

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ساختمان مدارس، به دلیل ساختار جمعیتی آنها، جزو ساختمان‌های با اهمیت هستند که طراحی ایمن، اجرا و کنترل رفتار و عملکرد آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. تجربه زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد بروز خرابی در مدارس می‌تواند منجر به تلفات زیاد و فاجعه انسانی گردد از این رو آیین‌نامه‌های طراحی نیز ضوابط و مقررات سخت‌گیرانه‌تری برای طراحی ساختمان‌های آموزشی ارائه می‌نمایند. کنترل عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های آموزشی موجود نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و روش‌های مختلفی شامل تحلیل‌های خطی و غیرخطی توسط آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مختلف توصیه شده است. از طرفی در بررسی عملکرد سازه‌ها عدم قطعیت‌های فراوانی وجود دارند که مانع دستیابی قطعی به پاسخ عملکرد سازه می‌شوند. برخی از این عدم قطعیت‌ها ذاتی هستند مانند عدم امکان پیش‌بینی شدت زلزله‌های آینده و برخی نیز ناشی از خطای تحلیل و محاسبات است؛ بنابراین بیان احتمالاتی عملکرد سازه، راه منطقی بررسی عملکرد سازه است. روش‌های متعددی برای بررسی قابلیت اعتماد سازه وجود دارد که از نظر فرضیات، روش و دقت با هم متفاوت هستند، از این رو می‌بایست اثرات عدم قطعیت در هر روش به نحو مناسبی در نظر گرفته شود. در این مطالعه دو تپ پر تکرار از مدارس سازه بتنی کرمانشاه به صورت غیرخطی مدل‌سازی و با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت اثر ۱۲ رکورد محتمل زلزله حوزه دور و نزدیک، متناسب با نوع زمین و فاصله از گسل، تحلیل و ارزیابی می‌شوند. در ادامه به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد لرزه‌ای این مدارس، به ازای سطوح مشخصی از شدت، احتمال رسیدن پاسخ سازه به مقادیر حدی متناظر با سطوح مختلف خرابی تعیین می‌گردد. حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه به عنوان پاسخ و سطوح عملکردی تعریف شده در دستورالعمل FEMA356 به عنوان معیار خرابی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش طبقات سازه، احتمال رسیدن تغییر مکان جانبی نسبی سازه مدرسه به سطوح مختلف عملکردی همواره بیشتر بوده و با افزایش شدت زلزله این احتمال افزایش می‌یابد. همچنین سازه مدارس مورد مطالعه، علیرغم وجود نامنظمی در پلان، با منظور نمودن اثرات شدت زلزله، زمین ساختگاه و فاصله ساختگاه از گسل، دارای عملکرد مناسبی هستند.

واژگان کلیدی: قابلیت اعتماد لرزه‌ای، مدرسه، قاب بتنی، تحلیل دینامیکی، شدت لرزه‌ای.

ارزیابی قابلیت اعتماد لرزه‌ای مدارس تپ بتنی کرمانشاه بر مبنای پارامتر شدت لرزه‌ای

مهدی کههریزی

محقق پسا دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی،
کرمانشاه، ایران

امیر هوشنگ اخویسی (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه،
ایران، Ahakhaveissy@razi.ac.ir

۱- مقدمه

ایران رویدادهایی مانند زلزله بم، منجیل، بوئین زهرا و اخیراً زلزله کرمانشاه نشان می‌دهد که ساختمان‌های موجود بتن مسلح طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های قدیمی در برابر اثرات زلزله

زلزله یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی است که آسیب‌های اقتصادی و تلفات انسانی زیادی به دلیل خسارت و گسیختگی سازه‌ها ایجاد می‌کند. با نگاهی گذرا به تاریخ معاصر

زلزله کرمانشاه نشان داده شده است. در سال‌های اخیر، مدارس اسکلت بتنی با توجه به ملاحظات اقتصادی، در دسترس بودن مصالح و سرعت اجرای مناسب، با فراوانی قابل توجهی طراحی و اجرا شده‌اند. در بسیاری از ساختمان‌های بتن مسلح، به دلیل بحث‌های مرتبط با مسائل و مشکلات طراحی و اجرا، کیفیت بتن، درزهای اجرایی و اجرا نامناسب میانقاب‌ها، آسیب‌پذیری سازه در زمان وقوع زلزله محتمل است؛ بنابراین ارزیابی خسارت‌پذیری لرزه‌ای این‌گونه ساختمان‌ها، به دلیل رخدادهای پیاپی زلزله در دهه‌های اخیر، از اهمیت خاصی برخوردار است.

روش‌های مبتنی بر عملکرد از دهه ۱۹۸۰ میلادی به مهندسی زلزله راه یافت و در سال‌های اخیر نیز مورد توجه فراوان قرار گرفته است. نسل جدید آیین‌نامه‌ها، فلسفه جدیدی به نام طراحی بر اساس عملکرد^۱ را مطرح می‌کنند که در آن ساختمان متناسب با عملکرد مورد انتظار طراحی می‌شود. از جمله این موارد می‌توان به دستورالعمل‌های ATC40 (ATC, 1995)، FEMA356 (FEMA, 2000) و آیین‌نامه ASCE41 (ASCE, 2013) اشاره نمود. در ایران نیز دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود

بسیار آسیب‌پذیر هستند. پیامدهای ناگوار اقتصادی و اجتماعی ناشی از رویداد زمین‌لرزه‌ها که بیشتر به سبب طراحی و اجرای نامناسب ساختمان‌ها پدید آمده است، از یک طرف و گسترش روزافزون ساخت‌وسازها از طرف دیگر اهمیت طراحی‌های مناسب و بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه را مشخص ساخته است (Kouhestanian et al., 2021).

این موضوع در خصوص مدارس و ساختمان‌های آموزشی به دلیل تراکم زیاد جمعیت آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تجربه زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که بروز خرابی در مدارس می‌تواند منجر به تلفات و فاجعه انسانی گردد.

به همین علت سازه این ساختمان‌ها، اعم از سیستم دیوارهای باربر و اسکلت‌های فولادی و بتنی، باید به نحوی طراحی شوند که در مقابل زلزله‌های شدید، حداقل دارای سطح عملکرد ایمنی جانی باشند. در مشاهدات حاصل از بررسی فضاهای آموزشی پس از زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ از گله در کرمانشاه، مواردی از آسیب‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای در مدارس با سیستم‌های سازه‌ای مختلف گزارش شده است (Kahrizi et al., 2020). در شکل (۱) نمونه‌هایی از آسیب‌های وارد به ساختمان مدارس در



شکل (۱): نمونه‌هایی از آسیب‌های وارد به مدارس به زلزله آبان ماه ۱۳۹۶ از گله کرمانشاه.

بتنی قالب تونلی با احتساب تأثیر پدیده‌ی اندرکنش خاک و سازه را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه ضمن مدل‌سازی و تحلیل این نوع ساختمان‌ها، پاسخ‌های سازه با رویکردی احتمالاتی بررسی و سطح عملکرد ساختمان‌ها و ضرایب اطمینان در برابر لغزش و واژگونی حین زلزله در دو حالت بستر صلب و انعطاف‌پذیر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

یزدانی و همکاران (Yazdani et al., 2018) بررسی پارامتریک عدم قطعیت در شاخص اعتماد سازه‌های قاب خمشی بتنی با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی را مورد توجه قرار دادند. در این پژوهش به کمک تئوری قابلیت اطمینان، عدم قطعیت‌های ناشی از روش‌های انتخاب رکورد، در نظر گرفتن اثرات فروریزش در توزیع‌های آماری، روش‌های تخمین نیاز و ظرفیت لرزه‌ای و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مبانی، بر ایمنی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح در سطوح عملکردی بهره‌برداری، بهره‌برداری بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش بررسی شده است.

اثر توزیع احتمالاتی ترک‌خوردگی در حالت حدی بر قابلیت اعتماد لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی، توسط صافی و همکاران (Safi et al., 2020) بررسی شده است. در این مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۷، قابلیت اطمینان ضرایب ترک‌خوردگی تیر و ستون‌های بتنی در آیین‌نامه ACI، تحت توزیع تصادفی بار زنده در طبقات مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن حاکی از بسیار کم بودن شاخص قابلیت اطمینان این ضرایب می‌باشد.

کوهستانیان و همکاران (Kouhestanian et al., 2021) ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح دارای طبقه نرم و خیلی نرم تحت اثر توالی زلزله و پس‌لرزه را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش به منظور مشاهده اثرات نامنظمی و پس‌لرزه در سازه‌های بتن مسلح، منحنی‌های شکنندگی برای مدل‌های سه، پنج و هشت طبقه با سیستم لرزه‌ای قاب خمشی بتن مسلح دارای طبقه نرم و خیلی نرم، تحت اثر زلزله اصلی و توالی زلزله و پس‌لرزه بررسی شده است.

(نشریه ۳۶۰) Management and Planning Organization, (2014) به این موضوع اختصاص دارد. به‌طور کلی موضوع و دیدگاه اصلی این دست‌ورعمل‌ها، طراحی و کنترل سازه بر اساس عملکرد می‌باشد.

از اواخر قرن بیستم میلادی تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص تحلیل غیرخطی سازه‌ها انجام شده است و محققین متعددی به بررسی تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده^۲ در تخمین عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها تحت اثر بارهای لرزه‌ای^۳ پرداخته‌اند (Bazzurro et al., 1994; Shome, 1999; Cornell et al., 2002). در این مطالعات به اصول و مفاهیم پایه روش تحلیل دینامیکی افزایشی، پارامترهای مناسب برای انعکاس شدت لرزه‌ای^۴ و تقاضا^۵، تعیین سطوح عملکردی و خلاصه کردن منحنی‌های IDA و... پرداخته شده است.

در بررسی عملکرد سازه‌ها عدم قطعیت‌های فراوانی وجود دارند که مانع دستیابی قطعی به پاسخ عملکرد سازه می‌شوند بنابراین بیان احتمالاتی عملکرد سازه می‌تواند یک راه منطقی بررسی عملکرد سازه باشد. تحقیقات وسیعی در خصوص بیان احتمالاتی رفتار سازه و شاخص قابلیت اعتماد سازه انجام شده است. باسلر (Basler, 1960) و کرنل (Cornell, 1969) اولین تعریف شاخص قابلیت اطمینان را برای توابع حد نهایی نرمال ارائه نمودند و پس از آن جهت اندازه‌گیری سطح ایمنی، توابع حد نهایی غیر نرمال نیز گسترش یافت (Ghasemi et al., 2017). در سال‌های اخیر، مطالعه قابلیت اعتماد سازه‌ها با عدم قطعیت‌های ناشی از تصادفی بودن مواد، بارگذاری، هندسه و... انجام شده است. در این مطالعات عدم قطعیت‌های ناشی از داده‌های مبهم یا ناکافی و امکان تعیین ویژگی‌های آماری کمیت‌های دارای عدم قطعیت مورد توجه قرار گرفته است (Li et al., 2017; Skrzypczak et al., 2017; Zhang, 2018; Zheng et al., 2014).

