



سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد  
۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳  
هتل المپیک - تهران



## ارزیابی احتمالاتی قاب خمشی فولادی بر پایه فولاد St37 و St52 تحت زلزله‌های نزدیک گسل

نوید سیاه پلو\*<sup>۱</sup>، سیدعبدالنبی رضوی<sup>۲</sup>، نوید صالحی ریحانی<sup>۳</sup>

### چکیده

این مقاله به مقایسه عملکرد آرایش‌های فولاد St37 و St52 در تیر و ستون‌های قاب خمشی فولادی در برابر زلزله‌های نزدیک گسل می‌پردازد. به منظور توسعه منحنی شکست و محاسبه احتمال گذر از سطوح خطر معین، مدل‌های دو بعدی قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط ۶ و ۱۲ طبقه در نرم‌افزار ETABS2020 طراحی و سپس تحت ۷ رکورد زلزله نزدیک گسل در نرم‌افزار OpenSEES تحلیل دینامیکی فزاینده‌ای انجام شد. در ادامه و براساس حالت‌های حدی خسارت HAZUS، منحنی‌های شکنندگی استخراج شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فولاد St37 در اعضای سازه‌ای گزینه‌ای مناسب از منظر سطوح عملکردی طبق دستورالعمل HAZUS است بنحوی که متناظر با کلیه حالت‌های حدی خسارت و برای یک شتاب طیفی ثابت، احتمال شکست کمتری را نسبت به سایر آرایش فولادهای مصرفی دارد. علاوه بر این، با افزایش ارتفاع سازه، تأثیر استفاده از فولاد St52 مثبت‌تر می‌شود. به‌طور کلی، این تحقیق بر اهمیت ارزیابی رفتار فولادهای پرمقاومت در طراحی و تحلیل سازه‌های فولادی در برابر زلزله‌های نزدیک گسل تأکید دارد.

### واژگان کلیدی:

فولاد ST37، فولاد ST52، قاب خمشی فولادی، زلزله‌های نزدیک گسل، منحنی‌های شکنندگی، تحلیل دینامیکی فزاینده

### مقدمه

یکی از موضوعاتی که در چند سال اخیر به آن توجه ویژه شده است، نوع رکورد زلزله از نظر فاصله مرکز تا ساخت گاه است. در این حالت دودسته زلزله نزدیک و دور از گسل قابل تفکیک و طبقه‌بندی است. بیشتر مطالعات پیشین بر زلزله‌های دور از گسل تمرکز داشته‌اند. در این زلزله‌ها به دلیل محتوای فرکانسی قابل توجه، انرژی زلزله در زمان طولانی‌تری به‌صورت تجمعی به سازه وارد می‌شود. پس موضوع خستگی سیکل کم و خسارت‌های تجمعی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در مقابل چنانچه زلزله نزدیک

۱. گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاددانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران (\*نویسنده مسئول [siahpolo@acecr.ac.ir](mailto:siahpolo@acecr.ac.ir))

۲. گروه مهندسی عمران، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

۳. گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاددانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران



گسل باشد، مقادیر قابل توجهی انرژی زلزله در یک زمان کوتاه بر سازه وارد می شود؛ بنابراین سازه فرصت کافی برای عکس العمل به چنین ارتعاشی را ندارد [۱]. همین مسئله باعث می شود تقاضای نیرو و تغییر مکان به مراتب بیشتر از زلزله های دور باشد. یک مفهوم جدی در زلزله نزدیک گسل، ناحیه دارای آثار جهت پذیری پیش رونده است منظور منطقه ای است که در آن راستای حرکت گسل به سمت ساخت گاه بوده و سرعت انتشار گسلش در آن ناحیه نزدیک به سرعت موج برشی است. در چنین وضعیتی ننگاشت سرعت و برخی موارد شتاب ننگاشت دارای یک پالس مشهود با پریود طولانی و دامنه بزرگ است [۲]. باید دانست که از جمله مهم ترین ویژگی های رکوردهای نزدیک گسل به ویژه هنگامی که دربرگیرنده اثرات جهت پذیری پیشرو نیز باشند، پالس هایی با پریود بلند و دامنه بزرگ است که در ابتدای تاریخچه زمانی آن ها پدیدار می گردند. این یک مشخصه مهم در تفاوت گذاری میان این گونه رکوردها با رکوردهای دور از گسل است [۳].

منحنی های شکنندگی ابزار مفیدی برای برآورد خطر آفرینی زیرساخت های شهری می باشند. این منحنی ها احتمال خرابی را برای سطوح مختلف شدت زلزله نشان می دهند. به کمک این منحنی ها می توان با تعیین میزان آسیب پذیری سازه ها آنها را برای مقاوم سازی اولویت بندی کرد. همچنین مؤسسات مدیریتی دولتی و ادارات بیمه که عهده دار برآورد خسارت بعد از زلزله هستند می توانند از این منحنی ها بهره بگیرند. در مورد تاریخچه مطالعاتی درباره منحنی های شکنندگی باید اشاره کرد رسم و تولید منحنی های شکنندگی از سازه های تأسیسات هسته ای آغاز شد، چرا که این سازه ها جزء سازه های بسیار مهم و آسیب دیدگی آنها در هنگام زلزله بسیار خطرناک است. می توان گفت که بعد از زمین لرزه نورث ریج (۱۹۹۴) توجه بیشتری به تخمین میزان خسارت سازه ها شد، و مهندسی توجیه بیشتری به پیش بینی میزان خسارت مالی سازه ها در زلزله های شدید نشان دادند [۴].

رفتار لرزه ای یک سیستم باربر جانبی متناظر با نوع فولاد مصرفی اعم از St37 و St52 در یک ساختمان، هندسه سازه، نوع سیستم باربر جانبی و نوع زلزله از لحاظ فاصله با گسل، متفاوت است. در این بین موضوعی که کمتر مورد توجه قرار گرفته است رفتار و عملکرد لرزه ای قاب خمشی با آرایش های مختلف کاربرد فولاد St37 و St52 در برابر زلزله نزدیک گسل است [۵]. به عبارت ساده تر همواره این سؤال مطرح است که از بین آرایش های مختلف این فولادها در تیر و ستون سیستم قاب خمشی فولادی متوسط که بر اساس ضوابط طراحی لرزه ای مبحث ۱۰ طراحی شده اند و در طراحی آنها کلیه ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴ رعایت شده است، کدام یک عملکرد مناسب تری را در برابر زلزله های نزدیک گسل خواهند داشت. یکی دیگر از موضوعاتی که می تواند در تشخیص تأثیر نوع فولاد بر پاسخ غیرخطی سازه در برابر زلزله تأثیرگذار باشد، به کارگیری منحنی شکست برای سطوح مختلف شکل پذیری است [۶]. در این بین تأثیر عدم قطعیت های مختلفی قابل طرح است. پس می توان گفت بررسی و ارزیابی تاریخچه مطالعات پیشین نشان می دهد هیچ گونه مطالعه جامعی برای مقایسه عملکرد انواع آرایش های استفاده از فولاد St37 و St52 در تیر و ستون های قاب خمشی فولادی در برابر زلزله های نزدیک گسل با رویکرد توسعه منحنی شکست و محاسبه احتمال فرا گذشت از یک سطح خطر معین وجود ندارد.

