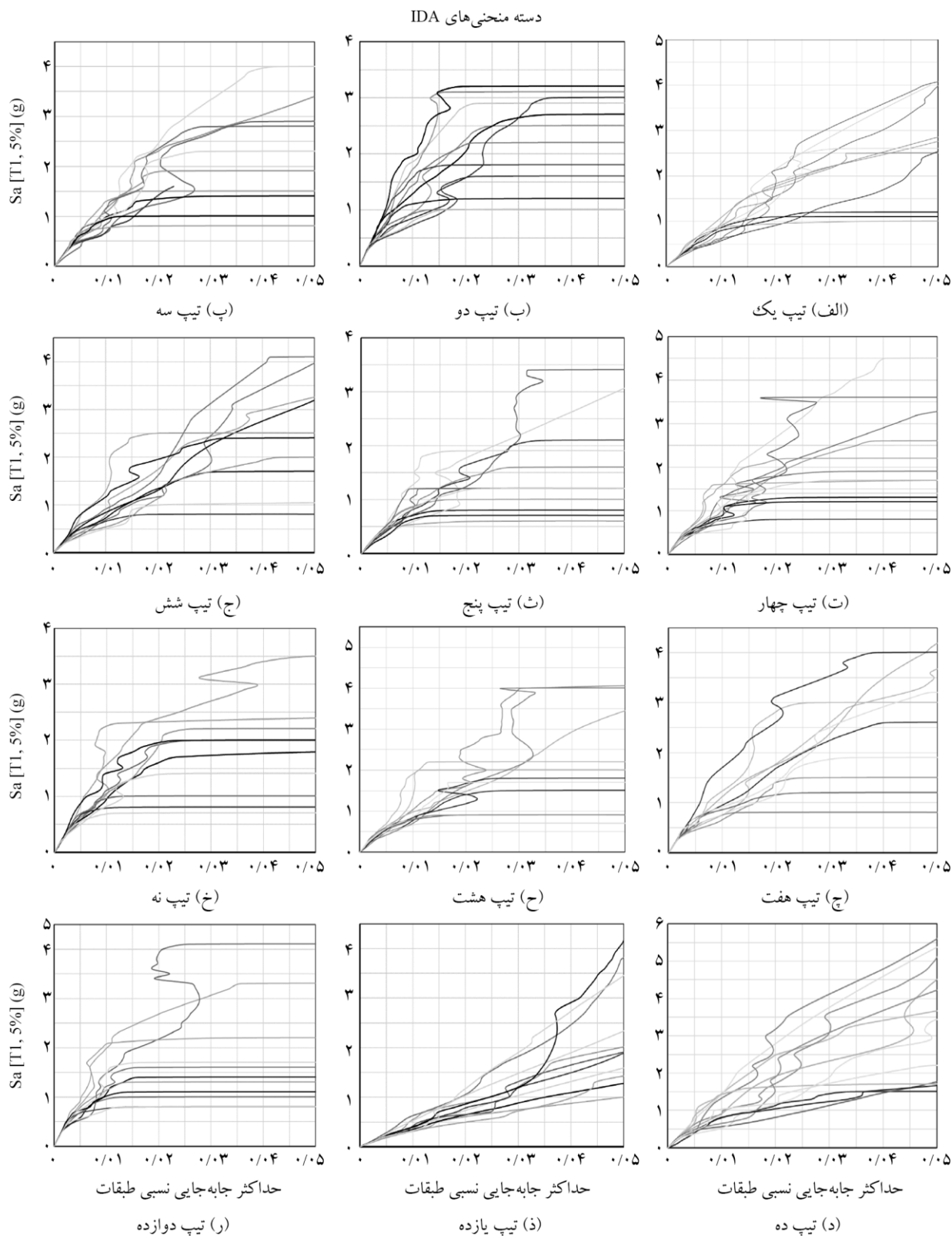


ادامه شکل (۹).

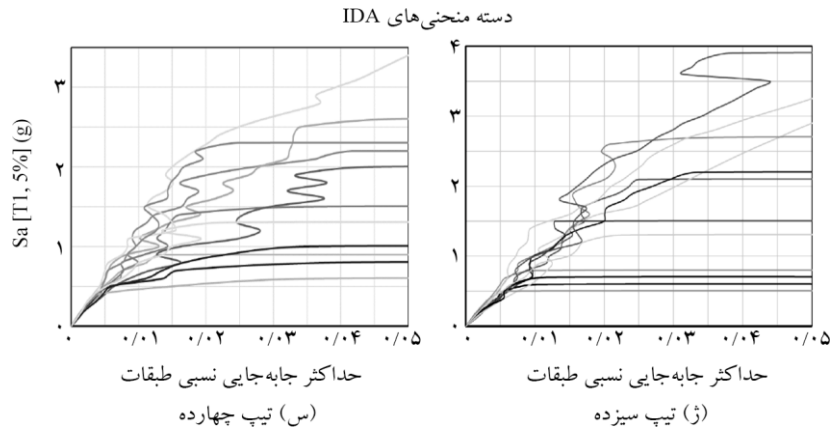
زیاد منحنی‌ها که هر یک نمایانگر رفتار خاصی از سازه تحت رکوردهای زلزله بوده، نمی‌تواند عملکرد کلی سازه را بیان کند زیرا پاسخ تحلیل‌های غیرخطی و IDA به شدت و مشخصات دینامیکی رکوردهای انتخابی وابسته است و نتایج از یک رکورد به رکورد دیگر به شدت تغییر می‌کند؛ از این رو برای دستیابی به یک حالت کلی از رفتار سازه و کاهش پراکندگی اطلاعات می‌توان دسته منحنی‌های به‌دست آمده از تحلیل IDA را به کمک روش‌های آماری خلاصه نمود. ساده‌ترین روشی که برای ترکیب منحنی‌های IDA استفاده می‌شود، استخراج منحنی‌های صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد از هر یک از دسته منحنی‌های IDA است. در این تحقیق نیز از همین روش برای ترکیب منحنی‌های به‌دست آمده برای سازه‌های مورد مطالعه استفاده شده است. پس از خلاصه‌سازی نمودارهای IDA به‌دست آمده برای هر یک از سازه‌های مورد مطالعه، در شکل‌های (۹) تا (۱۶) هر یک از این دسته منحنی‌های خلاصه شده مورد مقایسه بر اساس میزان خطر نسبی زلزله، تعداد طبقات (ارتفاع) و ویرایش آیین‌نامه ۲۸۰۰ سازه‌های مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت با افزایش قابل توجه ارتفاع، سازه زودتر وارد ناحیه غیرخطی شده و عمده سازه‌های طراحی شده با ویرایش سوم دیرتر وارد ناحیه غیرخطی شده و شتاب طیفی بزرگ‌تری را نسبت به سازه با مشخصات مشابه که با ویرایش دوم طراحی شده تحمل می‌نماید و در شتاب‌های کمتری دچار فروریزش می‌شوند.

با دقت در نواحی پراکندگی این دسته منحنی می‌توان طیف رفتاری قاب‌های طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ را از محدوده رفتار خطی، غیرخطی و در نهایت فروریزش سازه را مشاهده کرد. در ابتدا کلیه منحنی‌ها یک ناحیه خطی الاستیک با شیب تقریباً یکسان وجود دارد پس از آن وارد محدوده غیرخطی خود شده و اکثراً دچار کاهش سختی می‌شوند تا در نهایت دچار فروریزش می‌شوند.

