ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای مدارس شهرکرد به کمک منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای

افشین کلانتری، استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
امید بهار، استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
جعفر نجفی چالشتری، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، شهرکرد
سیاوش صادقی، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، شهرکرد

چکیده

ساختمان مدارس با توجه به ماهیت آنها از جنبه‌های گوناگون نظیر کاربری، اهمیت، کارفرما، فرم معماری، نحوه نظارت و مصالح مورد استفاده، ضوابط و معیارهای بارگذاری و طراحی لرزه‌ای عمدتاً شباهتهای فراوانی دارند. محاسبه شکنندگی لرزه‌ای به صورت موردی برای چند مدرسه، برآورد مناسبی از وضعیت آسیب‌پذیری مجموعه‌ای از ساختمانهای مدارس را امکانپذیر می‌سازد. در این مطالعه، آسیب‌پذیری لرزه‌ای این سازه‌ها در کشور از طریق مطالعه موردی مدارس شهرکرد و برآورد منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای صورت گرفته است. به این منظور، سه ساختمان با اسکلت فولادی و سه ساختمان با اسکلت بتن‌آرمه انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفت. برای برآورد آسیب‌پذیری لرزه‌ای این ساختمانها به صورت تابعی از مشخصه‌های حرکت قوی زمین و پارامترهای طراحی از برآورد مقادیر شکنندگی لرزه‌ای تحلیلی استفاده شده است. برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه‌های مورد بررسی توسط نرم‌افزار *SAP 2000 V11*، تعداد ۲۰ جفت شتابنگاشت انتخاب شد. به عنوان معیار شکست، از دو معیار جابه‌جایی جانبی مندرج در نشریه *FEMA 356* برای دو سطح عملکرد *IO* و *Ls* و معیار جابه‌جایی مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از تحلیل غیرخطی برای هر یک از معیارهای شکست انتخابی منحنی‌های شکنندگی با فرض توزیع دو پارامتری لگاریتمی نرمال برای هر یک از ساختمانها برآورد و ترسیم می‌گردند. در بررسی نتایج، شکنندگی لرزه‌ای سازه مدارس با منحنی‌های مشابه مربوط به ساختمانهای مسکونی مقایسه شده است.

کلیدواژه‌ها: منحنی شکنندگی لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، ساختمان مدارس

۱- مقدمه

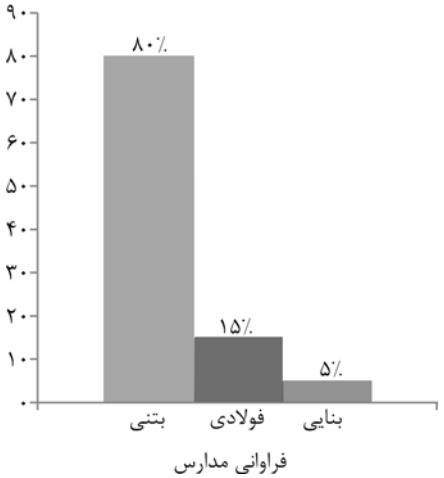
با توجه به این موضوع که در زلزله‌های گذشته به ساختمانهای جدید (طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های روز) هم خساراتی جدی وارد شده است، ضرورت بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمانهای موجود و از آن مهمتر ساختمانهای در حال ساخت در اثر زلزله‌های احتمالی دو چندان می‌گردد. کشور ایران و به تبع آن استان چهارمحال و بختیاری (شهرکرد) طبق اطلاعات و شواهد علمی یکی از مناطق با خطر بالای زلزله محسوب می‌شود. در کشور ما تقریباً به طور متوسط هر پنج سال یک بار یک زلزله با تبعات جانی و مالی زیاد را شاهد هستیم. ساختمان مدارس طبق گروه‌بندی ساختمانها بر حسب اهمیت عملکرد در استاندارد ۲۸۰۰ (مبنای طراحی لرزه‌ای ساختمانها در ایران) جزء مراکز با اهمیت زیاد دسته‌بندی شده‌اند. این موضوع با توجه به ارتباط با جان تعداد قابل‌توجهی از کودکان و نوجوانان نه تنها از نظر اهل فن، بلکه از منظر عموم نیز به طور کامل مقبول بوده است. با مطالعه دقیق و شناسایی وضعیت آسیب‌پذیری موردی اینگونه مراکز می‌توان تا حد مطلوب احتمال وقوع تلفات جانی و خسارات ناشی از زلزله‌های آینده را شناسایی و در رفع آن اقدام نمود. منحنی شکنندگی لرزه‌ای احتمال وقوع خسارت بر اساس یک اندیس خرابی را برای مقادیر مختلف شدت لرزه‌ای بیان می‌کند. این منحنی‌ها در برآورد سریع آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها و

میزان خطرپذیری لرزه‌ای پروژه‌ها استفاده فراگیری دارد. عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها در دستورالعملهای برآورد آسیب‌پذیری در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱]. از جمله ضوابط و دستورالعملهای بین‌المللی در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و روشهای بهسازی لرزه‌ای می‌توان به دستورالعملهای *FEMA* [۲] و *ATC* [۳] و در سطح ملی به دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود [۴] اشاره کرد. دیدگاه اصلی این دستورالعملها به طور کلی تحلیل و طراحی بر اساس عملکرد می‌باشد. در این رهیافت رفتار و عملکرد هدف سازه عبارت است از سطح رفتار لرزه‌ای مورد نظر از ساختمان که معمولاً با تعیین حداکثر پاسخ مجاز اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای سطح مشخصی از خطر لرزه‌ای بیان می‌شود. در این مطالعه، از این سطوح رفتار به عنوان معیاری برای تعریف شکست سازه استفاده شده است. طی سالهای اخیر پژوهشهایی به منظور برآورد شکنندگی لرزه‌ای انواع سازه‌ها در داخل و خارج از ایران صورت گرفته و مقالات بسیاری به چاپ رسیده است. از آن جمله می‌توان به بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پلها (بزرگراهی، چند دهانه و ....)، اعضای غیرسازه‌ای بلوکی شکل [۵] (تجهیزات بیمارستانها و ...) اشاره کرد. در طی این مطالعه شش ساختمان مدرسه با سازه و معماری متداول با اسکلت بتن‌آرمه و فولادی در مناطق مختلف شهرکرد که در سالهای اخیر مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم یا سوم طراحی گردیده‌اند، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای روشهای مختلفی وجود دارد که به نحوه محاسبه یا برآورد تقاضا و پاسخ سازه بستگی دارد. این پارامترها ممکن است، از تجارب میدانی، مطالعات آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی و یا تحلیل دینامیکی به دست آیند. در این تحقیق، از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی سازه‌ها استفاده شده است.