در این مقاله دو دسته قاب ۶ و ۱۲ طبقه از سیستم قاب خمشی فولادی متوسط بر اساس ارتفاع و آرایش مختلف مصالح فولادی تیر و ستون مورد مطالعه و سطح فروریزش آنها تحت زلزله های نزدیک گسل مورد مقایسه قرار گرفته است تا بتوان با توجه به شرایط، مثلاً تعداد طبقات، مناسب ترین نوع آرایش تیر و ستون بر اساس استفاده از مصالح فولادی St37 و St52 را در بین سازه های در نظر گرفته شده و برای ساختمان مورد نظر انتخاب و اجرا کرد. در واقع نوآوری این مقاله در نظر گرفتن آرایش های متفاوت تیر و ستون



## سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳

هتل المپیک - تهران



بر اساس استفاده از مصالح St37 و St52 و مقایسه آن‌ها در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد. در واقع می‌توان به این صورت بیان کرد که چندین حالت برای مصالح تیر و ستون با استفاده از مصالح St37 و St52 در نظر گرفته می‌شود. برای در نظر گرفتن این آرایش چندین آرایش تیر و ستون در نظر گرفته شده و سپس از بین این تعداد سازه‌ها و آرایش‌های مورد نظر مناسب‌ترین حالت با استفاده از تحلیل IDA و بررسی نتایج مربوط به منحنی‌های شکنندگی انتخاب خواهد شد.

### مدل‌های سازه‌ای

در این تحقیق مدل‌ها به صورت صفحه‌ای (دو بعدی) منظم در ارتفاع می‌باشند. همچنین عرض تمامی دهانه‌های قاب ۵ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر در نظر گرفته شد. قاب از نوع قاب خمشی فولادی متوسط انتخاب می‌گردد. جرم کلیه طبقات با هم برابر در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه جرم لرزه‌ای از توصیه‌های موجود در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای استفاده شده به نحوی که جرم مرده لرزه‌ای مجموع کل جرم مرده بعلاوه درصدی از جرم زنده طبقه در نظر گرفته می‌شود. درصد مشارکت بار زنده با فرض کاربری مسکونی برای کلیه مدل‌ها و به استناد مقادیر پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم برابر ۲۰٪ فرض خواهد شد. بار مرده کلیه طبقات (جهت بارگذاری تیرها) ۲۳۵۰ کیلوگرم بر متر و بار زنده ۵۰۰ کیلوگرم بر متر فرض می‌شود. فرض خواهد شد کلیه مدل‌های مقاله در منطقه با خطر لرزه‌خیزی زیاد مطابق طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم قرار دارند. خاک محل احداث مطابق طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم از نوع خاک III در نظر گرفته می‌شود. برای بارگذاری قاب‌ها از مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۲ استفاده می‌شود. در نرم‌افزار ایتبس طراحی قاب‌های فولادی بر اساس ضوابط طراحی لرزه‌ای مندرج در مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۹۲ و به روش LRFD با رعایت کلیه جزئیات طراحی لرزه‌ای) انجام می‌گیرد. برای تجلیل و طراحی حرفه‌ای ساختمان‌ها از نرم‌افزار ETABS2020 استفاده می‌گردد. برای تحلیل قاب‌ها در نرم‌افزار ETABS از تحلیل استاتیکی معادل استفاده می‌شود. اتصال ستون به فونداسیون به صورت گیردار فرض شده و ستون در تمامی طبقات به شکل پیوسته مدل‌سازی می‌شود. جنس فولاد مورد استفاده در مدل‌سازی، St37 و St52 است که تنش تسلیم به ترتیب برابر ۲۴۰۰ و ۳۶۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته می‌شود. برای تحلیل استاتیکی معادل کلیه قاب‌ها از الگوی بارگذاری جانبی استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم استفاده می‌شود. برای تیرها از مقطع IPE و تیرورق تک و برای ستون‌ها از BOX با رعایت ضوابط فشردگی لرزه‌ای استفاده می‌شود. در تحلیل در برنامه ایتبس، اثرات P- $\Delta$  و P- $\delta$  اعضا در نظر گرفته می‌شوند و از اثرات اندرکنش بین خاک و سازه صرف نظر می‌شود.

### شتاب‌نگاشت‌ها و شاخص شدت طیفی

به منظور انجام تحلیل دینامیکی از ۷ رکورد زلزله‌های نزدیک گسل دارای پالس استفاده می‌شود. نام و مشخصات رکوردها در جدول ۱ ارائه شده است. در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها معیارهای پیشنهاد شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش ۴ رعایت می‌شود. تمام شتاب‌نگاشت‌ها از پایگاه Peer انتخاب می‌گردد. شتاب‌نگاشت‌های دانلود شده مربوط به Femap695 می‌باشد. جهت تحلیل IDA از ۷



# سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران

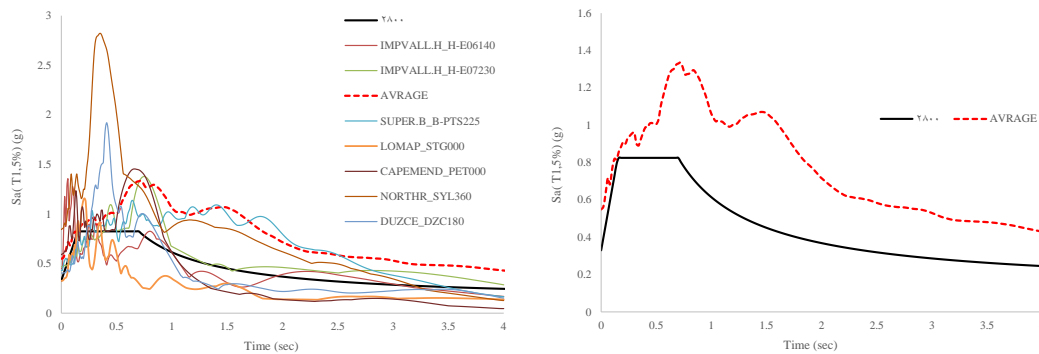


رکورد زلزله نزدیک گسل استفاده شد. جهت به دست آوردن مقادیر شتاب طیفی متناظر با زمان تناوب مود اول سازه، ابتدا طیف الاستیک رکوردهای انتخابی ترسیم شد که در اشکال ۲ نشان داده شده است. برای این کار از زمان تناوب تحلیلی استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات ۷ زلزله نزدیک گسل دارای اثرات جهت پذیری پیش رونده مؤلفه عمود بر گسل