مطالعات متعددی نیز در خصوص قابلیت اعتماد لرزه‌ای^۶ سازه‌های بتن مسلح انجام شده است. محسنیان و همکاران (Mohsenian et al., 2016) قابلیت اعتماد لرزه‌ای ساختمان‌های

سازه‌های بتنی انجام شده است اما مطالعات اندکی در خصوص بررسی رفتار نمونه‌های واقعی این گونه ساختمان‌ها وجود دارد. در این مطالعه دو تیپ پر تکرار از مدارس سازه بتنی کرمانشاه به صورت غیرخطی مدل سازی و با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده IDA تحت اثر ۱۲ رکورد محتمل زلزله، متناسب با نوع زمین و فاصله از گسل، تحلیل و ارزیابی می‌شوند. به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد لرزه‌ای این مدارس، به ازای سطوح مشخصی از شدت، احتمال رسیدن پاسخ سازه به مقادیر حدی متناظر با سطوح مختلف خرابی تعیین می‌گردد. حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی^۸ سازه به عنوان پاسخ و سطوح عملکردی تعریف شده در دستورالعمل FEMA356 به عنوان معیار خرابی در نظر گرفته می‌شوند.

یک مورد از نوآوری این مطالعه، مقایسه رفتار غیرخطی سازه‌های با اهمیت زیاد می‌باشد که به روش خطی و بر اساس آیین‌نامه‌های جاری کشور طراحی شده‌اند. همچنین بیان احتمالاتی آسیب‌پذیری سازه برای زلزله‌های محتمل، با منظور نمودن عدم قطعیت‌های موجود، می‌تواند تصویری گویا و روشن از عملکرد سازه‌های با اهمیت در هر منطقه ارائه نماید. این اطلاعات می‌تواند در مدیریت بحران، تصمیم‌گیری‌های مدیریت شهری و برنامه‌ریزی‌های آتی منطقه مورد استفاده فراوان واقع گردد.

۲- معرفی مدارس مورد بررسی

در سال‌های اخیر تیپ‌های مختلفی از مدارس با سازه بتن مسلح در استان کرمانشاه اجرا گردیده است. در این میان دو تیپ از این نوع مدارس دارای تکرار بیشتری از نظر اجرا در سطح استان هستند به همین دلیل در این مطالعه این دو تیپ جهت بررسی‌های دقیق آسیب‌پذیری لرزه‌ای انتخاب شدند. مدارس انتخابی از نظر شکل پلان کاملاً یکسان هستند و اختلاف آنها در تعداد طبقات است به نحوی که یکی به صورت ۴ طبقه و دیگری به صورت ۳ طبقه طراحی و اجرا شده‌اند. پلان معماری این مدارس L شکل بوده و دارای نامنظمی‌هایی در پلان است که تأثیر این نامنظمی در مدل‌سازی تحلیل دینامیکی غیرخطی لحاظ

بررسی آسیب‌پذیری ساختمان‌های آموزشی و مدارس نیز مورد توجه محققین متعددی بوده است. قدرتی امیری و همکاران (Amiri et al., 2016) در یک مطالعه، منحنی‌های شکنندگی تحلیلی برای ساختمان‌های بنایی متداول مدارس ایران ارائه نمودند. در این مطالعه با استفاده از یک روش تحلیلی، منحنی‌های شکنندگی برای ساختمان‌های بنایی در سه حالت یک، دو و سه طبقه و روی انواع خاک‌های ذکر شده در استاندارد ۲۸۰۰ به صورت مجزا توسعه داده شدند. در این مطالعه از طیف استاندارد ۲۸۰۰ به عنوان طیف تقاضا استفاده شده و منحنی‌های ظرفیت سازه با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی به دست آمده‌اند. همچنین با فرض توزیع لوگ نرمال برای تابع چگالی احتمال، منحنی‌های شکنندگی استخراج گردیده است.

انعطاف‌پذیری لرزه‌ای مدارس تیپ بتنی موجود و مقاوم‌سازی شده در ایران، بر اساس منحنی‌های شکنندگی، توسط صمدیان و همکاران (Samadian et al., 2019) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، به صورت موردی یک دبیرستان واقع در تهران که بعد از یک دهه با استفاده از دیوارهای برشی بتن مسلح مقاوم‌سازی شده، با استفاده از منحنی‌های آسیب‌پذیری و شکنندگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه حاکی از تأثیر قابل توجه مقاوم‌سازی در بهبود انعطاف‌پذیری لرزه‌ای و کاهش آسیب‌پذیری سازه می‌باشد.

مطلق و همکاران (Motlagh et al., 2020) اثرات خوردگی کربنات بر شاخص انعطاف‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های مدارس معمول بتن مسلح را مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور، به صورت موردی یک دبیرستان واقع در تهران انتخاب و شاخص مقاومت انعطاف لرزه‌ای آن با خوردگی کربناتی محاسبه و بررسی شده است.

روش‌های متعددی برای بررسی قابلیت اعتماد سازه وجود دارد که از نظر فرضیات، روش و دقت با هم متفاوت هستند. از این رو می‌بایست اثرات عدم قطعیت در هر روش به نحو مناسبی در نظر گرفته شود. مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد اگرچه مطالعات زیادی در خصوص ارزیابی احتمالاتی رفتار لرزه‌ای

گردیده است. بر این اساس رده بتن مصرفی در تمامی المان‌ها و اجزای سازه C30 و رده فولاد مصرفی S400 می‌باشد. سایر مشخصات مکانیکی مصالح مطابق رده مذکور محاسبه و در مدل‌سازی لحاظ گردیده است. در جدول (۲) مشخصات مصالح مصرفی مدارس مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین در شکل (۲)، پلان، مراحل اجرا و نمای مدارس مورد بررسی نشان داده شده است.

۳- مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی غیرخطی

مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی سازه‌های مدارس مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ETABS (CSI, 2016) انجام گردید. مدل‌سازی سازه با فرض تکیه‌گاه صلب و بارگذاری ثقلی بر اساس ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (BHRC, 2014) انجام شده است. به منظور بررسی ارتباط میزان شدت لرزه‌ای و پاسخ سازه‌های مورد بررسی، از روش تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی استفاده می‌شود.

گردیده است. سازه این مدارس از نوع بتن مسلح با سقف تیرچه و بلوک در نظر گرفته شده و سیستم باربر جانبی آنها در هر دو جهت، ترکیب قاب خمشی بتن مسلح متوسط و دیوار برشی بتن مسلح متوسط می‌باشد. دیوارهای مورد استفاده در این دو تپ از مدارس، از نوع پانل سبک سه بعدی^۱ بوده که با استفاده از المان‌های فولادی قائم متصل به کف و سقف، از سازه اصلی جداسازی شده‌اند. در جدول (۱) مشخصات مدارس مورد مطالعه به همراه ابعاد المان‌های مختلف سازه‌ای اعم از تیر، ستون و دیوار برشی نشان داده شده است.

از آنجا که این مطالعه بر قابلیت اعتماد لرزه‌ای مدارس بر مبنای پارامتر شدت لرزه‌ای متمرکز می‌باشد، سازه این مدارس با فرض انطباق مشخصات مصالح اجرا شده با مشخصات موجود در نقشه و فقط با عدم قطعیت‌های موجود در مشخصات زلزله محتمل آینده ارزیابی می‌گردد. بر این اساس کلیه اطلاعات مربوط به مشخصات مصالح و نتایج آزمایش‌های مصالح انجام شده در حین ساخت این مدارس اخذ و در مدل‌سازی لحاظ

جدول (۱): مشخصات مدارس مورد مطالعه.

ردیف	نام نمونه مدرسه مورد بررسی	مشخصات مدرسه	طبقه	مقطع ستون (سانتی‌متر)	آرماتور ستون	آرماتور ستون طرفین دیوار برشی	مقطع تیر (سانتی‌متر)	آرماتورهای بالا و پایین تیر	ضخامت دیوار برشی (سانتی‌متر)	
۱	RCS 1	با سازه بتن مسلح	همکف	۴۵×۴۵	۱۲φ۱۸	۱۲φ۲۲	۴۵×۴۵	۳φ۱۸	۲۵	
			مدرسه ۴ طبقه	اول	۴۵×۴۵	۱۲φ۱۸	۱۲φ۲۲	۴۵×۴۵	۳φ۱۸	۲۵
			دوم	۴۵×۴۵	۱۲φ۱۶	۱۲φ۲۰	۴۵×۴۵	۳φ۱۸	۲۵	
۲	RCS 2	با سازه بتن مسلح	همکف	۴۵×۴۵	۱۲φ۱۸	۱۲φ۲۲	۴۵×۴۵	۳φ۱۸	۲۵	
			مدرسه ۳ طبقه	اول	۴۵×۴۵	۱۲φ۱۸	۱۲φ۲۲	۴۵×۴۵	۳φ۱۸	۲۵
			دوم	۴۵×۴۵	۱۲φ۱۶	۱۲φ۲۰	۴۵×۴۵	۳φ۱۸	۲۵	

جدول (۲): مشخصات مصالح مصرفی در مدرسه مورد مطالعه.

ردیف	جزء سازه	رده مصالح		مدول الاستیسیته (مکاپاسکال)		ضریب پواسون
		بتن	فولاد	بتن	فولاد	
۱	ستون	C30	S400	۲۵۷۴۳	۲۰۰۰۰۰	۰/۳
	تیر					
	دیوار برشی					
	سقف					



شکل (۲): پلان، مراحل اجرا و نمای مدارس مورد مطالعه.

پلاستیک صورت می‌گیرد. مفاصل پلاستیک عمدتاً به دو روش مفاصل پلاستیک متمرکز و مقاطع فایبر^۹ قابل تعریف هستند. در این مطالعه مفاصل پلاستیک المان‌های سازه‌ای بتن مسلح مدارس مورد بررسی، بر اساس ضوابط نشریه ۳۶۰ ایران که مشابه دستورالعمل FEMA356 است در نظر گرفته شده است.

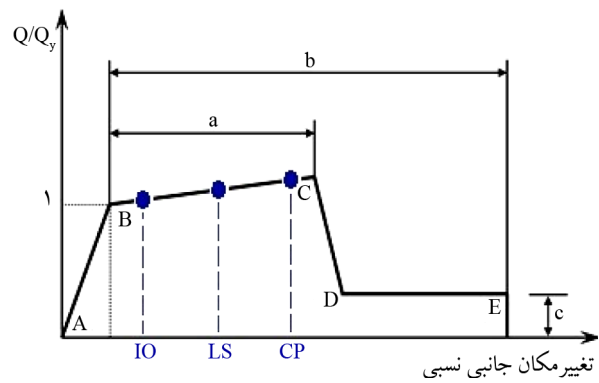
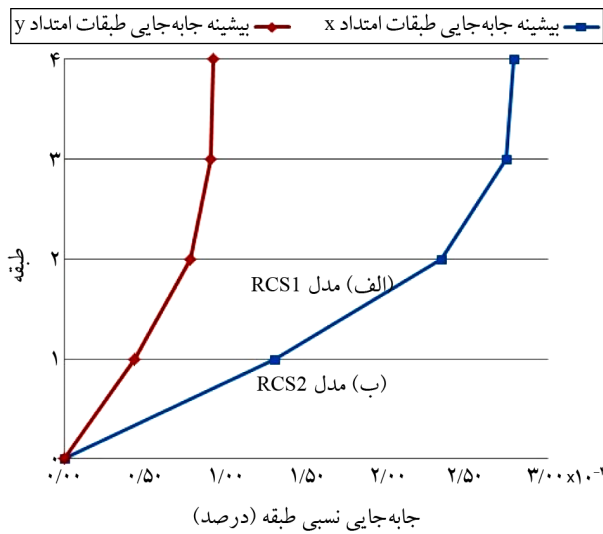
بر این اساس در تیرهای بتن مسلح، مفصل خمشی کنترل شونده توسط تغییر شکل منظور گردیده است. برای ستون‌های بتنی مفاصل پلاستیک حالت اندرکنش خمش و بار محوری، کنترل شونده توسط تغییر شکل در نظر گرفته شده است. برای دیوارهای برشی بتن مسلح نیز مفاصل پلاستیک از نوع فایبر منظور گردیده و به قسمت میانی دیوار اختصاص یافته است. در این مطالعه سطوح مختلف عملکرد سازه‌ای قابلیت استفاده بی‌وقفه^{۱۰}، ایمنی جانی^{۱۱}، آستانه فروریزش^{۱۲} و سطح عملکرد استاندارد ۲۸۰۰ کنترل می‌گردد (شکل ۳).