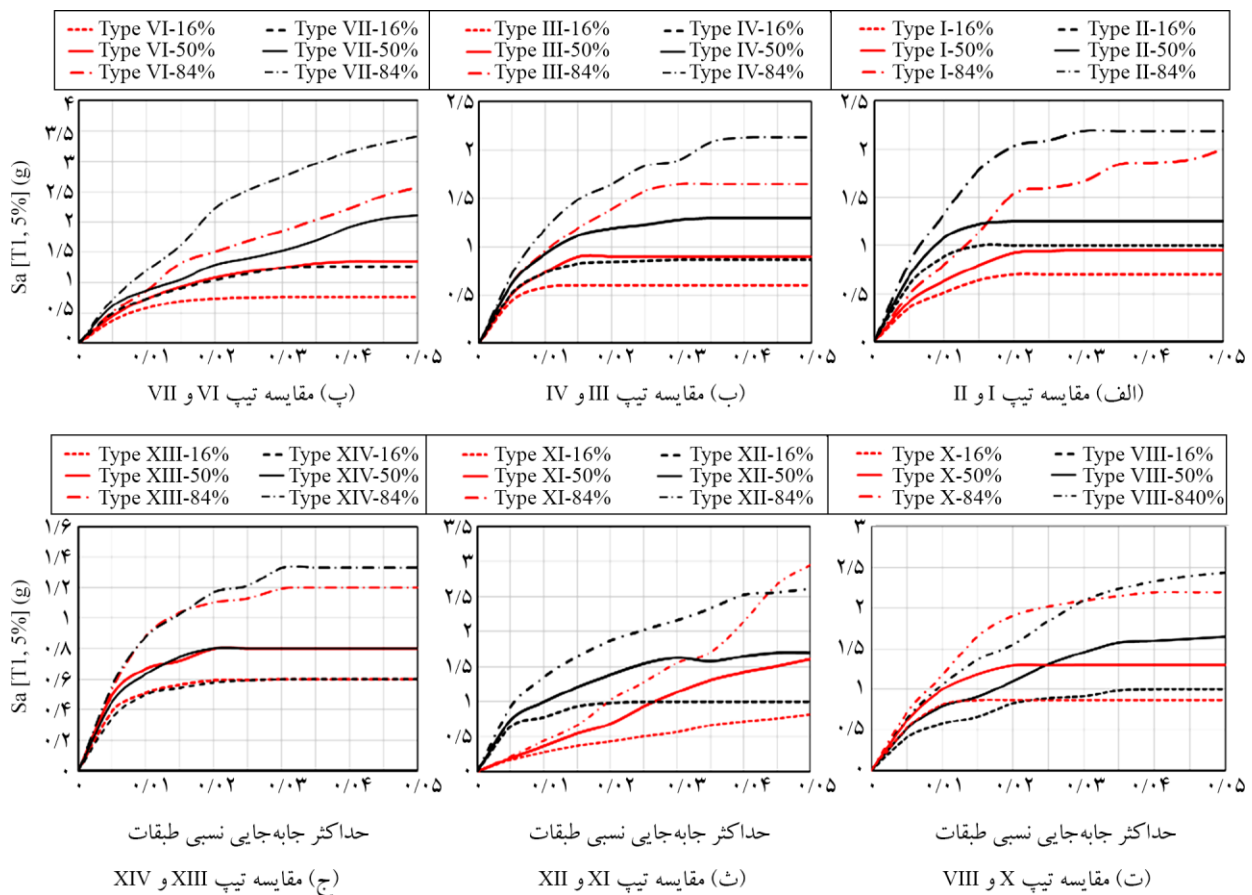
مطابق منحنی‌های به‌دست آمده، به‌طور کلی می‌توان گفت با افزایش شتاب طیفی مود اول، پاسخ سازه یعنی حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات افزایش می‌یابد اما هر سازه در مقابل شتاب‌نگاشت‌های مختلف متحمل جابه‌جایی‌های نسبی متفاوتی شده‌اند به نحوی که حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات سازه برای برخی از شتاب‌نگاشت‌ها در شدت‌های کمتری رخ داده است. دلیل اینکه برخی رکوردها در شدت‌های کمتری منجر به فروریزش یا ناپایداری دینامیکی سازه مورد مطالعه شده‌اند، منطبق بودن محدوده فرکانسی آنها با محدوده فرکانسی سازه مورد مطالعه می‌باشد. بیشترین شتاب طیفی که یک قاب متحمل شده است مربوط به قاب تپ X می‌باشد که نماینده ساختمان‌های مدارس بتنی دو طبقه واقع در مناطق با خطر نسبی زیاد است که بر اساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده‌اند. در مقایسه رفتار سازه‌ها با ارتفاع‌های متفاوت، می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع، سازه زودتر وارد ناحیه غیرخطی می‌شود. همان‌طور که نمودارهای IDA ترسیم شده نشان می‌دهند، تعداد



شکل (۱۰): مجموعه منحنی‌های IDA برای رکوردهای نزدیک گسل.



ادامه شکل (۱۰).

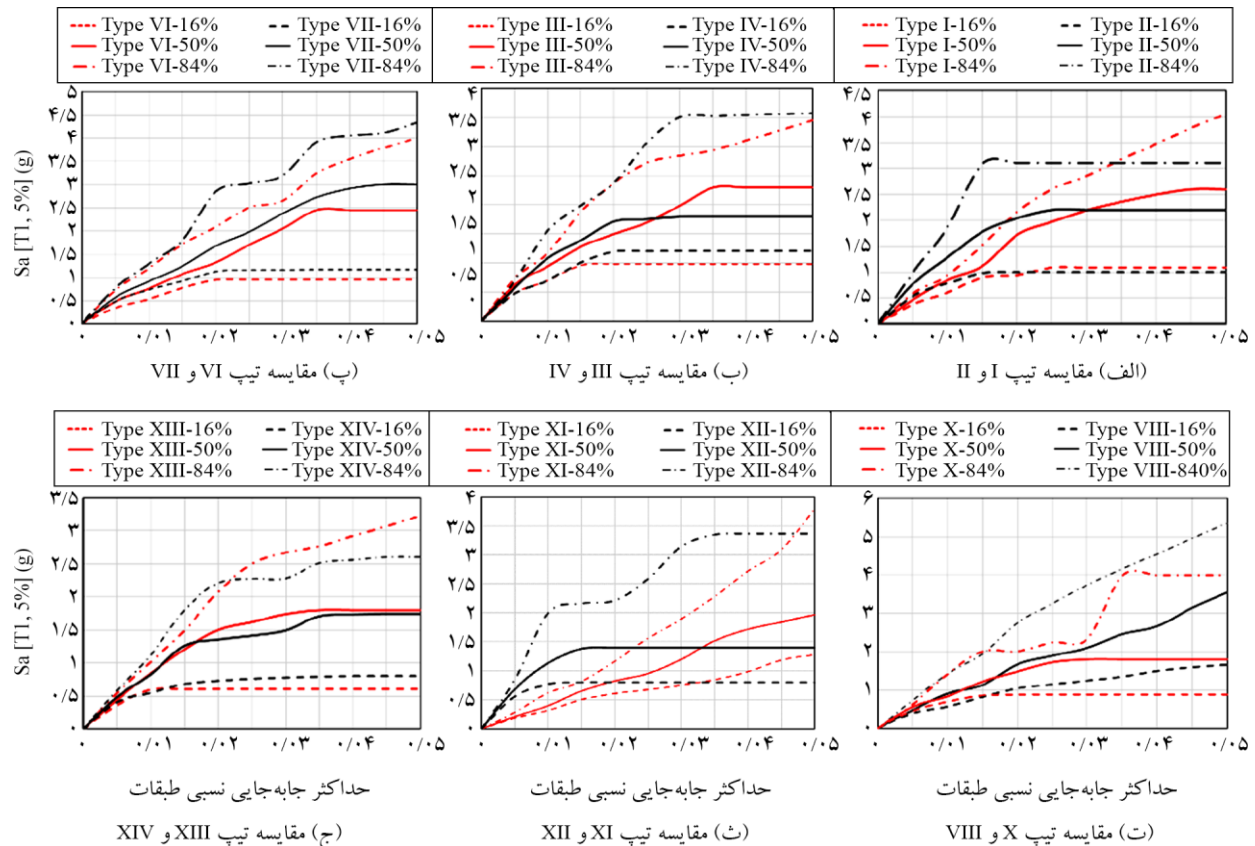


شکل (۱۱): مقایسه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد از هریک از دسته منحنی‌های IDA لرزه‌ای مدارس منتخب هر تیپ بر اساس خطر نسبی زلزله برای رکوردهای دور از گسل.