Result ID	Earthquake Name	TIME	dt	PGA	Magnitude	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/sec)	Soil
1	"Imperial Valley-06"	39.08	0.005	0.4470	6.53	0.00	1.35	203.2	III
2	"Imperial Valley-06"	36.86	0.005	0.4690	6.53	0.56	0.56	210.5	III
3	"Loma Prieta"	39.99	0.005	0.5145	6.93	7.58	8.50	380.9	II
4	"Cape Mendocino"	35.98	0.020	0.5908	7.01	0.00	8.18	422.2	II
5	"Northridge-01"	39.98	0.020	0.6049	6.69	1.74	5.30	440.5	II
6	"Duzce- Turkey"	25.88	0.005	0.4043	7.14	0.00	6.58	281.9	III
7	Superstition Hills-02	22.34	0.010	0.4318	6.54	0.95	0.95	348.7	II

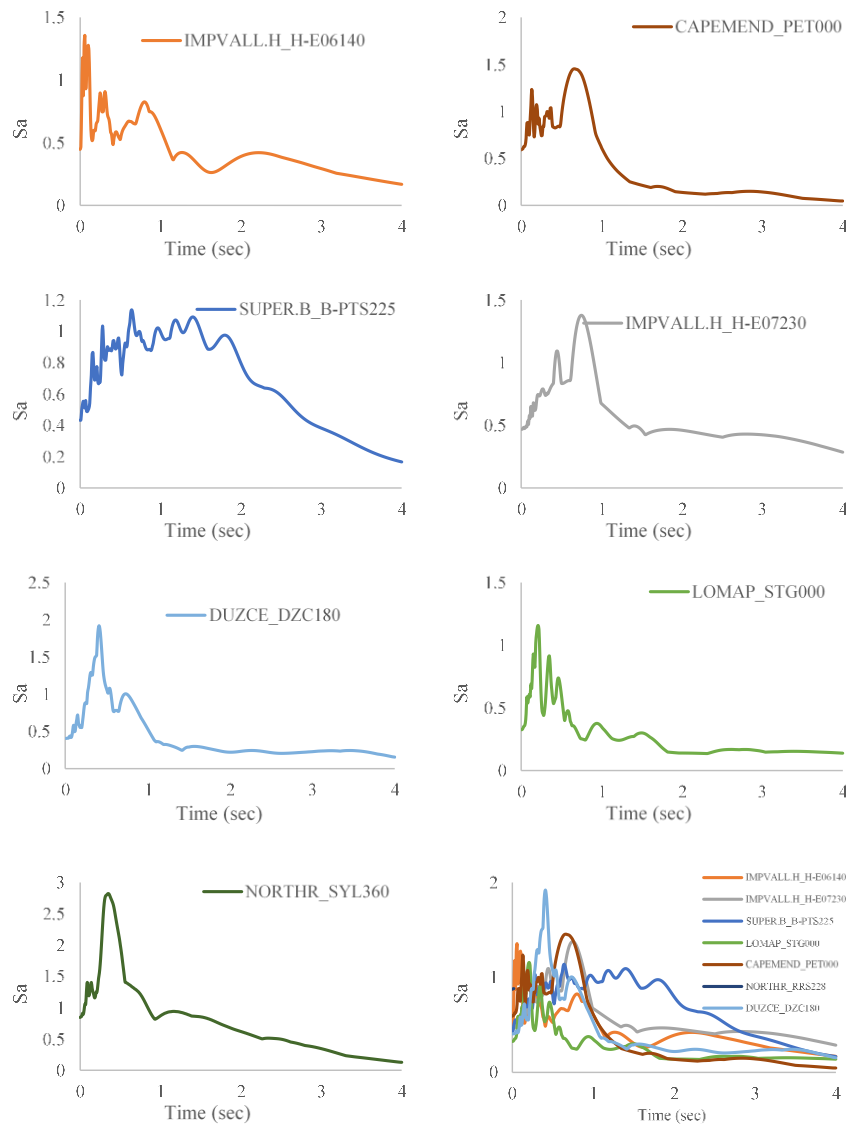
در شکل ۱ طیف های ترسیمی ۷ رکورد زلزله نزدیک گسل پالس گونه انتخابی برای این مقاله نشان داده شده است. همان طور که در نمودار ترسیمی شکل ۲ مشخص است طیف ۲۸۰۰ مربوط به مشخصات ساخت گاه مورد نظر این مقاله به همراه طیف میانگین رکوردهای انتخابی نشان داده شده است. با توجه به اینکه جهت همپایه سازی و تحلیل IDA از روش Sa استفاده می شود جهت محاسبه ضرایب مربوطه از طیف های ترسیمی استفاده می شود که در نمودارهای شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: طیف میانگین ترسیم شده رکوردهای انتخابی



سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد  
۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳  
هتل المپیک - تهران



شکل ۲: طیف‌های ترسیم شده رکوردهای انتخابی

### مراحل تحلیل غیرخطی مدلها

برای ایجاد منحنی‌های شکنندگی تعیین شاخص‌های برای شکست ضرورت می‌یابد. یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی که می‌تواند بیانگر میزان خرابی و ویرانی ساختمان‌ها در زلزله باشد حداکثر تغییر مکان بین طبقه‌ای می‌باشد. در آیین‌نامه‌های مختلف، آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در درجه‌های مختلف از عدم خرابی تا فروریختگی کامل تعریف می‌شود. در این مطالعه از دستورالعمل MH--MR5 HAZUS [۷] که توسط FEMA منتشر گردید، استفاده شد.

محدوده شکست با عملکرد سازه‌ها رابطه مستقیم دارد. می‌توان گفت گذر از هر سطح عملکرد سازه به مشابه شکست یک سطح آن سازه می‌باشد، چون اگر سازه از آن سطح عملکرد گذر کند، دیگر ضوابط آن سطح عملکرد را ارضا نمی‌کند و از دیدگاه بهسازی



## سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳

هتل المپیک - تهران



نیازمند تقویت است. در دستورالعمل ۵-MR MH-HAZUS [۷] برای سازه‌ها چهار سطح خرابی (کم، متوسط، زیاد و کامل) تعریف گردیده است. این سطوح برای معیار حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای در جدول ۵ آمده است. بر اساس این دستورالعمل بهترین نقطه‌ای که در طول منحنی IDA می‌تواند معرف تقاضا در سطح عملکرد آستانه فروریزش باشد، نقطه‌ای است که در آن، منحنی شروع به نرم شدگی در راستای رسیدن به ناپایداری دینامیکی کل سازه می‌کند. در واقع این نقطه باید کمترین مقدار خسارت را در میان نقاط احتمالی دارا باشد. باتوجه به تعریف، اولین نقطه‌ای که ۲۰٪ شیب ناحیه الاستیک را در طول منحنی IDA داشته باشد به عنوان تقاضای زلزله در این سطح عملکرد شناخته می‌شود. مشکلی که در این روش وجود دارد آن است که شیب هر منحنی IDA لزوماً قبل از رسیدن به ناپایداری کلی سازه، تا ۲۰٪ شیب ناحیه خطی اولیه افت نمی‌کند و لذا در برخی موارد اصولاً استفاده از این روش امکان‌پذیر نیست. همچنین به عنوان یکی دیگر از معیارهای مبتنی بر خرابی در این آیین‌نامه‌ها، حداکثر نسبت تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای می‌باشد که باتوجه به نوع ساختمان در آیین‌نامه‌ها ارائه گردیده است. سازه از هر یک از این دو معیار خرابی ارائه‌شده زودتر عبور کند آن نقطه سطح خرابی کامل سازه محسوب می‌شود. مراحل تحلیل قاب‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱. انتخاب یک مدل به صورت قاب دویعدی با سیستم قاب خمشی فولادی متوسط (قاب ۱۲ طبقه ۵ دهانه انتخاب شد).
۲. مدل‌سازی قاب ۱۲ طبقه به صورت دویعدی در برنامه ایتبس ۲۰۲۰
۳. مصالح استفاده شده برای اعضای این قاب (تیر و ستون) فولاد St37 می‌باشد.
۴. بارگذاری، تحلیل (تحلیل استاتیکی معادل) و طراحی قاب موردنظر به صورت حرفه‌ای (طراحی قاب‌ها به روش LRFD) کنترل‌های لازم پس از طراحی قاب‌ها صورت گرفت (مانند کنترل دررفت).
۵. مدل قاب ۱۲ طبقه با نام B&C37 (به معنی مصالح استفاده شده جهت تیر و ستون از نوع فولاد St37 می‌باشد) در نرم‌افزار OpenSEES مدل‌سازی شد. در ادامه با تغییرات در نوع مصالح اعضای سازه‌ای قاب (با استفاده از فولاد St52) مدل‌های دیگر نیز تولید می‌شوند.
۶. تحلیل IDA قاب ۱۲ طبقه (B&C37) تحت اثر ۷ رکورد زلزله‌های نزدیک گسل (دارای پالس) در نرم‌افزار اپن سیس
۷. ثبت نتایج مربوط به ماکزیمم دررفت ایجاد شده در سازه. (در ۴ سطح عملکردی مطابق تعریف آیین‌نامه Hasuz)
۸. ترسیم منحنی شکنندگی برای ۴ سطح عملکردی (با استفاده از نرم‌افزار اکسل)
۹. تکرار مراحل ۱ تا ۱۰ برای ۳ قاب دیگر (B&C52, B37&C52, B52&C37)

جهت تعیین سطوح عملکردی از دستورالعمل 5-Hasuz-MH MR5 [۷] استفاده می‌شود. باتوجه به جدول ۴-۳ دستورالعمل Hasuz، برای قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات ۱۲، نوع قاب در جدول SIH (قاب بلند) می‌باشد.

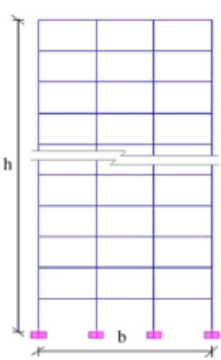
### صحت سنجی

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی این مقاله، یک نمونه از نتایج مدل‌سازی قاب از مرجع موجود در مقاله [۸] استخراج و با نتایج مدل غیرخطی قاب مورد استفاده شده در این مقاله مقایسه و صحت سنجی شد. لازم به ذکر است صحت سنجی توسط نرم‌افزار OpenSEES انجام گرفت. قاب موجود در مقاله موردنظر توسط نرم‌افزار OpenSEES مدل‌سازی و تحلیل و بر اساس نتایج تحلیل نمودارهای موردنیاز ترسیم گردید.



سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد  
 ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳  
 هتل المپیک - تهران

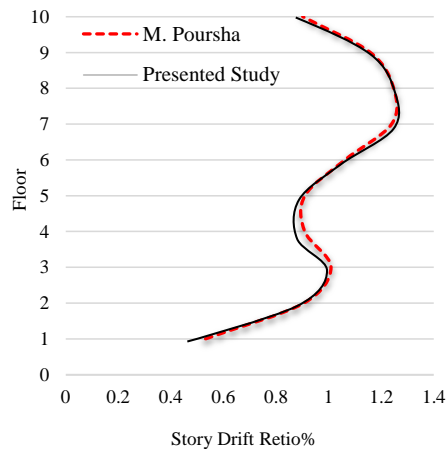


No.	No. of storeys	h (m)	b (m)	Seismic mass of floors (kg s <sup>2</sup> /m)	Periods		
					T1 (S)	T2 (S)	T3 (S)
 S1	10	32	15	5440	1.697	0.605	0.347

شکل ۳: مشخصات قاب ۱۰ طبقه مورد مطالعه در مقاله [۸]

جدول ۲: مشخصات رکوردهای استفاده شده در مقاله [۸]

NO.	Earthquake name	Date	Magnitude	Station Name	Station Number	Component (deg)	PGA(g)
1	Duzce, Turkey	11/12/1999	7.3	Lamont	1061	E	0.134
2	Northridge	01/17/1994	6.7	LA Baldwin Hills	24157	90	0.239
3	Trinidad, California	11/08/1980	7.2	Rio Dell Overpass, FF	1498	270	0.147
4	Victoria, Mexico	06/09/1980	6.4	Cerro Prieto	6604	45	0.621
5	Hollister	01/26/1986	5.5	SAGO South-Surface	47189	295	0.09
6	Imperial Valley	10/15/1979	6.9	Parachute Test Site	5051	315	0.204
7	Morgan Hill	04/24/1984	6.1	Corralitos	57007	310	0.109



شکل ۴: مقایسه نتایج نمودار دررفت طبقه‌ای قاب ۱۰ طبقه مقاله مرجع [۸]



# سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران

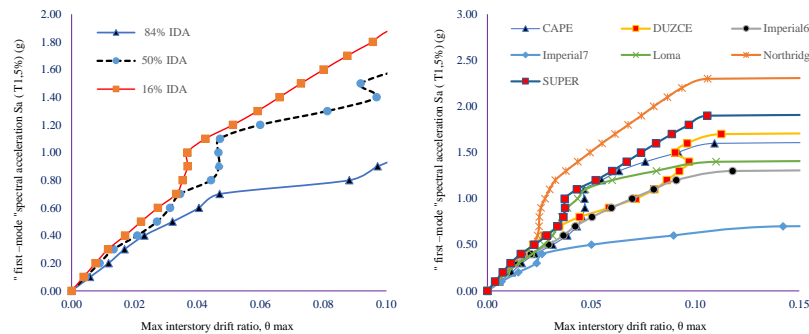


جدول ۳: مقایسه زمان تناوب قاب ۱۲ طبقه (B&CST37) این مقاله در دو نرم افزار ETABS2020 و OpenSEES

