



## اثر اندرکنش خاک و سازه بر عملکرد قاب‌های خمشی فولادی کوتاه و میان مرتبه مجهز به میراگر اصطکاکی پال

محسن محمدی زاده<sup>۱\*</sup>، محمد بستانی<sup>۱</sup>، عشرت فرکت<sup>۱</sup>، نیما محمدی زاده<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران.

۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۱۵

### کلمات کلیدی:

قاب خمشی فولادی

میراگر اصطکاکی پال

زلزله حوزه نزدیک

تحلیل دینامیکی افزایشی

اندرکنش خاک و سازه

**خلاصه:** در این تحقیق، به بررسی رفتار سازه‌های فولادی ۳، ۵ و ۸ طبقه با قاب فولادی خمشی متوسط در چهار حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش (A)، با در نظر گرفتن اندرکنش (B)، با استفاده از میراگر (C) و در حالت استفاده از میراگر با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (D) و عملکرد میراگرهای پال، منحنی شکنندگی، تحت هفت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک پالس گونه پرداخته شده است. نوآوری پژوهش در استفاده از میراگر اصطکاکی پال و در نظر گرفتن اثر برهم‌کنش خاک و سازه (SSI) جهت بررسی رفتار دینامیکی و لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی کوتاه و میان مرتبه می‌باشد. مدل‌سازی در نرم‌افزار ایتبس و تحلیل دینامیکی افزایشی به روش LRFD با نرم‌افزار اپنسیس انجام شده است. برای بررسی حالات خرابی مختلف مدل‌ها از سطوح آسیب‌پذیری معرفی شده در HAZUS MH-MR4 استفاده شده است. قاب‌های مورد مطالعه با میراگر تحت تحلیل غیرخطی در سه میرایی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده نشان داد که: برای حالت (B) در سازه‌های کوتاه مرتبه جابجایی طبقات تقریباً ثابت مانده و هیچ تفاوتی نسبت به حالت (A) نداشته است؛ اما در حالت (C) باعث کاهش جابجایی طبقات گردیده و از طرفی در حالت (D) جابجایی طبقات نسبتاً کاهش یافته است؛ و الگوی کاهش جابجایی در رکوردهای مختلف، متفاوت است که این موضوع به دلیل متفاوت بودن محتوای فرکانس رکوردها بوده است. همچنین نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهد که استفاده از میراگر تأثیری در مقدار برش پایه سازه‌ها نداشته اما در سازه‌های با تعداد طبقات بیشتر، مقدار برش پایه کاهش داشته است.

### ۱- مقدمه

سازه‌ها جهت کاهش پاسخ سازه و همچنین صدمات وارد بر اجزای سازه‌های و در نتیجه کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله بر سازه، می‌تواند راهکاری مؤثر برای مقابله با اثرات این پدیده‌ی طبیعی باشد. خرابی سازه‌ها در زلزله‌های اخیر که منجر به صدمات جانی و مالی فراوان شده است مهندسی را به سمت استفاده از سیستم‌های جاذب انرژی و تجمع خرابی ناشی از زلزله در نقاط خاصی از سازه سوق داده است. از جمله این مستهلک کننده‌های انرژی، میراگر اصطکاکی پال می‌باشد. عملکرد میراگرها به مؤلفه‌های گوناگونی از جمله مشخصات خاک و نوع حرکت زمین بستگی دارد. عموماً در تحلیل سازه، خاک واقع در زیر سازه صلب فرض می‌شود، در صورتی که خاک صلب نیست و همین امر منجر به حصول نتایج دور از واقعیت می‌گردد. از طرفی پیشنهاد استفاده از روش جداسازی پایه در سازه‌ها ابتدا به وسیله پزشکی انگلیسی به نام کالاتارینتزر در سال ۱۹۰۹ ارائه گردیده است. او پیشنهاد کرد تا برای کاهش نیروی زلزله، از درزهای آزاد روغن کاری شده به همراه لایه‌ای از ماسه نرم و سیلیکا برای حرکت سازه بر روی آن استفاده شود.

در حین حرکات شدید زمین، انرژی زیادی به سازه وارد می‌شود و اگر این انرژی بیش از ظرفیتش باشد، باعث آسیب به عضو و در نهایت کل سازه می‌شود. از سوی دیگر، پالس‌های طولانی مدت در زلزله‌های حوزه نزدیک، عملکرد سازه‌ها را تضعیف می‌کند. تحقیقات متعددی از جمله پژوهش‌های مکرر و همکاران [۱]، توتونگ و کورنل [۲]، علوی و کراوینکلر [۳]، هال و همکاران [۴]، چمیون و لایل [۵] و اوزیوگور و نوروزی نژاد [۶]، پاسخ دینامیکی سازه‌ها در ناحیه نزدیک گسل را بررسی و در مورد تأثیر زمین‌لرزه‌های نزدیک به گسل دریافته‌اند که تأثیر این پارامتر بر پاسخ سازه این است که رکوردهای پالس گونه نزدیک به گسل، تمایل به افزایش پاسخ جابجایی در سازه‌ها نسبت به زلزله‌های حوزه دور دارند. این افزایش تقاضای جابجایی می‌تواند آسیب‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای را به شکل گسترده‌ای افزایش دهد. به همین دلیل، استفاده از سیستم‌های مستهلک کننده انرژی در

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mohsen.mohammadzadeh@iau.ac.ir



این پیشنهاد اولین نمونه از یک فلسفه طراحی مقاوم لرزه‌ای بوده که بعدها به جداسازی پایه یا جدا سازه لرزه‌ای معروف شد. امروزه صنعت ساختمان به سمت استفاده از تجهیزات کنترل لرزه‌ای سازه شامل میراگرهای فعال، نیمه فعال و غیرفعال پیش رفته است [۷]. پرکاربردترین آن‌ها، میراگرهای غیرفعال می‌باشند که انواع مختلفی مانند میراگرهای فلزی، اصطکاکی و ویسکوز دارند که در میان آن‌ها، انواع اصطکاکی و ویسکوالاستیک به دلیل توانایی بالا در اتلاف انرژی، بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. محققان حوزه ساختمان در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی اثر استفاده از انواع میراگر در کاهش خطرات ناشی از زلزله بر سازه‌ها را به بحث گذارده‌اند. مرادی و توکلی [۸] با استفاده از مفاهیم بالانس انرژی در سازه، عملکرد یک ساختمان ۱۰ طبقه دارای میراگر اصطکاکی پال را تحت بارهای متعدد انفجار بررسی کردند. آن‌ها دو سازه ۱۰ طبقه را در نرم‌افزار 3d-Perform با و بدون میراگر اصطکاکی پال در معرض ۱۲ بار انفجار قرار داده و عملکرد آن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که دوران مفاصل پلاستیک، دریافت و انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در سازه دارای میراگر اصطکاکی پال کمتر از سازه بدون میراگر است. رفیع و همکاران [۹] باهدف بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر بهینه‌سازی میراگرهای اصطکاکی نیروها و تغییر مکان‌های واقعی یک سازه تحت اثر حرکات لرزه‌ای سطح آزاد را با لحاظ کردن اثرات اندرکنش تعیین کرده‌اند. این مقاله قاب‌های دوبعدی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر در نرم‌افزار تحلیل غیرخطی سازه‌ها به روش تاریخچه زمانی غیرخطی یک‌بار با در نظر گرفتن اثر اندرکنش و با معرفی سه الگوی مختلف بارگذاری جانبی و بار دیگر بدون اثر آن مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد در نظر گرفتن این موضوع با لحاظ الگوی بار لغزش مثلثی تجمعی در عمده موارد سبب افزایش اتلاف انرژی ورودی زلزله توسط این نوع میراگرها گردیده است. همچنین بسته به نوع الگوی بار، رکورد اعمالی و ارتفاع سازه، کاهش هم مشاهده شده است. منکه و همکاران [۱۰]، در پژوهشی به بررسی اندرکنش خاک و سازه و تأثیر آن بر پاسخ دینامیکی سازه‌های بسیار بلند پرداختند. آزمایش‌های میدانی متعدد ساختمان‌های فوق بلند نشان می‌دهد که اندرکنش خاک-سازه (SSI) تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های دینامیکی ساختمان‌های فوق بلند دارد که ممکن است منجر به واکنش‌های لرزه‌ای غیرمنتظره و حالت‌های شکست شود. با در نظر گرفتن برج شانگهای (که در ارتفاع ۶۳۲ متری، نمایانگر یک ساختمان معمولی فوق بلند است)، به‌عنوان هدف تحقیق، از مدل المان محدود (FE) با در نظر گرفتن برهم‌کنش خاک و سازه استفاده شد. این تحقیق نشان می‌دهد که

با در نظر گرفتن SSI، میزان دوره تناوب برج شانگهای به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است و تأثیر قابل توجهی بر منحنی شکنندگی برج شانگهای در معرض زلزله‌های شدید دارد. واثقی و همکاران [۱۱] قاب‌های سه‌بعدی خمشی فولادی را برای بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه در مقاوم‌سازی سازه ارزیابی کردند. مدل‌های ۳ بعدی مورد مطالعه، قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۷ و ۱۳ طبقه در نظر گرفته شدند. نتایج بیانگر این نکته بود که در صورت اثر متقابل خاک و سازه، میزان دوره تناوب ساختمان‌ها افزایش می‌یابد، اما در سازه‌های کم ارتفاع می‌توان این اثر را نادیده گرفت. عبدالله زاده و همکاران [۱۲]، سه مدل قاب خمشی فولادی به‌صورت دوبعدی با تعداد طبقات ۴، ۸ و ۱۲ طبقه را به‌منظور بررسی تأثیر میراگر اصطکاکی پال بر پاسخ سازه بررسی کردند. مدل‌ها دارای ۳ دهانه به عرض ۵ متر و ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شدند که از پروفیل IPE و IPB برای تیرها و ستون‌ها استفاده شد. بار مرده ۶۰۰ کیلوگرم بر متر و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر برای کلیه طبقات در نظر گرفته شد. هفت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و هفت شتاب‌نگاشت دور برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده شد. نتایج تغییر مکان جانبی طبقات نشان داد که قاب در زمین‌لرزه حوزه نزدیک جابجایی بیشتری نسبت به حوزه دور دارد و پس از نصب میراگر، تغییر مکان جانبی طبقات ۶۲ و ۶۳ و ۶۳ درصد برای قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در زمین‌لرزه حوزه دور و ۵۹، ۷۵ و ۷۵ درصد برای قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در حوزه نزدیک حاصل شد. نتیجه‌گیری شد که میراگر ویسکوالاستیک اثر قابل توجهی در کاهش تغییر مکان جانبی طبقات دارد و تأثیر آن در ساختمان با طبقات بالاتر بیشتر است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در زمین‌لرزه حوزه نزدیک خسارت بیشتری نسبت به حوزه دور به طبقات وارد شده است. پس از نصب میراگر اصطکاکی پال، میزان خسارت برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب ۶۰، ۵۴ و ۶۳ درصد برای حوزه دور و ۶۶، ۷۷ و ۸۳ درصد برای حوزه نزدیک کاهش می‌یابد. نتیجه نشان‌دهنده تأثیر میراگر اصطکاکی پال در کاهش آسیب‌پذیری هست و این اثر در ساختمان با طبقات بالاتر بیشتر است. اربابی و تحقیقی [۱۳] در پژوهش خود اقدام به شبیه‌سازی سیستم‌های چندطبقه پی-ساختمان از طریق رویکرد وینکلر با استفاده از چارچوب المان محدود اپنسیس نمودند. چهار ساختمان قاب خمشی معمولی ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه فولادی در سه مکان فرضی خاک نرم، متوسط و سخت با سرعت موج‌برشی کمتر از ۶۰۰ متر بر ثانیه که در معرض رکوردهای حرکت واقعی زمین از سطوح مختلف خطر، با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه قرار دارند، مدل‌سازی شدند. نتایج حاکی از این نکته بود که سطح عملکرد

جدول ۱. مشخصات بارگذاری جانبی

Table 1. Lateral load specifications

طبقات	زمان تناوب (T)(sec)	ضریب بازتاب (B)	C	K
۳ طبقه	۰/۵۴۵۴	۲/۷۵	۰/۱۶۵	۱/۰۲۷۷
۵ طبقه	۰/۸	۲/۴۰۶	۰/۱۴۷۴	۱/۱۵
۸ طبقه	۱/۱۳۸۱	۱/۸۴۸	۰/۱۱۰۹	۱/۳۱۹

شکندگی ترسیم شده است. در ادامه و به منظور بررسی حالات خرابی مختلف در مدل‌ها، از سطوح آسیب‌پذیری معرفی شده در HAZUS MH-MR4 استفاده شده است [۱۵].

۲- مشخصات کلی مدل و توضیحات آن

۲-۱- مشخصات سازه‌ها

در این تحقیق از نرم‌افزار ایتبس ۲۰۱۵ به روش LRFD قاب‌های فولادی خمشی دوبعدی ۳، ۵ و ۸ طبقه همچنین ضوابط بارگذاری جانبی آن بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) می‌باشد. قاب‌های مدل‌سازی شده دارای سه دهانه با فواصل ۵ متر و ارتفاع طبقه ۳/۲ متر است. بار مرده ۵۰۰ کیلوگرم بر متر و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر لحاظ گردیده است. برای طراحی ستون از پروفیل HEB و برای تیر از پروفیل IPE استفاده شده است. در این مطالعه نیز جهت وارد کردن زمان تناوب اصلی سازه به حیطه مقیاس کردن رکوردها و نیز لحاظ کردن پارامترهای مدت‌زمان لرزش و میرایی، از شتاب طیفی مد اول سازه  $S_a(T_1)$ ، به‌عنوان معیار شدت لرزه‌ای استفاده شده است. در جدول ۱ زمان تناوب (T)، ضریب بازتاب (B) و ضرایب زلزله برای هر قاب نمایش داده شده است. در جدول‌های ۲ الی ۴ نیز مشخصات پروفیل‌های طراحی شده نشان داده شده است.