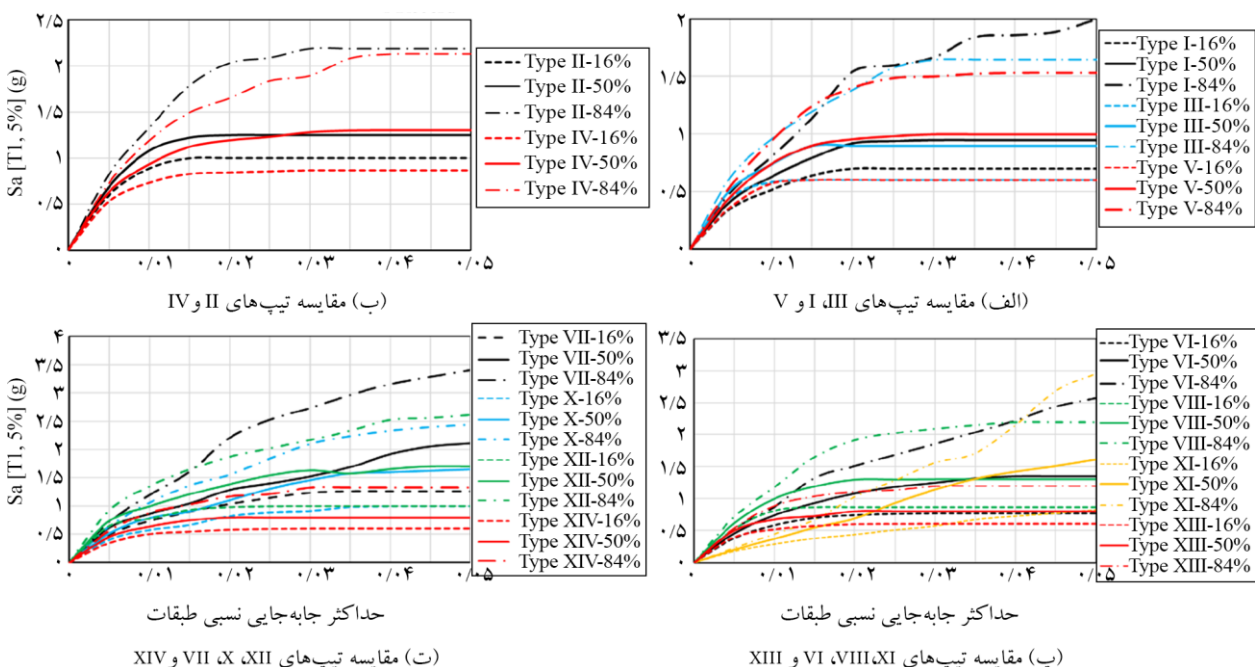
۱۰- تهیه منحنی‌های شکنندگی قاب‌های مورد بررسی
منحنی شکنندگی که از مدل رفتاری سازه، ظرفیت و مجموعه‌ای از حرکات زمین ایجاد شده است، یک نمایش گرافیکی از آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک سازه است. منحنی شکنندگی، نسبت بین شدت زمین‌لرزه و سطح خرابی لرزه‌ای

محتمل را توصیف می‌کند. برای استخراج منحنی‌های شکنندگی از دسته منحنی‌های IDA توزیع‌های آماری زیادی وجود دارد. به‌منظور تعریف تابع شکنندگی معمولاً از یک تابع توزیع تجمعی لوگ نرمال استفاده می‌شود (Shome, 1999). در واقع با انتخاب یک شاخص عملکرد بر اساس یکی از پارامترهای تقاضای

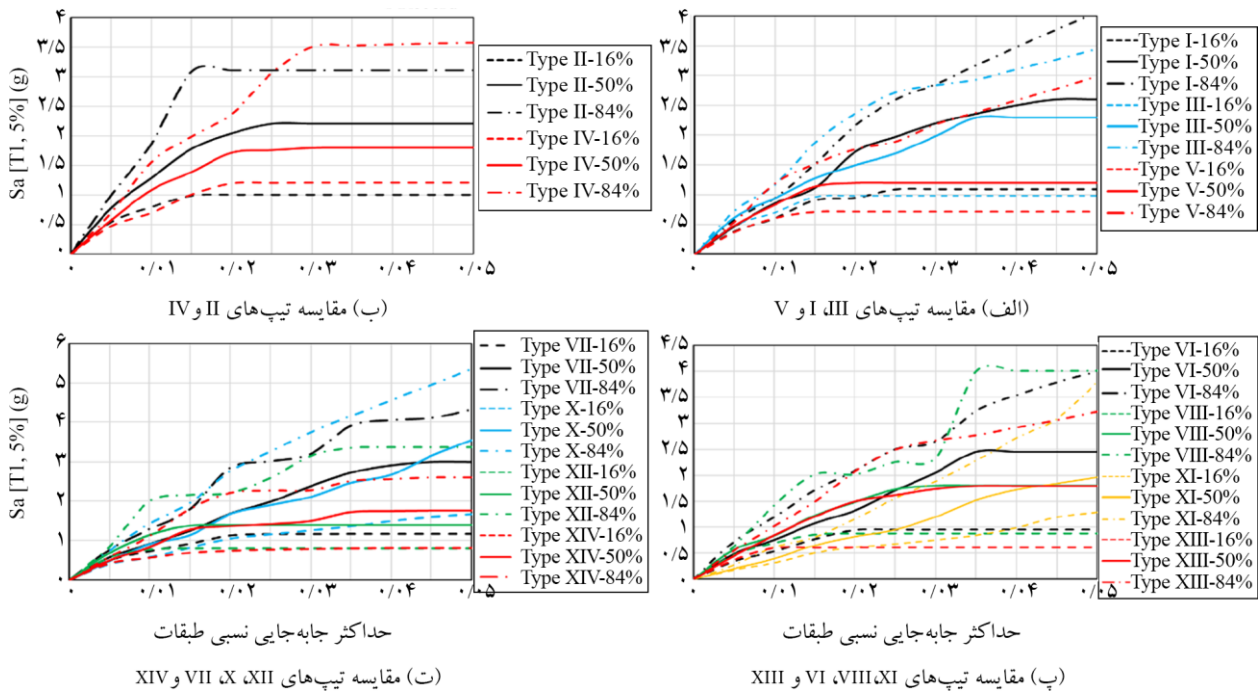
مهندسی (EDP)^۱ مانند حداکثر جابه‌جایی نسبی میان طبقه‌ای، مقدار حدی (LS) تعریف شده برای سطوح عملکرد مختلف را به مقدار کرنش یا مانند آنها، احتمال فراگذشت این شاخص از ازای مقادیر شدت لرزه‌ای (IM) مبنا بیان می‌کند.



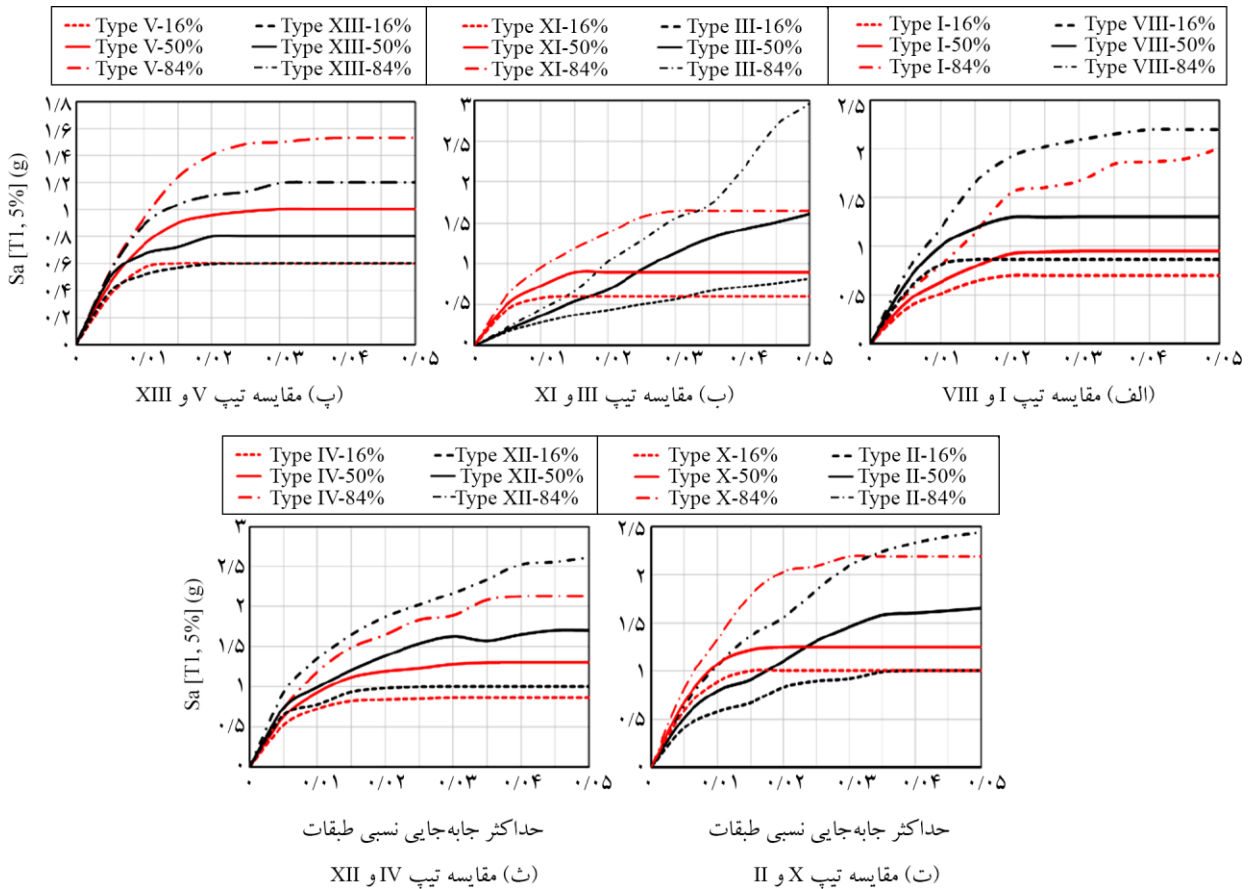
شکل (۱۲): مقایسه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد از هریک از دسته منحنی‌های IDA لرزه‌ای مدارس منتخب هر تیپ بر اساس خطر نسبی زلزله برای رکوردهای نزدیک گسل.