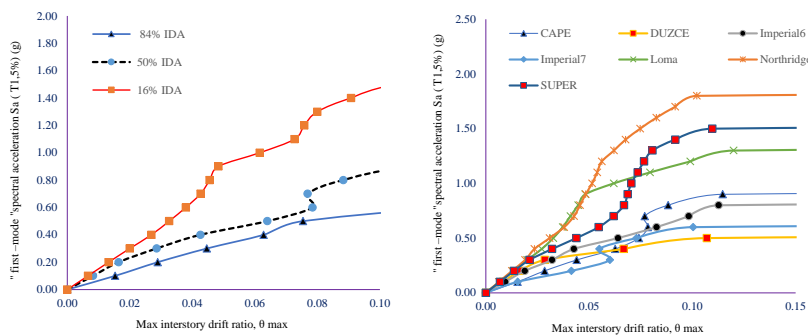
	زمان تناوب (ثانیه)	
	ETABS 2020	OpenSEES
مود اول	۲/۱۱	۲/۰۱
مود دوم	۰/۸۶۴	۰/۸۳۹
مود سوم	۰/۵۲۸	۰/۵۱۴

## نمودارهای IDA و منحنی‌های شکست قاب ۶ طبقه

برای تحلیل سازه از تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده استفاده شد. به این صورت که حداکثر شتاب طیفی زلزله ( $S_a$ ) اعمالی به سازه از  $0.1S_a$  تا خرابی کامل (فروریزش) با گام‌های افزایشی مقیاس شدند. سپس با تحلیل سازه در هر گام منحنی‌های IDA ترسیم گردید. در شکل‌های ۵ تا ۸ نمودارهای IDA به همراه سه مقدار آماری صدکهای ۱۶، ۵۰٪ و ۸۴٪ از هر یک از دسته منحنی‌های IDA برای سازه ۶ طبقه استخراج گردیده است. در شکل‌های ۹ منحنی شکنندگی در ۴ حالت حدی خرابی (کم، متوسط، زیاد و خرابی کلی) برای قاب ۶ طبقه (۴ مدل) نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار منحنی IDA قاب ۶ طبقه مدل B&C37 (راست) - نمودارهای ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد (چپ)

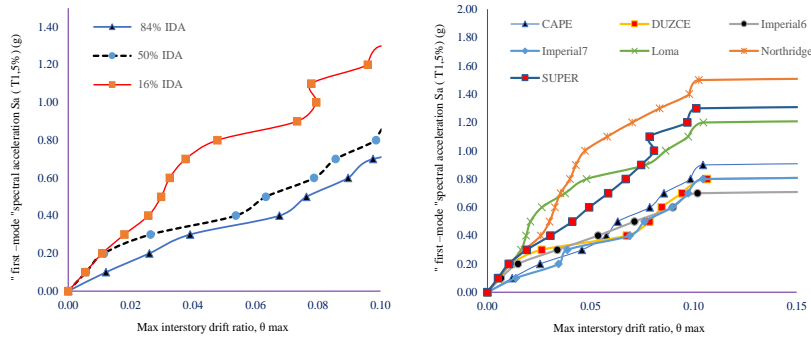


شکل ۶: نمودار منحنی IDA قاب ۶ طبقه مدل B&C52 (راست) - نمودارهای ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد (چپ)

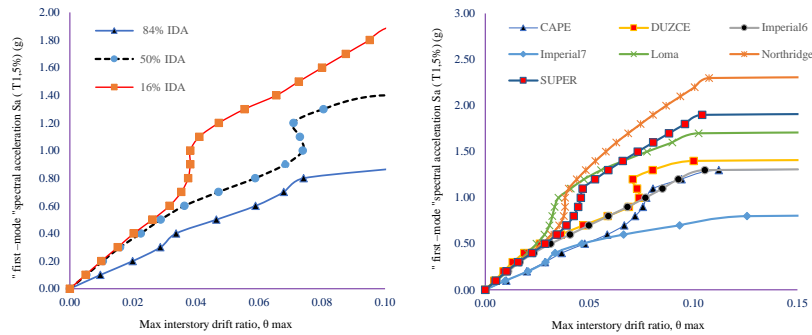




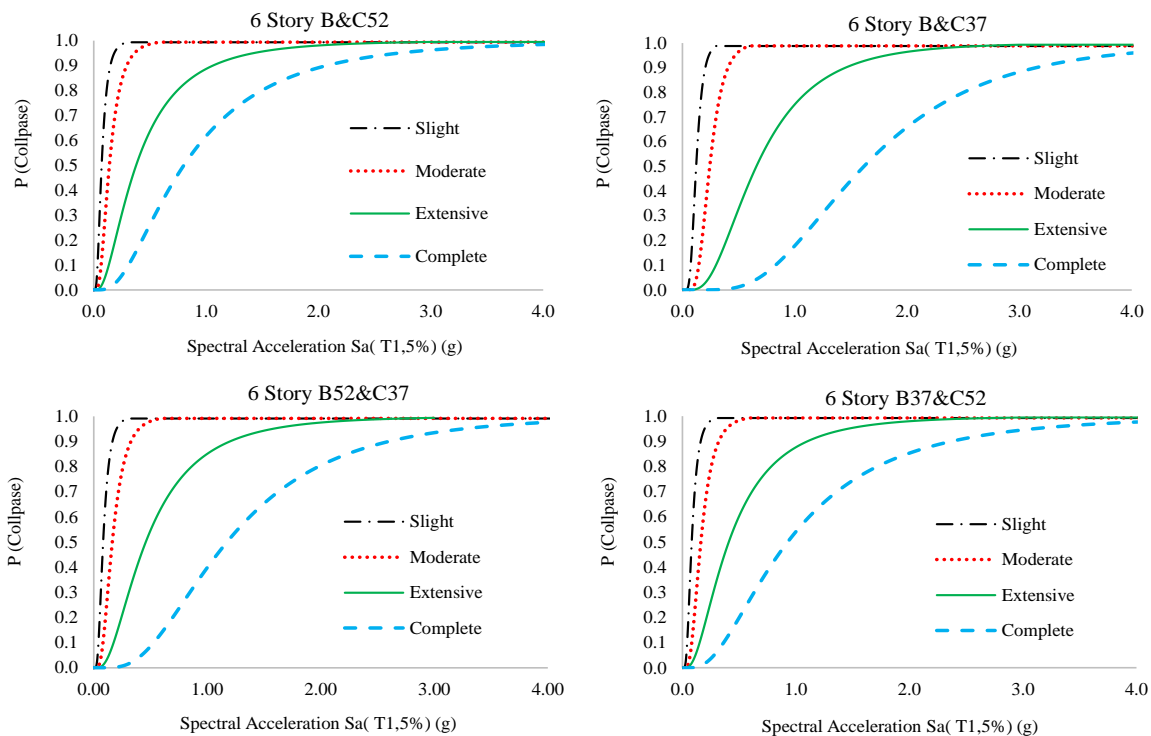
سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد  
 ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳  
 هتل المپیک - تهران



شکل ۷: نمودار منحنی IDA قاب ۶ طبقه مدل B37&C52 (راست) - نمودارهای ۱۶، ۵۰، و ۸۴ درصد (چپ)