در طراحی سازه‌های بدون میراگر از ۱۰۰٪ برش پایه استفاده شده است. در طراحی قاب‌های با میراگر، سازه برای نسبتی از برش پایه آیین‌نامه طراحی شده است. مطابق فصل ۱۸ آیین‌نامه ASCE 7-10 حداقل برش پایه برای سیستم‌های دارای میراگر به‌صورت رابطه (۱) معرفی گردیده است.

$$V_D \geq V_{min} = \max \left\{ \frac{V}{B_{V+1}}, 0.75V \right\} \quad (1)$$

مدل‌های پشتیبانی شده توسط فونداسیون انعطاف‌پذیر، به‌ویژه در یک رویداد زلزله شدید، ممکن است به‌طور قابل‌توجهی در مقایسه با سازه‌هایی با پایه‌ی ثابت تغییر کند. علاوه بر این، برای قاب‌های خمشی معمولی در خاک نرم، پی غیرخطی اثر قابل‌توجهی بر تقاضاهای نیرو و جابجایی دارد. نویسندگان همچنین ضرورت در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه به‌منظور انجام یک طراحی سازه‌ای اقتصادی و درعین‌حال ایمن را یادآور شده‌اند. مرادی و توکلی [۱۴] در پژوهش خود، عملکرد ساختمانی ۱۰ طبقه دارای میراگر اصطکاکی پال را تحت بارهای انفجار بررسی نمودند. آن‌ها دو سازه ۱۰ طبقه را در نرم‌افزار پرفورم با و بدون میراگر اصطکاکی پال در معرض ۱۲ بار انفجار قرار داده و عملکرد آن را بررسی کردند. نتایج حاکی از این بود که دوران مفاصل پلاستیک، دریافت و انرژی کرنشی پلاستیک تلف‌شده در سازه دارای میراگر اصطکاکی پال کمتر از سازه بدون میراگر است.

با توجه به تحقیقات انجام‌شده بر روی میراگرها و همچنین میراگر اصطکاکی پال، تاکنون تأثیر اندرکنش خاک-سازه تحت زلزله با پالس مورد مطالعه و تحقیق قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر، تأثیر میراگر پال بر منحنی شکندگی سازه‌ها با اندرکنش خاک و سازه تحت زلزله حوزه نزدیک با پالس مورد بررسی قرار گرفته و بررسی می‌شود که میراگر با اندرکنش خاک-سازه تحت شتاب‌نگاشت‌های گوناگون تا چه حدی می‌تواند منحنی شکندگی را بهبود ببخشد. در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن قاب فولادی خمشی متوسط دوبعدی ۳، ۵ و ۸ طبقه، تحت هفت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک پالس گونه، رفتار سازه در چهار حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش (A)، با در نظر گرفتن اندرکنش (B)، با استفاده از میراگر (C) و در حالت استفاده از میراگر با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (D) مورد بررسی قرار گرفته است. هر مدل، ابتدا در نرم‌افزار ایتبس و به روش LRFD مدل‌سازی شده و سپس در نرم‌افزار اپنسیس تحت تحلیل دینامیکی افزایشی آنالیز شده و سپس بر اساس نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی، منحنی

جدول ۲. مقاطع قاب ۳ طبقه

Table 2. 3 story frame sections

مقطع تیر	مقطع ستون	طبقه
IPE300	HE180	طبقه ۳
IPE330	HE200	طبقه ۲
IPE330	HE240	طبقه ۱

جدول ۳. مقاطع قاب ۵ طبقه

Table 3. 5 story frame sections

مقطع تیر	مقطع ستون	طبقه
IPE300	HE180	طبقه ۵
IPE360	HE220	طبقه ۴
IPE360	HE240	طبقه ۳
IPE400	HE260	طبقه ۲
IPE400	HE300	طبقه ۱

جدول ۴. مقاطع قاب ۸ طبقه

Table 4. 8 story frame sections

مقطع تیر	مقطع ستون	طبقه
IPE300	HE180	طبقه ۸
IPE330	HE200	طبقه ۷
IPE360	HE240	طبقه ۶
IPE360	HE260	طبقه ۵
IPE400	HE300	طبقه ۴
IPE400	HE300	طبقه ۳
IPE450	HE320	طبقه ۲
IPE450	HE400	طبقه ۱

جدول ۵. ثابت فنر برای خاک

Table 5. Spring constant value for soil

حالت	سختی فنر	مدول برشی	میرایی
Vertical	$\frac{4G.r_0}{1-\nu}$	0.58	0.095
Horizontal	$\frac{8G.r_0}{1-\nu}$	0.85	0.27
Rocking	$\frac{8G.r_0^3}{3(1-\nu)}$	$\frac{0.3}{1 + \frac{3(1-\nu)m}{8r_0^5\rho}}$	0.24

انجام تحلیل دینامیکی افزایشی<sup>۲</sup> با اختصاص مقادیر ۱، ۰g تا ۳g برای هر شتاب‌نگاشت، تحلیل‌ها برای چهار حالت سازه‌های بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (A)، با در نظر گرفتن اندرکنش (B)، با میراگر بدون در نظر گرفتن اندرکنش (C) و با میراگر با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (D) انجام شده است. برای طراحی میراگر پال از مصالح غیرخطی بوکون استفاده گردیده و مدل‌سازی سیستم خاک و فونداسیون در حالت خطی و غیرخطی توسط مدل وینکلر (BNWF) صورت پذیرفته است. برای مدل‌سازی خاک اطراف سازه از مدل‌های مخروطی استفاده شده است. در این تحقیق درجات آزادی Vertical و Horizontal و Rocking که دارای اثر بیشتری در پاسخ سازه هستند موردبررسی قرار گرفته است. برای هر درجه آزادی هم یک فنر و یک دمپر معرفی گردیده که نشان‌دهنده اثر خاک در آن درجه آزادی است. مقادیر سختی و ثابت میرایی این فنر و میراگرها در جدول ۵ آورده شده است.

$$C = \frac{r}{V_s} k \cdot \gamma_0 \quad (2)$$

$$m = \left( \frac{r}{V_s} \right)^2 k \cdot \gamma_0 \quad (3)$$

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (4)$$

در این رابطه V برابر با مقدار برش پایه سازه بدون میراگر و ضریب BV+۱ برابر با ضریب کاهش طیف طراحی بر اثر افزایش میرایی است. میرایی طیف آیین‌نامه برابر با ۰.۵٪ در نظر گرفته شده است، بنابراین در حالت بدون میراگر برابر با یک بوده و با اضافه نمودن میراگر (افزایش میرایی) در سیستم مقادیری معادل ۱/۵ تا ۱/۹ اختصاص داده شده است. برای طراحی سازه‌های دارای میراگر از روابط فصل ۱۸ آیین‌نامه ASCE 7-10 استفاده شده است [۱۶] به همین دلیل سطح مقطع اجزای تشکیل‌دهنده حالت C بر اساس ۰.۷۵٪ نیروی برشی تحلیل و طراحی شده است.

۲-۲- مدل‌سازی در نرم‌افزار اپنسیس

با توجه به خروجی مقاطع از نرم‌افزار ایتبس و واردکردن اطلاعات مقاطع در نرم‌افزار اپنسیس و تعیین جرم، نقطه و شماره‌گذاری المان غیرخطی تیر و ستون صورت گرفته است. برای مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان تیر-ستون غیرخطی<sup>۱</sup> و مدل رفتاری مصالح Steel01 استفاده شده است. شیب ناحیه‌ی غیرخطی، ۳ درصد لحاظ شده است. با توجه به این که اتصالات تیر-ستون گیردار است، اثر این اتصالات در مدل‌سازی قاب‌ها لحاظ گردیده است. برای مدل‌سازی اتصالات گیردار در انتهای تمامی تیرها و ستون‌ها گره‌های جداگانه تعریف شده است. سپس با استفاده از المان به طول صفر به صورت فنر دورانی دوخطی RotSpring2D دو گره واقع در محل اتصال تیر به ستون که دارای مختصات یکسانی می‌باشند، به یکدیگر متصل شده‌اند. مصالح مورد استفاده برای اتصالات از نوع مصالح چرخه‌ای می‌باشد. همچنین مقاطع فایبر برای مقاطع موجود در سازه‌ها تعریف شده است. همچنین برای

جدول ۶. نسبت Drift بین طبقه برای هر حالت خرابی طبق HAZUS

Table 6. Drift ratio between floors for each failure mode according to HAZUS

Type	Slight	Moderate	Extensive	Complete
S1L	۰/۰۰۶	۰/۰۱۲	۰/۰۳	۰/۰۸
S1M	۰/۰۰۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۰/۰۵۳۳
S1H	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۴

هریک از رکوردهای زلزله، با مقادیر ارائه شده در جدول ۶ مقایسه شده سپس رسیدن یا فرا گذشت هر مدل در هر مقدار حداکثر شتاب زمین<sup>۳</sup> به هر یک از این حالات خرابی بررسی شده است.

۲-۱- صحت سنجی مدل سازی

به منظور صحت سنجی مدل های این سه سازه، زمان تناوب مربوط به سه مورد اول به دست آمده از تحلیل مدها در نرم افزار اپنسیس با زمان های تناوب ارائه شده در مرجع [۱۷] مقایسه شده و نتایج مربوط به هر سه سازه در جدول ۷ گردآوری شده است و پس از آن به مقایسه دریافت و برش پایه پرداخته شده است.

همان طور که از نتایج به دست آمده در جدول ۷ مشاهده می شود، تمامی درصد های اختلاف میان زمان های تناوب سازه های مدل شده در اپنسیس و زمان های تناوب ارائه شده در مرجع [۱۷] کمتر از ۴ درصد است لذا می توان نتیجه گرفت که مدل سازی سازه های ذکر شده در این مقاله با آنچه در این مرجع وجود دارد، تطابق خوبی دارد و می توان ادامه بررسی ها را بر روی آن ها انجام داد.

۲-۳- مشخصات شتاب نگاشت ها

انتخاب رکورد زلزله باید به گونه ای صورت گیرد که نتایج تحلیل ها شامل همه حالات رفتاری سازه در محدوده های الاستیک، پلاستیک و خرابی کامل باشد. همچنین باید نوع خاک برای رکوردهای انتخاب شده یکسان باشد تا رکوردها از مشابهت خوبی با یکدیگر برخوردار باشند؛ بنابراین در این پژوهش به بررسی یک روش مناسب جهت انتخاب زلزله هایی متناسب با شدت های مختلف لرزه ای مطابق با آئین نامه پرداخته شد، این روش در ارزیابی ساختمان بر اساس سطح عملکرد و انجام آزمایش های تجربی بسیار مؤثر می باشد. مراحل انتخاب رکورد شامل: انتخاب یک دسته رکورد متناسب با خاک

$\rho$  چگالی خاک که در این تحقیق برابر ۲۰۰۰ نیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

$V_s$  سرعت برشی خاک می باشد که برای خاک نوع ۳ برابر ۲۷۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است

$\mu_0$  ثابت نفوذپذیری و  $U$  ضریب پواسون که در این تحقیق برای ماسه ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

$C$  میرایی فنر،  $k$  سختی فنر،  $G$  مدول برشی خاک

پس از به دست آوردن پارامترهای  $C$ ,  $m$ ,  $G$  از روابط (۲)، (۳) و (۴) جهت مدل سازی در اپنسیس ابتدا گره های متصل به پی را توسط المان تیر الاستیک با سختی زیاد به یکدیگر متصل شده و سپس برای مدل سازی فنرها و میراگرها به ترتیب از مواد تک محوری الاستیک و مدل وینکلر استفاده شده این فنرها و میراگرها را در وسط پی توسط المان با طول صفر<sup>۱</sup> به المان تیر الاستیک متصل شده است. معیار شدت خسارت یک کمیت اسکالر مثبت است که پاسخ مدل سازه ای را به علت بارگذاری لرزه ای بیان می کند. به عبارتی دیگر معیار شدت خسارت، کمیتی قابل مشاهده است که از خروجی آنالیز دینامیکی غیرخطی استخراج و نتیجه می شود. در این مطالعه به منظور بررسی هر چه بهتر پاسخ سازه ای، از حداکثر نسبت تغییر مکان نسبی بین طبقه ای، به عنوان معیار شدت خرابی در سازه ها و مطابق با دستورالعمل HAZUS MH-MR4 استفاده شده است. طبق دستورالعمل HA-ZUS برای ساختمان های فولادی دارای سیستم قاب خمشی با طبقات کم و متوسط، ۴ حالت خرابی بر اساس نسبت جابجایی بین طبقه در نظر گرفته شده است که به ترتیب حالت خرابی جزئی، حالت خرابی متوسط، حالت خرابی گسترده و حالت خرابی کلی یا کامل می باشد. مقادیر عددی مربوط به هر حالت خرابی در جدول ۶ ارائه شده است.