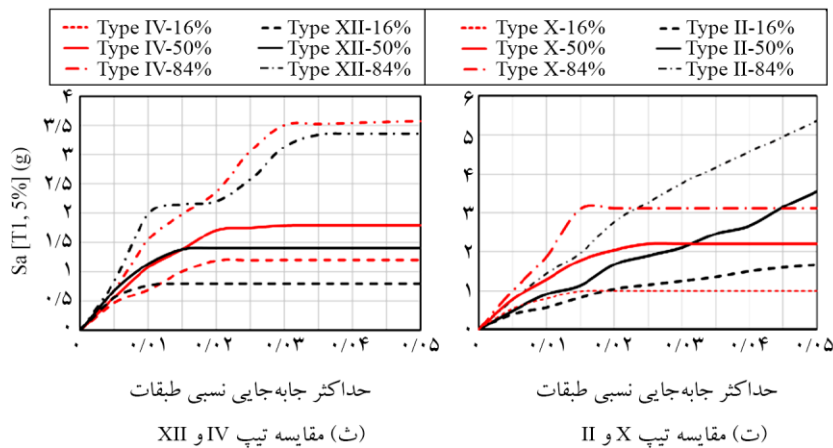
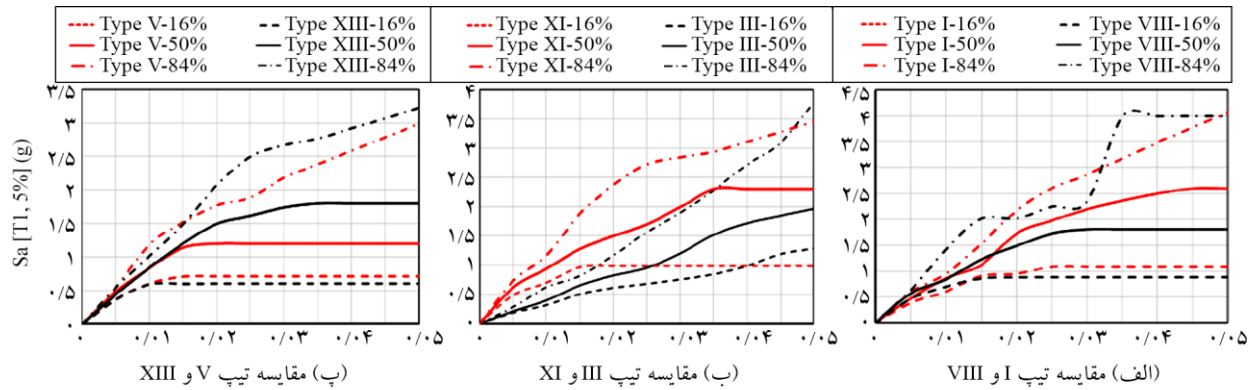
شکل (۱۳): مقایسه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد از هریک از دسته منحنی‌های IDA لرزه‌ای مدارس منتخب هر تیپ بر اساس تعداد طبقه (ارتفاع) برای رکوردهای دور از گسل.



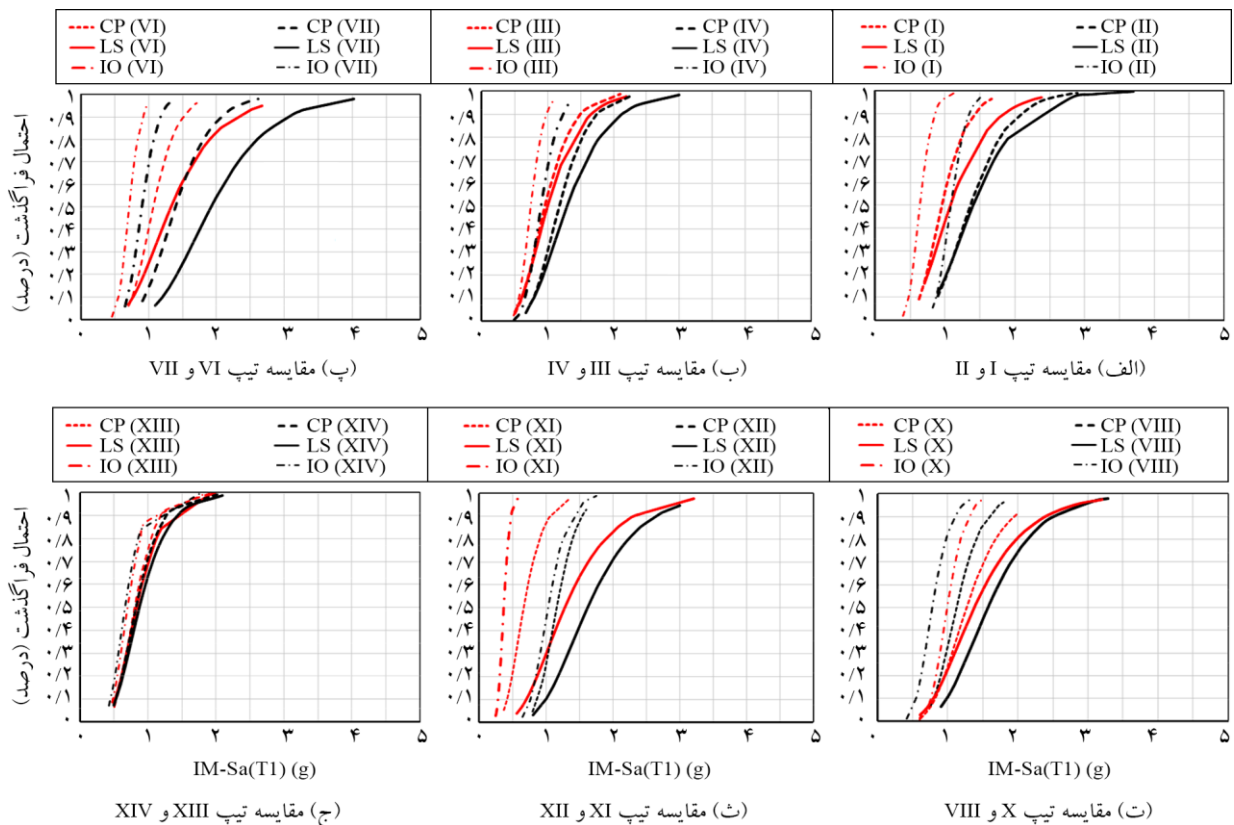
شکل (۱۴): مقایسه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد از هریک از دسته منحنی‌های IDA لرزه‌ای مدارس منتخب هر تیپ بر اساس تعداد طبقه (ارتفاع) برای رکوردهای نزدیک گسل.