۲- فراوانی نوع سازه‌ای مدارس شهرکرد

طبق آمار دریافتی از دفتر فنی اداره کل نوسازی و تجهیز مدارس استان چهارمحال و بختیاری فراوانی تقریبی نوع سازه‌های مدارس شهرکرد مطابق نمودار (۱) می‌باشد.

در این مطالعه، از تیپ سازه‌های بتن‌آرمه و فولادی که دارای بیشترین فراوانی در شهر هستند، استفاده می‌گردد.



***نمودار (۱):** فراوانی نوع مدارس شهرکرد از نظر سازه‌ای.*

۳- مشخصات مدارس مورد بررسی

در این پژوهش، برای برآورد آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان مدارس شهرکرد به صورت موردی سه ساختمان با اسکلت بتن‌آرمه و سه ساختمان با اسکلت فولادی طبق مشخصات و کاربری‌های ذکر شده در جدول (۱) مورد بررسی قرار گرفت. پلان و تصویر هر یک از سازه‌های مورد بررسی در شکلهای (۱) تا (۶) مشاهده می‌شوند.

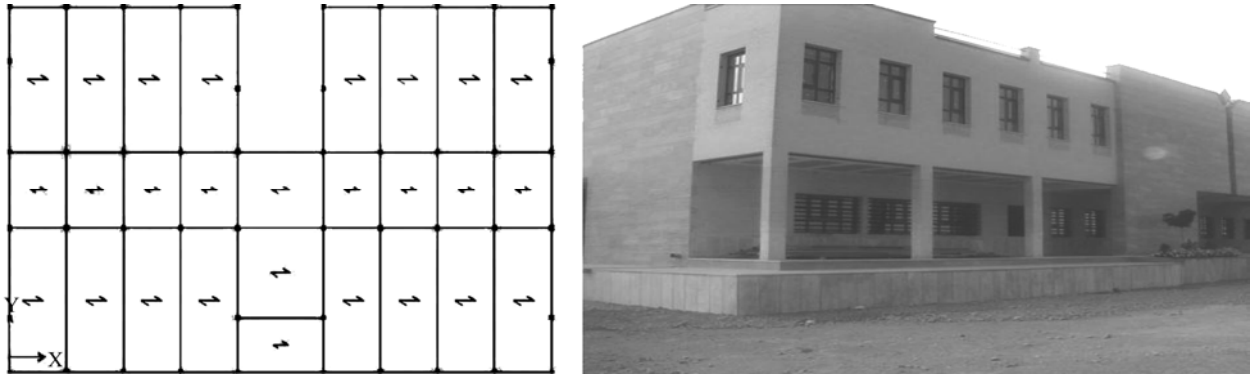
به دلیل وجود مشخصات مصالح مورد استفاده در سازه‌ها در دفترچه محاسبات و نقشه‌های اجرایی کلیه ساختمانهای مورد مطالعه، از این اطلاعات به عنوان مشخصات مورد استفاده در مدلسازی سازه‌های مورد بررسی در نرم‌افزار به کار گرفته شد.

۴- انتخاب رکوردهای زلزله

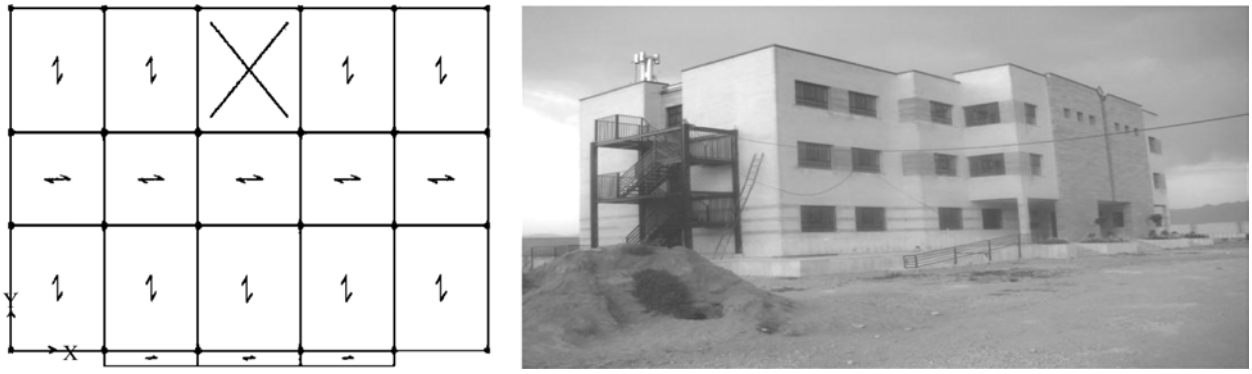
همان‌طور که ذکر شد، به منظور برآورد مقادیر شکنندگی لرزه‌ای از تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده شده و به این منظور انتخاب رکوردهای زلزله بسیار حائز اهمیت است. رکوردهای مورد استفاده در محاسبات در حالت کلی باید به خوبی منعکس‌کننده ویژگیهای چشمه زلزله، نحوه ساز وکار گسل، فاصله از گسل، بزرگا و ویژگیهای ساختگاهی باشند.

جدول (۱): مشخصات ساختمانهای مدارس مورد بررسی.