بر اساس دستورالعمل FEMA356، برای هر یک از سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش، یک مقدار حداکثر برای تغییر مکان نسبی طبقات مشخص گردیده است.

در این مطالعه، از شتاب طیفی متناظر با مود اول و میرایی ۵ درصد ($Sa(T1,5\%)$) به عنوان شاخص شدت و نسبت بی‌بعد پیشینه تغییر مکان نسبی طبقات ($\max(\theta)$) به عنوان شاخص خسارت در طول زمان تحلیل تاریخچه زمانی استفاده می‌گردد. شتاب‌نگاشت‌های انتخابی که به سطوح مختلف شدت لرزه‌ای مقیاس شده‌اند، مرحله به مرحله به سازه اعمال می‌شوند و در هر مرحله پاسخ حداکثر سازه برای هر سطح شدت به دست می‌آید. در نهایت با بیان عملکرد سازه به فرم احتمالاتی، به ازای یک سطح مشخص از شدت، احتمال رسیدن پاسخ سازه به مقادیر حدی متناظر با سطوح مختلف خرابی تعیین می‌گردد.

۳-۱- مدل‌سازی رفتار غیرخطی المان‌های سازه

از آنجا که در تحلیل دینامیکی غیرخطی اصل جمع آثار قوا برقرار نیست، بنابراین می‌بایست ابتدا بارهای ثقلی به سازه اعمال گردد و سپس رکوردهای زلزله به سازه اعمال شود. از سوی دیگر در تحلیل غیرخطی می‌بایست رفتار و سطح عملکرد اجزای سازه پس از جاری شدن بررسی شوند که این موضوع با تعریف مفاصل

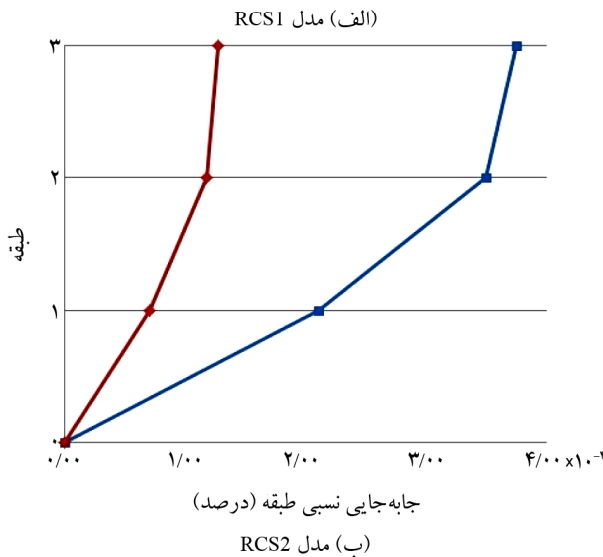


شکل (۳): منحنی نیرو- تغییر شکل کلی اعضا، تعمیم یافته برای سازه‌های بتنی مورد مطالعه (Management and Planning Organization, 2014).

همچنین استاندارد ۲۸۰۰ ایران نیز یک مقدار حداکثر برای تغییر مکان نسبی طبقات تعریف نموده است. این مقادیر حداکثر به تفکیک در جدول (۳) نشان داده شده‌اند که به‌عنوان معیار شکست استفاده می‌شوند.

جدول (۳): مقادیر حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی طبقات.

ردیف	سطح عملکرد	حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات (درصد)
۱	قابلیت استفاده بی‌وقفه	۰/۵
۲	ایمنی جانی	۱
۳	آستانه فروریزش	۲
۴	استاندارد ۲۸۰۰	۲/۵



شکل (۴): بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات در تحلیل خطی برای مدل اول تغییر شکل.

یا نوع ۳ مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران هستند. همچنین با توجه به تنوع گسل‌های لرزه خیز استان، قاعدتاً این مدارس در فواصل مختلفی از گسل‌های مسبب زلزله واقع شده‌اند که اثرات حوزه زلزله نیز بر رفتار آنها تأثیر قابل توجهی خواهد داشت. فاصله از حوزه گسل، از این نظر که می‌تواند موجب تغییرات عمده‌ای در پاسخ سازه گردد، موضوع مهمی در انتخاب شتاب نگاشت است. دستورالعمل FEMA p695 (FEMA, 2009) رکوردهای ثبت شده در فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر از گسل را به‌عنوان حوزه نزدیک و رکوردهای ثبت شده در فاصله بیش از ۱۰ کیلومتر از گسل را به‌عنوان حوزه دور طبقه‌بندی می‌نماید.

نتایج تحلیل خطی و مودال سازه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد زمان تناوب اصلی سازه RSC1 در مدل اول ۰/۳۷۴ ثانیه و زمان تناوب اصلی سازه RSC2 در مدل اول ۰/۲۵۵ ثانیه می‌باشد. در شکل (۴) بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات در تحلیل خطی، برای مدل اول تغییر شکل سازه نشان داده شده است.

۳-۲- تحلیل تاریخچه زمانی

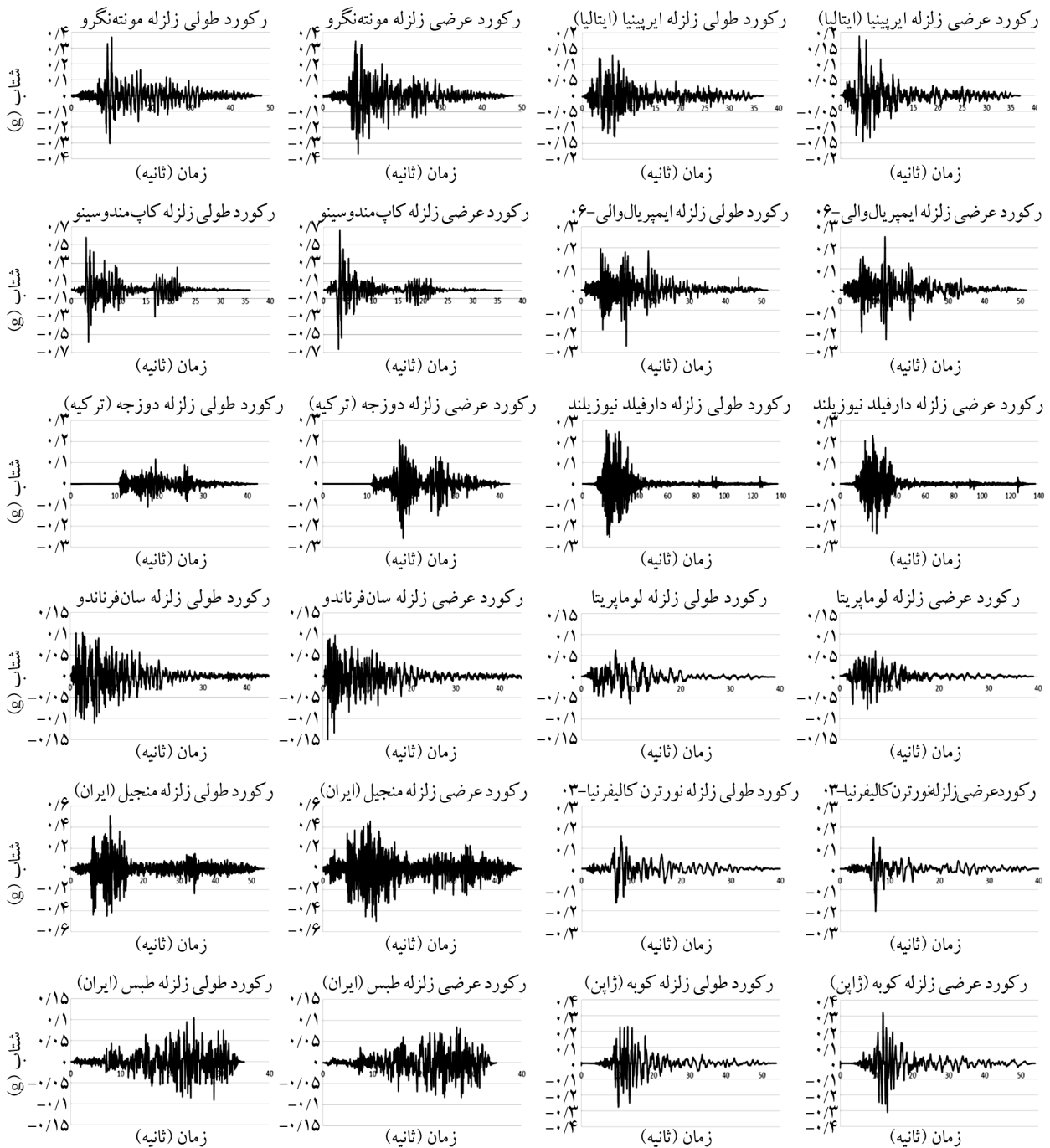
مدارس مورد مطالعه جزو مدارس تیپ بوده و در سطح استان کرمانشاه با نوع خاک و شرایط لرزه خیزی مختلف اجرا شده است. مطابق نتایج مرور مطالعات ژئوتکنیک مدارس استان، زمین‌های محل احداث مدارس اغلب در رده زمین‌های نوع ۲ و

در این مطالعه، ۱۲ رکورد زلزله به شرح سه رکورد زلزله مربوط به زمین نوع ۲ برای زلزله حوزه نزدیک گسل، سه رکورد زلزله مربوط به زمین نوع ۲ برای زلزله حوزه دور از گسل، سه رکورد زلزله مربوط به زمین نوع ۳ برای زلزله حوزه نزدیک گسل و سه رکورد زلزله مربوط به زمین نوع ۳ برای زلزله حوزه دور گسل، از سایت پایگاه لرزه‌نگاری PEER (PEER) برداشت و مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق الزام بسیاری از آیین‌نامه‌ها از جمله استاندارد ۲۸۰۰ ایران، مدت زمان حرکت شدید زمین در شتاب‌نگاشت‌های انتخابی، می‌بایست برابر بیشترین مقدار ۱۰ ثانیه و یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه باشد که این موضوع در

خصوص کلیه شتاب‌نگاشت‌های انتخابی رعایت گردیده است. در جدول (۴) مشخصات لرزه‌ای رکوردهای زلزله و در شکل (۵) شتاب‌نگاشت زلزله‌های انتخابی نشان داده شده است. از آنجا که شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین محل احداث بنا در هنگام وقوع زلزله باشند، بر اساس بسیاری از آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های معتبر دنیا، از جمله دستورالعمل FEMA356، رکوردهای انتخابی می‌بایست مقیاس شوند؛ بنابراین بعد از رسم پاسخ طیفی هر زوج شتاب‌نگاشت و مقایسه‌ی آنها، طیف شتاب با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه و اصلاح گردیده است.