مقدار تغییر مکان جانبی نسبی طبقات<sup>۲</sup> به دست آمده برای هر مدل تحت

- 1 zero Length Element
- 2 Drift

3 Peak Ground Acceleration (PGA)

جدول ۷. مقایسه زمان تناوب سه مدل اول سازه‌های مدل شده در اینسیس با مرجع [۱۷]

Table 7. Comparing the periodicity time of the first three modes of the structures modeled in the appendix with the reference

زمان تناوب	سازه ۳ طبقه	سازه ۹ طبقه	سازه ۲۰ طبقه
مدل اینسیس	۱/۰۱۷	۲/۲۶۷	۳/۷۶۴
مد اول (sec)	مرجع [۱۷]	۲/۲۶	۳/۸۳
اختلاف (%)	۰/۶۹	۰/۳۱	۱/۷۲
مدل اینسیس	۰/۳۳۷	۰/۸۵۴	۱/۳۱
مد دوم (sec)	مرجع [۱۷]	۰/۸۴۷	۱/۳۲۸
اختلاف (%)	۳/۰۶	۰/۸۲۶	۱/۳۵۵
مدل اینسیس	۰/۱۹۷	۰/۴۹۱	۰/۷۷۷
مد سوم (sec)	مرجع [۱۷]	۰/۴۸۸	۰/۷۶۹
اختلاف (%)	۳/۱۴	۰/۶۱۵	۱/۰۴

جدول ۸. مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک

Table 8. Details of near-field records

شماره	زلزله	ایستگاه	تاریخ وقوع	بزرگا (M)	فاصله کانونی (Km)	پریود غالب (Sec)
۱	Chi-Chi, Taiwan	TCU120	۱۹۹۹	۷/۶۲	۹/۹۶	۴/۸
۲	Darfield, New Zealand	Lincoln School	۲۰۱۰	۷	۵/۲۸	۷/۰
۳	Imperial Valley-06	El Centro Array #4	۱۹۷۹	۶/۵۳	۴/۹	۵/۹
۴	Kobe, Japan	CEOR Station	۱۹۹۵	۶/۹	۳/۳۱	۱/۴۶
۵	Morgan Hill	Gilroy Array #6	۱۹۸۴	۶/۱۹	۳/۴۵	۳/۴۴
۶	Northridge-01	Pacoima Dam	۱۹۹۴	۶/۶۹	۳/۱۶	۰/۲۶

حالت C: سازه‌های با میراگر (درصد میرایی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) که اندرکنش خاک و سازه در آن‌ها در نظر گرفته نشده است.

حالت B: سازه‌های بدون میراگر که اندرکنش خاک و سازه در آن‌ها در نظر گرفته شده است.

حالت D: سازه‌های با میراگر (درصد میرایی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) که اندرکنش خاک و سازه در آن‌ها در نظر گرفته شده است.

نتایج به دست آمده در جدول‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است، بسته به نوع رکوردها افزایش میرایی در سازه‌های کوتاه مرتبه تأثیری در برش پایه

منطقه و شدت مناسب، مدل سازی غیرخطی سازه مورد مطالعه، انجام تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)، دسته بندی نتایج، انتخاب رکوردهای بحرانی مورد نظر با توجه به نزدیکی آن‌ها با حدود نتایج تحلیل دینامیکی افزایش در شدت زلزله طرح (DBE) و بیشینه زلزله محتمل (MPE) می باشد. در این تحقیق از ۷ شتاب نگاشت حوزه نزدیک دارای پالس با مشخصات جدول ۸ استفاده شده است.

حالت A: سازه‌های ساده بدون میراگر که اندرکنش خاک و سازه در آن‌ها در نظر گرفته نشده است.



جدول ۹. برش پایه مدل ۳ طبقه

Table 9. 3-story base shear force

رکورد	حالت A	حالت C(۵٪)	حالت C(۱۰٪)	حالت C(۱۵٪)	حالت B	حالت D(۵٪)	حالت D(۱۰٪)	حالت D(۱۵٪)
Zealand	۱۳۵۷۳	۷۹۸۳۲	۸۴۳۰۹	۸۵۳۵۳	۱۱۳۰۱۵	۷۷۳۴۴	۷۹۲۲۴	۸۱۵۶۷
Kobe-japan	۵۵۲۷۲	۵۵۸۵۶	۵۱۲۱۷۳	۵۱۵۴۱۸	۵۱۸۸۲۵	۴۹۹۷۷۳	۵۰۸۸۰۷	۵۲۰۶۵۳
Morgan-Hill	۶۱۰۵۱۲	۱۸۲۲۵۳	۱۷۷۶۰۶	۱۷۴۱۲۶	۵۱۸۳۵۳	۱۷۹۲۱۲	۱۸۳۵۵۱	۱۷۰۰۴۵

جدول ۱۰. برش پایه مدل ۵ طبقه

Table 10. 5-story base shear force

رکورد	حالت A	حالت C(۵٪)	حالت C(۱۰٪)	حالت C(۱۵٪)	حالت B	حالت D(۵٪)	حالت D(۱۰٪)	حالت D(۱۵٪)
Zealand	۹۸۸۵۰	۶۹۷۳۲	۶۵۲۶۲	۶۱۴۲۵	۱۱۸۱۵۲	۶۸۲۷۹	۶۱۰۷۲	۵۶۳۹۲
Kobe-japan	۵۴۳۲۱۵	۳۱۸۴۵۲	۳۵۵۱۲۹	۳۳۶۷۴۳	۵۳۶۹۴۲	۳۱۴۱۵۲	۳۲۰۷۵۲	۳۴۲۶۵۱
Morgan-Hill	۵۹۵۴۸۴	۴۸۰۲۵۲	۴۳۸۲۲۹	۴۰۸۵۰۲	۵۹۳۷۴۲	۴۷۹۳۸۲	۴۴۳۸۲۲	۴۱۹۳۱۳

جدول ۱۱. برش پایه مدل ۸ طبقه

Table 11. 8-story base shear force

رکورد	حالت A	حالت C(۵٪)	حالت C(۱۰٪)	حالت C(۱۵٪)	حالت B	حالت D(۵٪)	حالت D(۱۰٪)	حالت D(۱۵٪)
Zealand	۸۴۲۵۴	۵۲۸۳۲	۷۱۲۰۹	۵۲۲۵۳	۱۱۵۰۱۵	۶۱۲۴۴	۵۲۲۲۴	۶۲۹۹۳
Kobe-japan	۵۸۳۵۱۶	۲۳۸۵۶	۲۰۳۱۷۳	۴۴۰۴۱۸	۵۷۸۸۲۵	۲۱۹۷۷۳	۲۲۸۸۰۷	۴۱۲۳۵۲
Morgan-Hill	۶۱۲۴۸۲	۳۳۲۲۵۳	۵۱۲۶۰۶	۲۱۲۱۲۶	۵۹۸۳۵۳	۵۱۹۲۱۲	۴۸۳۵۵۱	۵۱۲۰۴۵

با یکدیگر و ارزیابی احتمالاتی سازه‌ها استفاده شده است. مقدار آماری صدک ۵۰٪ بیانگر میانگین داده‌ها و میانگین مقادیر شتاب طیفی می‌باشد و جهت مقایسه دسته منحنی‌های IDA غالباً از این مفهوم استفاده می‌گردد [۱۹، ۲۰].

### ۳-۱- قاب ۳ طبقه

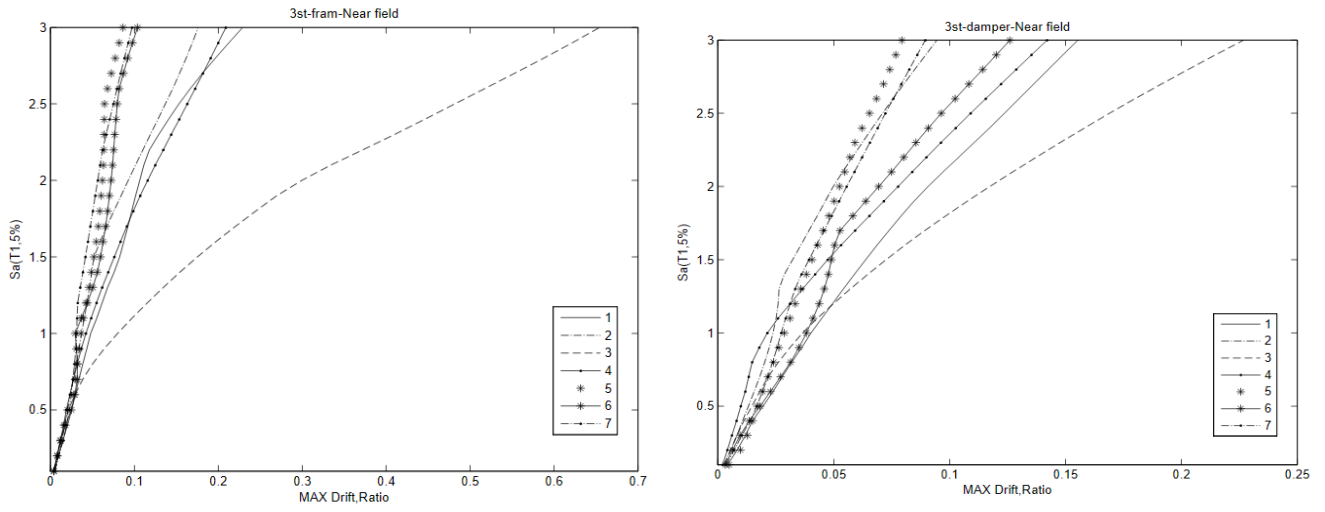
منحنی IDA قاب ۳ طبقه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

نداشته ولی در سازه‌های بلندمرتبه با افزایش میرایی برش پایه کاهش داشته است.

### ۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

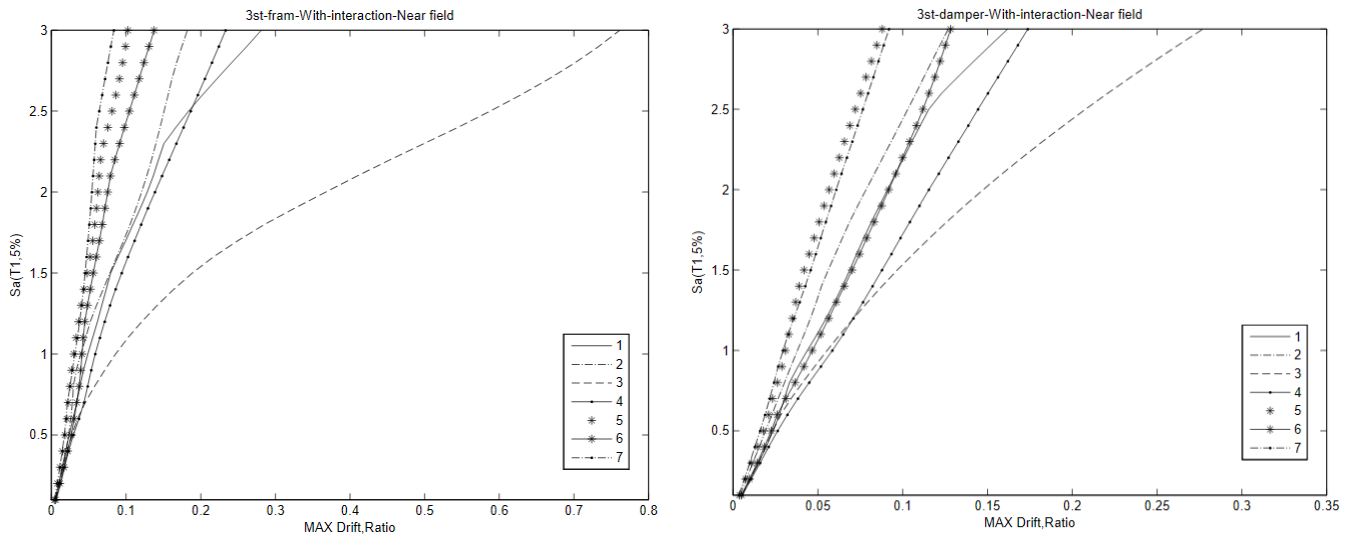
در این بخش نتایج و خروجی حاصل از تحلیل ۳ مدل دوبعدی قاب خمشی فولادی ۳، ۵ و ۸ طبقه به صورت منحنی‌های IDA به دست آمده است که خلاصه منحنی‌های IDA به صورت صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ و منحنی‌های شکنندگی ارائه شده است. خلاصه منحنی‌ها ابتدا در پژوهش کرنل و وامواتسیکوس [۱۸] و از آن برای مقایسه دسته منحنی‌های مختلف