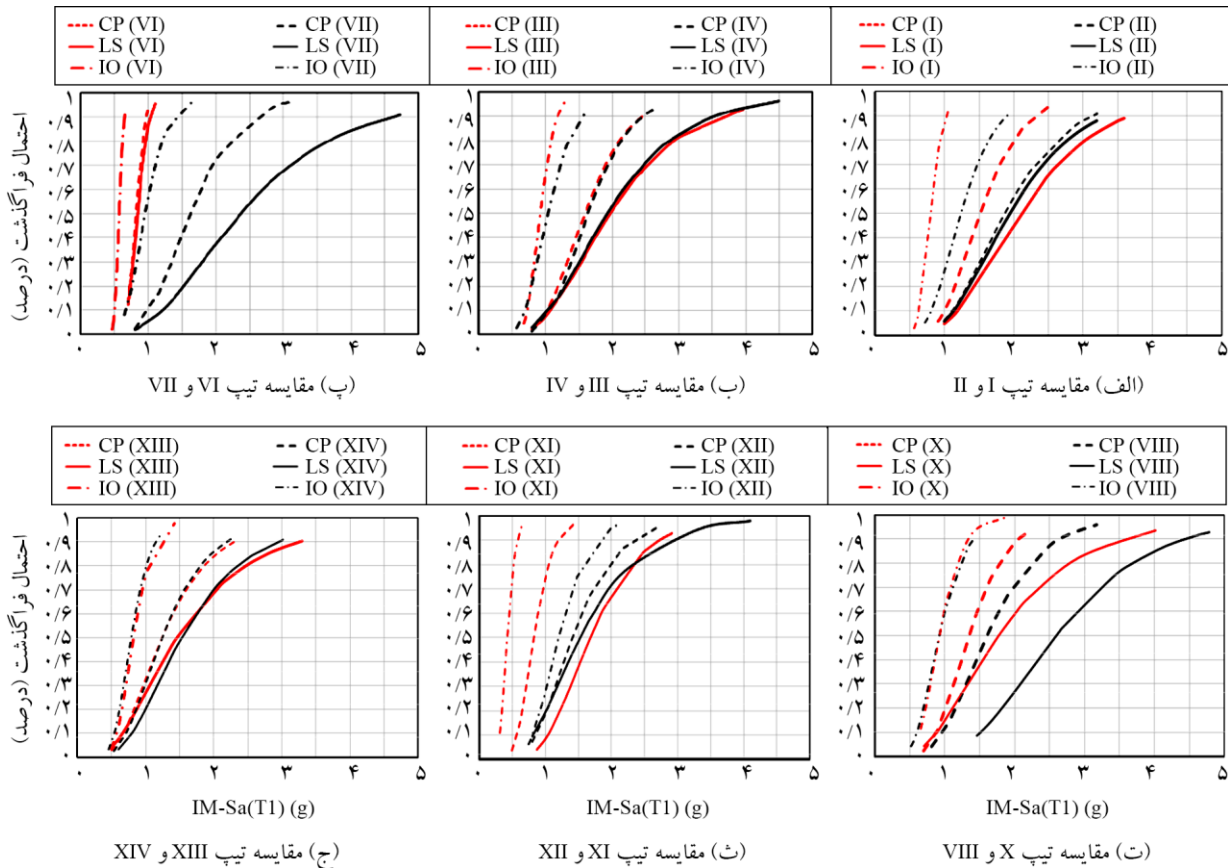
شکل (۱۵): مقایسه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد از هریک از دسته منحنی‌های IDA لرزه‌ای مدارس منتخب هر تیپ بر اساس ویرایش‌های استاندارد ۲۸۰۰ برای رکوردهای دور از گسل.



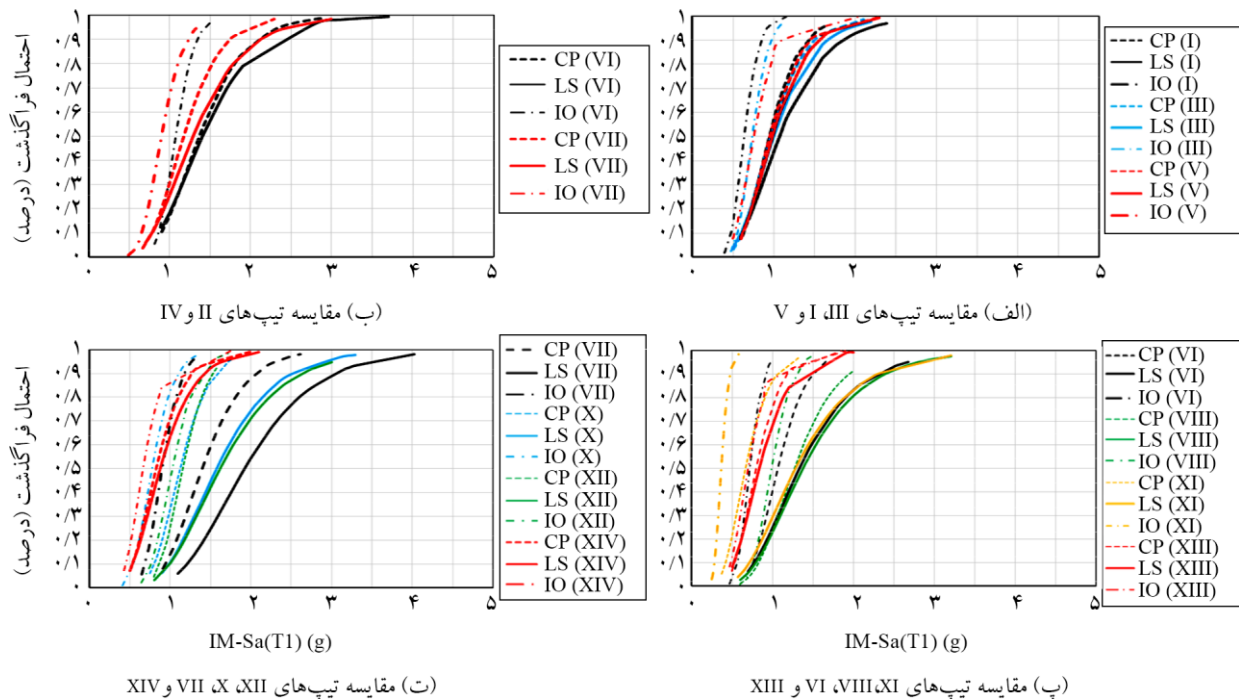
شکل (۱۶): مقایسه صدک‌های ۱۶، ۵۰، ۸۴ درصد از هریک از دسته منحنی‌های IDA لزه‌ای مدارس منتخب هر تیپ بر اساس ویرایش‌های استاندارد ۲۸۰۰ برای رکوردهای نزدیک گسل.



شکل (۱۷): مقایسه منحنی‌های شکنندگی منتخب هر تیپ بر اساس خطر نسبی زلزله برای رکوردهای دور از گسل.



شکل (۱۸): مقایسه منحنی‌های شکنندگی مدارس منتخب هر تیپ بر اساس خطر نسبی زلزله برای رکوردهای نزدیک گسل.



شکل (۱۹): مقایسه منحنی‌های شکنندگی مدارس منتخب هر تیپ بر اساس ارتفاع برای رکوردهای دور از گسل.

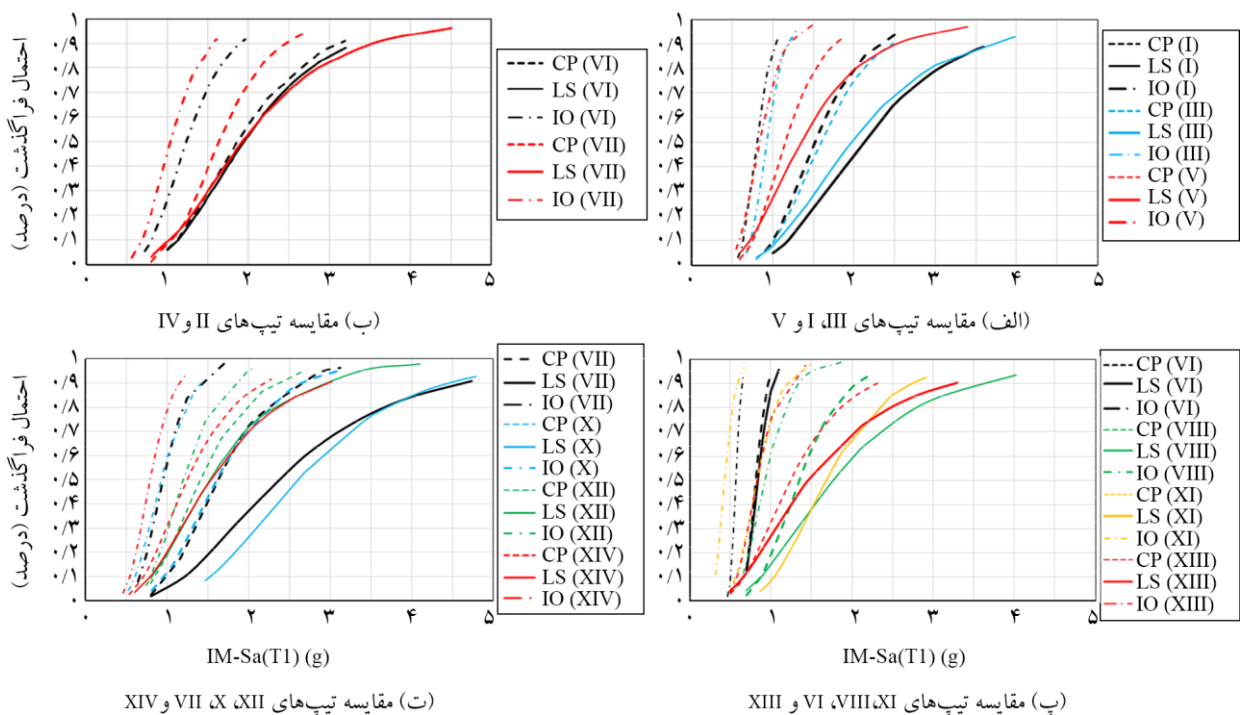
در رابطه (۳)، φ تابع توزیع تجمعی لوگ نرمال، θ میانگین

$$\text{fragility} = P(\text{EDP} > \text{IM} = x) = \varphi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right) \quad (3)$$