جدول (۴): رکوردهای زلزله انتخابی جهت تحلیل تاریخچه زمانی مدارس مورد مطالعه.

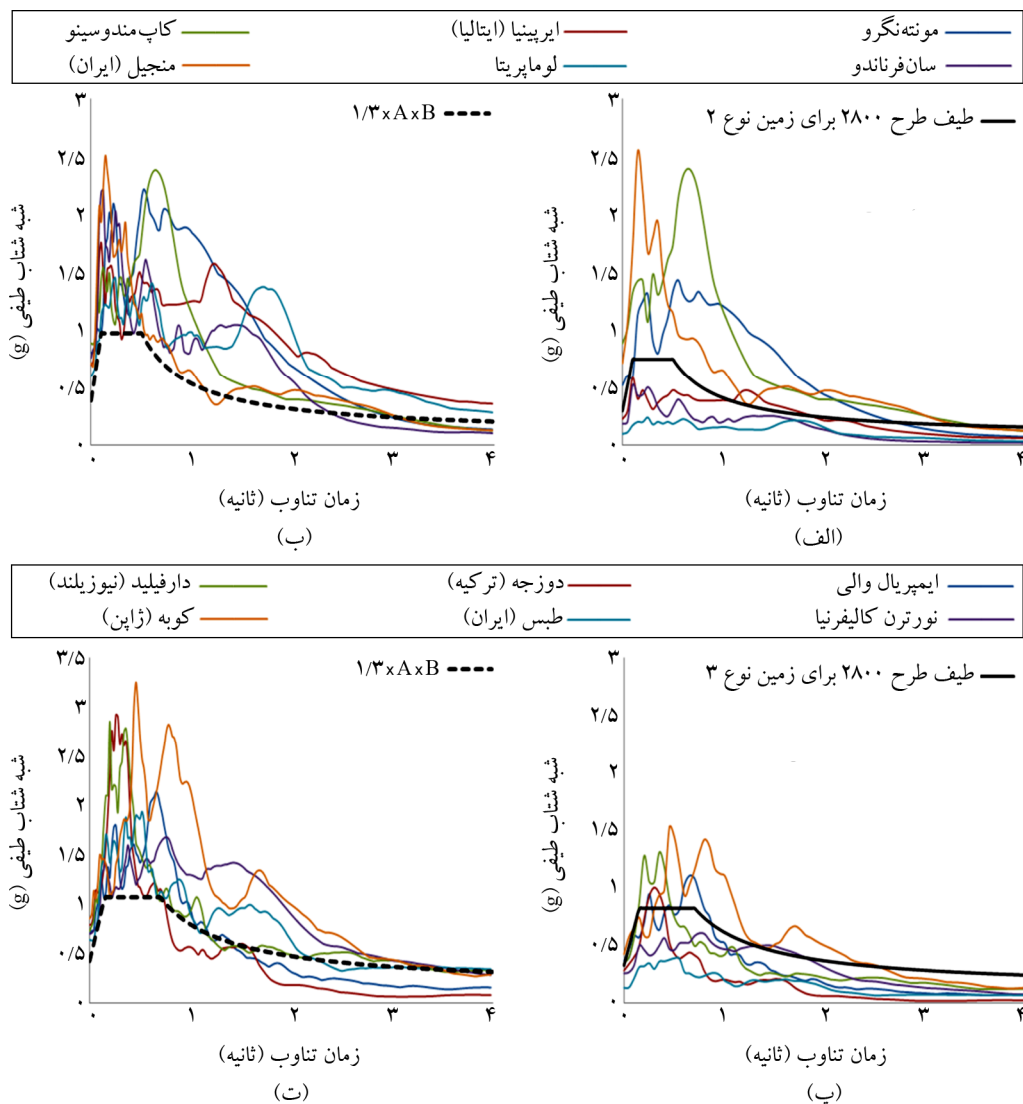
ردیف	حوزه گسل	نوع زمین	نام زلزله	سال وقوع	بزرگا (Mw)	بیشینه شتاب (g)	مدت زمان دوام (ثانیه)	ضریب مقیاس زلزله
۱			Montenegro, Yugoslavia	۱۹۷۹	۷/۱	۰/۳۷۲ ۰/۳۶۸	۲۱/۲۸ ۱۸/۸۱	۱/۵۳
۲		نوع ۲	Irpinia, Italy	۱۹۸۰	۶/۹	۰/۱۳ ۰/۱۹	۱۹/۶۰ ۱۶/۱۴	۳/۰۴
۳	حوزه نزدیک		Cape Mendocino	۱۹۹۲	۷	۰/۵۹ ۰/۶۶	۱۷/۷۴ ۱۶/۰۸	۱
۴	گسل		Imperial Valley-06	۱۹۷۹	۶/۵۳	۰/۲۷ ۰/۲۵۴	۲۰/۵۷ ۲۳/۹۸	۱/۸۹
۵		نوع ۳	Duzce, Turkey	۱۹۹۹	۷/۱۴	۰/۱۱۹ ۰/۲۵۹	۱۶/۰۸ ۱۲/۵۰	۲/۷۶
۶			Darfield, New Zealand	۲۰۱۰	۷	۰/۲۵۷ ۰/۲۳۷	۱۸/۰۸ ۱۹/۵۶	۲/۱
۷			San Fernando	۱۹۷۱	۶/۶۱	۰/۱۱۲ ۰/۱۵۱	۱۸/۳۲ ۱۸/۹۴	۴/۰۴
۸		نوع ۲	Loma Prieta	۱۹۸۹	۶/۹۳	۰/۰۶۴ ۰/۰۷۸	۱۵/۶۵ ۱۲/۹۷	۶
۹	حوزه دور از گسل		Manjil, Iran	۱۹۹۰	۷/۳۷	۰/۵۱۵ ۰/۴۹۷	۲۸/۶۶ ۲۹/۰۸	۱
۱۰			Northern Calif-03	۱۹۵۴	۶/۵	۰/۱۶۳ ۰/۲۰۳	۱۷/۳۴ ۱۹/۳۶	۲/۷۱
۱۱		نوع ۳	Tabas, Iran	۱۹۷۸	۷/۳۵	۰/۱۰۶ ۰/۰۸۵	۱۹/۴۸ ۱۸/۷۲	۴/۷۴
۱۲			Kobe, Japan	۱۹۹۵	۶/۹	۰/۲۷۶ ۰/۳۲۷	۱۹/۲۷ ۱۹/۴۳	۱/۹۸



شکل (۵): شتاب‌نگاشت زلزله‌های انتخابی جهت تحلیل تاریخی زمانی مدارس مورد مطالعه.

مقایسه طیف‌های ترکیبی پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده در محدوده تناوبی مذکور و $1/3$ برابر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰، با توجه به نوع خاک، نمایش داده شده است. به منظور تأثیر نامنظمی پلان در مدل‌سازی، مطابق الزام نشریه ۳۶۰، زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده به صورت هم‌زمان به مدل سه‌بعدی سازه اعمال می‌گردد.

طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰، از حاصل ضرب مقادیر شتاب مبنای طرح (A)، ضریب بازتاب (B) و شتاب ثقل زمین (g) برای میرایی ۵ درصد به دست می‌آید. برای این منظور شتاب‌نگاشت‌ها به نحوی مقیاس شده‌اند که طیف میانگین حاصل در محدوده زمان تناوبی $0.2T$ تا $1.5T$ ، کمتر از $1/3$ برابر طیف طرح سازگار با سطح خطر مدنظر نباشد. در شکل (۶)

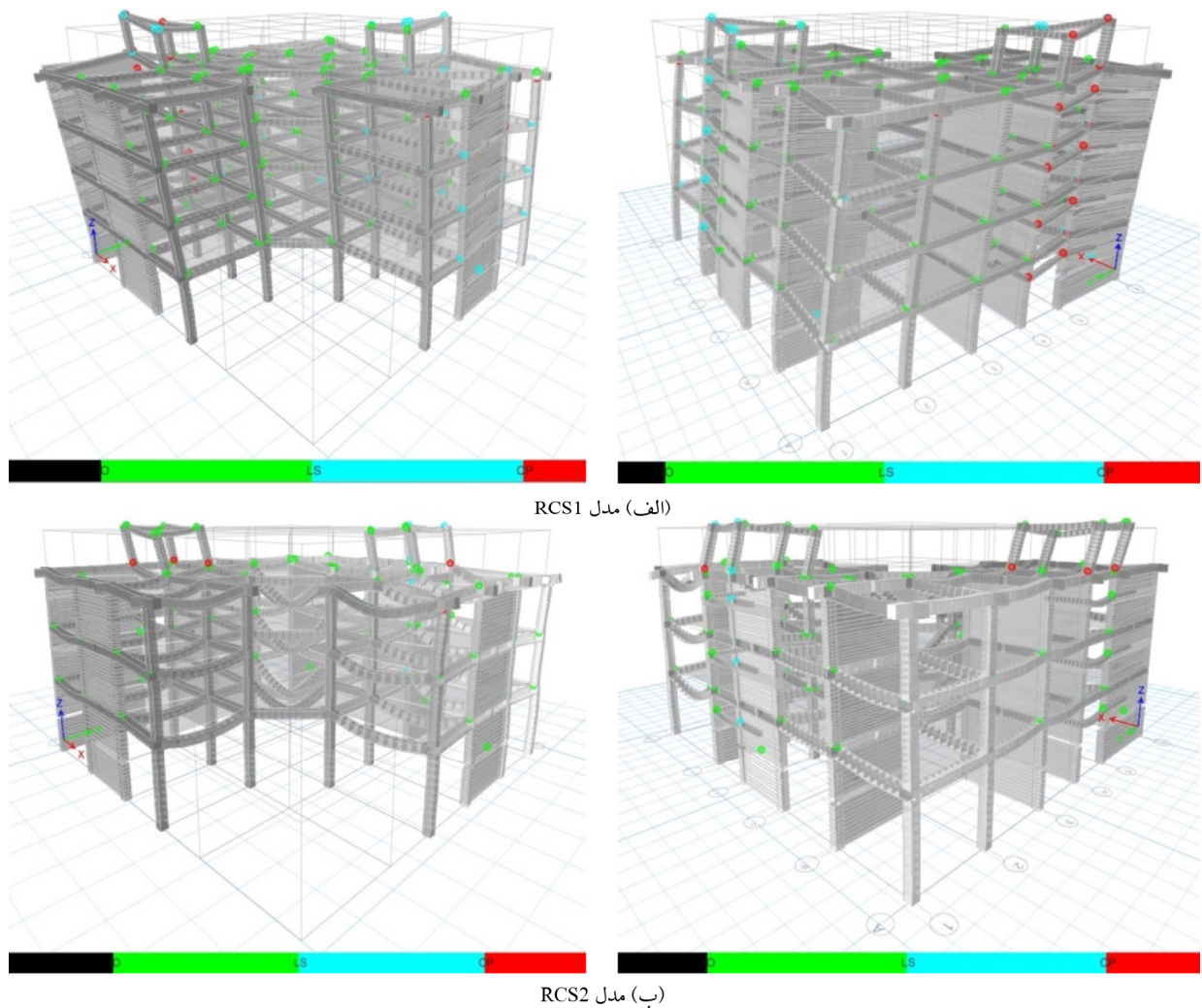


شکل (۶): (الف) طیف شبه‌شتاب رکوردهای انتخابی برای زمین نوع ۲، (ب) طیف شبه‌شتاب رکوردهای مقیاس شده برای زمین نوع ۲، (پ) طیف شبه‌شتاب رکوردهای انتخابی برای زمین نوع ۳ و (ت) طیف شبه‌شتاب رکوردهای مقیاس شده برای زمین نوع ۳.