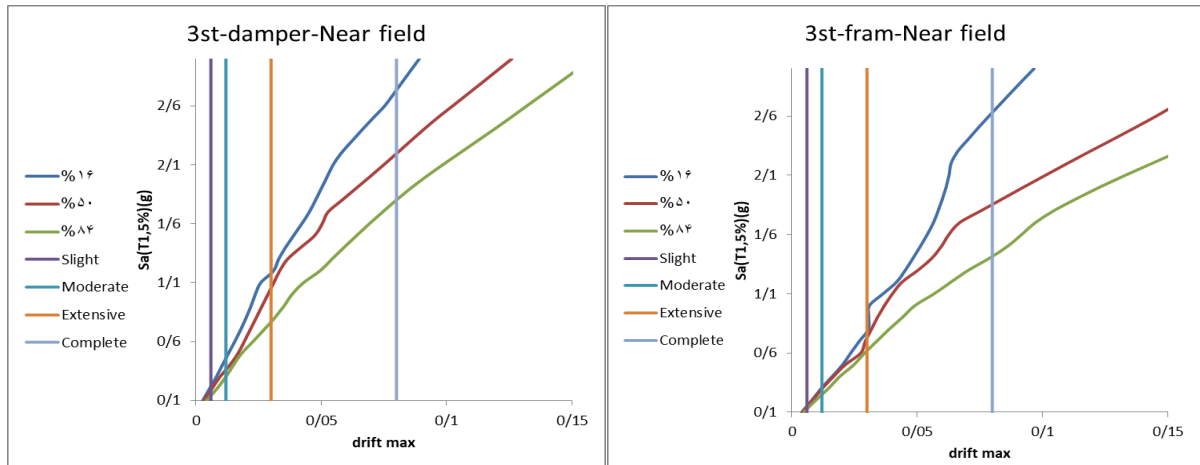
شکل ۱. منحنی IDA حالت A و حالت C ۳ طبقه

Fig. 1. IDA curve mode A and mode C- 3 floors



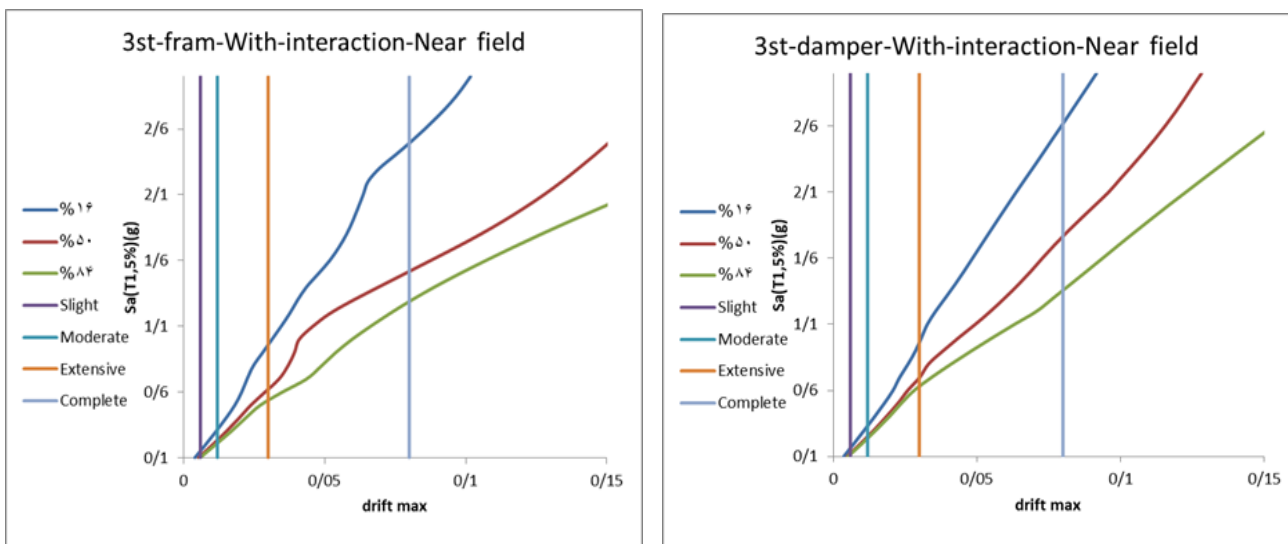
شکل ۲. منحنی IDA حالت B و حالت D ۳ طبقه

Fig. 2. IDA curve of mode B and mode D- 3 floors



شکل ۳. خلاصه منحنی IDA حالت A و حالت C ۳ طبقه

Fig. 3. Summary of the IDA curve of mode A and mode C of 3 floors



شکل ۴. خلاصه منحنی IDA حالت B و حالت D ۳ طبقه

Fig. 4. Summary of the IDA curve of mode B and mode D of 3 floors

خسارت، دررفت بین طبقات می‌باشد، در جدول‌های ۱۳ الی ۱۵ با توجه به صدک‌ها، سطح خرابی برای هر حالت در شتاب طیفی نشان داده شده است. جدول‌های ۱۲ الی ۱۴ نشان می‌دهد که: حالت C نسبت به حالت A، حالت D و حالت B در شتاب طیفی بالاتری به سطح خرابی می‌رسد. این موضوع بیانگر عملکرد میراگر در کاهش دررفت بین طبقات به‌عنوان یکی از معیارهای پیش‌بینی خسارت می‌باشد و همچنین اثر اندرکنش خاک و سازه

به‌منظور مقایسه راحت‌تر منحنی‌های IDA، این منحنی‌ها برای صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ خلاصه شده است. شیب ناحیه خطی، معرف سختی سازه است. این شیب در سازه باحالت‌های A, B نسبت به حالت‌های دیگر کمتر نشان‌دهنده رفتار نرم‌تر سازه می‌باشد و در سازه باحالت C در شتاب بالاتری وارد ناحیه فروریزش می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد بهتری نسبت به حالات دیگر می‌باشد. معیار

جدول ۱۲. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۱۶٪ برای قاب ۳ طبقه

Table 12. The amount of spectral acceleration according to the damage criterion is 16% for a 3-story frame

رکورد	حالت A	حالت C(۵٪)	حالت C(۱۰٪)	حالت C(۱۵٪)	حالت B	حالت D(۵٪)	حالت D(۱۰٪)	حالت D(۱۵٪)
Zealand	۸۴۲۵۴	۵۲۸۳۲	۷۱۲۰۹	۵۲۲۵۳	۱۱۵۰۱۵	۶۱۲۴۴	۵۲۲۲۴	۶۲۹۹۳
Kobe-japan	۵۸۳۵۱۶	۲۳۸۵۶	۲۰۳۱۷۳	۴۴۰۴۱۸	۵۷۸۸۲۵	۲۱۹۷۷۳	۲۲۸۸۰۷	۴۱۲۳۵۲
Morgan-Hill	۶۱۲۴۸۲	۳۳۲۲۵۳	۵۱۲۶۰۶	۲۱۲۱۲۶	۵۹۸۳۵۳	۵۱۹۲۱۲	۴۸۳۵۵۱	۵۱۲۰۴۵

جدول ۱۳. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۵۰٪ برای قاب ۳ طبقه

Table 13. The amount of spectral acceleration according to the damage criterion in the 50% percentile for the 3-story frame

مدل	خرابی کم (g)	خرابی متوسط (g)	خرابی گسترده (g)	خرابی کامل (g)
حالت A	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۷۳	۱/۸۵
حالت B	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۶۲	۱/۵۱
حالت C	۰/۱۹	۰/۳۶	۱/۰۵	۲/۱۹
حالت D	۰/۱۲	۰/۲۵	۰/۶۹	۱/۷۶

جدول ۱۴. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۸۴٪ برای قاب ۳ طبقه

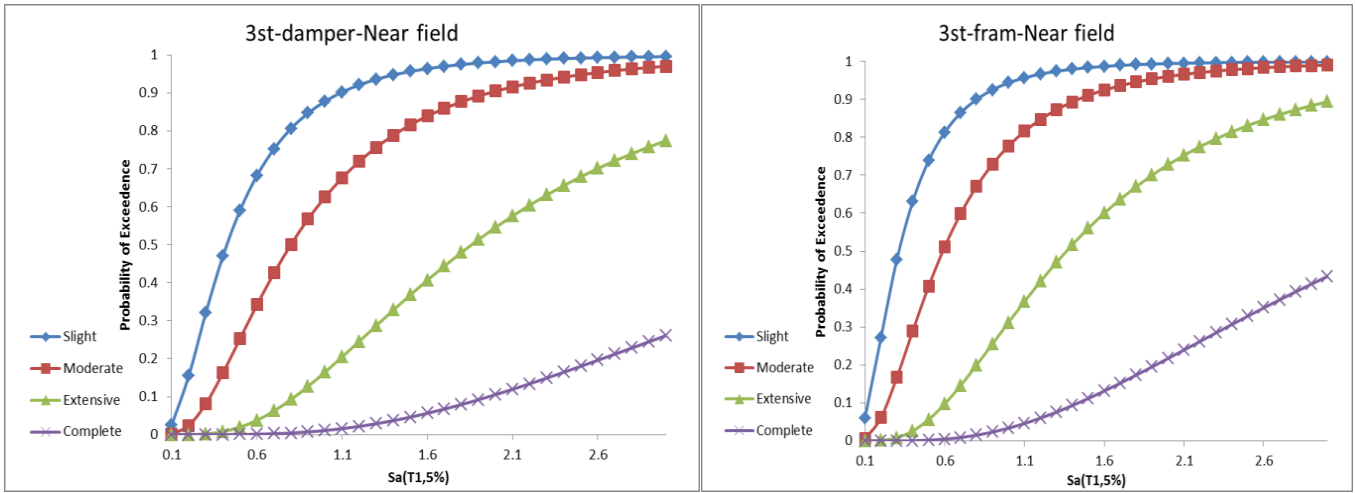
Table 14. The rate of spectral acceleration according to the damage criterion is 84% for the 3-story frame

مدل	خرابی کم (g)	خرابی متوسط (g)	خرابی گسترده (g)	خرابی کامل (g)
حالت A	۰/۱۳	۰/۲۵	۰/۶۲	۱/۴۱
حالت B	۰/۱۰	۰/۲۱	۰/۵۳	۱/۲۸
حالت C	۰/۱۴	۰/۳۰	۰/۷۶	۱/۸۰
حالت D	۰/۱۱	۰/۲۴	۰/۶۳	۱/۳۵

حالات خرابی کم و متوسط، شیب منحنی ابتدا زیاد است و سپس کاهش یافته است. برای حالت خرابی گسترده منحنی‌ها تقریباً با شیب یکنواخت در حال تغییر هستند و در حالت خرابی کلی نیز تغییرات شیب بسیار کم است. با توجه به ضریب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک برای سازه سه طبقه، شکنندگی در شتاب طیفی ۱/۲۸۴ برای خاک نوع سه رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد وجود اندرکنش خاک و سازه اثر قابل توجهی در افزایش احتمال

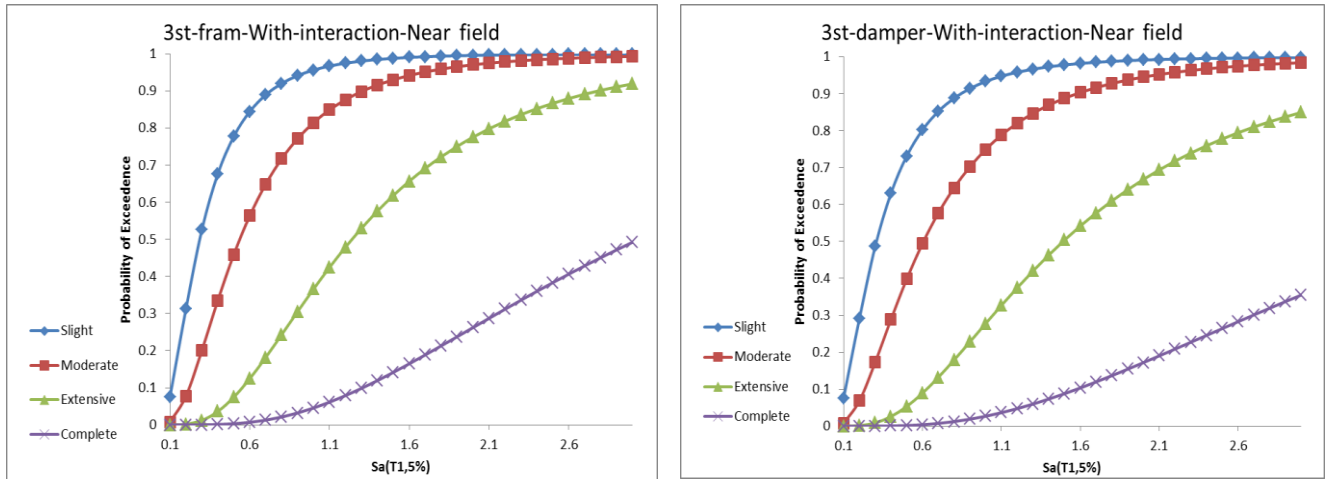
برافزایش دریفت بین طبقات و رسیدن به سطح خرابی در شتاب طیفی کمتر را نشان می‌دهد. منحنی شکنندگی قاب ۳ طبقه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

منحنی شکنندگی نشان می‌دهد که احتمال شکست سازه در حالت خرابی کم در مقادیر Sa کمتر رخ می‌دهد و به ترتیب، حالات خرابی متوسط، گسترده و کلی در مقادیر بالاتر Sa اتفاق می‌افتد. در تمام منحنی‌ها، برای