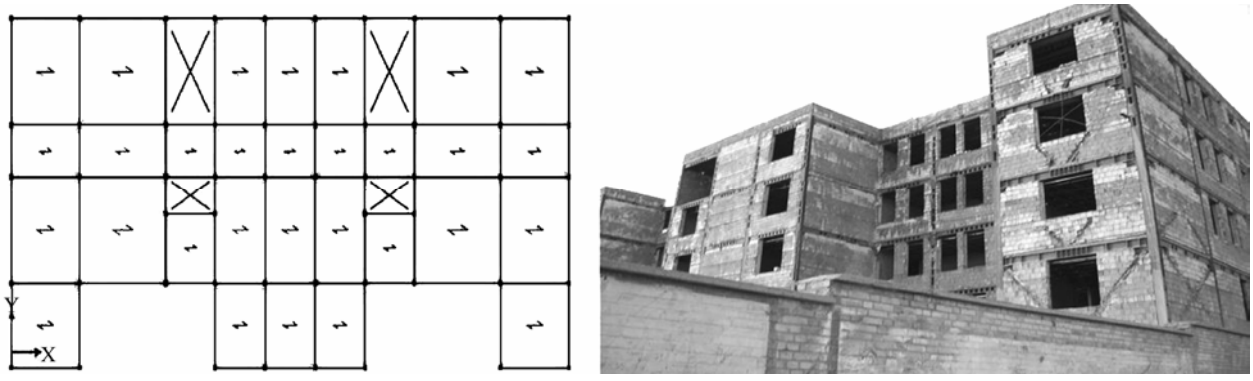
ردیف		نوع ساختمان	تعداد سقف	نوع خاک	آیین‌نامه طراحی	سال ساخت	ارتفاع (متر)	نامنظمی در پلان و ارتفاع	نوع سقف	نوع کاربری
۱	بتنی آرمه	قاب خمشی بتنی	۲ سقف	تیپ ۲	استاندارد۲۸۰۰	۱۳۸۵	۸/۱۵	ندارد	تیرچه و بلوک	آموزشی
۲		بتنی با دیوار برشی در دو جهت	۳ سقف	تیپ ۲	استاندارد۲۸۰۰	۱۳۸۵	۱۰/۸	ندارد	تیرچه و بلوک	رفاهی (خوابگاه)
۳		بتنی با دیوار برشی در دو جهت	۴ سقف	تیپ ۲	استاندارد۲۸۰۰	۱۳۸۷	۱۴/۴	ندارد	تیرچه و بلوک	آموزشی
۴	فولادی	اسکلت فلزی با مهاربند ضربدری	۵ سقف	تیپ ۲	استاندارد ۲۸۰۰	۱۳۸۳	۱۷/۲	ندارد	کامپوزیت	اداری
۵		اسکلت فلزی با مهاربند ضربدری	۳ سقف	تیپ ۲	استاندارد ۲۸۰۰	۱۳۸۶	۱۰/۸	ندارد	تیرچه و بلوک	آموزشی
۶		اسکلت فلزی با مهاربند ضربدری	۲ سقف	تیپ ۲	استاندارد ۲۸۰۰	۱۳۸۵	۸/۶	ندارد	کامپوزیت	آموزشی



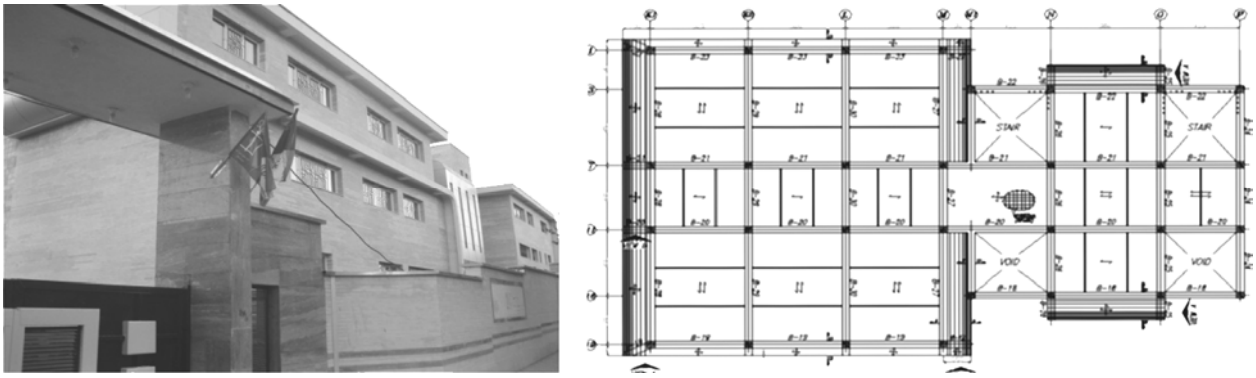
شکل (۱): پلان و نمای سازه دو طبقه فولادی.



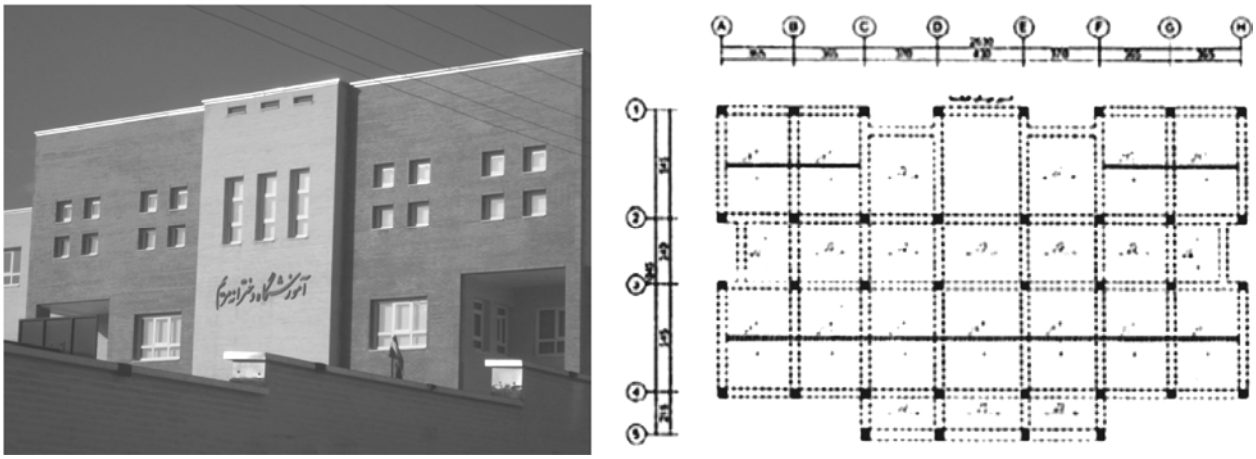
شکل (۲): پلان و نمای سازه سه طبقه فولادی.