تحلیل دینامیکی غیرخطی استخراج می‌گردد. این پارامتر در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای به‌عنوان عاملی جهت ارزیابی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۷) مدل‌هایی از سازه مدارس مورد بررسی، با استفاده از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی نشان داده شده است.

بررسی پاسخ‌ها و مقایسه نتایج شکل (۸) و مقادیر جدول (۳) نشان می‌دهد که سازه چهار طبقه RCS1 در بیشینه شتاب $0.3g$ دارای حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی 0.64 درصد و در محدوده قابلیت استفاده بی‌وقفه است. این سازه در بیشینه شتاب $0.5g$ دارای حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی بین 1.62 درصد است که

در ادامه تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی برای سطوح مختلفی از PGA انجام می‌گردد. بررسی تاریخچه زلزله‌های استان و از جمله مهم‌ترین زلزله سال‌های اخیر در شهرستان ازگله استان کرمانشاه نشان می‌دهد وقوع زلزله با بیشینه شتاب‌های مختلفی در این استان محتمل است برای این منظور شتاب‌نگاشت‌ها به گونه‌ای مقیاس می‌شوند که بیشینه شتاب در آنها شامل چهار سطح $0.3g$ ، $0.5g$ ، $0.7g$ و $0.9g$ باشد. در ادامه پاسخ‌های حداکثر جابه‌جایی مرکز جرم طبقات برداشت و مورد مقایسه قرار می‌گیرند. پارامتر تقاضای مهندسی در این تحلیل، تغییر مکان جانبی نسبی در نظر گرفته می‌شود که از خروجی



شکل (۷) مدل سازه مدارس مورد بررسی با استفاده از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی.

۰/۶۵ درصد است که همچنان نشان‌دهنده عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه سازه است. همچنین حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی این سازه در بیشینه شتاب $0.7g$ ، برابر $1/46$ درصد و در محدوده ایمنی جانی است. با افزایش بیشینه شتاب به $0.9g$ ، حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه برابر $2/54$ درصد شده که مربوط به محدوده آستانه فروریزش می‌باشد.

مقایسه رفتار مدارس مورد بررسی نشان می‌دهد، با کاهش یک طبقه از سازه، مقاومت به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد به نحوی که مدرسه سه طبقه تحت اثر زلزله‌های شدید با بیشینه شتاب حدود $0.8g$ همچنان دارای عملکرد ایمنی جانی است، اما مدرسه چهار طبقه تحت اثر زلزله‌های متوسط با بیشینه شتاب کمتر از $0.6g$ دارای عملکرد ایمنی جانی می‌باشد.

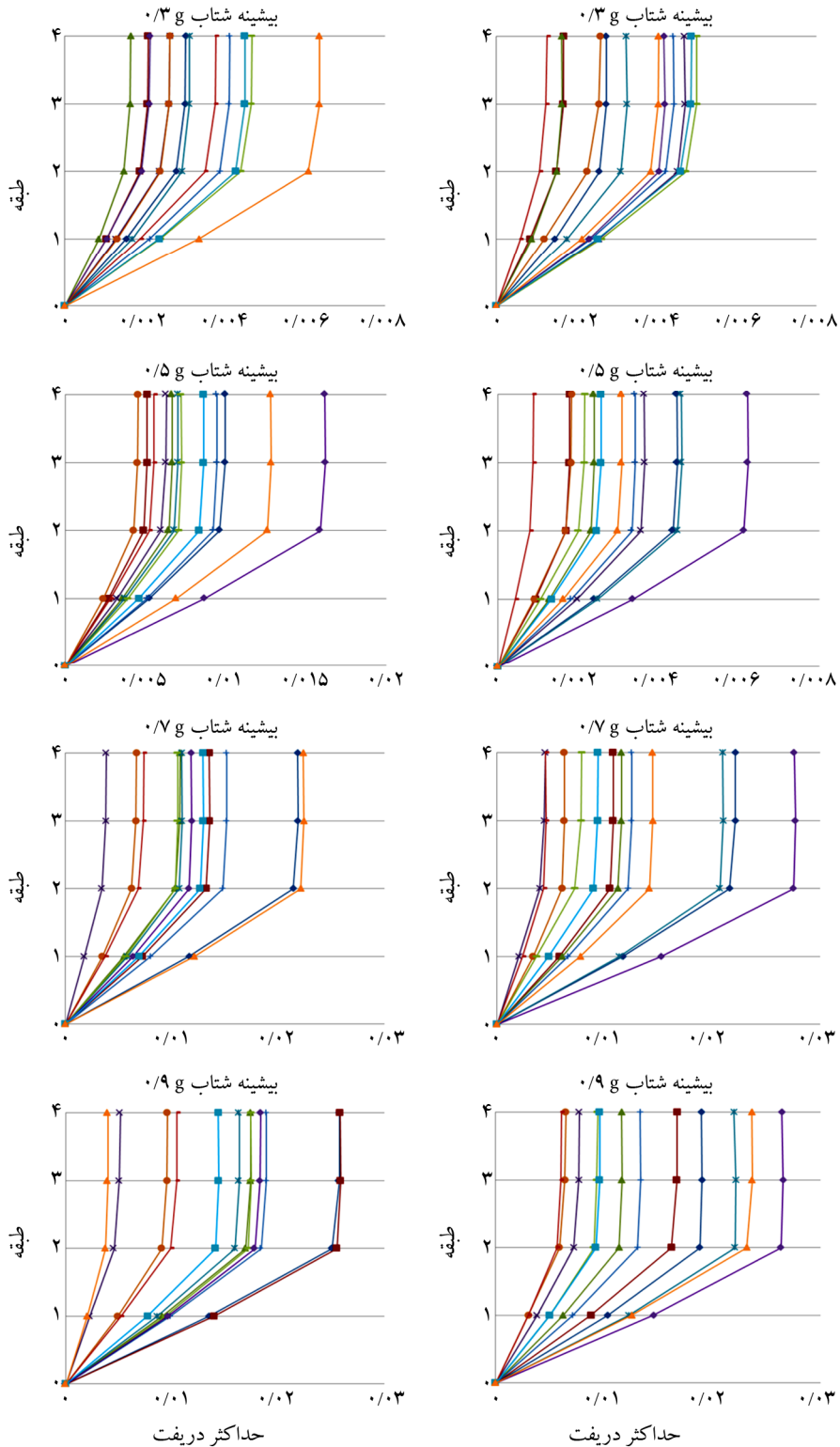
نشان‌دهنده عملکرد سازه در محدوده ایمنی جانی است. همچنین در بیشینه شتاب $0.7g$ و $0.9g$ دارای حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی بیش از $2/5$ درصد است که نشان‌دهنده عملکرد سازه در محدوده آستانه فروریزش است. همچنین در این میزان بیشینه شتاب، تغییر مکان جانبی نسبی سازه از حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی توصیه شده در استاندارد 2800 برای زلزله طرح بیشتر است.

بررسی پاسخ‌های سازه RCS2 نشان می‌دهد در حالتی که مدرسه به صورت ۳ طبقه اجرا شده است، سازه در بیشینه شتاب $0.3g$ دارای حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی 0.35 درصد و در محدوده عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه است. تغییر مکان جانبی نسبی حداکثر برای این سازه در بیشینه شتاب $0.5g$ ، برابر

سان فرناندو	کاپ مندوسینو	ایرپینیا (ایتالیا)	مونته نگرو
دوزجه (ترکیه)	ایمپریال والی	منجیل (ایران)	لوما پریتا
کوبه (ژاپن)	طبس (ایران)	نورترن کالیفرنیا	دارفیلید (نیوزیلند)

پاسخ امتداد عرضی سازه RCS1 به رکوردهای انتخابی

پاسخ امتداد طولی سازه RCS1 به رکوردهای انتخابی



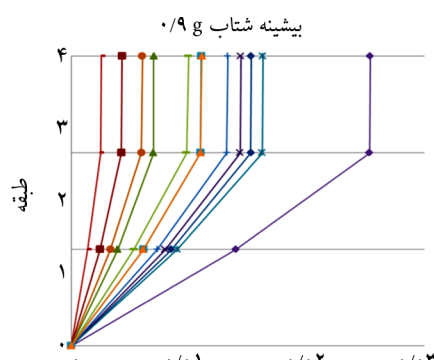
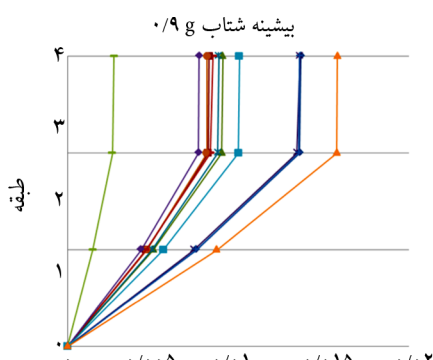
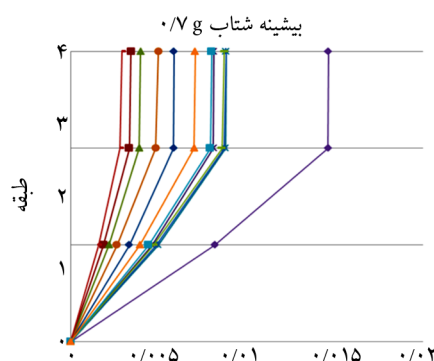
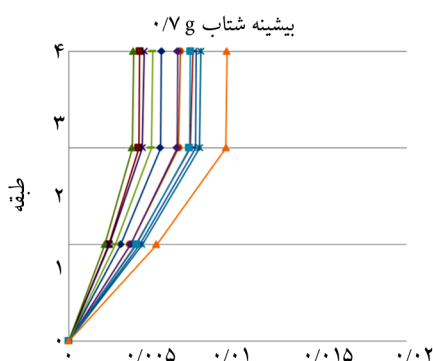
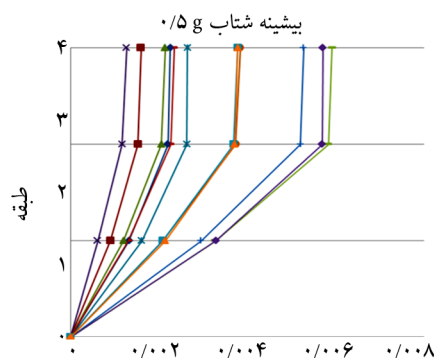
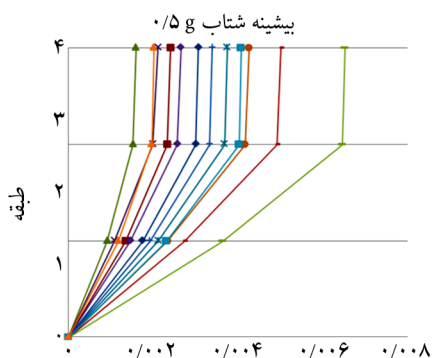
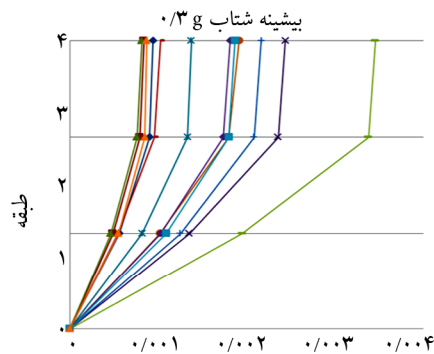
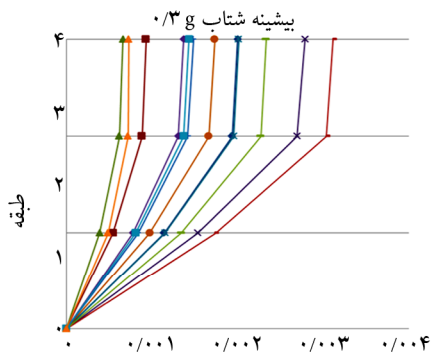
RCS1 مدل (الف)

شکل (۸): جابه‌جایی نسبی طبقات برای بیشینه شتاب‌های مختلف رکوردهای زلزله.