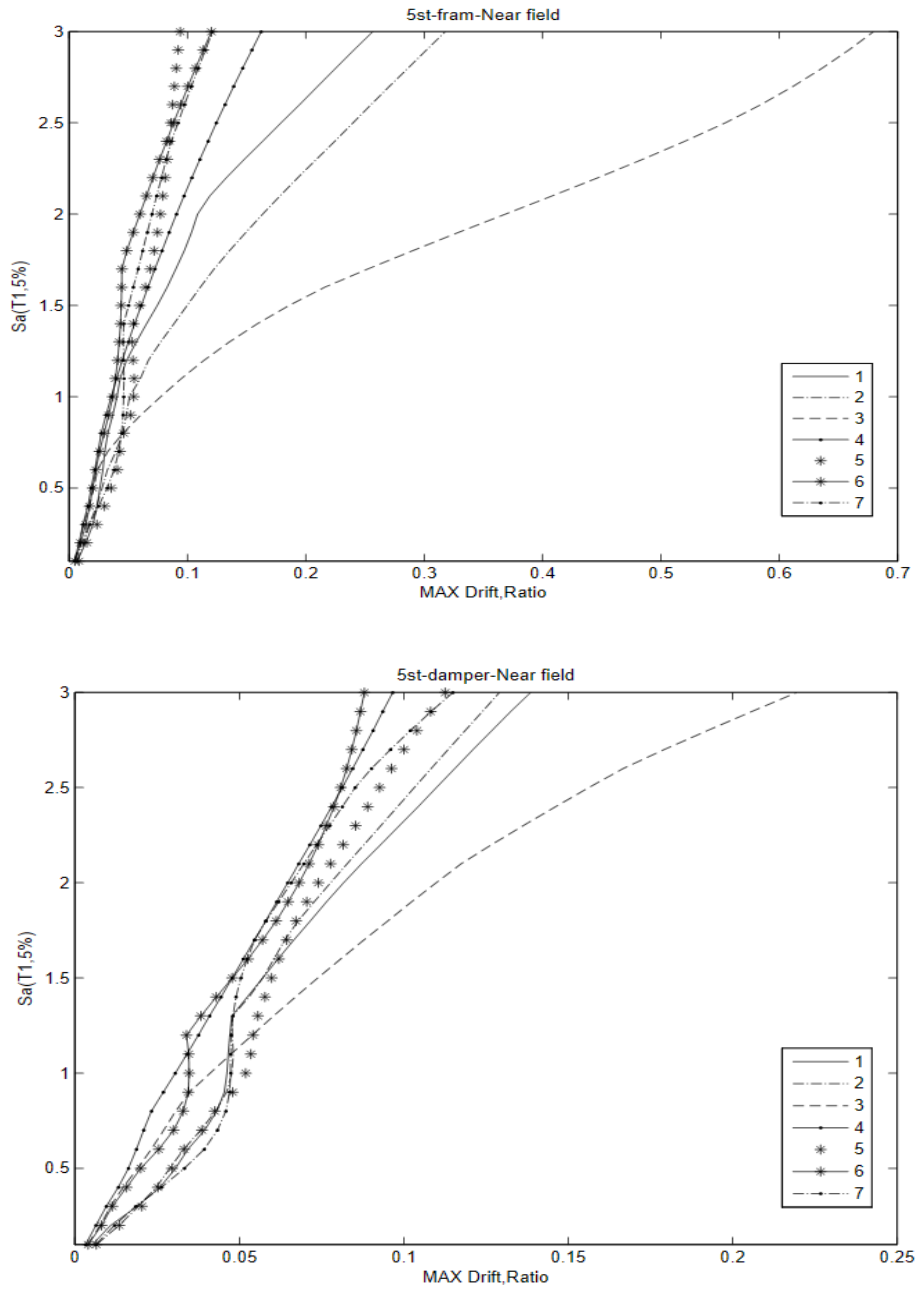
شکل ۵. منحنی شکنندگی حالت A و حالت C ۳ طبقه

Fig. 5. Fragility curve of state A and state C- 3 floors



شکل ۶. منحنی شکنندگی حالت B و حالت D ۳ طبقه

Fig. 6. Fragility curve of state B and state D- 3 floors



شکل ۷. منحنی IDA حالت A و حالت C ۵ طبقه

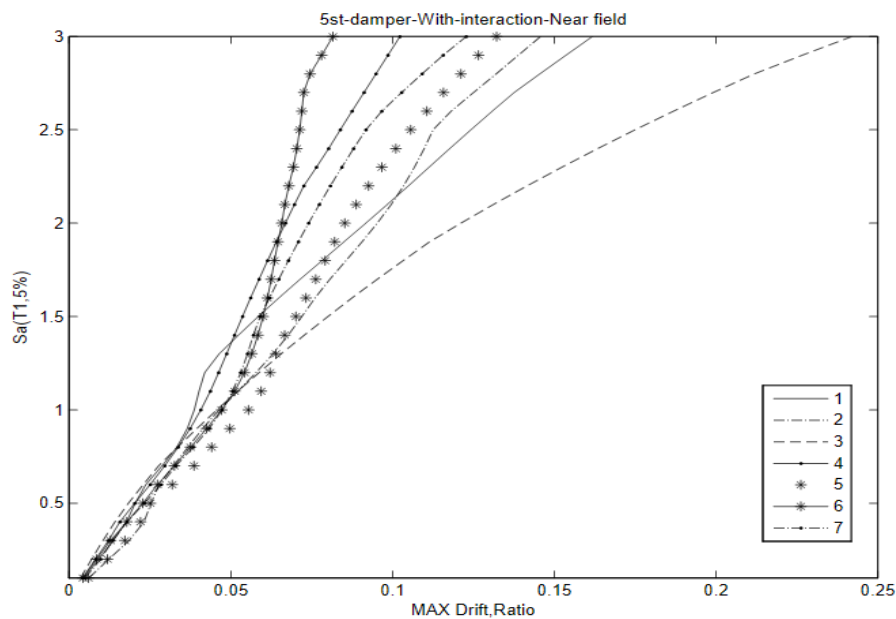
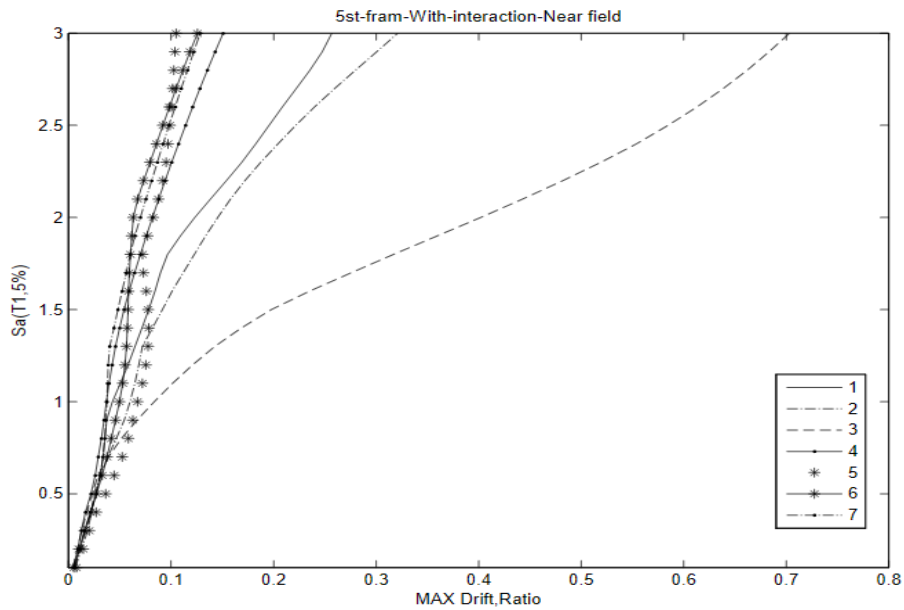
Fig. 7. IDA curve mode A and mode C- 5 floors

منحنی‌های IDA برای صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ ترسیم شده است. به دلیل وجود میراگر و مستهلک شدن انرژی، مقدار دررفت بین طبقات کاهش داشته است. همچنین با در نظر گرفتن اثر (SSI) به دلیل کاهش سختی خاک و جذب انرژی، زمان تناوب افزایش یافته با توجه به سختی سازه میزان دررفت بین طبقات افزایش یافته است لذا در شتاب طیفی کمتر به

خرابی سازه دارد. همچنین نشان می‌دهد وجود میراگر در دو حالت C, D باعث کاهش احتمال خرابی می‌گردد.

۳-۲- قاب ۵ طبقه

منحنی IDA قاب ۵ طبقه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. منحنی IDA حالت B و حالت D ۵ طبقه

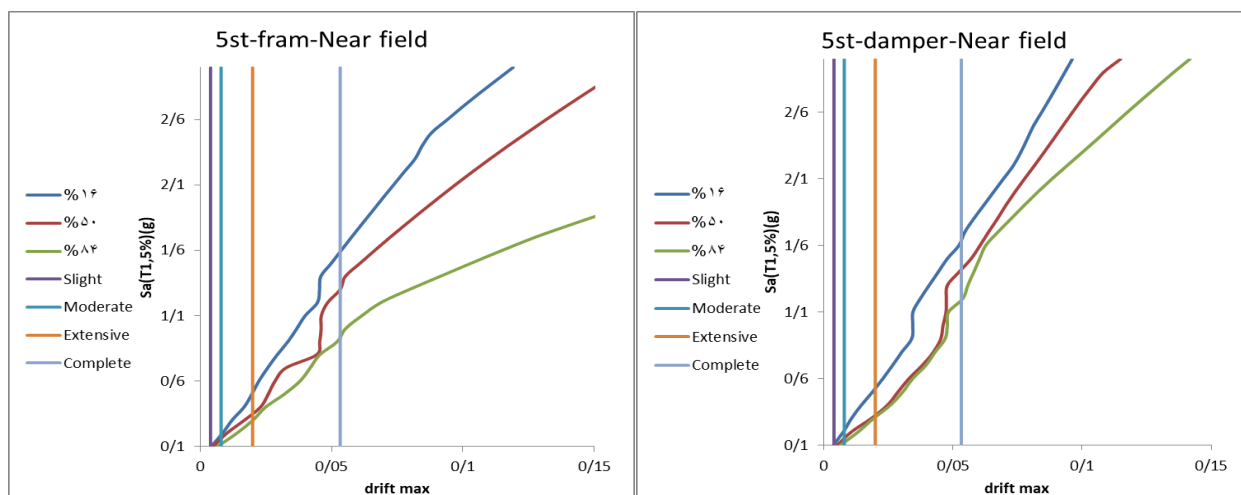
Fig. 8. IDA curve of mode B and mode D -5 floors

به حالت‌های دیگر کمتر است و در حالت قاب D در شتاب بالاتری وارد ناحیه فروریزش می‌شود که عملکرد بهتری می‌باشد. با توجه به صدک‌ها، سطح خرابی برای هر قاب در شتاب طیفی در جدول‌های ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده است.

نتایج جدول‌های ۱۵ الی ۱۷ نشان می‌دهد که حالت C نسبت مدل‌های

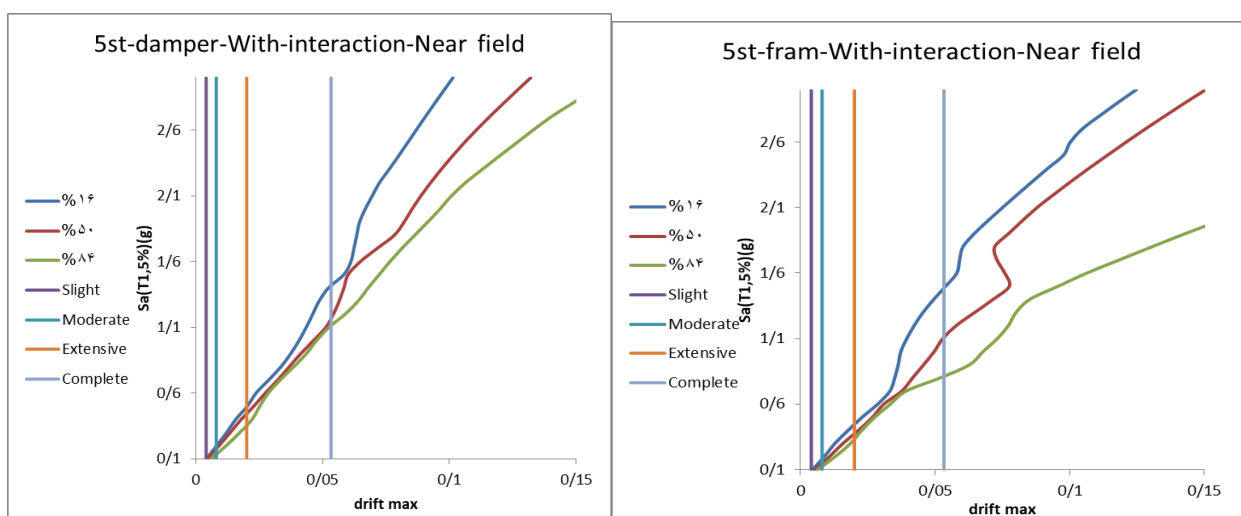
سطح خرابی در همه‌ی مدل‌ها رسیده است. با افزایش تعداد طبقات، سطح خرابی در شتاب طیفی کمتری رخ داده و احتمال خرابی افزایش یافته است. با در نظر گرفتن (SSI) احتمال خرابی برای سازه‌ها به واقعیت نزدیک‌تر شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شیب ناحیه خطی در حالت B,D نسبت



شکل ۹. خلاصه منحنی IDA حالت A و حالت C ۵ طبقه

Fig. 9. Summary of the IDA curve of mode A and mode C of 5 floors



شکل ۱۰. خلاصه منحنی IDA حالت B و حالت D ۵ طبقه

Fig. 10. Summary of the IDA curve of mode B and mode D of 5 floors

نشان داده شده است.