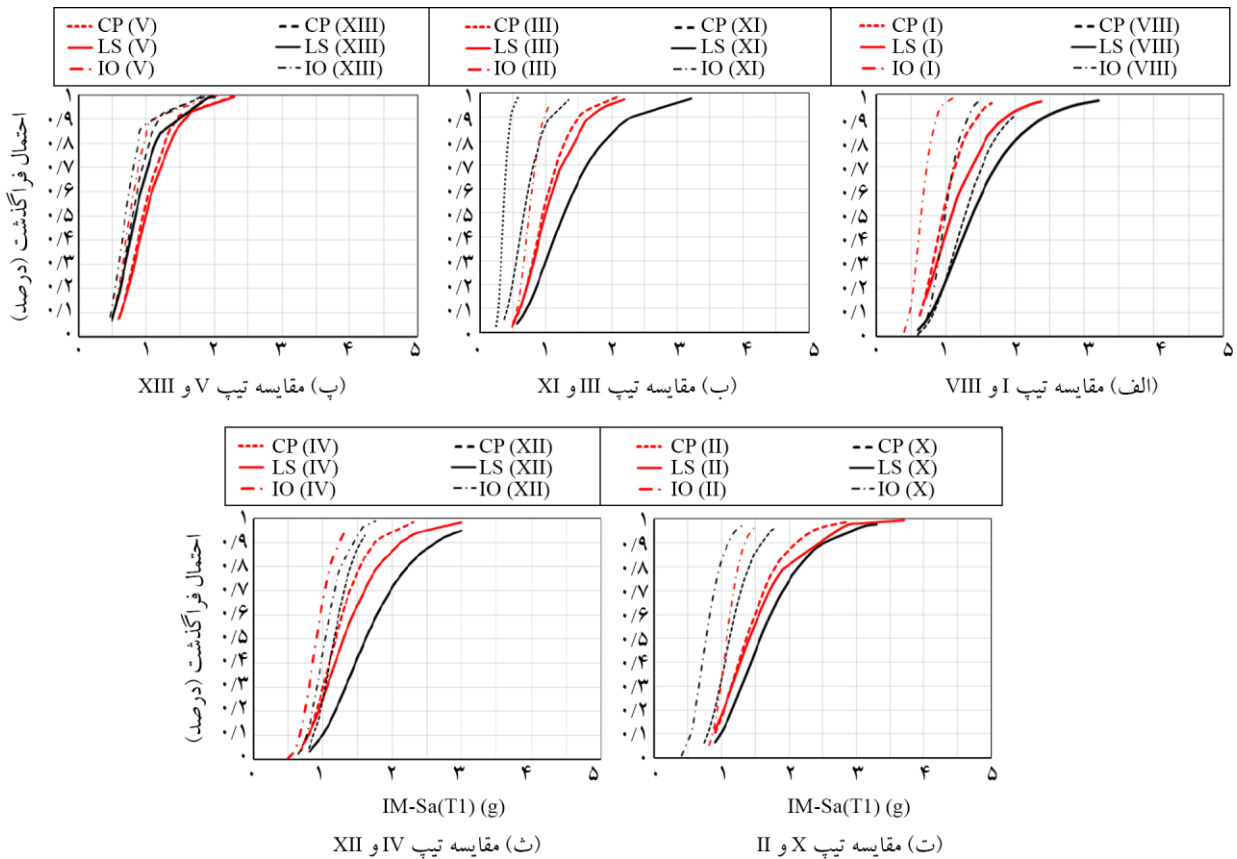
منحنی شکنندگی و β پراکندگی آن می‌باشد. احتمال اینکه

تابع توزیع تجمعی لوگ- نرمال برای هر حالت برآورد گردید. نتایج حاصل از این محاسبات برای قاب‌های مورد مطالعه به ازای سطوح عملکردی مختلف ترسیم شد. برای بررسی و درک بهتر رفتار لرزه‌ای سازه مدارس منتخب هر تیپ در سطوح عملکرد مختلف، منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای به‌دست آمده به روش تحلیلی را بر اساس میزان خطر نسبی زلزله، تعداد طبقات (ارتفاع) و ویرایش آیین‌نامه ۲۸۰۰ در سه سطح عملکرد IO، LS، CP به ترتیب در شکل‌های (۱۵) تا (۲۰) مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس مقایسه به‌عمل آمده بین نمودارهای واقع در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) می‌توان گفت: مطابق انتظار با افزایش خطر نسبی، منحنی شکنندگی به سمت سطوح بالاتر شدت تمایل پیدا می‌کند که این امر به معنای کاهش میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای با افزایش خطر نسبی زلزله می‌باشد. مقایسه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای به‌دست آمده با یکدیگر نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع، سازه زودتر وارد ناحیه غیرخطی شده و ظرفیت سازه کاهش می‌یابد. این امر به معنای افزایش میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای با افزایش تعداد طبقات می‌باشد.

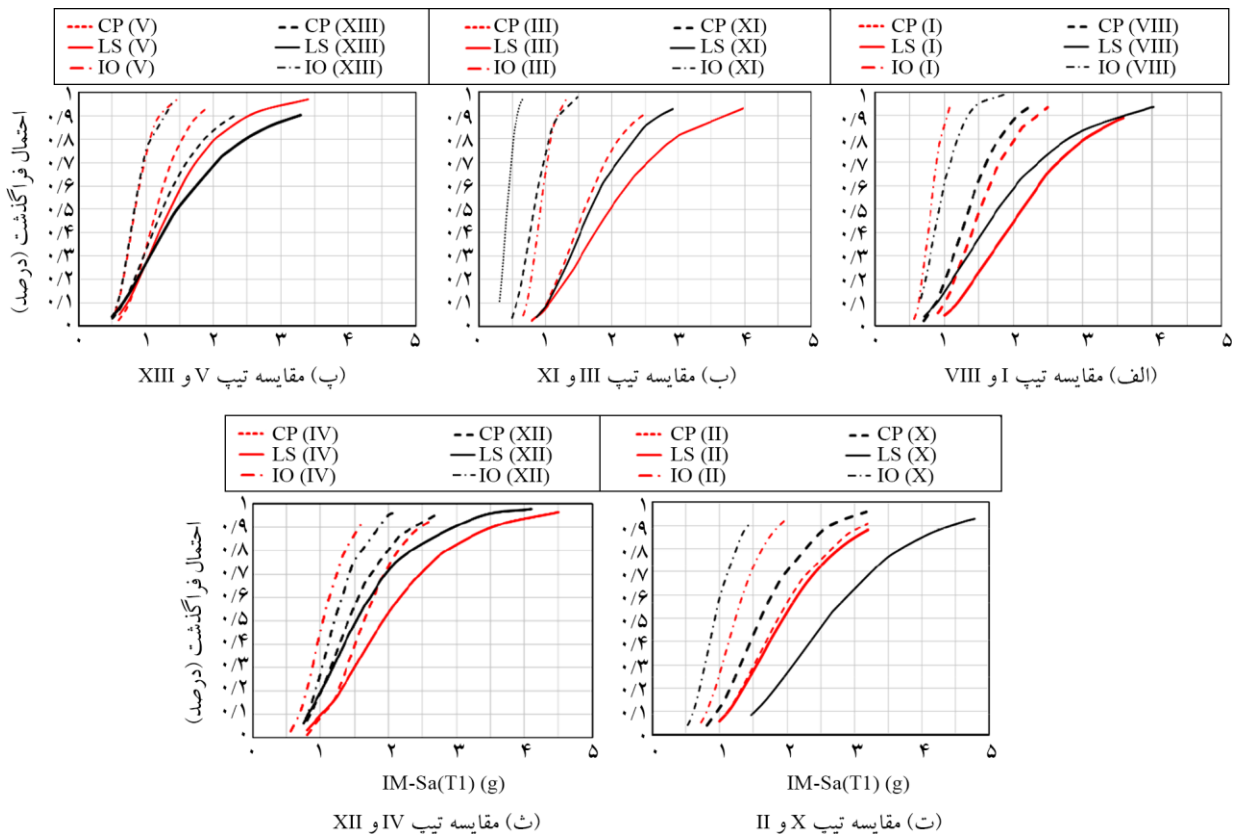
زمین‌لرزه‌ای با شدت x موجب رسیدن به حالت حدی LS در سازه شود را با عبارت $P(EDP > LS | IM = X)$ نشان می‌دهد. رابطه بالا نشان می‌دهد که مقادیر IM ای که در زمین‌لرزه‌های گوناگون موجب فروریزش یک سازه مفروض می‌گردند، به‌صورت لوگ-نرمال توزیع شده‌اند که محققان منطقی بودن آن را تأیید نموده‌اند (Beheshti et al., 2014). در این تحقیق مقدار بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقات سطح عملکرد (IO)، عملکرد ایمنی جانی (LS) و سطح عملکرد آستانه فروپاشی (CP) که برای حالت‌های حدی استفاده بی‌وقفه ایمنی جانی و آستانه فروریزش به ترتیب با ۱، ۲ و ۴ درصد برابر است. بر این اساس، در بررسی نتایج تحلیل‌های غیرخطی فزاینده و مقدار بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقات به‌عنوان پارامتر تقاضای مهندسی تعریف و فراگذشت آن از معیارهای یاد شده به‌عنوان شکست تعریف شده است. برای هر قاب از روی منحنی‌های IDA به‌دست آمده مقادیر شدت لرزه‌ای (IM) برای هر شتاب‌نگاشت همراه با حداکثر جابه‌جایی نسبی میان‌طبقه‌ای نظیر هر یک از سطوح عملکرد تعیین و سپس مقدار میانگین و انحراف معیار برای مقادیر شتاب طیفی محاسبه و



شکل (۲۰): مقایسه منحنی‌های شکنندگی مدارس منتخب هر تیپ بر اساس ارتفاع برای رکوردهای نزدیک گسل.