—●— سان فرناندو	—▲— کاپ مندوسینو	—■— ایرپینیا (ایتالیا)	—●— مونته نگرو
—●— دوزجه (ترکیه)	—+— ایمپرئال والی	—●— منجیل (ایران)	—●— لوماپریتا
—▲— کوبه (ژاپن)	—■— طبس (ایران)	—●— نورترن کالیفرنیا	—●— دارفیلید (نیوزیلند)

پاسخ امتداد عرضی سازه RCS2 به رکوردهای انتخابی

پاسخ امتداد طولی سازه RCS2 به رکوردهای انتخابی



حداکثر دریفت

حداکثر دریفت

(ب) مدل RCS2

ادامه شکل (ا).

یکی از روش‌های احتمالاتی برای بیان عملکرد سازه، رویکرد انهدام بر مبنای پارامتر شدت لرزه‌ای است. در این روش، شدت لرزه‌ای به‌عنوان متغیر تعیین‌کننده حالت حدی در سازه منظور می‌گردد و احتمال رسیدن سازه به هر یک از حالات حدی مفروض از رابطه (۱) قابل محاسبه است (Beheshti et al., 2014).

$$F_x(x) = P[C | IM = im_i] = P[im_i > IM_c] = 1 - F_{IMC}(im_i) \quad (1)$$

که در آن IM شدت زلزله است که معمولاً برابر شتاب حداکثر زمین (PGA) فرض می‌شود. IM_c حالت حدی بحرانی تعریف شده برای شدت لرزه‌ای و $F_x(x)$ احتمال تجمعی شکست سازه برای شدت (im_i) است. در این مطالعه به ازای سطوح مشخصی از شدت، احتمال نرسیدن پاسخ سازه به مقادیر حدی متناظر با سطوح مختلف خرابی تعیین می‌گردد.

برای مدارس مورد مطالعه، با در نظر گرفتن بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات به‌عنوان پاسخ، سطوح عملکردی تعریف شده در دستورالعمل FEMA356 به‌عنوان معیار خرابی سازه لحاظ می‌گردد و به این حالات حدی، مقادیر کمی مطابق با مقادیر جدول (۳) نسبت داده می‌شود. مقادیر بیشینه پاسخ ساختمان تحت هر نگاهت مقیاس شده به چهار $PGA(g)$ مشخص شامل $0.3g$ ، $0.5g$ ، $0.7g$ و $0.9g$ برداشت می‌شود. سپس با فرض توزیع نرمال لگاریتم طبیعی مقادیر حاصل، پس از محاسبه پارامترهای میانگین (μ) و انحراف معیار استاندارد (δ)، تابع چگالی احتمال $f(x)$ استخراج می‌گردد. مطابق شکل (۹) با در نظر گرفتن مقداری برای X به‌عنوان پاسخ متناظر با یک سطح عملکرد، سطح زیر منحنی تابع چگالی احتمال از $-\infty$ تا X احتمال نرسیدن به سطح عملکرد مورد نظر را نشان می‌دهد. این بدان معناست که در این سطح ثابت از شدت زلزله $PGA(g)$ به احتمال $F_x(x)$ پاسخ سازه به مقدار X و سطح عملکرد مورد نظر نمی‌رسد.

تکرار این روند و استخراج مقادیر احتمال به ازای مقادیر مختلف پاسخ، منجر به استخراج یک منحنی شکنندگی برای شدت مورد نظر می‌شود. در شکل (۱۰) منحنی‌های شکنندگی مدارس مورد مطالعه در سطوح مختلف عملکردی نشان داده شده است.

مقایسه رفتار سازه تحت اثر رکوردهای مختلف متناسب با نوع زمین و حوزه گسل نشان می‌دهد سازه RCS1 تحت اثر رکوردهای زلزله حوزه دور در زمین نوع ۳ دارای تغییر مکان جانبی نسبی و آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به سایر حالات است. بیشترین تغییر مکان جانبی نسبی در این سازه به ترتیب تحت اثر رکوردهای زلزله حوزه دور در زمین نوع ۳، رکوردهای حوزه نزدیک در زمین نوع ۲، رکوردهای حوزه دور در زمین نوع ۲ و رکوردهای حوزه نزدیک در زمین نوع ۳ رخ می‌دهد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت سازه RCS1 در ساختگاه زمین نوع ۳ تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و در ساختگاه زمین نوع ۲ تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردار است. در سازه RCS2 نیز بیشترین مقدار تغییر مکان جانبی نسبی و آسیب‌پذیری تحت اثر رکوردهای زلزله حوزه دور در زمین نوع ۳ اتفاق می‌افتد. بیشترین تغییر مکان جانبی نسبی در این سازه به ترتیب تحت اثر رکوردهای زلزله حوزه دور در زمین نوع ۳، رکوردهای حوزه نزدیک در زمین نوع ۳، رکوردهای حوزه دور در زمین نوع ۲ و رکوردهای حوزه نزدیک در زمین نوع ۲ رخ می‌دهد؛ بنابراین سازه RCS2 تحت اثر هر دو زلزله حوزه دور و نزدیک، در ساختگاه زمین نوع ۳ آسیب‌پذیری بیشتری خواهد داشت.

۳-۳- تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای

بررسی آسیب‌پذیری و سطح عملکرد یک سازه تحت اثر یک زلزله با شدت مشخص، همواره با عدم قطعیت‌های فراوانی همراه است که این عدم قطعیت‌ها باعث عدم دستیابی به پاسخ دقیق و قطعی می‌شوند. برخی از این عدم قطعیت‌ها مانند امکان پیش‌بینی شدت زلزله‌های آینده، تفاوت‌های موجود در مشخصات مصالح و اثرات محیطی (تأثیر عوامل محیطی بر مشخصات و مقاومت مصالح) ذاتی هستند و برخی دیگر از عدم قطعیت‌ها ناشی از خطاهای موجود در مدل‌سازی و محاسبات هستند (Berahman et al., 2007)؛ بنابراین راه‌حل منطقی، بیان رفتار و عملکرد سازه به‌صورت احتمالاتی است.

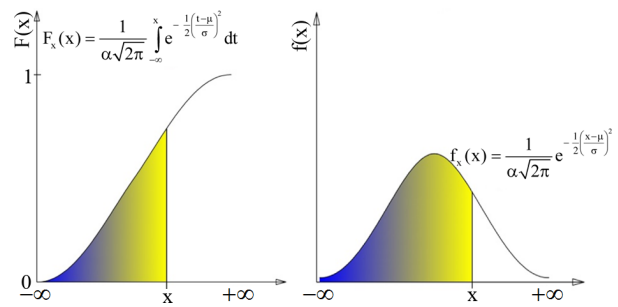
جدول (۵): نتایج حاصل از ارزیابی احتمالاتی مدارس مورد مطالعه.

نمونه مورد مطالعه	بیشینه شتاب	احتمال رسیدن به سطوح مختلف عملکرد (درصد)		
		IO	LS	CP
RCS1	۰/۳g	۶/۵	۰	۰
	۰/۵g	۶۸	۱۸	۰
	۰/۷g	۸۰	۵۶	۱۰
	۰/۹g	۸۷	۶۵	۱۴
RCS2	۰/۳g	۰	۰	۰
	۰/۵g	۸	۰	۰
	۰/۷g	۶۳	۱۰	۰
	۰/۹g	۷۸	۴۸	۳/۸

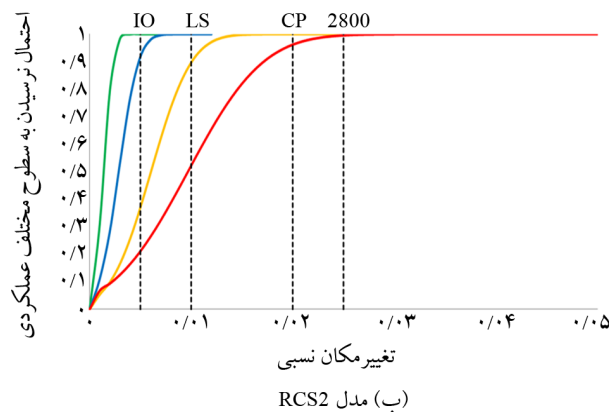
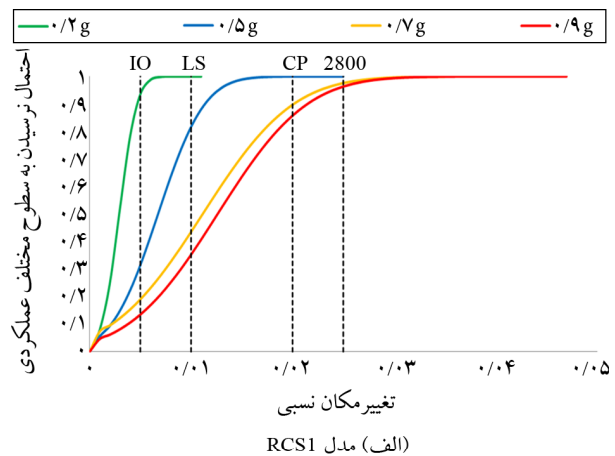
بررسی پاسخ سازه ۴ طبقه RCS1 تحت اثر بیشینه شتاب‌های مختلف نشان می‌دهد، در بیشینه شتاب ۰/۳g که برابر شتاب مبنای طرح استاندارد ۲۸۰۰ در مناطق با خطر نسبی زیاد است، احتمال رسیدن سازه به سطح عملکردی IO در حدود ۶/۵ درصد است و به احتمال ۹۳/۵ درصد سازه دارای عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه خواهد بود.

در این بیشینه شتاب، رسیدن به سایر سطوح عملکردی ممکن نیست. در بیشینه شتاب ۰/۵g که تقریباً معادل زلزله متوسط است، احتمال رسیدن سازه به سطح عملکردی IO در حدود ۶۸ درصد، سطح عملکردی LS در حدود ۱۸ درصد و سایر سطوح عملکردی صفر است. در بیشینه شتاب ۰/۷g که می‌توان گفت معادل یک زلزله شدید است، احتمال رسیدن سازه RCS1 به سطح عملکردی IO در حدود ۸۰ درصد، سطح عملکردی LS در حدود ۵۶ درصد، سطح عملکردی CP در حدود ۱۰ درصد و سطح عملکردی استاندارد ۲۸۰۰ در حدود ۲/۴ درصد است. در بیشینه شتاب ۰/۹g که در زلزله‌های بسیار شدید اتفاق می‌افتد، احتمال رسیدن سازه RCS1 به سطح عملکردی IO در حدود ۸۷ درصد، سطح عملکردی CP در حدود ۱۴ درصد و سطح عملکردی استاندارد ۲۸۰۰ در حدود ۳/۶ درصد است.