منحنی شکنندگی نشان می‌دهد که احتمال شکست سازه در حالت خرابی کم در مقادیر  $Sa$  کمتر رخ می‌دهد و حالات خرابی متوسط، گسترده و کلی در مقادیر بالاتر  $Sa$  اتفاق می‌افتد. در تمام منحنی‌ها، برای حالات خرابی کم و متوسط، شیب منحنی ابتدا زیاد است و سپس کاهش یافته است.

دیگر در شتاب طیفی بالاتری به سطح خرابی می‌رسد که بیانگر عملکرد میراگر در کاهش دررفت بین طبقات به‌عنوان معیار خسارت می‌باشد و همچنین اثر اندرکنش خاک و سازه برافزایش دررفت بین طبقات و رسیدن به سطح خرابی در شتاب طیفی کمتر را نشان می‌دهد. منحنی شکنندگی قاب ۵ طبقه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در شکل‌های ۱۱ و ۱۲



جدول ۱۵. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۱۶٪ برای قاب ۵ طبقه

Table 15. The amount of spectral acceleration according to the damage criterion is 16% for the 5-story frame

خرابی کامل (g)	خرابی گسترده (g)	خرابی متوسط (g)	خرابی کم (g)	مدل
۱/۵۸	۰/۵۱	۰/۱۹	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت A
۱/۴۸	۰/۴۴	۰/۱۸	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت B
۱/۶۴	۰/۵۳	۰/۲۱	۰/۱۱	حالت C
۱/۴۱	۰/۵۰	۰/۲۰	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت D

جدول ۱۶. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۵۰٪ برای قاب ۵ طبقه

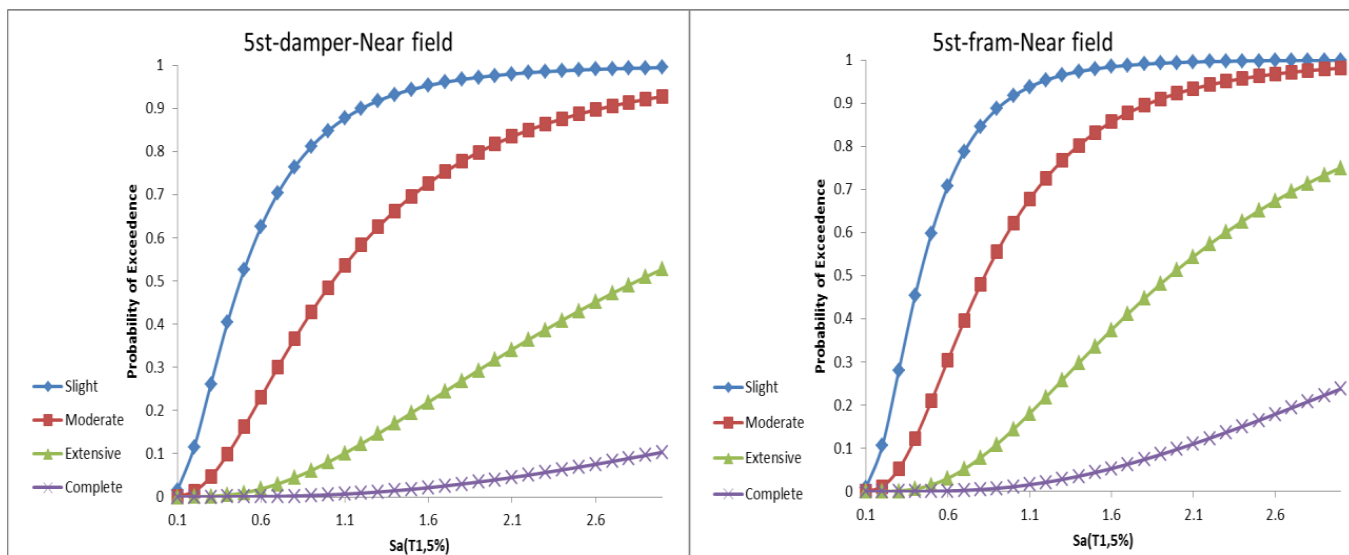
Table 16. The amount of spectral acceleration according to the damage criteria is 50% for the 5-story frame

خرابی کامل (g)	خرابی گسترده (g)	خرابی متوسط (g)	خرابی کم (g)	مدل
۱/۳۰	۰/۳۵	۰/۱۶	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت A
۱/۱۰	۰/۳۸	۰/۱۵	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت B
۱/۴۱	۰/۳۳	۰/۱۵	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت C
۱/۱۷	۰/۴۴	۰/۱۸	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت D

جدول ۱۷. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۸۴٪ برای قاب ۵ طبقه

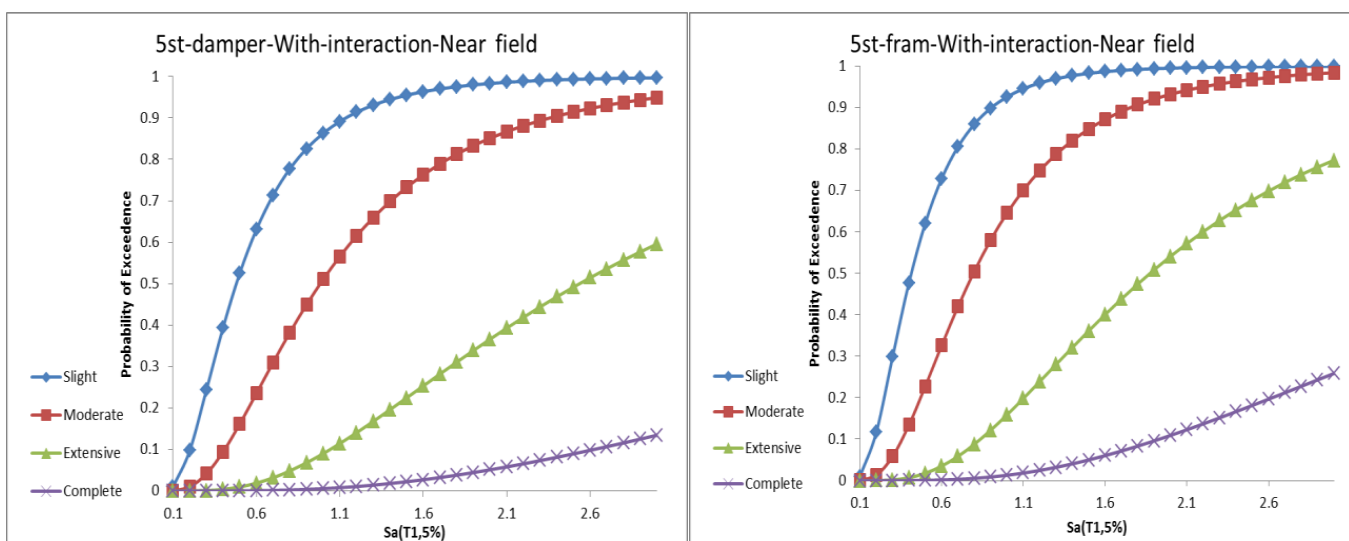
Table 17. The amount of spectral acceleration according to the damage criterion is 84% for the 5-story frame

خرابی کامل (g)	خرابی گسترده (g)	خرابی متوسط (g)	خرابی کم (g)	مدل
۰/۹۴	۰/۳۰	۰/۱۲	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت A
۰/۸۱	۰/۳۳	۰/۱۳	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت B
۱/۱۹	۰/۳۱	۰/۱۲	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت C
۱/۱۱	۰/۳۵	۰/۱۳	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت D



شکل ۱۱. منحنی شکنندگی حالت A و حالت C ۵ طبقه

Fig. 11. Fragility curve of state A and state C- 5 floors



شکل ۱۲. منحنی شکنندگی حالت B و حالت D ۵ طبقه

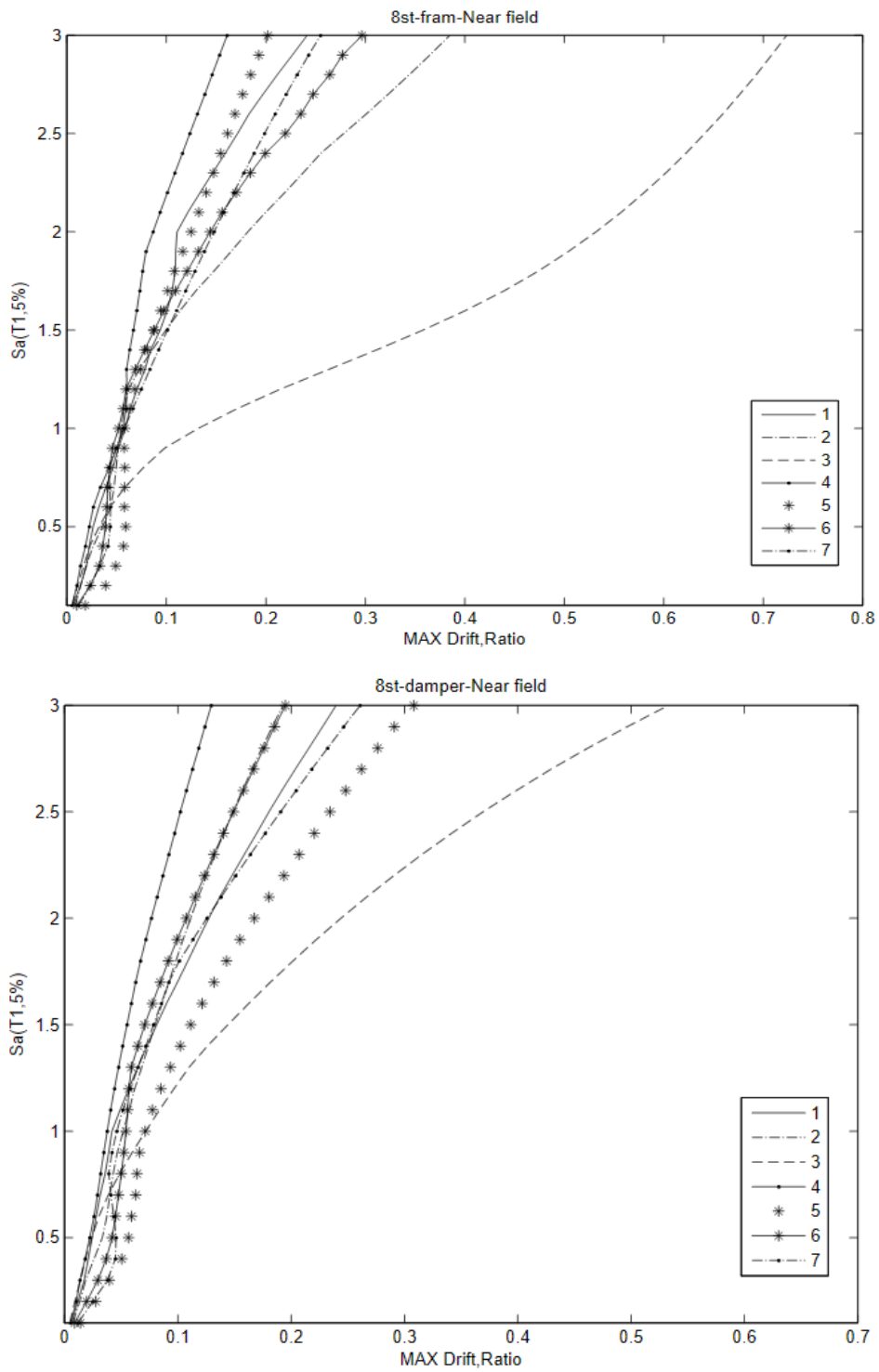
Fig. 12. Fragility curve of state B and state D- 5 floors