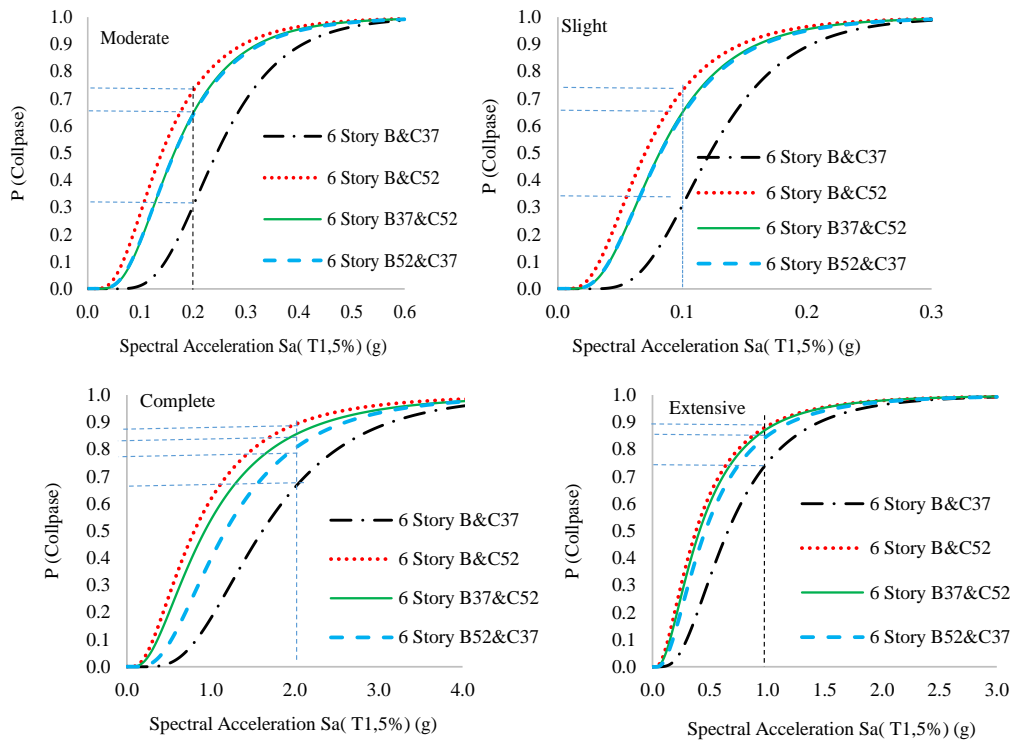
شکل ۸: نمودار منحنی IDA قاب ۶ طبقه مدل B52&C37 (راست) - نمودارهای ۱۶، ۵۰، و ۸۴ درصد (چپ)





شکل ۹: مقایسه نمودار منحنی شکنندگی قاب ۶ طبقه هر ۴ مدل در سطح عملکردی

در شکل‌های ۱۰ مقایسه‌ای بین منحنی شکنندگی قاب ۶ طبقه (۴ مدل) برای ۴ حالت خرابی (کم، متوسط، زیاد و خرابی کلی) نشان داده شده است. بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در حالت حدی خسارت کم (S)، در یک شتاب طیفی مشخص مانند  $0.1S_a$  احتمال فراگذشت از حالت حدی S برای مدل‌های B&C37، B&C52، B37&C52 و B52&C37، به ترتیب برابر با ۳۵، ۷۵، ۶۸ و ۶۷ درصد برآورد شده است. برای حالت حدی خسارت متوسط (M) و برای یک شتاب طیفی ثابت مانند  $0.2S_a$  این درصد‌ها به ترتیب برابر با ۳۳، ۷۴، ۶۶ و ۶۵ درصد محاسبه شد. به شکل مشابه و برای حالت حدی خسارت زیاد (E) و برای شتاب طیفی ثابت مانند  $1.0S_a$  مقادیر احتمال فراگذشت به ترتیب برابر با ۷۵، ۸۹، ۸۸ و ۸۵ درصد می‌باشد. در نهایت و برای حالت حدی خسارت کامل (C) و برای شتاب طیفی برابر  $2.0S_a$  مقادیر شتاب فراگذشت در مدل‌ها B37&C52، B&C52، B&C37 و B52&C37، به ترتیب ۶۶، ۸۹، ۸۵ و ۸۰ درصد بدست آمده است. بررسی نتایج بدست آمده از ۴ حالت حدی نشان می‌دهد که با افزایش حالت حدی خسارت، همواره احتمال فراگذشت برای عمده مدل‌ها افزایش یافته است. ضمناً کمترین احتمال فراگذشت مربوط به B&C37 و بیشترین آن به B&C52 تعلق دارد.

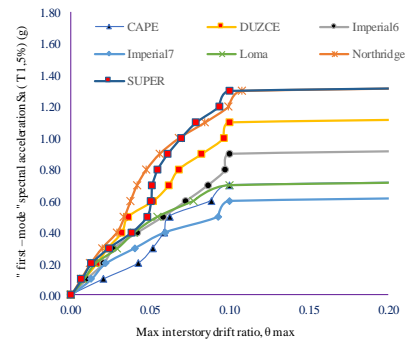
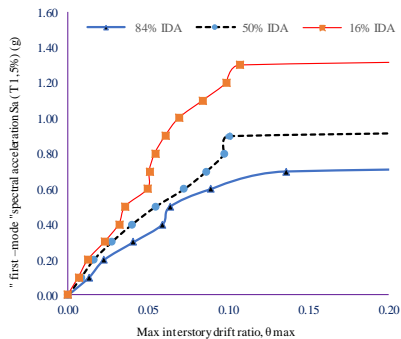


شکل ۱۰: مقایسه نمودار منحنی شکنندگی قاب ۶ طبقه هر ۴ مدل در سطح عملکردی

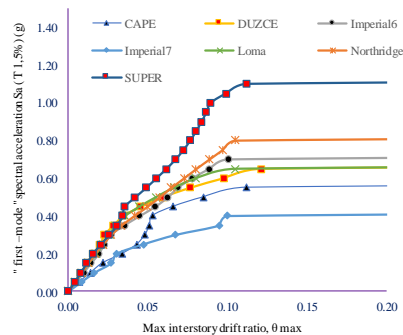
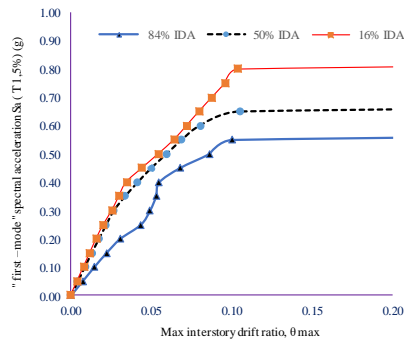