مطابق نمودار شکل (۱۰-ب) در سازه سه‌طبقه مدرسه



شکل (۹): تابع چگالی و توزیع تجمعی احتمال با احتمال نرسیدن به یک سطح خرابی.



شکل (۱۰): منحنی‌های شکنندگی مدارس مورد مطالعه در سطوح مختلف عملکردی.

بررسی منحنی‌های شکنندگی شکل (۱۰) و کنترل سطوح مختلف عملکردی نشان می‌دهد احتمال رسیدن تغییر مکان جانبی نسبی سازه RCS1 به سطوح مختلف عملکردی همواره بیشتر از سازه RCS2 است و با افزایش شدت زلزله این احتمال افزایش می‌یابد. در جدول (۵) نتایج حاصل از ارزیابی احتمالاتی به صورت خلاصه ارائه شده است.

شتاب مبنای طرح استاندارد ۲۸۰۰ در مناطق با خطر نسبی زیاد، دارای عملکرد استفاده بی‌وقفه خواهند بود. از آنجا که فضاهای آموزشی مطابق نشریه ۳۶۰ می‌بایست دارای حداقل سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) باشند، مقایسه هردو سازه در این سطح عملکرد نشان می‌دهد که سازه RCS2 دارای عملکرد مناسب‌تری برای سطح عملکرد LS است.

گزارش مشاهدات آسیب‌های وارد به مدارس پس از زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ استان کرمانشاه (Kahrizi et al., 2020) نیز حاکی از عملکرد لرزه‌ای مناسب این تیپ از مدارس می‌باشد. بررسی نمونه‌ای از تیپ مدرسه مدل RCS1 که در محدوده ۱۰ تا ۴۰ کیلومتری کانون اصلی زلزله و با بیشینه شتاب ۰/۲g واقع گردیده است، نشان می‌دهد هیچ‌گونه آسیبی در اجزای سازه‌ای این مدرسه به وجود نیامده و فقط آسیب‌های جزئی در اجزای غیر سازه‌ای و دیوارهای میانقاب رخ داده است (شکل ۱۱). مقایسه رفتار واقعی این سازه در زلزله با منحنی‌های شکنندگی حاصل از تحلیل در شکل (۱۰-الف) نشان می‌دهد در بیشینه شتاب مذکور، ساختمان همچنان دارای قابلیت استفاده بی‌وقفه می‌باشد و منحنی‌های حاصل از تحلیل دارای انطباق مناسبی با واقعیت رفتار سازه هستند. همچنین علاوه بر مقایسه کیفی مذکور، منحنی‌های شکنندگی حاصل از تحلیل در این مطالعه، با منحنی‌های شکنندگی ارائه شده در راهنمای فنی مدل زلزله هازوس (FEMA, 2020) نیز مقایسه و صحت‌سنجی گردیده است.

RCS2 و در بیشینه شتاب ۰/۳g، احتمال رسیدن به هیچ‌یک از سطوح عملکردی وجود ندارد و سازه در این بیشینه شتاب دارای عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه خواهد بود. در بیشینه شتاب ۰/۵g، احتمال رسیدن سازه به سطح عملکردی IO در حدود ۸ درصد و سایر سطوح عملکردی صفر است. برای بیشینه شتاب ۰/۷g نیز احتمال رسیدن سازه RCS2 به سطح عملکردی IO در حدود ۶۳ درصد، سطح عملکردی LS در حدود ۱۰ درصد و احتمال سایر سطوح عملکردی صفر است. در بیشینه شتاب ۰/۹g نیز که مربوط به زلزله‌های بسیار شدید می‌باشد، احتمال رسیدن سازه RCS2 به سطح عملکردی IO در حدود ۷۸ درصد، سطح عملکردی LS در حدود ۴۸ درصد، سطح عملکردی CP در حدود ۳/۸ درصد و سطح عملکرد استاندارد ۲۸۰۰ بسیار ناچیز و در حدود ۰/۴۲ درصد است.

مقایسه نمونه مدارس مورد بررسی حاکی از آن است که با افزایش تعداد طبقات سازه، احتمال رسیدن سازه به سطوح مختلف خرابی افزایش می‌یابد به نحوی که افزایش یک طبقه در سازه مدرسه موجب می‌گردد احتمال رسیدن سازه به اولین سطح خرابی به مقدار قابل توجهی افزایش یابد.

بررسی عملکرد سازه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد هر دو سازه RCS1 و RCS2 در هر دو نوع زمین ۲ و ۳ و تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک، از عملکرد مناسب و قابل قبولی برخوردار هستند به نحوی که تحت اثر بیشینه شتاب ۰/۳g و معادل



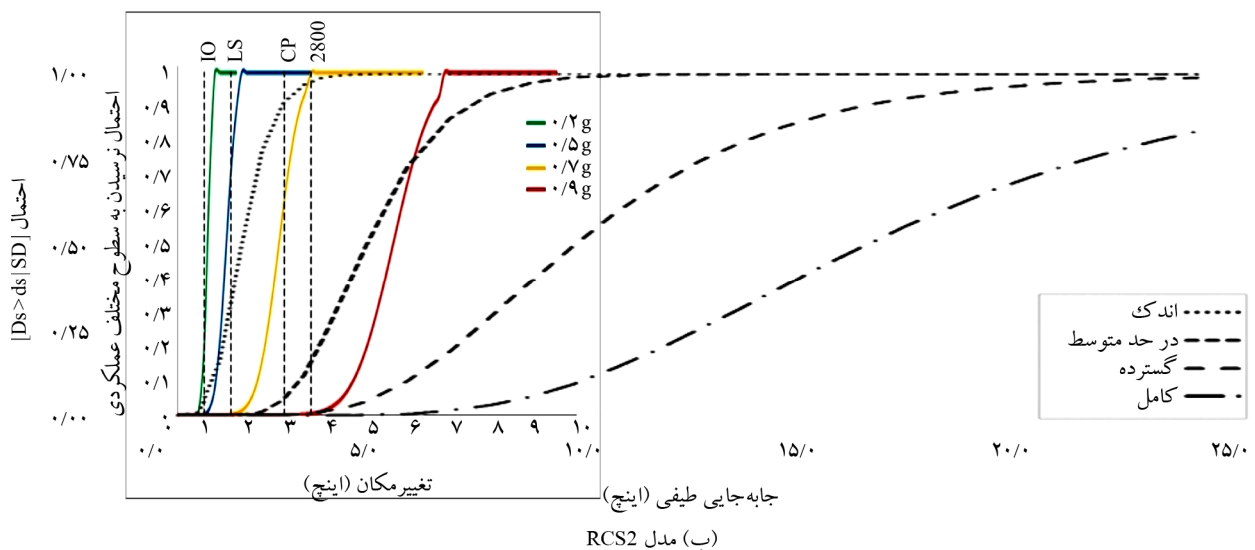
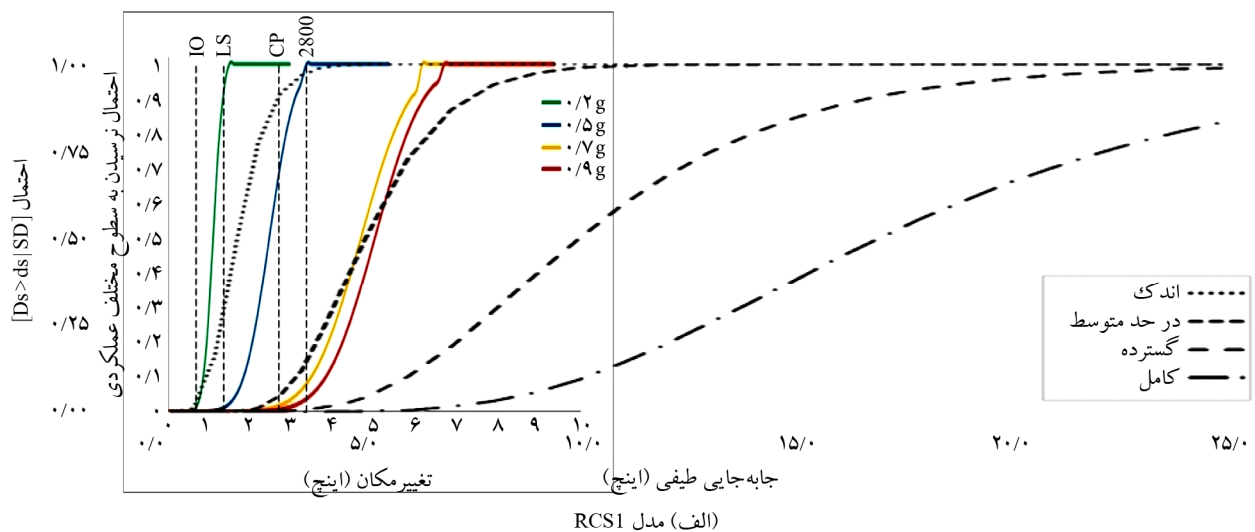
شکل (۱۱): ترک‌های سطحی در دیوارهای مدرسه پس از زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ استان کرمانشاه (Kahrizi et al., 2020).

دستورالعمل مدل زلزله هازوس در واقع زیرمجموعه‌ای از دستورالعمل‌های FEMA است که برای به دست آوردن توابع خرابی ساختمان‌ها و برآورد خسارات احتمالی ناشی از زلزله استفاده می‌شود و در آن روش‌های به دست آوردن منحنی شکنندگی برای ۳۶ نوع ساختمان خاص شرح داده شده است. با توجه به خاص بودن نقشه‌های معماری دو مدرسه مورد بررسی در این مطالعه و فرضیات متفاوت در روش‌های استخراج منحنی‌های شکنندگی، تطابق کامل منحنی‌ها امکان‌پذیر نیست، اما قرارگیری در یک بازه می‌تواند نشان‌دهنده صحت نتایج استخراج شده باشد.

برای این منظور ابتدا منحنی‌های شکنندگی نشان داده شده در شکل (۱۰) که بر اساس تغییر مکان نسبی و احتمال نرسیدن به دست آمده باشد.

مقایسه منحنی‌های شکل (۱۲) نشان می‌دهد علیرغم تفاوت‌های اساسی موجود در معماری، سازه، فرضیات استخراج منحنی‌های شکنندگی و سطوح عملکردی مدارس مورد مطالعه با دستورالعمل مذکور، منحنی‌های شکنندگی در بازه احتمال بروز آسیب‌های کم و متوسط دارای انطباق قابل قبولی هستند که می‌تواند بیانگر صحت نتایج به دست آمده باشد.

در شکل (۱۰) که بر اساس تغییر مکان نسبی و احتمال نرسیدن به دست آمده باشد.