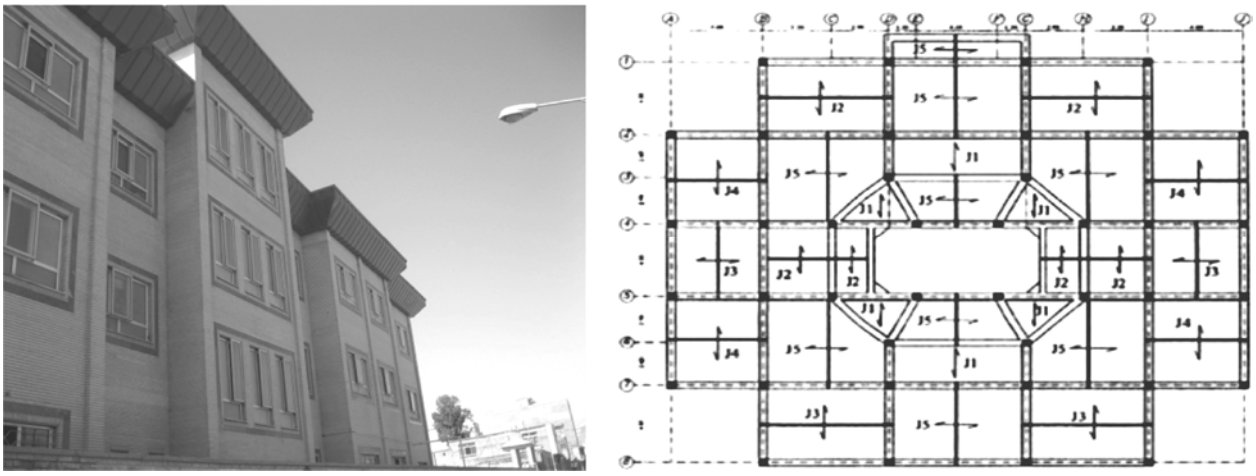
شکل (۳): پلان و نمای سازه پنج طبقه فولادی.



شکل (۴): پلان و نمای سازه چهار طبقه بتن‌آرمه.



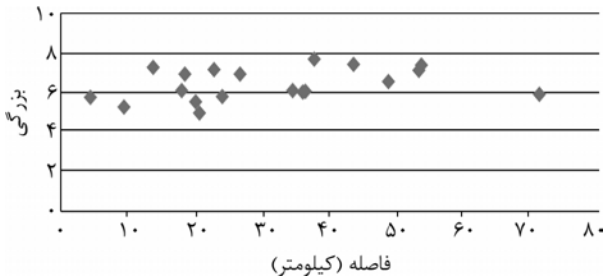
شکل (۵): پلان و نمای سازه دو طبقه بتن‌آرمه.



شکل (۶): پلان و نمای سازه سه طبقه بتن‌آرمه.

با توجه به توصیه شومی [۶]، تعداد ده تا بیست زلزله معمولاً دقت قابل‌قبولی را برای برآورد تقاضای لرزه‌ای نشان می‌دهند. در این تحقیق، بیست رکورد از رکوردهای زلزله‌های استخراج شده از وب سایت اینترنتی *PEER* [۷] با توجه به نوع خاک ساختگاه و فاصله از گسلهای منطقه انتخاب شدند که در جدول (۲) به مشخصات آنها اشاره شده است.

توزیع بزرگا و فواصل زلزله‌های انتخابی در شکل (۷) و جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۷): *توزیع بزرگا و فواصل زلزله‌های انتخابی.*

جدول (۲): *مشخصات رکوردهای به کار گرفته شده در تحلیل‌ها.*

ردیف	نام زلزله	بزرگا (g)		ایستگاه	فاصله از مرکز (کیلومتر)	M
		بزرگ	کوچک			
۱	هولیستر	۰/۱۳	۰/۰۴۹	San Juan Bautista	۹/۳۸	۵/۲
۲	فوریلی، ایتالیا	۰/۲۶	۰/۲۱۲	Forgario Cornino	۱۷/۹۶	۶/۱
۳	کویتی لک	۰/۴۳۴	۰/۳۱۶	Gilroy Array #6	۴/۳	۵/۷
۴	دره امپریال	۰/۲۰۴	۰/۱۱۱	Parachute Test Site	۴۸/۶۲	۶/۵
۵	کاپ‌مندوسینو	۰/۸۲۱	۰/۵۹۹	Rio Dell Overpass Ff	۲۲/۶۴	۷/۱
۶	لاندرز	۰/۲۸۴	۰/۲۷۴	Joshua Tree	۱۳/۶۷	۷/۳
۷	کوبه	۰/۸۲۱	۰/۵۹۹	Kjm, 000	۱۸/۲۷	۶/۹
۸	چی- چی، تایوان	۰/۱۸۳	۰/۱۶۳	Als, E (Cwb)	۳۷/۸۳	۷/۶
۹	کرن کانتری	۰/۱۷۸	۰/۱۵۶	Taft Lincoln School	۴۳/۴۹	۷/۴
۱۰	فوریلی، ایتالیا	۰/۱۱۲	۰/۰۹۳	Forgaria Cornino	۱۹/۹۷	۵/۵
۱۱	کویوتی لک	۰/۱۱۴	۰/۰۷۳	Sjb Overpass Bent	۲۳/۹۱	۵/۷
۱۲	انزا	۰/۰۹۷	۰/۰۹۲	Rancho De Anza	۲۰/۴۳	۴/۹
۱۳	پالم اسپرینگ	۰/۱۶۹	۰/۱۵۳	Cranston Forest Sta	۳۵/۸۸	۶
۱۴	لوما پریتا	۰/۲۴۴	۰/۲۴	Anderson Dam	۲۶/۵۷	۶/۹
۱۵	کاپ مندوسینو	۰/۱۷۸	۰/۱۵۴	Eureka - Myrtle & West	۵۳/۳۴	۷/۱
۱۶	کوکائیلی	۰/۲۱۸	۰/۱۴۹	Arcelik, 000	۵۳/۶۷	۷/۴
۱۷	نورثریج	۰/۴۳۳	۰/۳۰۱	Pacoima24088-Canyon	۱۹/۲۸	۶/۳
۱۸	پارک‌فیلد	۰/۰۶۳	۰/۰۵۹	Cdmg 1062 Cholame	۳۶/۱۸	۶/۱
۱۹	ترینیداد- آف‌شور	۰/۱۹۴	۰/۱۴۵	1498 Riodell Over Pass	۷۱/۲۴	۵/۹
۲۰	وایتر ناروز	۰/۲۶	-	Hollywood90009-Coldwater	۳۴/۴۸	۶

۵- معیار شکست

در این مطالعه، از بین مقادیر حدی مجاز پاسخ سازه مندرج در ضوابط طراحی و ارزیابی لرزه‌ای، معیارهای شکست انتخاب شده‌اند. یکی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری برای ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها، حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات است. آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، این عامل را در ارزیابی پاسخ لرزه‌ای ساختمانها در نظر می‌گیرند. دستورالعمل *FEMA 356* برای هر یک از سطوح عملکرد یک مقدار حداکثر برای تغییرمکان نسبی طبقات مشخص نموده و برای این مبنا مقادیر مربوط به سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه ($I.O$) و ایمنی جانی ($L.S$) در این مطالعه به عنوان معیارهای شکست در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر آن معیار حداکثر جابه‌جایی نسبی واقعی مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۸] نیز معیار دیگری برای ارزیابی و محاسبه شکنندگی لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. بر این اساس با محاسبه

جابه‌جایی نسبی جانبی طبقه و مقایسه آن با مقادیر حدی مجاز برای سطوح عملکرد مورد بررسی مطابق با معیارهای یاد شده که در جدول (۳) قابل مشاهده هستند، احتمال فراگذشت از سطح خسارت مد نظر (شکست) را بررسی می‌نماییم. منظور از شکست یا خرابی زمانی است که پارامتر تقاضای مهندسی مورد نظر از مقدار حدی از پیش تعیین‌شده‌ای که منعکس‌کننده سطح عملکرد موردنظر است، تجاوز نماید.