### نمودارهای IDA و منحنی‌های شکست قاب ۱۲ طبقه

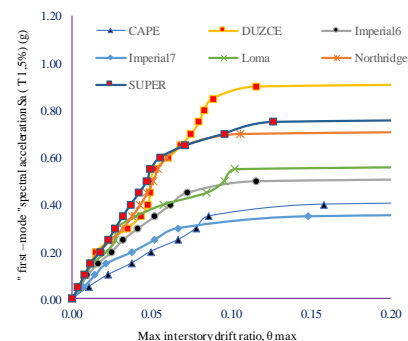
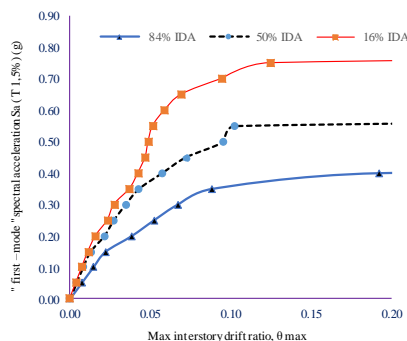
در این بخش از مقاله نتایج مربوط به مدل ۱۲ طبقه ارائه شده است. این نتایج در شکل های ۱۱ تا ۱۴ بصورت دسته نمودارهای IDA به همراه سه مقدار آماری صدکهای ۱۶، ۵۰٪ و ۸۴٪ نمایش داده شده اند.



شکل ۱۱: نمودار منحنی IDA قاب ۱۲ طبقه مدل B&C37 (راست) - نمودارهای ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد (چپ)



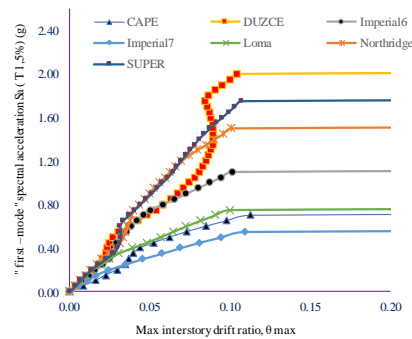
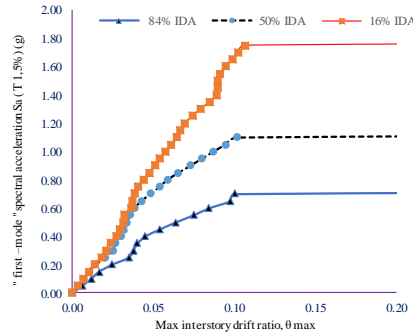
شکل ۱۲: نمودار منحنی IDA قاب ۱۲ طبقه مدل B&C52 (راست) - نمودارهای ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد (چپ)



شکل ۱۳: نمودار منحنی IDA قاب ۱۲ طبقه مدل B37&C52 (راست) - نمودارهای ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد (چپ)

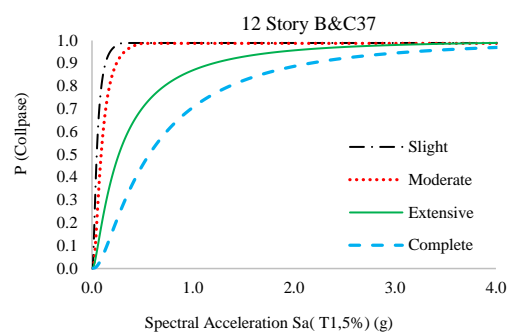
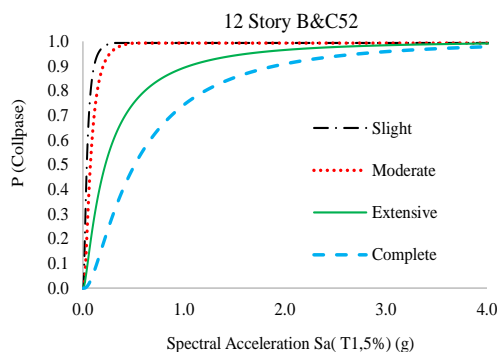


# سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران



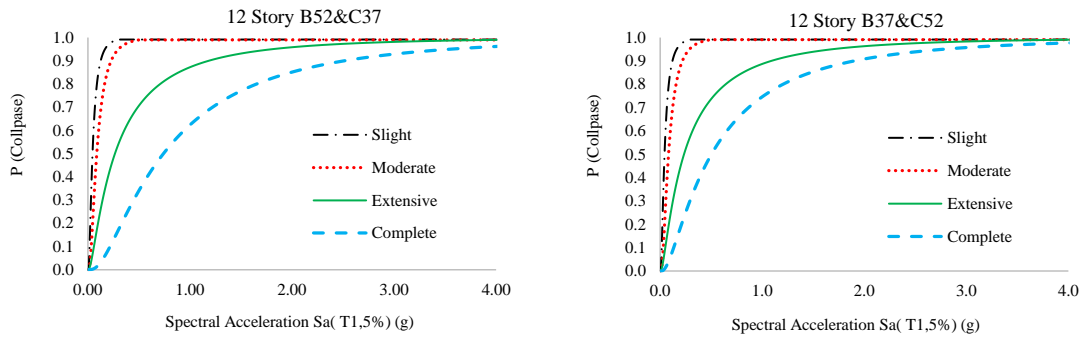
شکل ۱۴: نمودار منحنی IDA قاب ۱۲ طبقه مدل B52&C37 (راست) - نمودارهای ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد (چپ)

در شکل‌های ۱۵ منحنی شکنندگی در ۴ حالت خرابی (کم، متوسط، زیاد و خرابی کلی) برای قاب ۱۲ طبقه (۴ مدل) نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۶ مقایسه‌ای بین منحنی شکنندگی قاب ۱۲ طبقه (۴ مدل) برای ۴ حالت خرابی (کم، متوسط، زیاد و خرابی کلی) نشان داده شده است. بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در حالت حدی خسارت کم (S)، در یک شتاب طیفی مشخص مانند  $0.06S_a$  احتمال فراگذشت از حالت حدی S برای مدل‌های B37&C52، B&C52، B&C37 و B52&C37، به ترتیب برابر با ۶۵، ۷۴، ۷۰ و ۶۸ درصد برآورد شده است. برای حالت حدی خسارت متوسط (M) و برای یک شتاب طیفی ثابت مانند  $0.1S_a$  این درصد‌ها به ترتیب برابر با ۵۶، ۶۶، ۶۲ و ۵۹ درصد محاسبه شد. به شکل مشابه و برای حالت حدی خسارت زیاد (E) و برای شتاب طیفی ثابت مانند  $0.5S_a$  مقادیر احتمال فراگذشت به ترتیب برابر با ۷۵، ۸۹، ۸۸ و ۸۵ درصد می‌باشد. لذا برای این ۳ حالت حدی خسارت، کمترین احتمال فراگذشت به سازه B&C37 تعلق دارد. در نهایت و برای حالت حدی خسارت کامل (C) و برای شتاب طیفی برابر  $1.0S_a$  مقادیر شتاب فراگذشت در مدل‌ها B&C52، B&C37 و B37&C52، به ترتیب ۷۱، ۷۴، ۷۵ و ۶۳ درصد بدست آمده است. لذا برای این حالت حدی خسارت اخیر، کمترین احتمال فراگذشت به سازه B52&C37 تعلق دارد.