شکل (۱۲): مقایسه منحنی‌های شکنندگی مدارس مورد مطالعه و منحنی‌های مدل زلزله هازوس.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله دو تیپ پر تکرار از مدارس سازه بتنی کرمانشاه به صورت غیرخطی مدل سازی و با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت اثر ۱۲ رکورد محتمل زلزله، متناسب با نوع زمین و فاصله از گسل، تحلیل و ارزیابی گردید. همچنین به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد لرزه ای این مدارس، به ازای سطوح مشخصی از شدت، احتمال رسیدن پاسخ سازه به مقادیر حدی متناظر با سطوح مختلف خرابی تعیین گردید. برخی از مهم ترین نتایج این بررسی به شرح زیر است.

بیان احتمالاتی عملکرد سازه، یک روش مناسب جهت بیان رفتار و عملکرد سازه می باشد که ضمن پوشش خطاهای ناشی از عدم قطعیت ها و نیز خطاهای تحلیل و محاسبات، برآورد کاملی از رفتار سازه ارائه می نماید.

نوع زمین ساختگاه مدرسه و فاصله ساختگاه از گسل، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد لرزه ای و پاسخ سازه دارد. نتایج نشان داد آسیب پذیری سازه هر دو نمونه مدرسه سه و چهار طبقه در ساختگاه زمین نوع ۳ و برای زلزله های حوزه دور بیشتر از سایر حالات است.

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان می دهد سازه مدرسه سه طبقه در کلیه رکوردها تا بیشینه شتاب $0.3g$ که معادل شتاب مبنای طرح استاندارد ۲۸۰۰ در مناطق با خطر نسبی زیاد زلزله می باشد، دارای رفتار الاستیک و سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه است. در این بیشینه شتاب، احتمال عبور عملکرد سازه مدرسه چهار طبقه از سطح عملکرد استفاده بی وقفه، در حدود $6/5$ درصد است. لذا می توان نتیجه گرفت که سازه مدارس مورد بررسی علیرغم وجود نامنظمی در پلان، از قابلیت اعتماد بالایی نسبت به آیین نامه های طراحی برخوردار بوده و در حد شتاب مبنای طرح مطابق استاندارد ۲۸۰۰ عملاً هیچ گونه آسیبی در سازه مدارس ایجاد نخواهد شد.

مقایسه نمونه مدارس مورد بررسی حاکی از آن است که با افزایش تعداد طبقات، احتمال رسیدن سازه به سطوح مختلف خرابی افزایش می یابد به نحوی که افزایش یک طبقه در سازه

مدرسه موجب می گردد احتمال رسیدن سازه به سطوح مختلف عملکردی و خرابی به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. مقایسه هر دو سازه مدارس مورد مطالعه نشان می دهد در سطح عملکرد ایمنی جانبی، سازه مدرسه سه طبقه دارای عملکرد مناسب تری نسبت به سازه مدرسه چهار طبقه است. در زلزله های بسیار شدید و نادر با بیشینه شتاب $0.9g$ ، احتمال رسیدن تغییر مکان جانبی نسبی سازه مدرسه چهار طبقه به حد تغییر مکان جانبی نسبی استاندارد ۲۸۰۰، در حدود $3/6$ درصد و برای مدرسه سه طبقه 0.42 درصد است که نشان دهنده مقاومت زیاد سازه تحت اثر زلزله های شدید و نادر نیز می باشد.

تقدیر و تشکر

از دفتر فنی اداره کل نوسازی مدارس استان کرمانشاه بابت همکاری فراوان تقدیر و تشکر می گردد.

مراجع

- Amiri, G., Razegh, H.R., & Doosti, L. (2016). Development of analytical fragility curves for Irans masonry school buildings. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 31, 145-156.
- ASCE. (2013). *ASCE 41. Seismic rehabilitation of existing buildings*. Virginia: Reston: American Society of Civil Engineers.
- ATC. (1995). *ATC-40 Report. Performance based seismic engineering of buildings*. Sacramento, CA: Structural Engineers Association of California.
- Basler, E. (1960). *Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken*. ETH Zurich.
- Bazzurro, P., & Cornell, C.A. (1994). Seismic hazard analysis of nonlinear structures. II: Applications. *Journal of Structural Engineering*, 120(11), 3345-3365.
- 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*, 14-18.
- Berahman, F., & Behnamfar, F. (2007). Seismic fragility curves for un-anchored on-grade steel storage

Supervision. Islamic Republic of Iran.

Mohsenian, V., Asil Gharehbaghi, S., & Beheshti-Aval, S.B. (2016). Seismic reliability assessment of two case-study tunnel form buildings considering the effect of soil-structure interaction. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 3(3), 2-11.

Motlagh, Z.S., Dehkordi, M.R., Eghbali, M., & Samadian, D. (2020). Evaluation of seismic resilience index for typical RC school buildings considering carbonate corrosion effects. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 46.

PEER. *PEER Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center*. Retrieved from <http://peer.berkeley.edu>.

Safi, M., Koolivand, M., Rasouli, M., & Ketabdari, H. (2020). Investigating the effect of probabilistic distribution of crack at the limit state on the seismic reliability of concrete buildings. *Concrete Research*, 13(4), 29-42.

Samadian, D., Ghafory-Ashtiany, M., Naderpour, H., & Eghbali, M. (2019). Seismic resilience evaluation based on vulnerability curves for existing and retrofitted typical RC school buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127.

Shome, N. (1999). *Probabilistic Seismic Demand Analysis Of Nonlinear Structures*. Stanford University.

Skrzypczak, I., Kujda, J., & Buda-Ozóg, L. (2017). The use of probabilistic methods in assessing the reliability of masonry structures. *Procedia Engineering*, 193, 160-167.

Yazdani, A., Mehrabi Moghaddam, A., & Shahidzadeh, M.S. (2018). Parametric assessment of uncertainties in reliability index of reinforced concrete MRF structures using incremental dynamic analysis. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4), 755-7.

Zhang, H. (2018). Durability reliability analysis for corroding concrete structures under uncertainty. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 101, 26-37.

Zheng, Z., Guo, J., Song, W., He, X., Lu, F., Xie, C., & Sun, J. (2014). Nonlinear free vibration analysis of axisymmetric polar orthotropic circular membranes under the fixed boundary condition. *Mathematical Problems in Engineering*.

tanks: Bayesian approach. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(2), 166-192.

BHRC. (2014). *National Building Regulations (Subject 6), Loads on the building*. Tehran, Iran: Office of National Building Regulations.

Cornell, C.A. (1969). A probability-based structural code. *Journal of ACI*, 66(12), 974-985.

Cornell, C.A., Jalayer, F., Hamburger, R.O., & Foutch, D.A. (2002). Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 526-533.

CSI. (2016). *ETABS 16.2.0., Computers and Structures*. Berkeley, California.

FEMA. (2000). *FEMA356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency.

FEMA. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P 695*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.

FEMA. (2020). *Hazus Earthquake Model Technical Manual Hazus 4.2 SP3*.

Ghasemi, S.H., & Nowak, A.S. (2017). Reliability index for non-normal distributions of limit state functions. *Structural Engineering and Mechanics*, 62(3), 365-372.

Kahrizi, M., & TahamouliRoudsari, M. (2020). Seismic performance of school buildings in 2017 Ezgeleh Earthquake, Iran. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 53(2), 70-82.

Kouhestanian, H., Pahlavan, H., Shafaei, J., & Shamekhi Amiri, M. (2021). Probabilistic seismic assessment of RC buildings considering soft and extreme soft story irregularities subjected to main shock-aftershock sequences. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(2), 457-478.

Li, D., Zheng, Z., Tian, Y., Sun, J., He, X., & Lu, Y. (2017). Stochastic nonlinear vibration and reliability of orthotropic membrane structure under impact load. *Thin-Walled Structures*, 119, 247-255.

Management and Planning Organization. (2014). *NO. 360. Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. Vice Presidency for Strategic Planning and

واژه‌نامه

Performance Based Design	۱- طراحی بر اساس عملکرد
Increase Nonlinear Dynamic Analysis	۲- تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده
Seismic Loads	۳- بارهای لرزه‌ای
Seismic Intensity	۴- شدت لرزه‌ای
Demand	۵- تقاضا
Seismic Reliability	۶- قابلیت اعتماد لرزه‌ای
Monte-Carlo Simulation Method	۷- روش شبیه‌سازی مونت کارلو
Drift	۸- حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی
3D Panel	۹- پانل سبک سه‌بعدی
Fiber Section	۱۰- مقاطع فایبر
Immediate Occupancy	۱۱- استفاده بی‌وقفه
Life Safety	۱۲- ایمنی جانی
Collapse Prevention	۱۳- آستانه فرو ریزش

Evaluation of Seismic Reliability of Kermanshah Concrete Type Schools Based on Seismic Intensity Parameter

Mehdi Kahrizi¹ and Amir Houshang Akhaveissy^{2*}

1. Postdoctoral Researcher, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran,
*Corresponding Author, email: Ahakhaveissy@razi.ac.ir

Earthquake is one of the most important natural phenomena that causes economic damages and human losses due to the damage and breakage of structures. The unfortunate economic and social consequences caused by earthquakes, determine the importance of evaluating and improving existing buildings against earthquakes. This issue is particularly important for schools and educational buildings. School buildings, due to their demographic structure, are important buildings whose safe design, implementation and control of behavior and performance are of great importance. Experience of past earthquakes shows that damage to schools can lead to high casualties and human catastrophe; therefore, design regulations also provide stricter rules and regulations for the design of educational buildings. Seismic performance control of existing educational buildings is also of special importance and various methods including linear and nonlinear analysis have been recommended by different regulations and instructions. On the other hand, there are many uncertainties in the study of structural performance that prevent a definite achievement of the structural performance response. Some of these uncertainties are inherent, such as the impossibility of predicting the intensity of future earthquakes, and some are due to errors in analysis and calculations, so the probabilistic expression of structural performance is a logical way to study structural performance. There are several methods to check the reliability of the structure that are different in terms of hypotheses, methods and accuracy, so the effect of uncertainty in each method should be considered appropriately. A review of past research shows that many studies have been conducted on the possible evaluation of the seismic behavior of concrete structures, but there are few studies on the behavior of real examples of such buildings. In this study, two repetitive types of Kermanshah concrete structural schools are non-linearly modeled and analyzed and evaluated using time-history dynamic analysis under the effect of 12 possible earthquake records, appropriate to the type of land and distance from the fault. In order to evaluate the seismic reliability of these schools, based on the specific levels of intensity, the probability of reaching the response to the corresponding values is determined at different levels of damage. The maximum structural drift is considered as the response, and the performance levels defined in the FEMA356 guideline are considered as the failure criterion. The fragility curves of the studied schools have been compared and verified with the behavior of a sample of these schools in a real earthquake, as well as the fragility curves presented in the technical manual of the Hazus earthquake model. In this study, the non-linear behavior of important structures such as schools, which are designed in a linear way, is evaluated and compared. Also, expressing the probability of vulnerability of such structures for possible earthquakes can provide the performance of important structures in each region. The results show that the probabilistic expression of the structure's performance is a suitable method to express the behavior and performance of the structure. The type of ground of the school building and the distance of the building from the fault has a significant effect on the seismic performance and response of the structure. With the increase of storeys, the probability of reaching the school drift to different functional levels is always higher and by increasing the earthquake intensity this probability increases as well. Also, the structures of the studied schools, despite the irregularity in the plan, have a good performance in order to take into account the effects of earthquake intensity, site ground and site distance from the fault. This information can be widely used in crisis management, urban management decisions and future planning of the region.

Keywords: Seismic Reliability, School, Concrete Frame, Dynamic Analysis, Seismic Intensity.