جدول (۳): *مقادیر حداکثر تغییرمکان نسبی جانبی طبقات.*

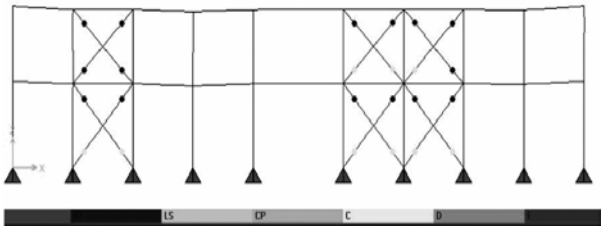
ترازهای عملکرد		تغییرمکان نسبی طبقات (٪)		
		قاب خمشی بتن‌آرمه	دیوار برشی بتن‌آرمه	اسکلت فلزی با مهاربند هم‌محور ضربدری
قابلیت استفاده بی‌وقفه (I.O)		۱	۰/۵	۰/۵
ایمنی جانی (L.S)		۲	۱	۱/۵
آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران	T < ۰/۷ ثانیه	۲/۵	۲/۵	۲/۵
	T > ۰/۷ ثانیه	۲	۲	۲

T: زمان تناوب ساختمان بر حسب ثانیه

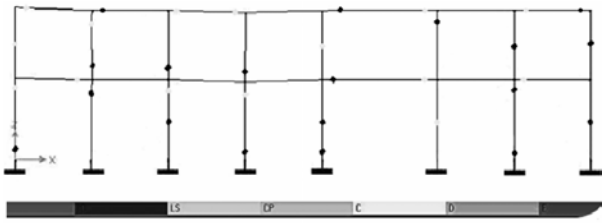
۶- مدلسازی و تحلیل دینامیکی غیرخطی

به منظور برآورد پارامتر تقاضای مهندسی از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تحت اثر رکوردهای زلزله یا دامنه افزایش یابنده استفاده می‌شود. برای مدلسازی و تحلیل از نرم‌افزار *SAP2000-V11* استفاده شده است. با تحلیل تحت هر شتابنگاشت برای به دست آوردن تغییرشکل نسبی سازه با انتخاب یکی از گره‌های نزدیک به مرکز جرم مقدار پاسخ جابه‌جایی محاسبه و با مقادیر حدی مقایسه می‌شوند.

یکی از معیارهای خرابی برای ساختمانها در روشهای غیرخطی تشکیل مفاصل پلاستیک است. میزان چرخش مفاصل در سطح عملکردهای مختلف بر اساس ضوابط موجود مقادیر معینی هستند و باید توجه داشت که دوران پلاستیک مهمترین عامل ایجاد تغییرمکانهای ماندگار در عضو می‌باشد. در برخی نرم‌افزارهای مهندسی پاسخ غیرخطی سازه به کمک تعریف مفاصل پلاستیک در نقاط مشخصی تعریف شده و در عمل نحوه پاسخ و رفتار غیرخطی به‌گونه‌ای به سازه دیکته می‌شود. این امر در کنار وارد نمودن تقریبهایی در کار، فرآیند تحلیل غیرخطی را ساده‌سازی و مقدور می‌نماید [۹]. در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای برای روشهای تحلیل غیرخطی پارامترهای مدلسازی و معیار کمّی پذیرش برای هر عضو از سازه مقادیر مشخصی ارائه گردیده و با در نظر گرفتن نوع عضو و سطح عملکرد آن مقدار متناسب برای تغییرمکان و دوران مفاصل مشخص شده است. به این منظور، باید طولی برای مفاصل پلاستیک در نظر گرفته شود که کرنش‌های پلاستیک یا انحنای پلاستیک روی آن جمع زده شوند. در نشریات *ATC-40* و *FEMA 356* راهنماییهایی برای برآورد این طول ارائه شده است. طول این مفاصل معمولاً نسبتی از طول عضو و تابعی از عمق مقطع می‌باشد که برای مفاصل خمشی با دقت خوبی صادق است. همچنین این طول بستگی به بار اعمالی، شرایط مرزی و هندسه مقطع دارد. در این تحقیق، در مدلسازی جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی ساختمانهای با اسکلت بتن‌آرمه، مفاصل *P-M-M* در ستونها و دیوارهای برشی و مفاصل خمشی در تیرها در فاصله ۵ درصد طول عضو از بر تکیه‌گاه با فرض فاصله تنگها کمتر یا مساوی *d/3* (*d*، ارتفاع مؤثر مقطع تیر) و علاوه بر آن برای اعضای با شکل‌پذیری متوسط و زیاد، مقاومت تعیین شده توسط تنگها حداقل برابر سه چهارم برش طراحی باشد، مفصل برشی در وسط ستونها و دیوارهای برشی اعمال می‌شود. همچنین در مدلسازی ساختمانهای فولادی به دلیل اینکه هر سه سازه مورد بررسی دارای اسکلت سازهای قاب ساده با اتصالات مفصلی و سیستم بار بر جانبی مهاربند قطری ضربدری می‌باشند، مفاصل از نوع بار محوری *P* طبق مشخصات موجود در نشریه ۳۶۰ تعریف می‌شود [۴]. همچنین چون بار محوری در تمام طول مهاربند ثابت می‌باشد، در هر قسمت از مهاربند (وسط، انتها و ...) می‌توان مفاصل را تعریف و اختصاص داد. در این تحقیق، مفاصل در دو انتهای هر یک از مهاربندها تعریف شده است. شکل (۸) نشان‌دهنده مفاصل خمیری ایجاد شده در مدل سازه‌ای دو طبقه فولادی و شکل (۹) نشان‌دهنده مفاصل خمیری ایجاد شده در مدل سازه‌ای دو طبقه بتن‌آرمه، پس از انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار می‌باشد.