شکل (۲۱): مقایسه منحنی‌های شکستگی مدارس منتخب هر تیپ بر اساس ویرایش استاندارد ۲۸۰۰ برای رکوردهای دور از گسل.



شکل (۲۲): مقایسه منحنی‌های شکستگی مدارس منتخب هر تیپ بر اساس ویرایش استاندارد ۲۸۰۰ برای رکوردهای نزدیک گسل.

- مقایسه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای به دست آمده با یکدیگر نشان می‌دهد برای مقادیر پایین‌تر شتاب طیفی مود اول عموماً کمتر از $1/0g$ سرعت تغییرات در احتمال رسیدن یا فراگذشت از یک حالت خرابی بیشتر از مقادیر بالاتر (بیشتر از $2g$) آن می‌باشد. به عبارت دیگر شیب منحنی شکنندگی در مقادیر کمتر شتاب طیفی مود اول بیشتر است. در حالت کلی، هرچه منحنی‌ها به سمت چپ حرکت کنند، بدین معنی است که احتمال وقوع شکنندگی افزایش می‌یابد. مخرب‌ترین رکوردها که بیشترین پاسخ را در قاب‌های مورد مطالعه ایجاد کرده‌اند دارای محتوای فرکانسی پهنی در محدوده $0/1$ تا 1 هرتز هستند و احتمال فراگذشت قاب‌هایی که محدوده فرکانسی آنها در این دامنه قرار می‌گیرد از سطوح عملکرد مورد انتظار به مراتب بیشتر از قاب‌هایی است که محدوده فرکانسی آنها خارج از محتوای فرکانسی رکوردها می‌باشد.

۱۱- نتیجه‌گیری

- ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های مدارس طراحی شده با ویرایش‌های قدیمی آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، از جمله نیازهای ضروری برای تصمیم‌گیری در امر مقاوم‌سازی و حتی نوسازی مدارس به شمار می‌رود که در سال‌های اخیر مطالعات معدودی با این هدف انجام شده است. در این مقاله منحنی‌های شکنندگی مدارس بتن‌آرمه استان اصفهان بر اساس نقشه‌های سازه‌ای آنها تهیه گردید. بی‌شک یکی از مفیدترین و کاربردی‌ترین ابزار در ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های کنونی مدارس در برابر زلزله‌های محتمل آتی می‌باشد. از سوی دیگر مقایسه منحنی‌های شکنندگی به دست آمده با یکدیگر می‌تواند تا حد مطلوبی ساختمان‌های مختلف مدارس را از حیث آسیب‌پذیری تقسیم‌بندی و مدارس با سازه‌های آسیب‌پذیرتر را شناسایی و در برنامه‌ریزی مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی ساختمان مدارس آنها را در اولویت‌های بالاتری قرار داد. با توجه به منابع معمول عدم قطعیت در مهندسی زلزله از جمله عدم قطعیت‌های مرتبط با معیار شدت زلزله IM و تغییرپذیری رکورد به رکورد زمین‌لرزه (Kwon & Elnashai, 2004) می‌توان با مقایسه و ارزیابی نتایج
- به دست آمده به صورت کلی نتایج زیر را بیان نمود.
 - با مشاهده دسته منحنی‌های IDA می‌توان به دیدگاه کلی از رفتار سازه، از حد الاستیک کامل تا خرابی کامل دست یافت. در مقایسه رفتار سازه با ارتفاع‌های متفاوت، می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع، سازه زودتر وارد ناحیه غیرخطی می‌شود.
 - با توجه به منحنی‌های IDA مدل‌ها، با افزایش ارتفاع سازه، فروریزش و ناپایداری دینامیکی در شدت‌های کمتری از زلزله اتفاق می‌افتد.
 - آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی بتنی طراحی شده بر مبنای ویرایش‌های جدیدتر استاندارد ۲۸۰۰ کاهش یافته است، البته در مواردی به دلیل طراحی ساختمان با ضریب زلزله بالاتر ساختمان طراحی شده با ویرایش پایین میزان آسیب‌پذیری کمتری نسبت به ساختمان مشابه طراحی شده با ویرایش بالاتر دارد.
 - لازم به ذکر است به دلیل اینکه نتایج به دست آمده، حاصل از تحلیل دینامیکی فزاینده مدل سازه‌ای ساخته شده از روی نقشه‌های اجرایی ساختمان‌های مورد مطالعه هستند، عوامل متعددی همچون طراحی فراتر از حد و بیشتر در نظر گرفتن ابعاد اجزای سازه‌ای نظیر تیر و ستون در مقایسه به ضوابط طراحی و تفاوت ضرایب طراحی در ویرایش‌های مختلف باعث بروز رفتار لرزه‌ای متفاوتی نسبت به عملکرد مورد انتظار از آن شده است.
 - برای مقادیر پایین‌تر شتاب طیفی مود اول سرعت تغییرات در احتمال رسیدن یا فراگذشت از یک حالت خرابی بیشتر از مقادیر بالاتر آن می‌باشد. به عبارت دیگر شیب منحنی شکنندگی در مقادیر کمتر شتاب طیفی مود اول بیشتر است.
 - اکثراً سازه‌های طراحی شده با ویرایش سوم دیرتر وارد ناحیه غیرخطی شده و شتاب طیفی بزرگ‌تری را نسبت به سازه با مشخصات مشابه که با ویرایش دوم طراحی شده تحمل می‌نماید. با این حال بررسی نتایج نشان می‌دهد برخی از قاب‌های طراحی شده با ویرایش دوم نسبت به قاب‌های طراحی شده با ویرایش سوم در شتاب‌های بزرگ‌تری دچار

ساختمان یک طبقه طراحی شده با ویرایش سوم با خطر لرزه‌ای زیاد تقریباً برابر با صفر است که بیانگر آسیب‌پذیری کم این ساختمان در برابر رکوردهای وارده است.

References

مراجع

- Akkar, S., Sucuoğlu, H., & Yakut, A. (2005). Displacement-based fragility functions for low- and mid-rise ordinary concrete buildings. *Earthquake Spectra*, 21(4), 901-927.
- Baker, J. W., & Allin Cornell, C. (2005). A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(10), 1193-1217.
- Baniassadi, A. (2010). *Investigation on the Performance of Damage Index in Seismic Response of RC Frames Using Endurance-Time Method* [Master's thesis, Sharif University of Technology] (in Persian).
- Beheshti, A., Masoumi Verki, A., & Rastegaran, M. (2014). Systematical approach to evaluate collapse probability of steel MRF buildings based on engineering demand and intensity measure. *International Journal of Structural Analysis & Design*, 1(1), 14-18.
- Bertero, V. V. (1977). Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments. *Structural Engineering and Structural Mechanics*, 53(1), 29-79.
- Bryant, G. (2005). *Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones* [PhD thesis, Georgia Institute of Technology].
- Esfahan Organization for Development, Renovation and Equipping Schools. (2023). *Technical Documents: Spatial Identity of Schools* (in Persian).
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings (FEMA 350)*.
- Federal Emergency Management Agency. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors (FEMA P-695)*.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings (FEMA 351)*. Washington, DC: Author.
- Heydari Bani, A., & Motovali Emami, S. M. (2024). Development of fragility curves of Isfahan reinforced

فروریزش شده‌اند که مهم‌ترین دلیل آن بزرگ‌تر بودن ضریب زلزله در نظر گرفته شده برای این قاب‌ها نسبت به قاب با مشخصات مشابه که بر اساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ است. به عبارتی برای نیروی برش پایه بیشتری طراحی شده‌اند.