۳-۳- قاب ۸ طبقه

منحنی IDA قاب ۸ طبقه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

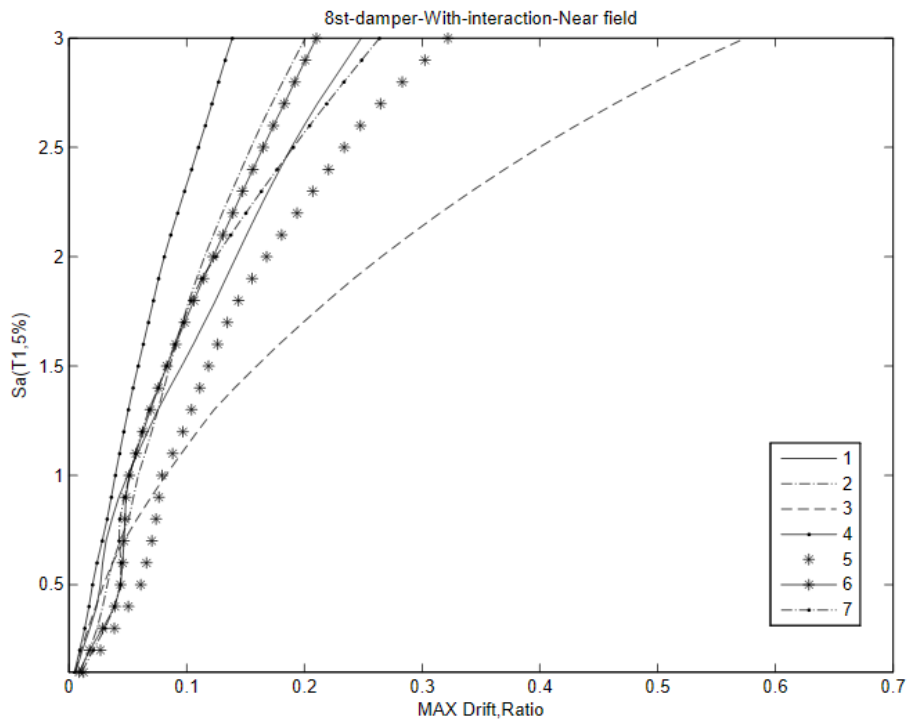
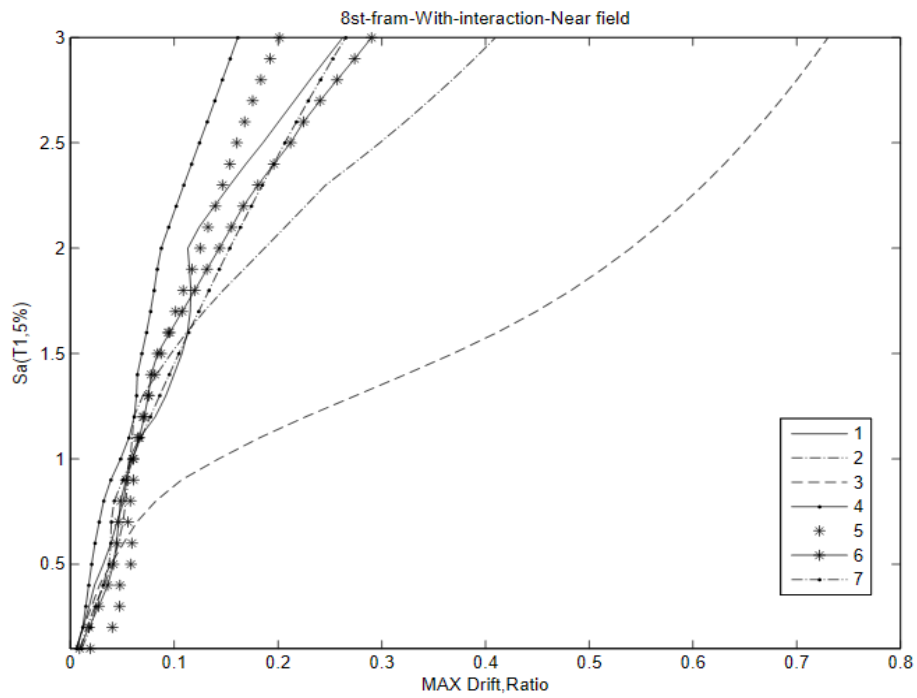
به منظور مقایسه بهتر منحنی‌های IDA، این منحنی‌ها را برای صدک

برای حالت خرابی گسترده، منحنی‌ها تقریباً با شیب یکنواخت در حال تغییر هستند و در حالت خرابی کلی نیز تغییرات شیب بسیار کم است. با توجه به ضریب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک برای سازه ۵ طبقه، شکنندگی در شتاب طیفی ۱/۲۶۶ برای خاک نوع سه رخ می‌دهد.



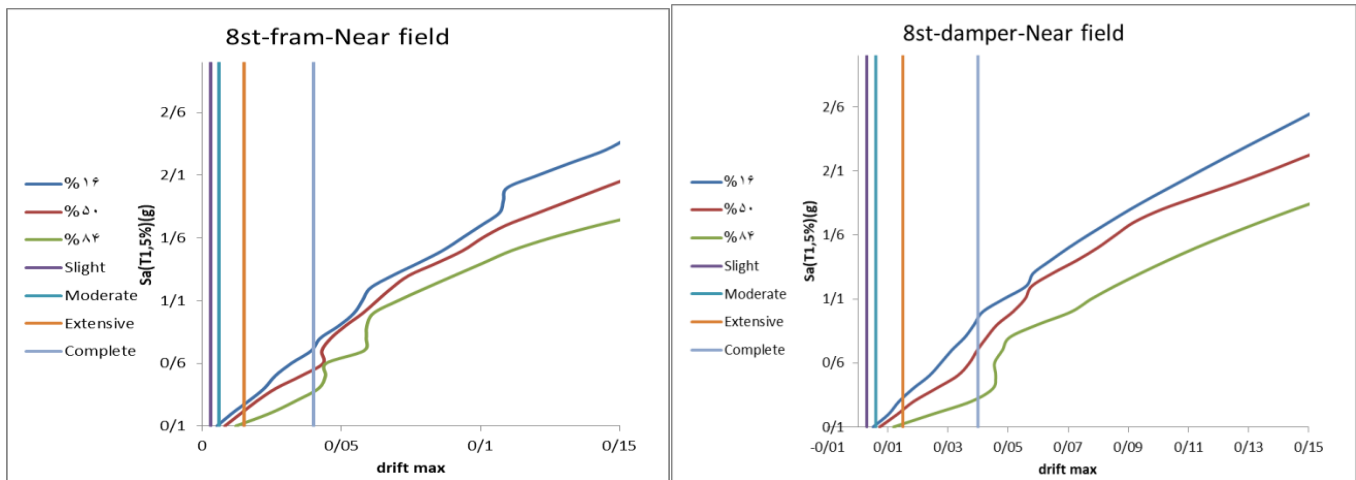
شکل ۱۳. منحنی IDA حالت A و حالت C ۸ طبقه

Fig. 13. IDA curve mode A and mode C- 8 floors



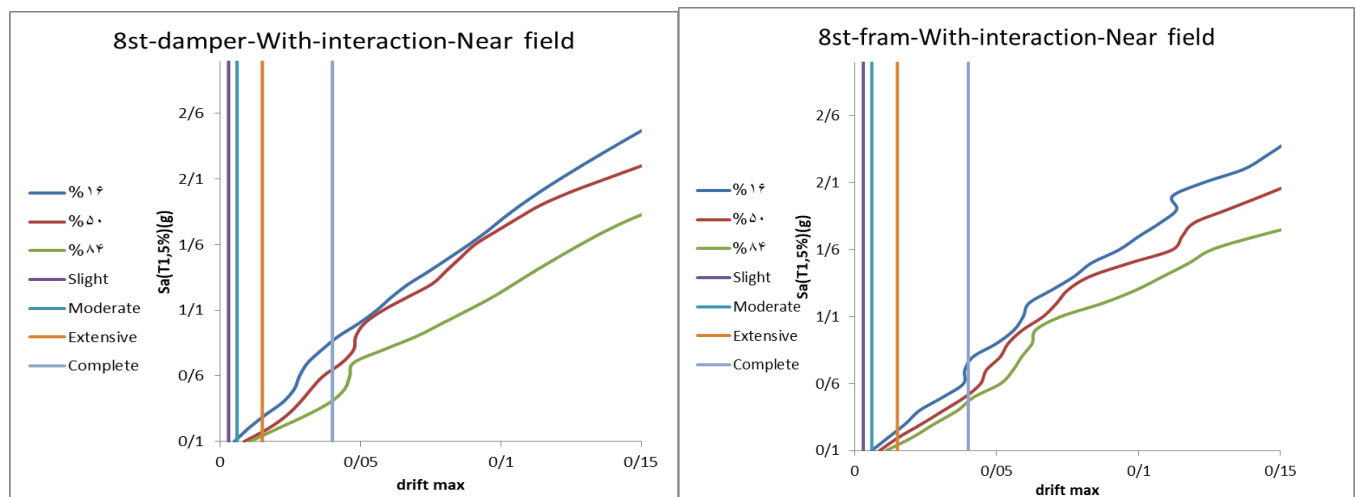
شکل ۱۴. منحنی IDA حالت B و حالت D ۸ طبقه

Fig. 14. IDA curve mode B and mode D- 8 floors



شکل ۱۵. خلاصه منحنی IDA حالت A و حالت C ۸ طبقه

Fig. 15. Summary of the IDA curve of mode A and mode C of 8 floors



شکل ۱۶. خلاصه منحنی IDA حالت B و حالت D ۸ طبقه

Fig. 16. Summary of the IDA curve of mode B and mode D of 8 floors

دیگر می‌باشد. در جدول‌های ۱۸ الی ۲۰ با توجه به صدک، سطح خرابی برای هر قاب در شتاب طیفی نشان داده شده است.

نتایج جدول‌های ۱۸ الی ۲۰ نشان می‌دهد که حالت C نسبت مدل‌های دیگر در شتاب طیفی بالاتری به سطح خرابی می‌رسد که بیانگر عملکرد میراگر در کاهش دررفت بین طبقات است، همچنین اثر اندرکنش خاک

های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ خلاصه شده است.

شیب ناحیه خطی معرف سختی سازه می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شیب ناحیه خطی در حالت D، B نسبت به حالت‌های دیگر کمتر است که رفتار نرم‌تری را نشان می‌دهد و در حالت D در شتاب بالاتری وارد ناحیه فروریزش می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد بهتری نسبت به حالات

جدول ۱۸. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۱۶٪ برای قاب ۸ طبقه

Table 18. The amount of spectral acceleration according to the damage criteria is 16% for the 8-story frame

خرابی کامل (g)	خرابی گسترده (g)	خرابی متوسط (g)	خرابی کم (g)	مدل
۰/۷۳	۰/۲۷	۰/۱۱	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت A
۰/۷۴	۰/۲۵	۰/۱۰	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت B
۰/۹۵	۰/۳۳	۰/۱۲	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت C
۰/۸۶	۰/۲۸	۰/۱۲	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت D

جدول ۱۹. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۵۰٪ برای قاب ۸ طبقه

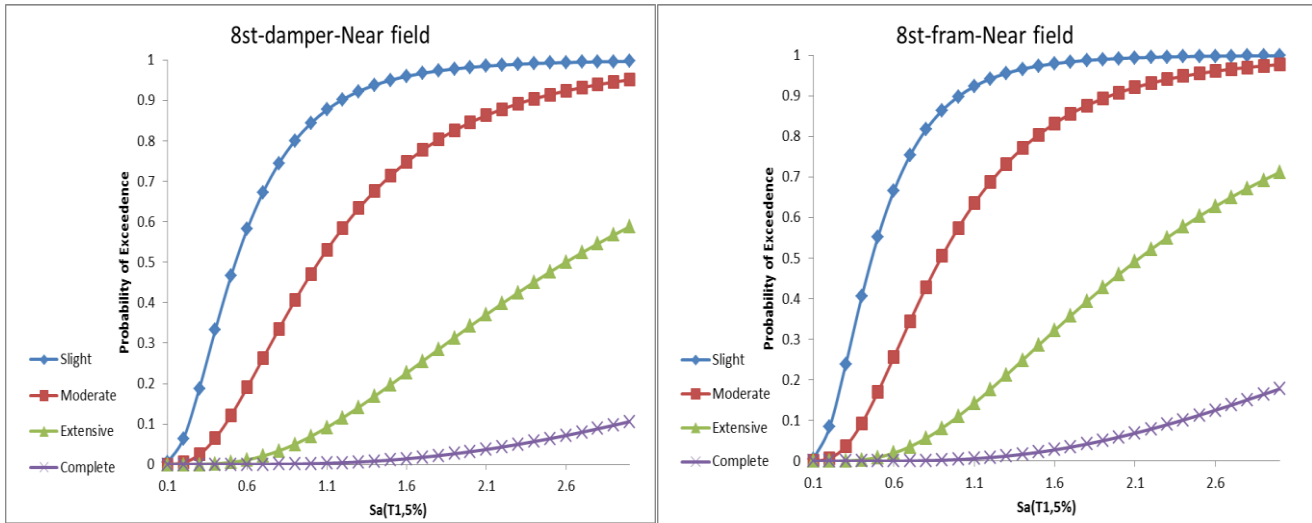
Table 19. The amount of spectral acceleration according to the damage criteria is 50% for the 8-story frame

خرابی کامل (g)	خرابی گسترده (g)	خرابی متوسط (g)	خرابی کم (g)	مدل
۰/۵۵	۰/۲۲	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت A
۰/۵۲	۰/۱۹	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت B
۰/۷۰	۰/۲۳	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت C
۰/۶۵	۰/۱۷	۰/۱۲	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت D

جدول ۲۰. میزان شتاب طیفی برحسب معیار خسارت ۸۴٪ برای قاب ۸ طبقه

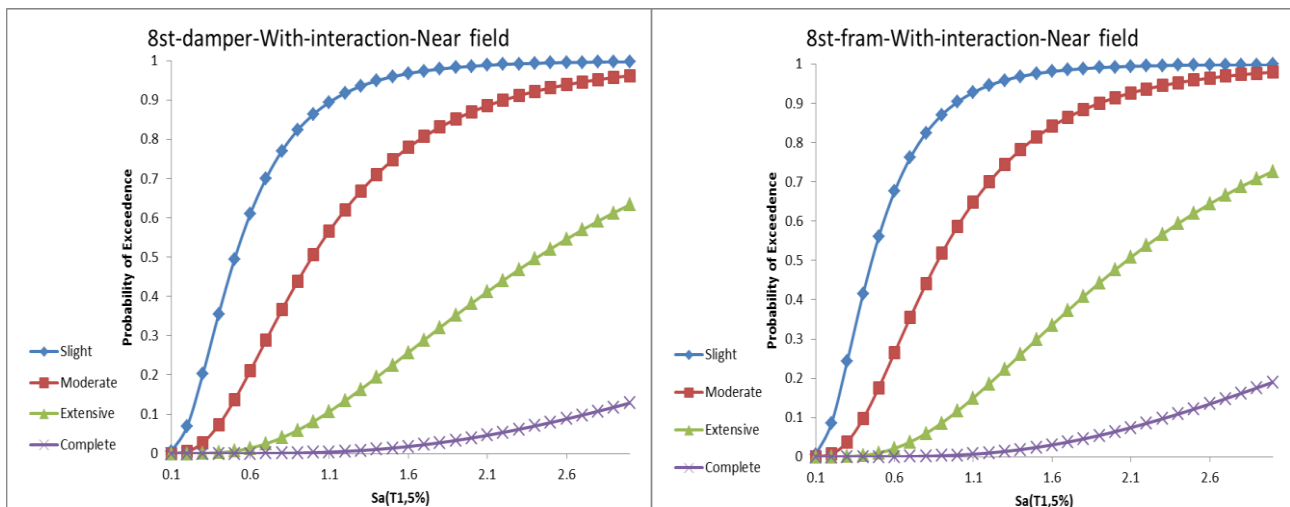
Table 20. The amount of spectral acceleration according to the damage criterion is 84% for the 8-story frame