شکل (۸): *نمایش تشکیل مفاصل پلاستیک سازه دو طبقه فولادی در برنامه.*



شکل (۹): *نمایش تشکیل مفاصل پلاستیک سازه دو طبقه بتن‌آرمه در برنامه.*

۷- محاسبه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای

منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای، احتمال تجمعی فراگذشت پارامترهای تقاضای مهندسی مورد نظر در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای از مقادیر منتخب به عنوان معیار شکست، به ازای مقادیر مختلف شدت لرزه‌ای هستند. بر این مبنا منظور از شکست یا خرابی زمانی است که پارامتر تقاضای مهندسی مورد نظر از مقدار حدی از پیش تعیین-شده‌ای که منعکس‌کننده سطح عملکرد مورد نظر است تجاوز نماید. در این تحقیق، منحنی‌های شکنندگی بر حسب معیار شدت *PGA* (حداکثر شتاب زمین) به دست آمده‌اند. همچنین منحنی‌های شکنندگی به صورت تابع توزیع احتمالاتی دو متغیره فرض شده و بر اساس فرض احتمال تجمعی رخداد پارامتر تقاضای مهندسی بزرگتر یا مساوی سطح آسیب مورد نظر به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$F(x)=\Phi\left[\frac{1}{\beta}\left(\ln(\frac{x}{\xi})\right)\right] \qquad (۱)$$

در این فرمول اگر x همان *PGA* در نظر گرفته شود، β را انحراف معیار *ln PGA* یا پارامترشکل (*shape*) و ξ *ln* را میانگین *ln PGA* یا پارامتر مقیاس (*scale*) می‌نامیم. پس از تحلیل و تعیین پارامترهای توزیع لوگ نرمال منحنی‌های شکنندگی برای هر سه ساختمان بر مبنای سطوح عملکرد استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی در نشریه *FEMA 356* و استاندارد ۲۸۰۰ (که در اینجا هم مبناء سطح عملکرد ایمنی جانی می‌باشد) محاسبه و ترسیم می‌شوند. در انتها، به منظور محاسبه منحنی‌های شکنندگی به وسیله مقایسه مقادیر به دست آمده برای تغییرمکان جانبی نسبی طبقات سازه‌های مورد بررسی با مقادیر حدی مجاز آن در سطوح عملکرد مورد نظر مندرج در آیین‌نامه‌های مذکور، احتمال رسیدن به سطح خسارت مورد نظر و یا عبور از آن به دست می‌آید. پارامترهای اصلی (ξ و β)، جهت محاسبه منحنی‌های شکنندگی سازه‌های مدارس مورد بررسی در جداول (۴) و (۵) آمده است.

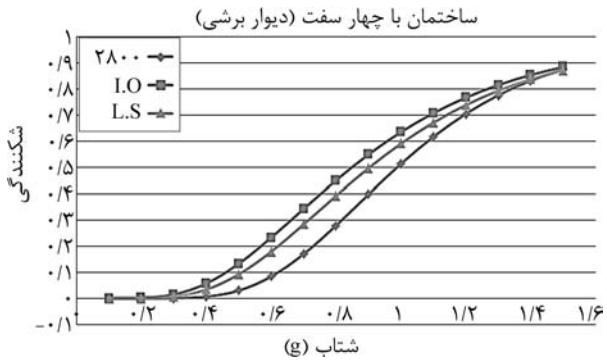
جدول (۴): *پارامترهای اصلی برای محاسبه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمانهای با اسکلت بتن‌آرمه.*

ساختمانهای با اسکلت بتن‌آرمه		I.O	L.S	۲۸۰۰
دو طبقه قاب خمشی	ξ	۰/۹۴۱	۱/۰۴	۱/۰۸
	β	۰/۴۴۳	۰/۳۳۹	۰/۲۹
سه طبقه دیوار برشی	ξ	۰/۹۳۵	۰/۹۹	۱/۰۲
	β	۰/۴۴۶	۰/۳۷۴	۰/۳۴۳
چهار طبقه دیوار برشی با احتساب زیرزمین	ξ	۰/۹۰۹	۰/۹۷۵	۱/۰۵
	β	۰/۴۶۶	۰/۳۸۷	۰/۳۲۱

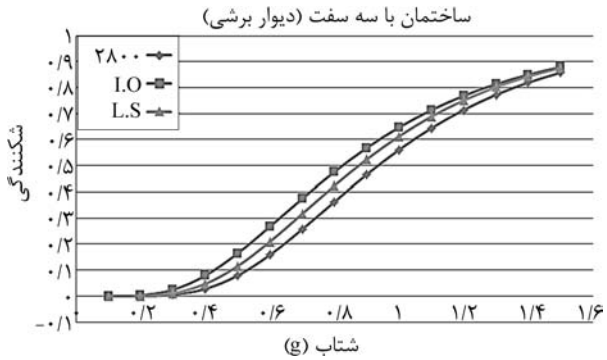
جدول (۵): *پارامترهای اصلی برای محاسبه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمانهای با اسکلت فولادی.*

سطح عملکرد	I.O دستورالعمل FEMA356	L.S دستورالعمل FEMA356	استاندارد ۲۸۰۰ ایران
مدرسه دو طبقه	β = ۰/۶۲۷ ξ = ۰/۷۴۳	β = ۰/۵۱۱ ξ = ۰/۸۶۹	β = ۰/۴۲۲ ξ = ۰/۹۵۷
مدرسه سه طبقه	β = ۰/۷۰۵ ξ = ۰/۶۷۴	β = ۰/۶۲۱ ξ = ۰/۷۴۱	β = ۰/۵۹ ξ = ۰/۷۵۶
مدرسه پنج طبقه	β = ۰/۶۷۳ ξ = ۰/۶۹۷	β = ۰/۵۹۳ ξ = ۰/۷۷۲	β = ۰/۵۳۳ ξ = ۰/۸۲۲

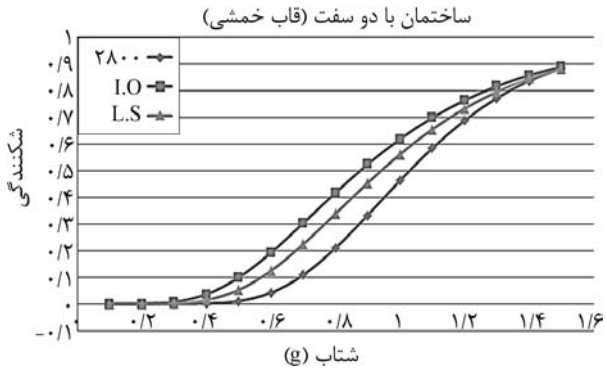
همان طور که اشاره شد، استاندارد ۲۸۰۰ ایران بر خلاف دستورالعمل *FEMA 356* فقط بر اساس زمان تناوب سازه و بدون توجه به نوع آن، حداکثر مقادیر حدی مجاز برای تغییرشکل نسبی جانبی طبقات را ارائه نموده است. اشکال (۱۰) تا (۱۵) نشان‌دهنده منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای محاسبه شده برای هر یک از سازه‌های مورد بررسی در سطوح عملکرد سه گانه ذکر شده، می‌باشند.