- به‌طور کلی با افزایش تعداد طبقات، منحنی شکنندگی به سمت سطوح پایین‌تر شدت تمایل پیدا می‌کند. این امر به معنای افزایش میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای با افزایش تعداد طبقات می‌باشد. بر اساس داده‌های آماری، آسیب‌پذیری ساختمان در زلزله با افزایش تعداد طبقات، افزایش می‌یابد. در چندین زلزله مانند زلزله بخارست در سال ۱۹۹۷ و زلزله مکزیکوسیتی میزان آسیب‌ها در ساختمان‌هایی با ارتفاع زیاد (بیش از سه طبقه) در مقایسه با ساختمان‌های کم‌ارتفاع بیشتر است. توزیع درخت‌بیشینه‌ی بین طبقه‌ای در طول ارتفاع سازه یکنواخت نیست از این‌رو با افزایش ارتفاع سازه، توزیع گسترده و یکنواخت‌تری به سمت توزیع موضعی و متمرکز میل کرده و از شکل‌پذیری سیستم می‌کاهد. در مقایسه رفتار سازه با ارتفاع‌های متفاوت، می‌توان گفت به‌طور کلی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی مدارس بتنی ۴ طبقه به دلیل ارتفاع زیاد (غالباً بیش از ۱۴ متر) بیشتر از سایر مدارس می‌باشد.
- مدارس چهار طبقه واقع در مناطق با خطر نسبی متوسط که بر اساس ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ طراحی و اجرا شده‌اند (تیپ ۱۳) نسبت به دیگر مدارس مورد مطالعه در این تحقیق آسیب‌پذیر است و از اولویت بالاتری جهت برنامه‌ریزی برای مقاوم‌سازی برخوردار است.
- با توجه به منحنی شکنندگی به‌دست‌آمده برای مدارس یک طبقه می‌توان گفت به ترتیب مدارس یک طبقه طراحی شده با ویرایش سوم خطر نسبی زیاد و متوسط از اولویت‌های پایین‌تری برخوردارند.
- احتمال فراگذشت ساختمان‌های با ارتفاع بیش از ۱۲ متر از سطح عملکرد آستانه فروریزش بیش از ۵۰ درصد می‌باشد.
- احتمال رسیدن یا فراگذشت از حالت حدی فروریزش برای

- Rezaei, H., Zarfam, P., Golafshani, E. M., & Amiri, G. G. (2022). Seismic fragility analysis of RC box-girder bridges based on symbolic regression method. *Structures*, 38, 306-322.
- Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC). (2014). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800)* (4th ed.). Tehran, Iran: BHRC.
- Rota, M., Penna, A., & Magenes, G. (2010). A methodology for deriving analytical fragility curves for masonry buildings based on stochastic nonlinear analyses. *Engineering Structures*, 32(5), 1312-1323.
- Ruiz-García, J., & Negrete, M. (2009). A simplified drift-based assessment procedure for regular confined masonry buildings in seismic regions. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(4), 520-539.
- Shome, N. (1999). *Probabilistic Seismic Demand Analysis of Nonlinear Structures* [PhD dissertation, Stanford University].
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2004). Applied incremental dynamic analysis. *Earthquake Spectra*, 20(2), 523-553.
- Venture, S. J., & Committee, G. D. (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings (FEMA 350)*. Federal Emergency Management Agency
- concrete school buildings. *Ninth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE9)*, Tehran, Iran (in Persian).
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. (n.d.). PEER ground motion database. Error! Hyperlink reference not valid.
- Ibarra, L. F. (2004). *Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations* [PhD dissertation, Stanford University].
- Karthik, M. M., & Mander, J. B. (2011). Stress-block parameters for unconfined and confined concrete based on a unified stress-strain model. *Journal of Structural Engineering*, 137(2), 270-273.
- Kent, D. C., & Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division*, 97(7), 1969-1990.
- Kwon, O.-S., & Elnashai, A. (2004). Sensitivity of analytical vulnerability functions to input and response parameter randomness. *Proceedings of the Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M., & Fenves, G. (2006). Open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES): User command-language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*.
- Nasimi, M. (2021). Lack of education space. Organization for Development, Renovation and Equipping Schools of Isfahan (in Persian).
- Pinho, R., & Elnashai, A. S. (2000). Dynamic collapse testing of a full-scale four storey RC frame. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 37(4), 143-164.
- Pinto, A. V., Verzeletti, G., Molina, J., Varum, H., Pinho, R. J. S. M., & Coelho, E. (2002). *Pseudo-Dynamic Tests on Non-Seismic Resisting RC Frames (Bare and Selective Retrofit Frames)*. European Commission, Joint Research Centre.
- Pitilakis, K., Argyroudis, S., Kakderi, K., & Argyroudis, A. (2013). *Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain (SYNER-G Synthetic Document)*. JRC Scientific and Policy Reports.

واژه‌نامه

- ۱- تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایش یافته
Incremental Dynamic Analysis (IDA)
- ۲- شاخص شدت
Intensity Measure (IM)
- ۳- شاخص خسارت
Damage Measure (DM)
- ۴- آستانه فروریزش
Collapse Prevention (CP)
- ۵- ایمنی جانی
Life Safety (LS)
- ۶- قابلیت استفاده بی‌وقفه
Immediate Occupancy (IO)
- ۷- ستون متکی
Leaning Column
- ۸- بتن محصور شده
Confined Concrete
- ۹- بتن هسته
Core Concrete
- ۱۰- پارامترهای تقاضای مهندسی
Engineering Demand Parameter (EDP)

Development of Seismic Fragility Curves for Isfahan's School Reinforced Concrete Buildings

Ali Heydari Beni¹ and Sayed Mohammad Motovali Emami^{2, 3*}

1. M.Sc. Graduate, Faculty of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
2. Assisat Professor, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran,
*Corresponding Author, email: sm.emami@iau.ac.ir
3. Assistant Professor, Sustainable Development in Civil Engineering Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Over the past few decades, the evaluation of the seismic vulnerability of existing buildings has received increasing attention due to the considerable damage observed in newly constructed structures, even those designed in accordance with contemporary seismic design codes. These observations have raised serious questions regarding the adequacy and reliability of past design practices and the extent to which buildings constructed under earlier editions of seismic design standards can meet current performance expectations. In Iran, the Iranian Seismic Code, Standard No. 2800, has undergone several revisions to incorporate advances in research, seismic hazard assessment, and design philosophy. However, a large number of existing buildings across the country, including vital facilities such as schools, were designed and constructed based on the earlier editions of this standard. Understanding the seismic performance of such buildings is therefore essential for risk mitigation, decision-making, and prioritizing retrofit strategies. The main objective of this research is to develop a comprehensive set of seismic fragility curves for reinforced concrete (RC) school buildings located in Isfahan Province. The selected buildings were designed according to different editions of Standard No. 2800 and represent various combinations of seismic hazard levels, structural heights, and local soil conditions. The building typology studied consists of RC moment-resisting frames, which are common in school construction throughout Iran. For a systematic and consistent evaluation, the selected models were classified into 14 categories based on four primary parameters: building height (low-rise, mid-rise, or high-rise), edition of the design code, regional seismic hazard intensity, and soil type according to the Iranian geotechnical classification system. To assess the seismic vulnerability of these representative structures, nonlinear Incremental Dynamic Analyses (IDA) were performed using the OpenSees software platform. Each two-dimensional analytical frame model was subjected to a suite of 22 far-field and 12 near-fault ground motion records, carefully selected and scaled according to the seismic hazard level. The analyses were carried out until global structural collapse or significant loss of lateral load-carrying capacity was observed. The spectral acceleration at the fundamental period of vibration, assuming 5% damping, was adopted as the intensity measure (IM), while the maximum inter-story drift ratio was used as the engineering demand parameter (EDP) and damage index. Utilizing the statistical results of the IDA curves, seismic fragility functions were derived for different performance limit states, ranging from slight to complete structural damage. The developed fragility curves clearly demonstrate that the seismic vulnerability of RC moment-resisting school buildings increases with building height. In other words, taller buildings exhibit a higher probability of reaching or exceeding a given damage state under the same seismic intensity. Furthermore, the comparison between buildings located in moderate and high seismic hazard zones revealed an unexpected yet consistent trend: the probability of damage exceedance is higher for buildings situated in moderate hazard regions. This may be attributed to the fact that structures in higher hazard zones are typically designed with greater strength and ductility requirements, leading to improved seismic performance. The results of this study provide valuable insights for engineers, researchers, and policymakers seeking to evaluate and improve the seismic resilience of existing school buildings designed under different generations of the Iranian Seismic Code. The derived fragility curves can be effectively used in regional loss estimation, probabilistic risk assessment, and the prioritization of retrofit interventions, contributing to safer educational environments and more resilient communities in earthquake-prone regions.

Keywords: Reinforced Concrete Moment Frame Buildings, Incremental Nonlinear Dynamic Analysis (IDA), OpenSees, Seismic Fragility Curve.