خرابی کامل (g)	خرابی گسترده (g)	خرابی متوسط (g)	خرابی کم (g)	مدل
۰/۳۷	۰/۱۲	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت A
۰/۴۶	۰/۱۴	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت B
۰/۳۳	۰/۱۲	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت C
۰/۴۲	۰/۱۴	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	به ۰/۱۰ نمی‌رسد	حالت D



شکل ۱۷. منحنی شکنندگی حالت A و حالت C ۸ طبقه

Fig. 17. Fragility curve of state A and state C- 8 floors



شکل ۱۸. منحنی شکنندگی حالت B و حالت D ۸ طبقه

Fig. 18. Fragility curve of state B and state D- 8 floors

خرابی کم در مقادیر  $Sa$  کمتر رخ می‌دهد و به ترتیب حالات خرابی متوسط، گسترده و کلی در مقادیر بالاتر  $Sa$  اتفاق می‌افتد. در تمام منحنی‌ها، برای حالات خرابی کم و متوسط شیب منحنی ابتدا زیاد است و سپس کاهش یافته است. برای حالت خرابی گسترده منحنی‌ها تقریباً با شیب یکنواخت در حال

و سازه برافزایش دررفت بین طبقات و رسیدن به سطح خرابی در شتاب طیفی کمتر را نشان می‌دهد. منحنی شکنندگی قاب ۸ طبقه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. منحنی شکنندگی نشان می‌دهد که احتمال شکست سازه در حالت



مرتبه تأثیر چندانی در برش پایه طبقات نداشته ولی در سازه‌های بلندمرتبه با افزایش میرایی برش پایه طبقات کاهش یافته است.

نتایج به دست آمده از تحلیل دینامیکی افزایشی نشان داد که حالت C نسبت به مدل‌های دیگر، در شتاب طیفی بالاتری به سطح خرابی می‌رسد که بیانگر عملکرد میراگر در کاهش دررفت بین طبقات است. همچنین اثر اندرکنش خاک و سازه برافزایش دررفت بین طبقات و رسیدن به سطح خرابی در شتاب طیفی کمتر در همه‌ی مدل‌ها بارز بوده است. با افزایش تعداد طبقات، سطح خرابی در شتاب طیفی کمتری رخ می‌دهد. با بررسی منحنی شکنندگی در همه مدل‌ها با افزایش  $Sa(T1, 5\%)$  شکنندگی افزایش یافته است و برای مقادیر پایین‌تر  $Sa(T1, 5\%)$ ، سرعت تغییرات در احتمال رسیدن از یک حالت خرابی، بیشتر از مقادیر بالاتر  $Sa(T1, 5\%)$  می‌باشد. در همه مدل‌ها احتمال خرابی کم در مقادیر  $Sa(T1, 5\%)$  کمتر رخ می‌دهد و به ترتیب حالات خرابی متوسط، گسترده و کلی در مقادیر بالاتر  $Sa(5\%)$  (T1) رخ می‌دهد. نتایج همچنین حاکی از آن است که هر چه تعداد طبقات افزایش یافته است احتمال خرابی افزایش یافته است.

برای سازه‌های ۳ طبقه با شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک برای حالت A نسبت به حالت B، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۰/۷۲، ۲/۹۷، ۱۱/۳۷ و ۲۳/۰۶ درصد کاهش یافته است. حالت C نسبت به حالت D، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۳/۲۷، ۱۰/۸۸، ۳۲/۰۷ و ۵۲/۴۹ درصد کاهش یافته است. حالت C نسبت به حالت A، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۴/۰۱، ۱۳/۵۳، ۳۹/۳۱ و ۶۲/۴۱ درصد کاهش یافته است. حالت B نسبت به حالت D، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۱/۴۸، ۸/۸۵، ۲۰/۸۲ و ۳۹/۱۲ درصد کاهش یافته است.

برای سازه‌های ۵ طبقه با شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک برای حالت A نسبت به حالت B، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۰/۵۵، ۲/۶۳، ۷/۸۷ و ۱۲/۷۱ درصد کاهش یافته است. حالت C نسبت به حالت D، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۱/۴۵، ۵/۱۶، ۱۲/۷ و ۱۸/۶۶ درصد کاهش یافته است. حالت C نسبت به حالت A، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۵/۱۱، ۱۸/۸۹، ۴۳/۵۷ و ۵۹/۲۶ درصد کاهش یافته است. حالت B نسبت به حالت D، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۴/۲۴، ۱۶/۷۲، ۴۰/۴۵ و ۵۶/۲۸ درصد کاهش یافته است.

برای سازه‌های ۸ طبقه با شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک برای حالت A

تغییر هستند و در حالت خرابی کلی نیز تغییرات شیب بسیار کم است. با توجه به ضریب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک برای سازه ۸ طبقه، شکنندگی در شتاب طیفی ۱/۲۷۶ برای خاک نوع سه رخ می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سازه‌های فولادی ۳، ۵ و ۸ طبقه جهت ارزیابی شکنندگی قاب‌های فولادی مجهز به میراگر اصطکاکی پال تحت زلزله پالس دار حوزه نزدیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در چهار حالت سازه‌های قاب خمشی بدون در نظر گرفتن اندرکنش (A)، با در نظر گرفتن اندرکنش (B)، با استفاده از میراگر (C) و در حالت استفاده از میراگر با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (D) تحت ۷ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در نرم‌افزار اپنسیس تحلیل دینامیکی افزایشی انجام شده است. جهت رسم منحنی IDA،  $Sa(T1, 5\%)$  به عنوان پارامتر شدت لرزه‌ای و ماکزیمم تغییر مکان نسبی طبقات، به عنوان معیار شدت خسارت در نظر گرفته شده و جهت رسم منحنی شکنندگی از دستورالعمل HAZUS بر اساس نسبت تغییر مکان نسبی طبقات در ۴ حالت خرابی، جزئی (Slight)، متوسط (Moderate)، گسترده (Extensive) و کلی یا کامل (Complete) استفاده شده است. همچنین ارزیابی عملکرد میراگرها در سازه‌هایی با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۸ نشان داد که: حالت B در سازه‌های کوتاه مرتبه طبقات جابه‌جایی طبقات تقریباً ثابت مانده و هیچ تفاوتی نسبت به حالت A نداشته است؛ اما استفاده از میراگرها باعث کاهش جابجایی طبقات شده است از طرفی در سازه‌هایی با حالت D جابجایی طبقات نسبتاً کاهش یافته است. همچنین الگوی کاهش جابجایی در رکوردهای مختلف، متفاوت بوده است که این موضوع به دلیل متفاوت بودن محتوای فرکانسی رکوردها می‌باشد. با افزایش تعداد طبقات، مقدار تأثیرگذاری اثرات میراگر تقریباً ثابت بوده است؛ اما در سازه‌های با تعداد طبقات بیشتر دارای حالت B باعث افزایش جابجایی طبقات شده؛ که میزان افزایش بستگی به نوع رکوردها نیز دارد. افزایش میرایی در سازه‌های کوتاه مرتبه تأثیر چندانی در جابجایی طبقات نداشته ولی در سازه‌های بلندمرتبه با افزایش میرایی جابجایی طبقات کاهش یافته است. نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهد که استفاده از میراگر تأثیری در مقدار برش پایه سازه‌ها نداشته اما در سازه‌های با تعداد طبقات بیشتر، مقدار برش پایه نیز افزایش یافته است. در سازه‌هایی با حالت D، برش پایه کاهش یافته است. لازم به ذکر است که مقدار برش پایه در رکوردهای مختلف متفاوت بوده و این الگوی تغییر تقریباً ثابت بوده است. افزایش میرایی در سازه‌های کوتاه

Structure with Pall Damper under Blast Loading, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 52(10) (2020) 2415-2434. (In Persian)

- [9] F. Rafie, H. Hamidi, J. Vaseghi Amiri, Determining the Optimal Slip Load Pattern of Pall Friction Dampers considering Soil-Structure interaction, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(2) (2022) 793-808. (In Persian)
- [10] M. Li, X. Lu, X. Lu, L. Ye, Influence of soil-structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6(5) (2014) 477-485.
- [11] J. Vaseghi, S. Navaei, B. Navayinia, F. Roshantabari, A parametric assessment of friction damper in eccentric braced frame, International Journal of Civil Environmental Engineering, 3(10) (2009) 361-365. (In Persian)
- [12] G. Abdollahzadeh, S. Shabani, The effect of viscoelastic damper on reducing seismic responses of steel frame structures, Asian Journal of Civil Engineering, 18 (2017) 945-960.
- [13] M. Arbabi, H. Tahghighi, Influence of nonlinear SSI on the seismic response of low-to-mid-rise steel moment resisting frame buildings, Journal of Structural and Construction Engineering, 7(Special Issue 3) (2020) 35-52. (In Persian)
- [14] M. Moradi, H. Tavakoli, G. Abdollahzadeh, Probabilistic assessment of failure time in steel frame subjected to fire load under progressive collapses scenario, Engineering failure analysis, 102 (2019) 136-147.
- [15] J.L. Ingargiola, C.P. Jones, R.C. Quinn, ASCE 24: Improving the performance of buildings and structures in flood hazard areas, in: Advances in Hurricane Engineering: Learning from Our Past, 2013, pp. 53-66.
- [16] C. Neighbors, E. Cochran, Y. Caras, G. Noriega, Sensitivity analysis of FEMA HAZUS earthquake model: case study from King County, Washington, Natural Hazards Review, 14(2) (2013) 134-146.
- [17] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited
- نسبت به حالت B، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۰/۳۵، ۱/۵۸، ۴/۶۳ و ۸/۳۱ درصد کاهش یافته است. حالت C نسبت به حالت D، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۱/۴۴، ۵/۴۱، ۱۳/۶۸ و ۲۲/۵۶ درصد کاهش یافته است. حالت C نسبت به حالت A، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۳/۶۲، ۱۳/۸۵، ۳۳/۶۶ و ۵۱/۶۴ درصد کاهش یافته است. حالت B نسبت به حالت D، احتمال خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل به ترتیب ۲/۵۵، ۱۰/۳۷، ۲۶/۷۱ و ۴۲/۷۵ درصد کاهش یافته است.

## منابع

- [1] G.A. MacRae, D.V. Morrow, C.W. Roeder, Near-fault ground motion effects on simple structures, Journal of Structural Engineering, 127(9) (2001) 996-1004.
- [2] P. Tothong, C. Cornell, Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures, Earthquake Engineering Structural Dynamics, 37(7) (2008) 1013-1037.
- [3] B. Alavi, H. Krawinkler, Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions, Earthquake engineering & structural dynamics, 33(6) (2004) 687-706.
- [4] J.F. Hall, T.H. Heaton, M.W. Halling, D. Wald, Near-source ground motion and its effects on flexible buildings, Earthquake spectra, 11(4) (1995) 569-605.
- [5] C. Champion, A. Liel, The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk, Earthquake Engineering Structural Dynamics, 41(10) (2012) 1391-1409.
- [6] A. Özüyüç, E. Norooznejad Farsangi, Influence of pulse-like near-fault ground motions on the base-isolated buildings with LRB devices, Practice Periodical on Structural Design construction, 26(4) (2021) 04021027.
- [7] F. Sardari, M. Dehkordi, M. Eghbali, D. Samadian, Practical seismic retrofit strategy based on reliability and resiliency analysis for typical existing steel school buildings in Iran, International Journal of Disaster Risk Reduction, 51 (2020) 101890.
- [8] M. Moradi, H. Tavakoli, Energy Balance on Steel

- on parallel computers, Network for earthquake engineering simulations, (2008).
- [20] C.A. Goulet, T. Kishida, T.D. Ancheta, C.H. Cramer, R.B. Darragh, W.J. Silva, Y.M. Hashash, J. Harmon, G.A. Parker, J.P. Stewart, PEER NGA-east database, Earthquake Spectra, 37(1\_suppl) (2021) 1331-1353.
- nonlinear buildings, Journal of engineering mechanics, 130(4) (2004) 366-385.
- [18] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, Earthquake engineering structural dynamics, 31(3) (2002) 491-514.
- [19] F. McKenna, G. Fenves, Using the OpenSees interpreter

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Mohammadzadeh, M. Bostani, E. Farkat, N. Mohammadzadeh, Soil-Structure Interaction Effect on seismic response of Low- and mid-rise steel moment frames equipped with Pall friction damper, Amirkabir J. Civil Eng., 55(7) (2023) 1337-1362.*

DOI: 10.22060/ceej.2023.20880.7559