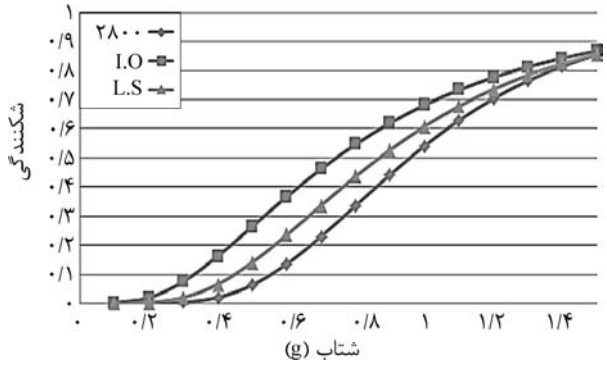
شکل (۱۰): منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمان چهار طبقه بتن‌آرمه.



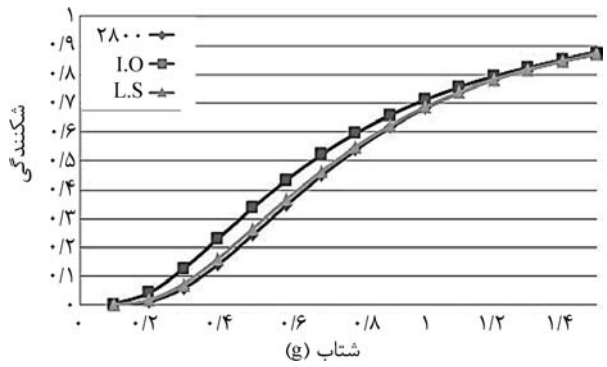
شکل (۱۱): منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمان سه طبقه بتن‌آرمه.



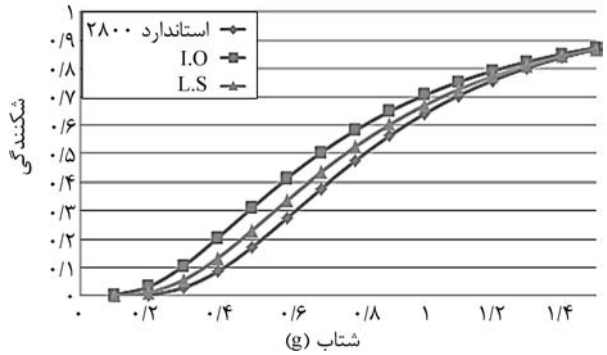
شکل (۱۲): منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمان دو طبقه بتن‌آرمه.



شکل (۱۳): منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمان دو طبقه فولادی.



شکل (۱۴): منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمان سه طبقه فولادی.



شکل (۱۵): منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای ساختمان پنج طبقه فولادی.

همان‌طور که انتظار می‌رود، با توجه به مقادیر مجاز معیار شکست انتخابی در کلیه سازه‌های مورد بررسی، شکست در سطح عملکرد *I.O* زودتر از دو سطح عملکرد مورد بررسی دیگر شروع می‌شود.

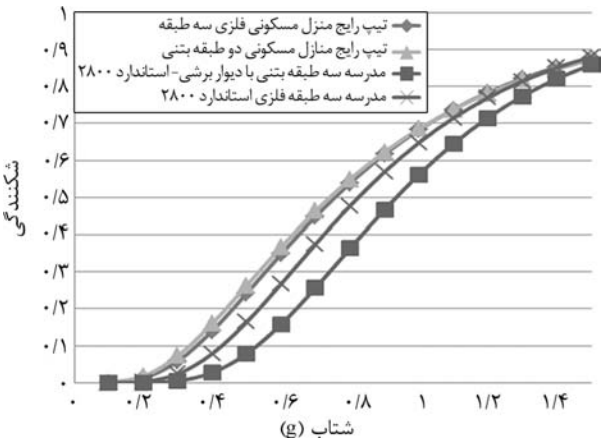
سطح عملکرد استاندارد ۲۸۰۰ ایران با هدف عملکرد ایمنی جانی تعریف شده است. در نتیجه در نگاه اول انتظار می‌رود منحنی‌های این سطح عملکرد و سطح عملکرد *L.S* (ایمنی جانی) از *FEMA 356* بر هم منطبق گردند؛ ولی همان طور که مشاهده می‌شود در هیچ یک از سازه‌های مورد بررسی این امر صورت نگرفته است. دلیل این امر تفاوت در مقادیر معیار شکست انتخابی از استاندارد ۲۸۰۰ ایران و *FEMA 356* در سطح عملکرد مورد نظر می‌باشد. البته این نکته نیز باید مد نظر قرار گرفته شود که استاندارد ۲۸۰۰ ایران فقط برای این سطح عملکرد و بدون در نظر گرفتن سیستم سازه‌ای مقدار مجازی جهت تغییرمکان جانبی نسبی طبقات در نظر گرفته است، در حالی که در

آیین‌نامه‌هایی همچون *FEMA* و گزارشهای *ATC* این مقدار بستگی به نوع سازه و سیستم باربر جانبی ساختمان مورد بررسی و سطح عملکرد مد نظر دارد.

با توجه به نمودارهای به دست آمده مشاهده می‌شود، برای هر معیار شکست معین، منحنی‌ها به سمت راست تمایل پیدا کنند و شیب نمودار برای رسیدن به خرابی کامل کمتر باشد سازه دارای مقاومت لرزه‌ای بالاتری است.