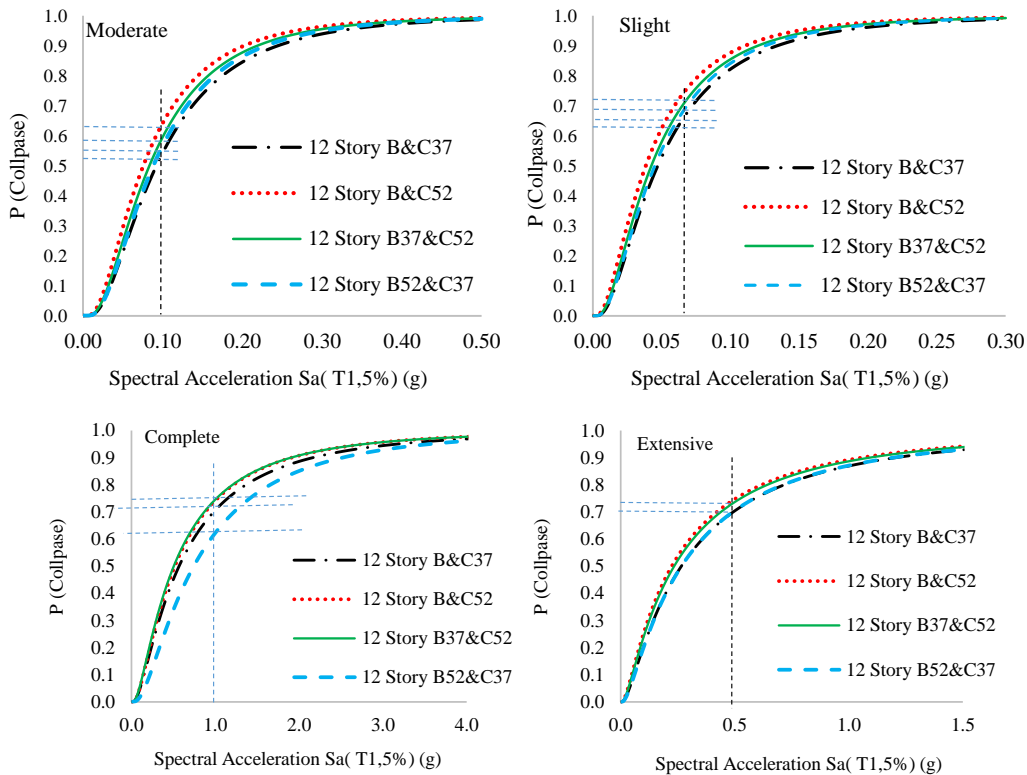




# سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران



شکل ۱۵: مقایسه نمودار منحنی شکنندگی قاب ۱۲ طبقه هر ۴ مدل در سطح عملکردی



شکل ۱۶: مقایسه نمودار منحنی شکنندگی قاب ۱۲ طبقه هر ۴ مدل در سطوح عملکردی

## بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد سازه‌های فولادی با استفاده از فولادهای St37 و St52 تحت زلزله‌های نزدیک گسل مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از OpenSEES انجام گرفته و منحنی‌های شکنندگی را برای قابهای ۶ و ۱۲ طبقه ترسیم شد. شایان ذکر است که هر سازه برای ۴ حالت مختلف فولاد طراحی شده است بنحوی که ابتدا فولاد مصرفی تیرها و ستون‌ها St37 فرض شد. در ادامه فولاد تیرها و ستون‌ها هر دو St52 و سپس یکبار فولاد تیر St37 و فولاد ستون St52 و باردیگر



بلعکس تعریف شد. نتایج حاصل نشان داد که نوع فولاد و آرایش تیر و ستون‌ها تأثیر قابل توجهی بر رفتار سازه‌ها در برابر زلزله دارد. به‌ویژه، استفاده از فولاد St37 در اعضای سازه‌ای به‌عنوان گزینه‌ای مناسب از منظر عملکردی در سطوح مختلف خرابی، به‌ویژه در زلزله‌های نزدیک گسل، شناسایی شد. بعلاوه با افزایش ارتفاع سازه، تأثیر استفاده از فولاد St52 بر عملکرد سازه‌ها بیشتر می‌شود. این یافته‌ها به‌ویژه در شرایط زلزله‌های نزدیک گسل که انرژی لرزه‌ای به‌طور ناگهانی و با شدت بالا به سازه وارد می‌شود، اهمیت دارد. همچنین احتمال خرابی سازه‌ها با افزایش شدت زلزله و نوع فولاد به‌کاررفته در اعضای سازه‌ای افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، در حالت‌های حدی مختلف خرابی، سازه‌های با فولاد St37 عملکرد بهتری نسبت به سازه‌های با فولاد St52 نشان دادند. این موضوع می‌تواند به مهندسان و طراحان سازه‌ها کمک کند تا در انتخاب مصالح و طراحی سازه‌ها، به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز، تصمیمات بهتری اتخاذ کنند.

## مراجع

- [۱] S. A. Razavi, N. Siahpolo, and M. Mahdavi Adeli, "The use of PSO and SA Optimization Algorithms in Estimating the Behavior factor of EBFs under Near-fault Pulse-type Earthquakes," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 8, no. Special Issue 3, pp. 57-77, 2021.
- [۲] A. Majdi, D.-P. N. Kontoni, and H. Almujiabah, "Correlation of the near-fault pulse-like ground motion characteristics with the vulnerability of buildings," *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2801, 2024.
- [۳] B. Wang, T. L. Karavasilis, P. Chen, and K. Dai, "Seismic modeling and performance evaluation of seismically isolated building considering large strain effects under near-fault earthquakes," *Journal of Building Engineering*, vol. 90, p. 109339, 2024.
- [۴] A. Serrano-Fontova *et al.*, "A comprehensive review and comparison of the fragility curves used for resilience assessments in power systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 108050-108067, 2023.
- [۵] O. Panchenko, I. Kladov, D. Kurushkin, L. Zhabrev, E. Ryl'kov, and M. Zamozdra, "Effect of thermal history on microstructure evolution and mechanical properties in wire arc additive manufacturing of HSLA steel functionally graded components," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 851, p. 143569, 2022.
- [۶] U. Mayo, N. Isasti, J. Rodriguez-Ibabe, and P. Uranga, "On the characterization procedure to quantify the contribution of microstructure on mechanical properties in intercritically deformed low carbon HSLA steels," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 792, p. 139800, 2020.
- [۷] M. Hazus, "Multi-hazard loss estimation methodology: earthquake model hazus-MH MR5 technical manual," *Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA*, 2011.
- [۸] M. Poursha, F. Khoshnoudian, and A. Moghadam, "A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings," *Engineering structures*, vol. 31, no. 2, pp. 591-599, 2009.