۸- مقایسه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای مدارس مورد بررسی در سطح عملکرد استاندارد ۲۸۰۰ با ساختمانهای متداول مسکونی شهرکرد

با استفاده از اطلاعات پایه به دست آمده در مراجع [۱۰-۱۱] و همچنین با استفاده از فرمول تابع تجمعی لگاریتمی استاندارد نرمال ذکر شده در مطالب قبل منحنی‌های شکنندگی ساختمانهای بتن‌آرمه با نمونه‌ای از منازل مسکونی بتن‌آرمه، بررسی شده در این مراجع در سطح عملکرد استاندارد ۲۸۰۰ ایران مقایسه گردید. شکل (۱۶) نمودارهای مقایسه شده را نمایش می‌دهد.

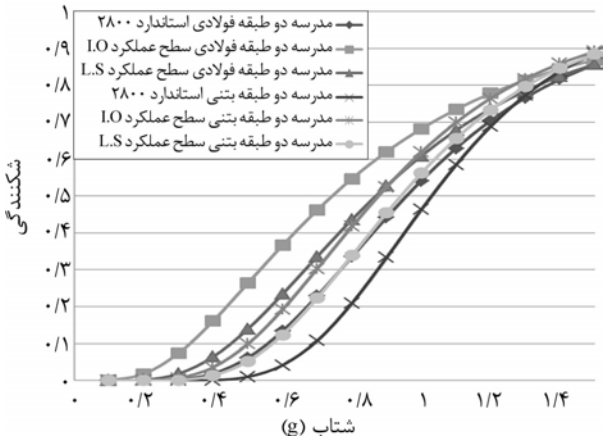


شکل (۱۶): *مقایسه موردی منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای مدارس فولادی مورد بررسی با منازل متداول مسکونی با اسکلت فولادی.*

همان‌طور که انتظار می‌رود، ساختمانهای مدارس در هنگام وقوع زلزله‌های احتمالی عملکرد بهتری نسبت به منازل مسکونی با اسکلت مشابه از خود نشان داده و شکست در اعضای سازه‌ای دیرتر شروع می‌شود.

۹- مقایسه موردی منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای مدارس دو طبقه فولادی و بتن‌آرمه در سطوح عملکرد سه‌گانه

در شکل (۱۷)، با مقایسه منحنی‌های شکنندگی این مدارس با هم، متوجه می‌شویم که مدارس با اسکلت بتن‌آرمه در این مطالعه، در سطوح عملکرد مشابه و هنگام وقوع زلزله‌های احتمالی عملکرد مطلوبتری از خود نشان می‌دهند، البته باید به این نکته توجه داشت که اکثریت سازه‌های مدارس سطح شهرکرد دارای اسکلت بتن‌آرمه می‌باشند.



شکل (۱۷): *مقایسه موردی منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای مدارس دو طبقه فولادی و بتن‌آرمه.*

۱۰- نتیجه‌گیری

منحنی‌های شکنندگی بدون شک یکی از مفیدترین و پرکاربردترین ابزارهای تعیین احتمالاتی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله می‌باشند. در این تحقیق، منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای برای ساختمانهای مدارس مورد بررسی قرار گرفت. معیارهای شکست بر اساس دو سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه (*I.O*) و ایمنی جانی (*L.S*) مندرج در دستورالعمل *FEMA 356* و سطح عملکرد موجود در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم انتخاب شدند. منحنی‌ها بر اساس اثر ۲۰ رکورد زلزله مختلف که حتی‌الامکان با نوع خاک و شرایط دیگر ساختگاه مورد نظر مشابه هستند، محاسبه و رسم گردیده‌اند. از این منحنی‌ها می‌توان به منظور برآورد کلی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌های مدارس مورد بررسی استفاده کرد. همچنین از میان ساختمانهای بتنی مورد مطالعه از

طریق مقایسه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای در هر یک از سطوح عملکرد مورد بررسی، ساختمان سه طبقه (خوابگاه ۲۰۰ نفره) به دلیل دارا بودن ضریب اهمیت عملکرد پایینتر در هنگام وقوع زلزله‌های احتمالی مشابه، عملکرد نامناسبی از خود نشان داده و شکست در این ساختمان نسبت به دو ساختمان دیگر مورد مطالعه محتمل‌تر است. همچنین با مقایسه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای مدارس با اسکلت فولادی مشاهده می‌گردد که احتمال وقوع شکست در مدرسه دو طبقه و پنج طبقه (مدرسه پنج طبقه در سال ۸۳، یعنی قبل از ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ طراحی گردیده) نسبت به مدرسه سه طبقه کمتر بوده و این اختلاف به عوامل متعددی بستگی دارد. با بررسی ابعاد مهاربندهای به کار رفته در ساختمانهای دو و پنج طبقه مشخص شده که مهاربندها در مقایسه با ضوابط طراحی با ابعاد بیشتری در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است به دلیل اینکه نتایج به دست آمده، حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مدل سازه‌ای ساخته شده از روی نقشه‌های اجرایی ساختمانهای مورد مطالعه می‌باشند، حتی رعایت نشدن نکات جزئی اجرایی در طی ساخت ممکن است از مقاومت این ساختمانها در هنگام وقوع زلزله‌های احتمالی بکاهد.

۱۱- مراجع

۱. معرفت، محمدصادق، خان‌محمدی، محمد و زاهدی، مزدک (۱۳۸۷). آنالیز شکنندگی لرزه‌ای برای ساختمانهای بتن مسلح متداول، *چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران*، دانشگاه تهران.

2. FEMA 356 prestandardand commentary for the seismic rehabilitation of buildings (2000). Federal Emergency Management Agency.

3. ATC-40 Report (1995). Performance based seismic engineering of buildings, Structural Engineers Association of California, Sacramento, CA.

۴. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود، نشریه ۳۶۰ معاونت برنامه‌ریزی.

۵. شهبازی، ولی (۱۳۸۸). *ترسیم منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای برای تجهیزات بلوکی شکل*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

6. Shome, N. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures, Ph.D. dissertation, Stanford University.

7. PEER (Pacific Earthquake Engineering Research), http://www.peer.com.

۸. استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم (۱۳۸۴). مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

۹. تقی‌نژاد، رامین (۱۳۸۴). *طراحی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس عملکرد*، نشر کتب دانشگاهی.

۱۰. براتی، آرمین (۱۳۸۸). *توسعه منحنی‌های شکنندگی برای ساختمانهای بتنی مسکونی*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد.

۱۱. باقری، ابراهیم (۱۳۸۸). *آسیب‌پذیری لرزه‌ای منازل مسکونی با اسکلت فلزی به روش احتمالاتی*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد.