نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۷۳۷ تا ۷۵۸
DOI: 10.22060/ceej.2021.19082.7060

بررسی فروریزش تدریجی و تحلیل شکنندگی لرزه ای قاب های دارای مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ های حافظه دار شکلی

سیده وحیده هاشمی[۱]،محمود میری*[۱]، محسن راشکی[۱]، صادق اعتدالی[۲]

۱-دانشکده هنر و معماری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۲-دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

خلاصه: اگر چه مهاربندهای کمانش تاب قادر به اتلاف مقادیر زیادی از انرژی ورودی زلزله می باشند، اما به دلیل تغییر شکل های ماندگار بزرگ بعد از یک زلزله قوی نیاز به تعمیر یا تعویض دارند. لذا، استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی در این مهاربندها مورد توجه قرار گرفته است. این آلیاژها می توانند پس از باربرداری به وضعیت اولیه خود باز گردند. هدف از مطالعه حاضر، بررسی فروریزش تدریجی و تحلیل شکنندگی قاب های دارای مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ های حافظه دار تحت زلزله های نزدیک به گسل در مقایسه با قاب های بدون آلیاژ است. برای این منظور، دو قاب ۵ و ۱۵ طبقه دارای مهاربند کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظه دار تحت ۷ زوج شتاب-نگاشت نزدیک گسل مورد مطالعه قرار گرفته اند. تحلیل های دینامیکی غیرخطی افزایشی با استفاده از نرم افزار OpenSees بر روی قاب ها انجام شده است. نتایج نشان داد که به طور میانگین، ظرفیت و مدت زمان مورد نیاز جهت فروریزش سازه های دارای مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ نسبت به سازه های دارای مهاربند های کمانش‌تاب به ترتیب ۳۰ و ۳۵ درصد بیش‌تر است. به عنوان نمونه، به ازای شتاب طیفی g۳ ، احتمال فروریزش برای قاب ۵ طبقه با مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ ۳۸ درصد و برای قاب بدون آلیاژ ۶۰ درصد می‌باشد. در قاب ۱۵ طبقه نیز در سطح آماری ۵۰ درصد، مدت زمان فروریزش قاب با مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ، ۲۵/۶ ثانیه و قاب بدون آلیاژ، ۱۰ ثانیه می باشد. علاوه بر این، به ازای شتاب های طیفی ۱ تا ۴، استفاده از آلیاژ حافظه دار، امکان رسیدن به سطح عملکردی آستانه ی فروریزش را بیش از ۵۰ درصد کاهش می دهد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۴
ارائه آنلاین:۱۴۰۰/۰۲/۲۷

کلمات کلیدی:
مهاربند کمانش تاب
آلیاژ حافظه دار شکلی
تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی
تحلیل شکنندگی لرزه ای
مدت زمان فروریزش

۱- مقدمه

امروزه قاب‌های دارای مهاربند کمانش‌تاب(BRB)[1]، به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به عدم کمانش در فشار، نمودار هیسترزیس آن‌ها پایدار است ولی این مهاربندها دارای معایبی نیز می‌باشند. از جمله این معایب می‌توان به ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار در سازه بعد از پایان بارگذاری و همچنین هزینه بر بودن تعویض این اعضا پس از خرابی و جاری شدن هسته‌ی فولادی این مهاربندها اشاره نمود. برای رفع این نواقص، از آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA[2]) استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، یک مجموعه از آلیاژهای فلزی، مرکب از میرایی ذاتی بالا و خصوصیات مقاومتی نسبتا بالا به طور فزاینده در کاربردهای صنعتی جدید مطرح شدند که آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نام دارند. دو خاصیت مهم آن‌ها، اثر حافظه‌دار شکلی و خاصیت فوق الاستیک بودن آن‌هاست. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نوعی از مصالح هوشمندند که پتانسیل قابل توجهی برای کنترل پاسخ‌های سازه‌های مهاربندی کمانش‌تاب را دارند [۲ و ۱]. آلیاژ حافظه‌دار عنوان گروهی از مواد محرک می‌باشد که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس‌العمل شدید این مواد نسبت به برخی از پارامترهای ترمودینامیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه به گونه‌ای است که می‌تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. در دمای پایین یک نمونه حافظه‌دار می‌تواند تغییر شکل پلاستیک چند درصدی را تحمل کند و سپس به شکل اولیه‌ی خود در دمای بالا باز گردد [۳-۶]. اگر بتوان سیستم مهاربندی کمانش‌تاب را به وسیله‌ی مصالح دارای خاصیت ارتجاعی بالا و کرنش پسماند اندک، نظیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تسلیح کرد، می‌توان به یک سیستم با برگشت‌پذیری بالا دست یافت [۷]. سیستم‌های هوشمند در مهندسی سازه به سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که به طور خودکار قابلیت انطباق رفتار سازه در پاسخ به بارگذاری غیرمترقبه را دارا هستند

1 Buckling Restrained Brace
2 Shape Memory Alloy

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmiri@eng.usb.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

تا بدین وسیله، ایمنی، افزایش عمر و کارایی سازه تأمین شود. استفاده از چنین مصالحی در اعضای ساختمانی فیوز شونده باعث می‌شود که پس از زلزله، سازه آسیب دیده زودتر به حالت بهره‌برداری برگردد یا هزینه‌های تعمیر و بازسازی آن کاهش یابد. این آلیاژها به سبب وقوع تبدیل فاز در ساختار کریستالی، قادر به بازگشت شکل اولیه‌ی خود در تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد [۹ و ۸]. در ادامه، تاریخچه‌ی پژوهش در زمینه‌ی مهاربند کمانش‌تاب و آلیاژ حافظه‌دار شکلی به منظور تبیین چارچوب نظری تحقیق حاضر ارائه شده است:

عسگریان و مرادی در سال ۲۰۱۱، به بررسی قابلیت کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مهندسی سازه و زلزله پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این آلیاژها در سازه‌ها و به خصوص در مهاربندها می‌تواند موجب کاهش تغییر شکل‌های پسماند پس از زلزله گردد [۱۰]. در سال ۲۰۱۴، میلر و همکاران[1] مطالعه‌ی آزمایشگاهی و محاسباتی روی مهاربندهای کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی انجام دادند. نتایج حاکی از بهبود رفتار لرزه‌ای این نوع مهاربندها می‌باشد [۱۱]. میرزاحسینی و گرامی در سال ۲۰۱۷، ضمن ارزیابی خواص آلیاژ نوین پایه مسCu-Al-Mn ، قابلیت مدل‌های رفتاری برای شبیه‌سازی عددی این آلیاژ را بررسی نمودند. نتایج شبیه سازی عددی رفتار آلیاژ Cu-Al-Mn در آزمایش کشش و شبه استاتیکی توسط دو مدل فاگازا و خود بازگشتی نشان داد، این مدل‌ها در کنار سادگی کاربرد و عدم نیاز به پارامترهای آزمایشگاهی پیچیده، انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشته‌اند [۱۲]. هو و همکاران[2] در سال ۲۰۱۷، سه نوع آلیاژ حافظه‌دار شکلی پایه مسی، آهنی و نیکلی در مهاربند همگرای ۳ طبقه را مورد بررسی قرار دادند و تأثیر این سه نوع آلیاژ را در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که آلیاژ حافظه‌دار شکلی پایه مسی عملکرد بهتری داشته است [۱۳]. شی و همکاران[3] در سال ۲۰۱۸، سازه‌ی مهاربندی فولادی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی را تحت ۷ زلزله‌ی نزدیک گسل مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی قرار دادند و نتایج نشان داد که سطح خسارت در حد آستانه‌ی فروریزش می‌باشد [۱۴]. قلهکی و همکاران در سال ۲۰۱۸، نمونه‌های دیوار برشی فولادی سه طبقه با ورق نازک با مقیاس یک سوم، دارای درصدهای مختلف از آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti، تحت بار چرخه‌ای قرار دادند، همچنین یک نمونه دیوار برشی فولادی با ورق نازک بدون آلیاژ[4] (SPSW-Base)، تحت بار دوره‌ای مشابه قرار گرفت نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش درصد آلیاژ مصرفی شکل‌پذیری نیز افزایش یافته است [۱۵]. در سال ۲۰۱۸، میرزایی و همکاران از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب‌های با مهاربندهای هم‌محور با عضو قائم استفاده کردند و نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث اتلاف بیش‌تر انرژی زلزله می‌گردد [۱۶]. سانژینگ و همکاران[5] در سال ۲۰۱۸، با به کار بردن آلیاژ حافظه‌دار در قاب‌های با مهاربندهای همگرای هشتی، عملکرد آن‌ها را با مهاربندهای کمانش‌تاب مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بهتر است از مهاربندهای همگرای مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی به جای مهاربند کمانش‌تاب استفاده گردد [۱۷]. نظری مفرد و شکرگزار در سال ۲۰۱۹، در دو سازه ۴ و ۸ طبقه، آلیاژ حافظه‌دار شکلی را در هسته مهاربند کمانش‌تاب به کار بردند. سپس با انجام تحلیل پوش‌آور و دینامیکی افزایشی، عملکرد لرزه‌ای آن‌ها را تحت ۶ شتاب‌نگاشت زلزله ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق حاکی از بهبود پاسخ‌های لرزه‌ای مورد مطالعه بوده است [۱۸]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۰، به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی اثرات ناشی از نوع فولاد هسته و فاصله‌ی هسته از غلاف بر رفتار مهاربند کمانش‌تاب پرداخته‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که استفاده از فولاد نرم‌تر با تنش تسلیم پایین‌تر و با ضخامت برابر در هسته موجب کاهش ظرفیت باربری و مقاومت مهاربند می‌گردد [۱۹]. صابری و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی تأثیر جنس، ضخامت و سوراخ‌دار بودن صفحات کناری بر عملکرد چرخه‌ای اتصال خمشی پرداخته‌اند. برای این منظور علاوه بر استفاده از صفحات کناری از جنس فولاد نرمه و فولاد پر مقاومت کم آلیاژ، از آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم نیز استفاده شده است تا اثر فوق الاستیک این آلیاژ بر عملکرد اتصال نیز مورد بررسی قرار گیرد [۲۰]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۰، به معرفی و بررسی عملکرد آزمایشگاهی سیستم نوین مهاربندی و ترکیب آن با میراگر تسلیم شونده پرداخته‌اند. این سیستم که در راستای افزایش شکل‌پذیری، جذب انرژی بالاتر و پوشش ضعف‌های سیستم‌های موجود مورد پیشنهاد و بررسی قرار گرفته است، از یک عضو مهاربند لوزی شکل به همراه میراگر تسلیم شونده حلقوی در وسط آن تشکیل شده است. در ساخت نمونه‌ها ۳ مدل مختلف با اتصالات صلب، نیمه صلب و مفصلی مدنظر قرار گرفته است که پس از ساخت، تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته و نتایج آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه شدند. نتایج این تحقیق بیانگر قابلیت بالای هر سه سیستم در جذب انرژی

1 Miller et al.
2 Hou et al.
3 Shi et al.
4 Steel Plate Shear Wall-Base
5 Canxing et al.

و شکل‌پذیری می‌باشد [۲۱].

امروزه بررسی فروریزش تدریجی سازه‌ها و توسعه منحنی‌های شکنندگی جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها امری مهم می‌باشد. محققان در سازه‌های قاب خمشی در این زمینه تحقیقاتی ارائه داده‌اند [۲۴-۲۲]، ولی در سازه‌های مجهز به سیستم‌های مهاربندی تحقیقات محدودی انجام گرفته است. با توجه به اینکه اجرای سازه‌های فولادی با انواع سیستم‌های مهاربندی در کشورمان رایج می‌باشد، بررسی و مقایسه‌ی احتمالاتی رفتار آن‌ها با در نظر گرفتن زلزله‌های مناسب می‌تواند نگرشی نو نسبت به رفتار این سیستم‌ها ایجاد نماید. لذا در این تحقیق، با در نظر گرفتن سازه‌های فولادی ۵ و ۱۵ طبقه با سیستم مهاربندی کمانش‌تاب، انتظار ارزیابی دقیق‌تری از نقش کاربرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در پتانسیل فروریزش سازه‌ها تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل پیش‌بینی شده است. علاوه بر بررسی نقش آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در ظرفیت فروریزش قاب‌های فولادی، ارزیابی و مقایسه احتمالاتی رفتار قاب‌ها با توسعه منحنی‌های شکنندگی در سطوح مختلف عملکرد دستورالعمل FEMA P ۶۹۵ [۲۵] انجام شده است. همچنین با بررسی مدت زمان فروریزش سازه‌ها در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی، میزان اثر بخشی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در بهبود مدت زمان رخداد فروریزش مورد مطالعه قرار گرفته است و می‌توان تاب‌آوری سیستم لرزه‌ای مدنظر را افزایش داد.

۲- مبانی تحقیق

در این روش یک رکورد زمین‌لرزه به نحوی بر سازه اعمال می‌شود که محدوده‌ی وسیعی از شدت‌های لرزه‌ای و پاسخ‌های سازه را در برگیرد. به منظور انجام تحلیل‌های IDA[1]، با در نظر گرفتن اهمیت عدم قطعیت محتوی فرکانسی رکوردها و اثر شکل طیف زلزله‌ها، تعداد قابل قبولی رکوردهای زمین‌لرزه انتخاب می‌شوند. این شیوه‌ی تحلیل غیرخطی در توصیه‌های آئین‌نامه‌ای به عنوان روشی برای پیش‌بینی ظرفیت سازه‌ها در سطوح عملکرد مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و در این مطالعه در قالب روش برآورد احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای (PSDA)[2] مطرح می‌شود [۲۲]. به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی، ابتدا باید پارامترهای مناسبی برای انعکاس شدت لرزه‌ای(IM) [3] و پارامتر تقاضا(DM) [4](انتخاب شوند. انتخاب مناسب این دو پارامتر اهمیت زیادی دارد و در سال‌های گذشته تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام شده است. انتخاب یک IM مناسب، منجر به پراکندگی کمتر پاسخ‌های لرزه‌ای می‌شود و در نتیجه تخمین‌های دقیق‌تری می‌توان ارائه نمود. پارامتر مناسب IM معمولاً شتاب حداکثر زلزله(PGA[5]) و یا شتاب طیفی در مد اول سازه با میرایی ذاتی ۵ درصد (Sa(T۱,۵٪)، می‌باشد که با توجه به پیشنهادها مراجع مختلف استفاده از این پارامتر باعث پراکندگی کمتر پاسخ‌های تحلیل‌های IDA می‌گردد. DM، به منظور انعکاس هر چه بهتر پاسخ سازه‌ای است و به طور متداول برابر حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای (گریز طبقه) در نظر گرفته می‌شود. برای انجام تحلیل‌های IDA، رکوردهای زلزله متناسب با شرایط تحلیل و موقعیت سازه و با تعداد مورد قبول انتخاب می‌گردد [۲۴ و ۲۳]. در این تحقیق تحلیل‌های IDA با گام‌های کوچک و کنترل شونده انجام شده است. با توجه به هدف ارزیابی ظرفیت فروریزش سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف، به منظور به دست آوردن پاسخ‌های دقیق‌تر، در بازه‌های نزدیک به فروریزش گام‌های تحلیل کوچک‌تر شده است. از ابتدای شروع تحلیل‌های فواصل گام‌ها ۰/۱ شتاب طیفی و در آخرین بازه فواصل گام‌ها به ۰/۰۲ کاهش یافته است. همچنین به منظور همگرایی پاسخ‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی از الگوریتم هانت-فیل[6] استفاده شده است. به منظور بیان کمی آسیب‌پذیری اجزای مختلف سازه‌ای و یا غیرسازه‌ای بر حسب میزان خطر زلزله می‌توان در مورد هر نوع از سازه‌ها یا اجزای غیرسازه‌ای حساس به جابجایی نسبی و اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب، احتمال وقوع یا فراگذشت از یک میزان خسارت خاص را بر حسب یک ویژگی معرف زلزله نظیرPGA ،PGV [7] وPGD [8] بیان کرد. تکرار این عملیات برای مقادیر مختلف PGAیا سایر تک‌پارامترها، منجر به تولید منحنی‌های نرمال شده‌ای موسوم به منحنی شکنندگی می‌شود. مطالعات مختلف نشان داده است که پارامترهای ظرفیت و تقاضای لرزه‌ای سازه با توزیع احتمالاتی لوگ نرمال مطابقت بیشتری دارند و منحنی‌های شکنندگی به صورت تابع چگالی احتمالاتی تجمعی لوگ نرمال انتخاب مناسب‌تری می‌باشد [۲۴]. مطابق رابطه‌ی (۱) تابع شکنندگی تخمینی از احتمال فراگذشت میزان خرابی از حدود مشخصی برای یک شدت مشخص از زلزله را بیان می‌کند.

1 Nonlinear Incremental Dynamic Analysis
2 Probabilistic Seismic Demand Analysis
3 Intensity Measure
4 Damage Measure
5 Peak Ground Acceleration
6 Hunt & Fill Algorithm
7 Peak Ground Velocity
8 Peak Ground Displacement

$$F_i(im) = P((D > d_i|IM = im)) \quad (۱)$$

در این رابطه، F_i (im) ، احتمال فراگذشت خرابی از حالت خرابی تحت یک زلزله‌ی مشخص است. پارامترهای شدت زلزله بیانگر بزرگی زلزله می‌باشد و با پارامترهایی نظیر بیشینه شتاب زمین، شتاب طیفی مود اول سازه، بیشینه سرعت زمین و تغییر مکان طیفی (SD[1]) بیان می‌شود. حالت خرابی (i) به صورت کمی از مقدار i=۰ برای حالت بدون خرابی تا i=n برای n امین حالت خرابی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه خرابی در سازه‌ها توسط انواع مختلفی از شاخص‌های خرابی اندازه‌گیری می‌شود، رابطه (۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$F_i(im) = P((DI > di_i|IM = im)) \quad (۲)$$

در رابطه‌ی فوق d_i شاخص خسارت متناظر با حالت خرابی i ام می‌باشد. با داشتن تابع چگالی احتمال در هر مقدار از شدت زلزله، می‌توان، $F_i\left(im\right)$ را بر اساس تئوری احتمالات مطابق رابطه‌ی (۳) به دست آورد [۲۴].

$$F_i(im) = P\big((DI > di_i|IM = im)\big) = 1 - \int_{-\infty}^{di_i} f_{im}(di)d(di) \quad (۳)$$

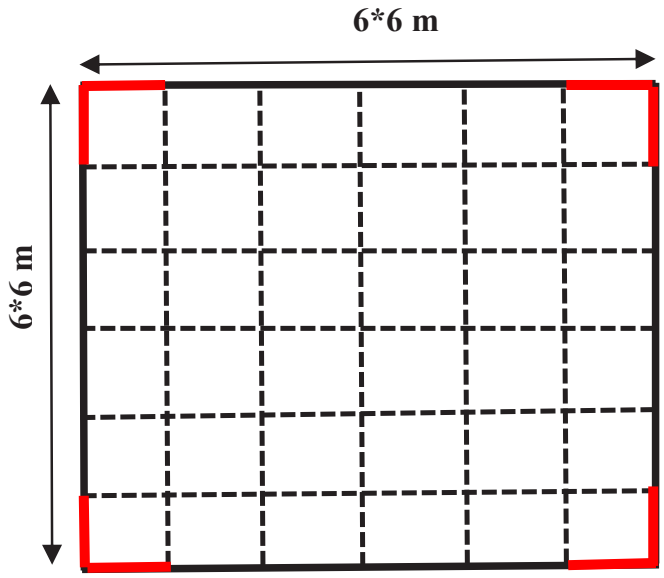
به منظور محاسبه‌ی تابع چگالی احتمال، سازه تحت رکوردهای مختلف زلزله که به شدت مشخصی مقیاس شده‌اند قرار می‌گیرد. اعمال رکوردهای زلزله‌ها به سازه معمولاً به صورت افزاینده و با افزایش تدریجی شتاب طیفی یا حداکثر شتاب آن‌ها انجام می‌شود. توزیع پاسخ سازه به ازای IM های مختلف استخراج و احتمال فراگذشت برای سطوح مختلف محاسبه می‌گردد.

۳- طراحی و مدل‌سازی

در این تحقیق، رفتار لرزه‌ای سازه‌های دارای سیستم مهاربندی کمانش‌تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی بررسی و مقایسه می‌شود. به منظور نیل به اهداف این تحقیق، ابتدا سازه‌های ۵ و ۱۵ طبقه به صورت سه بعدی بر اساس مباحث مقررات ملی ساختمان (مبحث ششم و دهم مقرارت ملی [۲۷ و ۲۶]) و استاندارد۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۸] طراحی گردید. به منظور طراحی سازه‌های مذکور از تحلیل‌های استاتیکی معادل و دینامیکی طیفی استفاده شده است [۲۹]. مقاطع طراحی شده برای قاب‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی از ۷ زوج شتاب‌نگاشت FEMA P ۶۹۵ استفاده شد. این دستورالعمل ارزیابی احتمالاتی فروریزش سازه‌ها را در بر می‌گیرد. مطابق FEMA P ۶۹۵، به منظور کاهش پراکندگی نتایج، این شتاب‌نگاشت‌ها ابتدا نسبت به سرعت حداکثر شتاب‌نگاشت مقیاس شده‌اند. همچنین در تحقیق حاضر شتاب طیفی همه‌ی رکوردها در زمان تناوب مد اول سازه، به عدد یک مقیاس گردید.

در ادامه‌ی مدل‌سازی، در هر سازه یکی از قاب‌های کناری با استفاده از نرم‌افزار OpenSees [۳۰] به صورت دو بعدی مدل شده و رفتار غیرارتجاعی قاب‌ها، که در دهانه‌های مختلف دارای مهاربندند، در دو حالت مهاربند کمانش‌تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی تحت ۱۴ شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA-P۶۹۵ بررسی شده است. هر سازه ۱۴ بار (معادل ۷ زوج شتاب‌نگاشت) تحت تحلیل دینامیکی افزایشی قرار گرفت و برای هر تحلیل یک ظرفیت فروریزش به دست آمد و تعداد داده‌های کافی جهت ارزیابی دقیق‌تر احتمال فروریزش قاب‌ها استفاده گردید. سپس منحنی‌های شکنندگی با استفاده از خروجی‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی توسط نرم‌افزار آماری Easyfit ۵.۵ترسیم شده‌اند و از تفسیر نتایج آن در جهت تعیین سطوح عملکرد سازه بهره گرفته می‌شود. پلان سازه‌های مذکور مطابق شکل ۱ در هر طرف دارای ۶ دهانه می‌باشد. فاصله‌ی دهانه‌ها ۶ متر و ارتفاع طبقات ۴ متر در نظر گرفته شده است. بار مرده‌ی طبقات ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده‌ی طبقات و بام به ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع لحاظ گردید. نمای قاب دو بعدی کناری مطابق شکل ۲ ارائه شده است. در این مقاله، مصالح به کار رفته در تیرها، ستون‌ها و مهاربندها همگی از نوع ST۳۷ با مدول الاستیسیته برابر ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۳۷۰ مگاپاسکال، در نظر گرفته شده است. مصالح فولادی تک محوری دو خطی با سخت شوندگی سینماتیکی و سختی ایزوتروپیک بر اساس مدل Steel۰۱ با میزان سخت شدگی ۳ درصد فرض شده‌اند [۳۱]. برای اعضای سازه‌ای تیر و ستون از المان تیر–ستون

1 Spectrum Displacement



شکل ۱. پلان مشترک سازه های ۵ و ۱۵ طبقه سه بعدی مورد استفاده در این تحقیق

Fig. 1. The similar plan of 5 and 15-story structures 3 dimensionally in this research

غیرخطی در مدل‌سازی استفاده شده است. این المان‌ها به صورت نیرویی[1] و بر پایه‌ی پلاستیسیته‌ی گسترده می‌باشند تا رفتار واقعی المان‌ها را در تحلیل غیرخطی ارزیابی نمایند. در ادامه، مدل عددی مهاربند کمانش‌تاب مجهز به میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی در راستای غلاف‌های داخلی و خارجی مطابق شکل ۳ ارائه شده است. برای مدل‌سازی غلاف‌های داخلی و خارجی از المان تیر–ستون الاستیک با ممان اینرسی بالا استفاده شده است. این غلاف‌ها به انتهای الاستیک قطعات مهاربند کمانش‌تاب به وسیله‌ی المان zero–length متصل شده‌اند. المان‌های GAP در دو انتهای غلاف‌ها برای مدل‌سازی لغزش صفحات استفاده شده است. میله‌های صلب در راستای طول میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به صورت المان الاستیک مدل شده‌اند. مصالح المان GAP در فشار الاستیک در نظر گرفته شده و از تاثیرات کشش صرف نظر گردیده است. المان اضافی نیز برای مدل‌سازی تماس بین صفحات لغزان و غلاف‌ها استفاده شده است. هسته مهاربند کمانش‌تاب و میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به صورت المان تیر–ستون جابجایی[2] مدل شده‌اند [۳۲]. برای مدل‌سازی این آلیاژها از دستور Self-Centering در نرم افزار OpenSees استفاده شده است. جهت برآورد رفتار غیرخطی هندسی از تبدیل همگرد استفاده شده است که در این نوع تبدیل، تبدیلات هندسی غیرخطی را به صورتی کاملاً دقیق از سیستم محلّی به سیستم کلّی محاسبه کرده است. همچنین اتصالات تیر به ستون و ستون به پی، صلب فرض شده است. شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر با مشخصات مندرج در جدول ۳ از سایت PEER [۳۳] استخراج شده‌اند و با استفاده از نرم‌افزار SeismoSignal [۳۴]، با میرایی ۵٪ ارائه شده‌اند. در این جدول ضرایب مقیاس نهائی اعمال شده به شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر ارائه شده است. این ضرایب بدون اعمال شتاب جاذبه (g)، مقدار شتاب طیفی زلزله‌ها در زمان تناوب تجربی مد اول سازه را به عدد واحد مقیاس می‌کنند. در ادامه، گام به گام روش تحقیق به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

۱–طراحی قاب‌های فولادی منظم دارای مهاربند کمانش‌تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی.

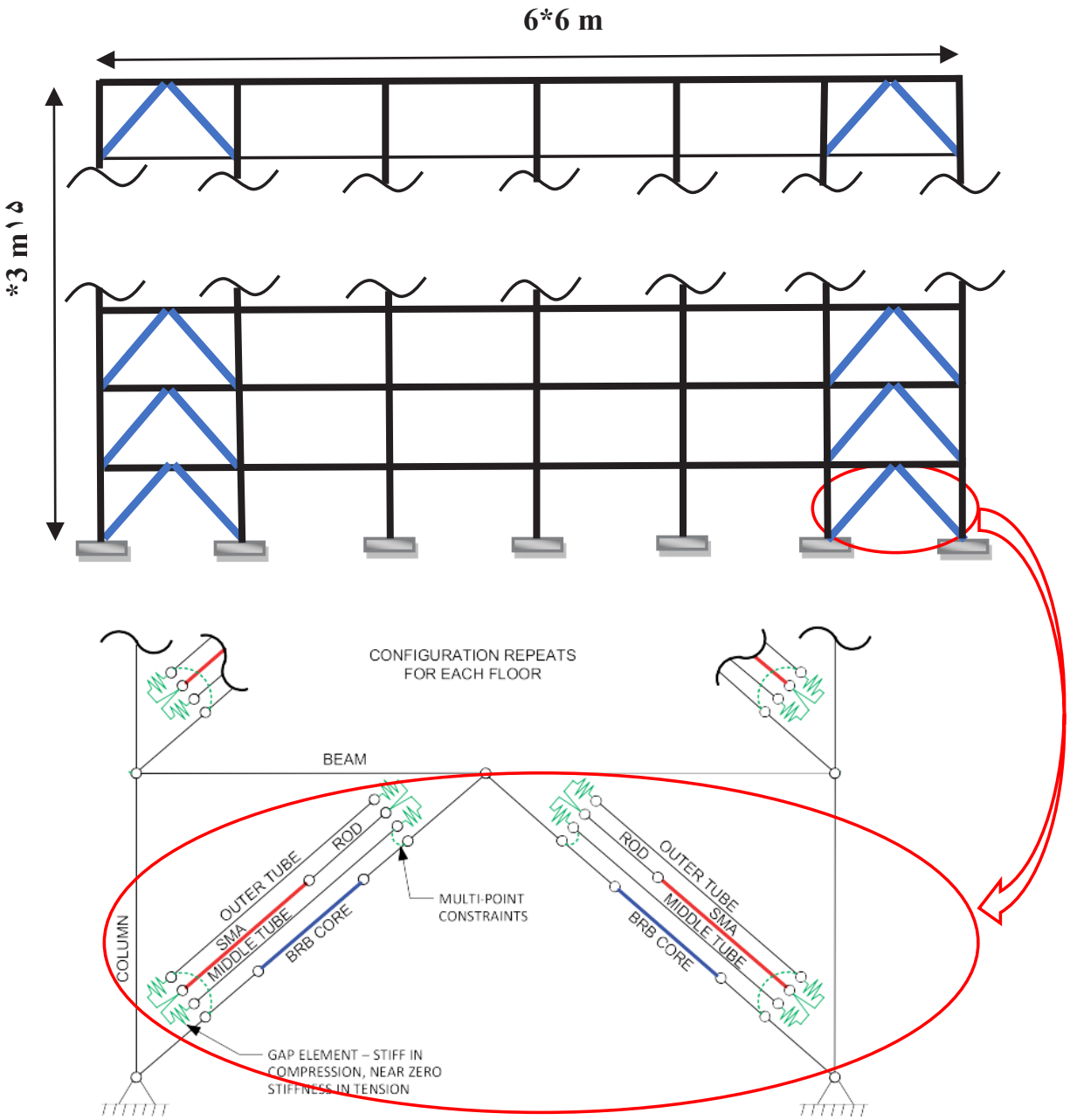
۲–تهیه مدل‌های غیرخطی قاب‌های مورد مطالعه و انتخاب ۷ زوج رکورد نزدیک به گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA P۶۹۵.

۳–انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی قاب‌های مورد مطالعه تحت رکوردهای انتخابی.

۴–برآورد ظرفیت فروریزش تدریجی و مدت زمان فروریزش قاب‌های فولادی دارای مهاربند کمانش‌تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی.

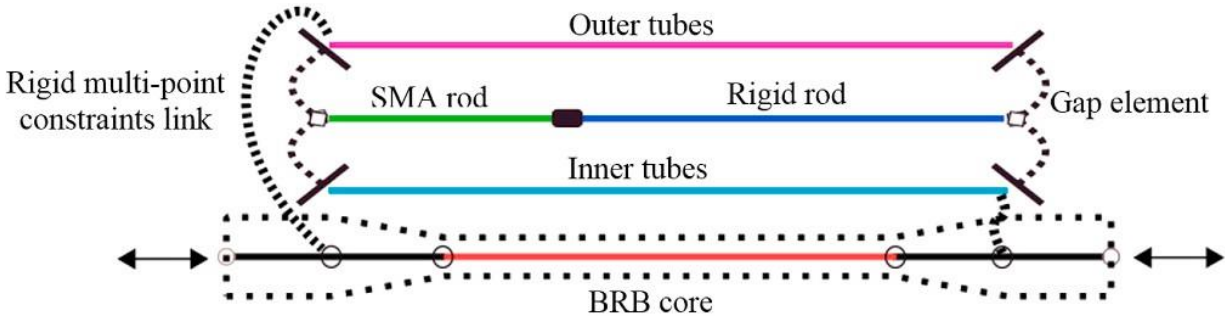
۵–توسعه‌ی منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای در سطح عملکردی فروریزش.

1 Force Beam-Column Element
2 Displacement Beam-Column Element



شکل ۲. قاب کناری استخراج شده از سازه های سه بعدی مورد نظر

Fig. 2. The side frame extracted from the studied 3D structures



شکل ۳. نمای شماتیک مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی [۳۲]

Fig.3. The schematic elevation of buckling restrained brace equipped with shape memory alloy

جدول ۱. مقاطع طراحی شده قاب ۵ طبقه

Table 1. Designed sections of 5-story frame

شماره طبقه	ستون		تیر		قاب دارای BRB	قاب دارای BRB-SMA	
	دهانه‌های کناری	دهانه‌های وسط	دهانه‌های کناری	دهانه‌های وسط	سطح مقطع هسته BRB (mm^2)	سطح مقطع SMA (mm^2)	سطح مقطع هسته BRB (mm^2)
طبقه ۱ و ۲	BOX 30*30*3	BOX 25*25*2	IPE 550	IPE 270	۱۷۱۹/۲	۱۱۴۵/۱	۳۵۴/۳
طبقه ۳ و ۴	BOX 20*20*1.5	BOX 20*20*1.5	IPE 550	IPE 270	۱۵۴۸/۳	۹۶۲/۵	۲۹۸/۱
طبقه ۵	BOX 20*20*1.5	BOX 20*20*1.5	IPE 360	IPE 270	۱۰۳۲/۲	۷۸۱/۸	۱۵۶/۲

جدول ۲. مقاطع طراحی شده قاب ۱۵ طبقه

Table 2. Designed sections of 15-story frame

شماره طبقه	ستون		تیر		قاب دارای BRB	قاب دارای BRB-SMA	
	دهانه‌های کناری	دهانه‌های وسط	دهانه‌های کناری	دهانه‌های وسط	سطح مقطع هسته BRB (mm^2)	سطح مقطع SMA (mm^2)	سطح مقطع هسته BRB (mm^2)
طبقه ۱ و ۲ و ۳	BOX 50*50*1	BOX 30*30*2.5	IPE 600	IPE 360	۴۵۸۵/۵	۳۶۸۹/۳	۹۸۷/۳
طبقه ۴ و ۵ و ۶	BOX 40*40*3	BOX 30*30*2	IPE 600	IPE 360	۴۱۲۶/۴	۳۰۱۵/۲	۸۹۸/۶
طبقه ۷ و ۸	BOX 25*25*2	BOX 23*23*2	IPE 500	IPE 330	۳۶۴۳/۹	۲۶۷۴/۴	۸۵۳/۱
طبقه ۹	BOX 25*25*1.5	BOX 22*22*1.5	IPE 450	IPE 330	۲۹۷۷/۸	۲۱۳۶/۲	۶۹۴/۵
طبقه ۱۰	BOX 25*25*1.5	BOX 21*21*1.5	IPE 400	IPE 300	۲۲۶۳/۳	۱۸۴۵/۴	۴۱۷/۳
طبقه ۱۱	BOX 23*23*1.5	BOX 21*21*1.5	IPE 360	IPE 270	۱۷۹۳/۱	۱۲۸۴/۹	۳۸۹/۴
طبقه ۱۲ و ۱۳	BOX 22*22*1.5	BOX 20*20*1.5	IPE 330	IPE 250	۱۲۵۴/۳	۹۸۹/۹	۲۹۲/۱
طبقه ۱۴ و ۱۵	BOX 22*22*1	BOX 20*20*1.5	IPE 300	IPE 230	۸۶۴/۹	۴۲۶/۴	۱۲۵/۲

جدول ۳. زلزله‌های مورد نظر در این تحقیق [۲۵]

Table 3. The studied earthquakes in this research [25]

شماره	بزرگی (M) (ریشتر)	سال وقوع	زلزله	ایستگاه زلزله	ضرایب مقیاس نهائی (g)	
					مولفه L	مولفه T
۱	۶/۵	۱۹۷۹	Imperial Valley-06	El Santro Array #6	۱/۲۷	۱/۶۷
۲	۶/۵	۱۹۷۹	Imperial Valley-06	El Santro Array #7	۱/۳۱	۰/۷۲
۳	۶/۹	۱۹۸۰	Irpinia. Italy-01	Sturno	۲/۶۴	۲/۴۲
۴	۶/۵	۱۹۸۷	Superstation Hills-02	Parachute Test Site	۱/۰۲	۱/۲۱
۵	۶/۹	۱۹۸۹	Loma Prieta	Saratoga-Aloha	۲/۰۵	۴/۱۲
۶	۶/۷	۱۹۹۲	Erzincan. Turkey	Erzincan	۱/۲۴	۱/۲۶
۷	۷/۰	۱۹۹۲	Cape Mendocino	Petrolia	۰/۷۱	۰/۶۲

۳- ۱- طراحی مهاربندهای کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی

جزئیات مدل‌سازی مهاربند کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی در شکل ۴ ارائه شده است. این مکانیسم مطابق شکل مذکور شامل سه قسمت می‌باشد: ۱) هسته‌ی BRB، ملات بتنی، پوشش بتنی و مصالح غیرچسبنده ۲) چهار میله‌ی آلیاژ حافظه‌دار شکلی و صفحات لغزان ۳) غلاف داخلی، غلاف میانی و غلاف خارجی می‌باشد. به منظور محاسبه‌ی سطح مقطع هسته‌ی مهاربند کمانش‌تاب و میله‌های آلیاژ حافظه‌دار رابطه‌های (۴) تا (۷) به کار برده می‌شوند. پارامترهای P_u ، F_{ysc}، $F_{i\text{-}SMA}$، A_{SMA}، A_{SC}، β و ω به ترتیب معادل نیروی نهایی مهاربند، تنش تسلیم هسته فولادی BRB ، تنش اولیه SMA ، سطح مقطع هسته فولادی BRB، کل سطح مقطع میله‌های SMA، ضریب مقاومت فشاری و ضریب سخت شدگی کرنشی می‌باشد. ضمنا، سطح مقطع آلیاژ حافظه‌دار چنان تعیین شده است که به هنگام تسلیم هسته‌ی مهاربندهای کمانش‌تاب جاری گردد.

$$F_i(im) = P\big((DI > di_i | IM = im)\big) = 1 - \int_{-\infty}^{di_i} f_{im}(di)d(di) \quad (۴)$$

$$\beta\omega F_{ysc} A_{sc} \le F_{i-SMA} A_{SMA} \quad (۵)$$

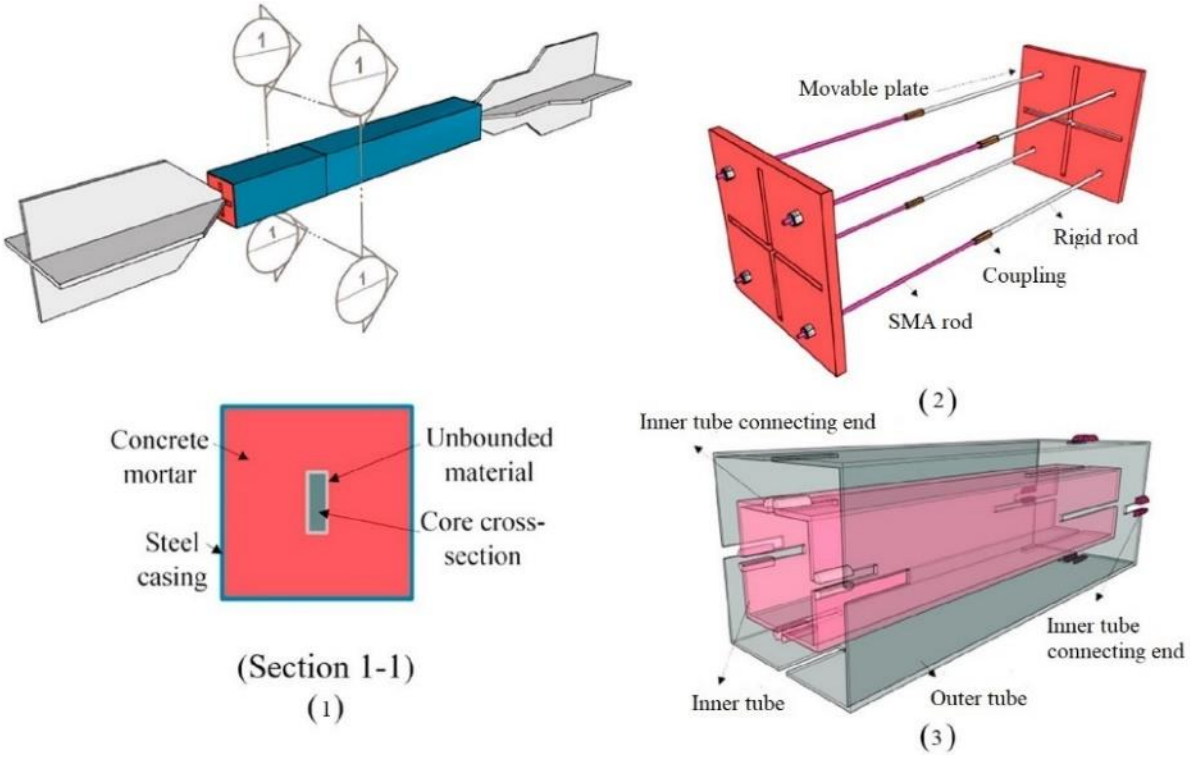
$$A_{sc} = \frac{P_{u-BRB-SMA}}{\phi F_{ysc}(1+\beta\omega)} \quad (۶)$$

$$A_{SMA} = \frac{\beta\omega F_{ysc} A_{sc}}{F_{i-SMA}} \quad (۷)$$

۴- صحت‌سنجی

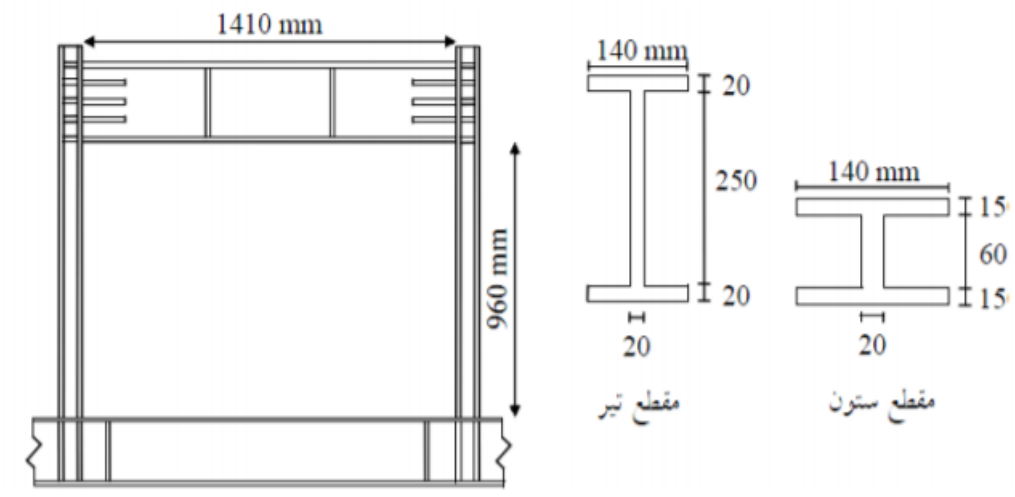
۴- ۱- صحت‌سنجی مدل‌سازی تحت بار شبه استاتیکی (چرخه‌ای)

در این تحقیق، به منظور صحت‌سنجی نمونه‌ی آزمایشگاهی قاب خمشی فولادی یک طبقه‌ی یک دهانه با ارتفاع و عرض ۱/۲۵۰ متر و ۱/۵۹۰ در نظر گرفته شده است. بار چرخه‌ای به وسیله‌ی دو جک هیدرولیکی که در دو طرف نمونه قرار دارد، وارد می‌شود. در پشت هر جک یک نیروسنج برای اندازه‌گیری نیرو قرار داده شده است. تغییر مکان نمونه توسط چهار تغییر مکان‌سنج نصب شده در کنار جک‌ها اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری تغییر شکل ستون‌ها بر روی هر ستون چهار تغییر مکان‌سنج نصب شده است که یک عدد در بالای ستون و سه عدد دیگر در فواصل مساوی از یکدیگر از پایین تا بالای هر ستون قرار داده شده است. شکل ۵ نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد [۳۵].



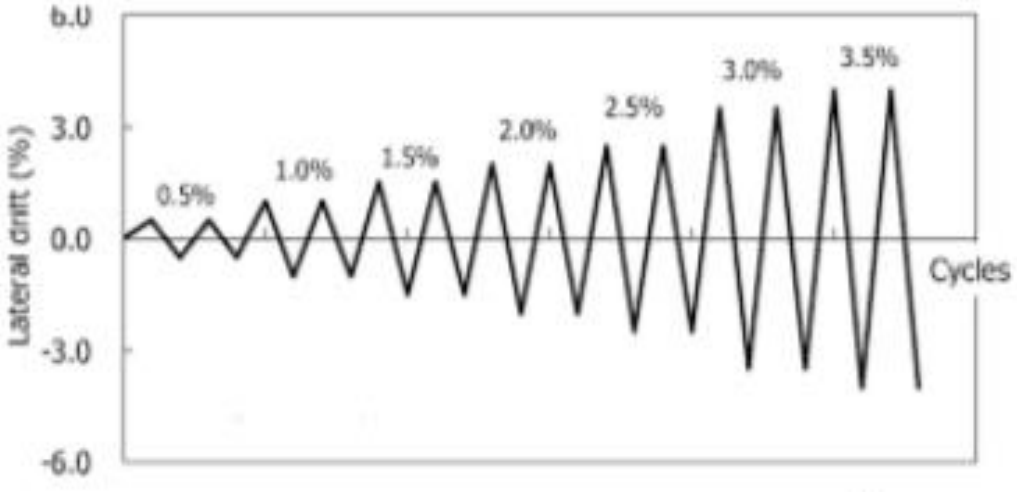
شکل ۴. جزئیات مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی ۱)مهاربند کمانش تاب ۲)میله های SMA ۳)غلاف ها [۳۲]

Fig. 4. Details of buckling restrained brace equipped with shape memory alloy 1) buckling restrained brace 2) SMA rods 3) sheaths [32]



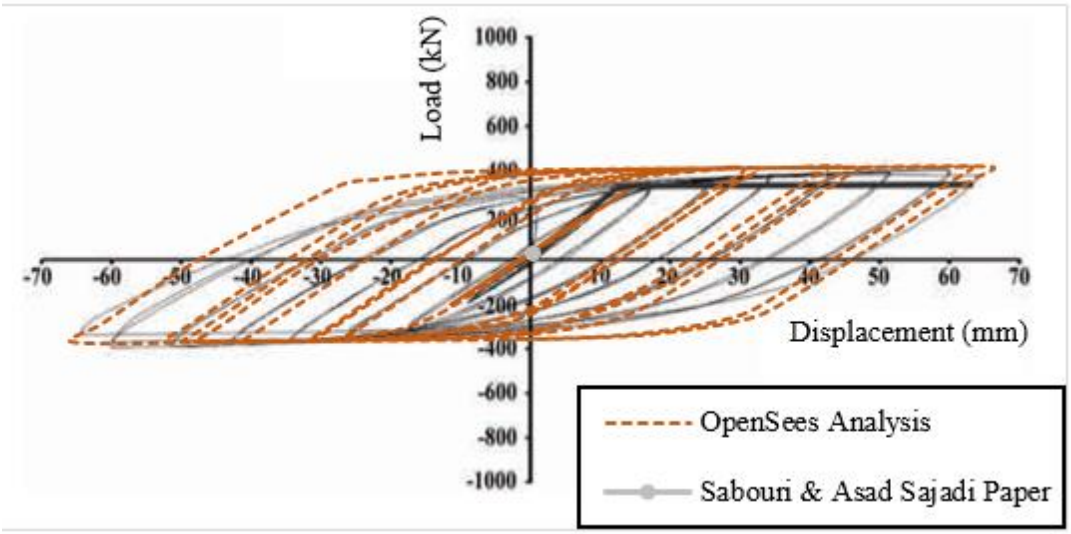
شکل ۵. مشخصات نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی فولادی صبوری و سجادی [۳۵]

Fig.5. Experimental specifications of steel moment frame of Sabouri and Sajadi [35]



شکل ۶. بارگذاری چرخه ای مطابق ATC-۲۴ [۳۶]

Fig. 6. Cyclic loading based on ATC-24 [36]



شکل ۷. مقایسه ی منحنی هیسترزیس نمونه ی عددی و نمونه ی آزمایشگاهی

Fig. 7. The hysteresis curve comparison of numerical and experimental models

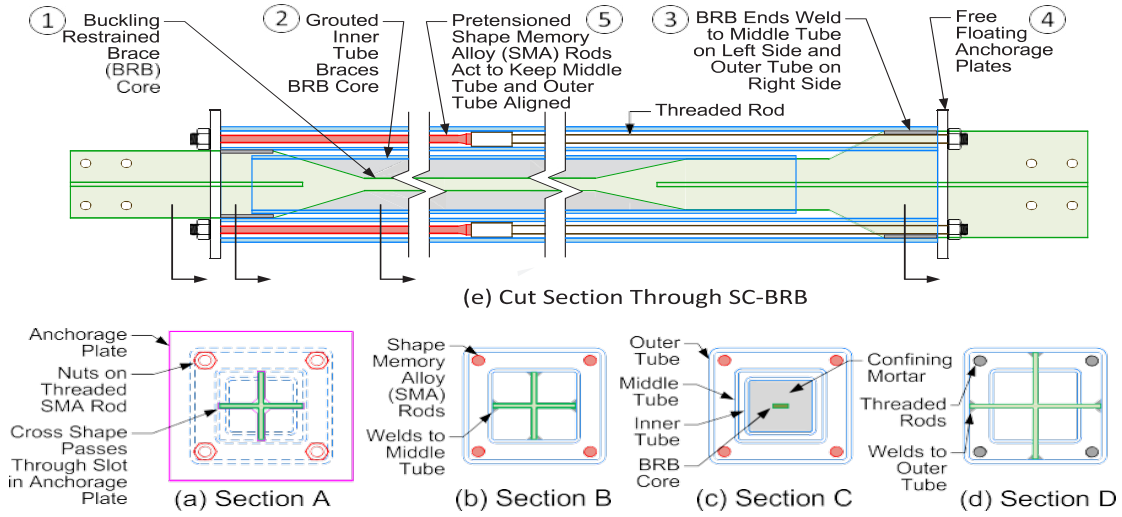
بارگذاری چرخه‌ای مطابق ATC-۲۴ [۳۶] صورت گرفته و شکل ۶ این بارگذاری را نشان می‌دهد. نمونه مطابق استاندارد مذکور تحت بارگذاری دوره‌ای رفت و برگشتی قرار گرفته است. بار به وسیله‌ی دو جک در دو طرف نمونه وارد شده و مقادیر بار و تغییر مکان ثبت شده است. در شکل ۷ منحنی هیسترزیس نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است. در شش دوره اول بارگذاری بار به تدریج افزایش داده شد و تقریبا جاری شدگی قابل توجهی در نمونه ایجاد نشد. بار آستانه‌ی جاری شدن ورق نزدیک به δ_y ۱/۷ میلی‌متر است. به علت کوچک بودن تغییر مکان آستانه‌ی جاری شدن و جلوگیری از خستگی نمونه در زمان آزمایش، گام تغییر مکان تا دوره بارگذاری بیست و ششم برابر سه میلی‌متر و مابقی، شش میلی‌متر در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۶، مقادیر جابجایی نسبی جانبی برای ۷ سیکل ابتدایی بارگذاری ارائه شده است.

جدول ۴: درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه تحت بارگذاری چرخه ای نمونه ی عددی و آزمایشگاهی

Table 4. Error percentage of studied parameters under cyclic loading of numerical and laboratory samples

پارامترهای مورد مطالعه	نمونه‌ی آزمایشگاهی	نمونه‌ی عددی	درصد خطا
نیروی تسلیم (kN)	۲۴۵	۲۶۲	۶٪/۹۳
نیروی نهایی (kN)	۳۶۵	۳۹۵	۸٪/۲۱
تغییر مکان تسلیم (mm)	۶	۵/۵	۸٪/۳۳
تغییرمکان نهایی (mm)	۵۹	۶۱	۳٪/۳۸
سختی اولیه (kN/m)	۱۰۰۰۰۰	۱۰۲۰۰۰	۲٪
جذب انرژی تجمعی (kN.m)	۳۲۳۳	۳۳۷۱	۴٪/۲
جذب انرژی سیکل ۱ (kN.m)	۷۷۰	۷۸۵	۱٪/۹
جذب انرژی سیکل ۲ (kN.m)	۶۸۰	۷۲۱	۶٪
جذب انرژی سیکل ۳ (kN.m)	۵۳۰	۵۵۰	۳٪/۷
جذب انرژی سیکل ۴ (kN.m)	۴۸۵	۵۰۰	۳٪
جذب انرژی سیکل ۵ (kN.m)	۳۳۳	۳۵۰	۵٪/۱
جذب انرژی سیکل ۶ (kN.m)	۲۸۵	۳۰۰	۵٪/۲
جذب انرژی سیکل ۷ (kN.m)	۱۵۰	۱۶۵	۱۰٪

بررسی آزمایش نشان می‌دهد که در شش دوره‌ی اول بارگذاری بار به تدریج افزایش داده شده و تقریباً جاری شدگی قابل توجهی در نمونه ایجاد نشده است. در دوره‌ی هفتم بارگذاری نمونه، کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی بال ستون نشان می‌دهد که تغییر مکان آستانه جاری شدن بال ستون‌ها تقریباً ۸/۵ میلی‌متر است. گام تغییر مکان در این آزمایش برابر ۸/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بیشترین بار قابل تحمل نمونه ۴۰۵ کیلو نیوتن در تغییر مکان ۵۹/۶ میلی‌متر ایجاد شد. نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی نمونه به ارتفاع ستون ۶/۶۸ درصد می‌باشد. تعداد بارگذاری دوره‌ای ۲۶ حلقه بوده است. پایان آزمایش به علت شکنندگی پای ستون بوده و تا پایان آزمایش هیچ‌گونه کمانش موضعی در بال و جان ستون دیده نشده است [۳۵]. نتیجه‌ی مدل‌سازی نمونه‌ی قاب خمشی مورد مطالعه در نرم‌افزار OpenSees و مقایسه‌ی منحنی هیسترزیس آن با حالت آزمایشگاهی مطابق شکل ۷، نشان می‌دهد که نحوه‌ی مدل‌سازی در نرم‌افزار مذکور قابل اطمینان می‌باشد و درصد خطا قابل چشم‌پوشی است. درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه در نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی مطابق جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۸. مدل آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب مجهز به میله های SMA [۱۱]

Fig. 8. The experimental model of BRB-SMA

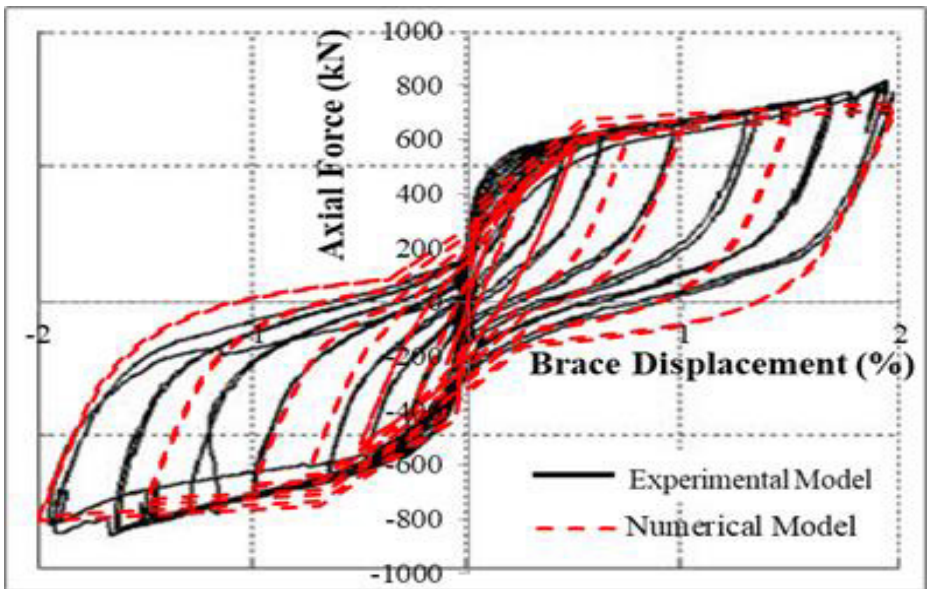
جدول ۵. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار بر اساس منحنی رفتار ارائه شده [۳۷]

Table 5. The mechanical properties of SMA based on the presented behavioral curve

نوع ماده	سختی اولیه (K_1) (N/m^2)	سختی نهایی (K_2) (N/m^2)	تنش فعال‌سازی (N/m^2)	ضریب بتا (β)
آلیاژ حافظه‌دار شکلی	۶۳۴۳۱۷۹۲۰۰۰	۲۰۸۰۴۱۲۹۸۷	۲۶۸۸۹۵۶۴۰	۰/۵

۴- ۲- صحت سنجی مهاربند کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی

به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار OpenSees از مدل آزمایشگاهی شامل مهاربند کمانش‌تاب با میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی، ارائه شده در مطالعه میلر و همکاران استفاده شده است [۱۱]. سیستم مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی در شکل ۸ توصیف شده است. برای مدل‌سازی مهاربند کمانش‌تاب و میله‌ی آلیاژ حافظه‌دار شکلی از المان‌های تیر-ستون غیرخطی استفاده شده است. این المان‌ها به صورت جابجایی و بر پایه‌ی پلاستیسیته‌ی گسترده می‌باشند تا رفتار واقعی المان‌ها را در تحلیل غیرخطی ارزیابی نمایند. جهت ممانعت از کمانش مهاربند مورد نظر از المان‌های GAP در دو انتهای غلاف‌ها برای مدل‌سازی لغزش صفحات استفاده شده است. میله‌های صلب در راستای طول میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیز به صورت المان الاستیک مدل شده‌اند. همچنین ۴ میله‌ی آلیاژ حافظه‌دار شکلی به کار برده شده نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. رفتار آلیاژ حافظه‌دار شکلی مورد استفاده در این تحقیق مطابق جدول ۵ در اثر بارگذاری و بار برداری بدون کرنش پسماند می‌باشد. هم‌پوشانی نمودارهای هیسترزیس نیروی محوری-تغییر شکل مهاربند مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزارOpenSees در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با مدل‌سازی این مهاربند در نرم‌افزار مذکور نتایج قابل قبولی در ارزیابی صحت مدل‌سازی به دست آمده است.



شکل ۹. مقایسه منحنی هیسترزیس نمونه ی عددی و آزمایشگاهی

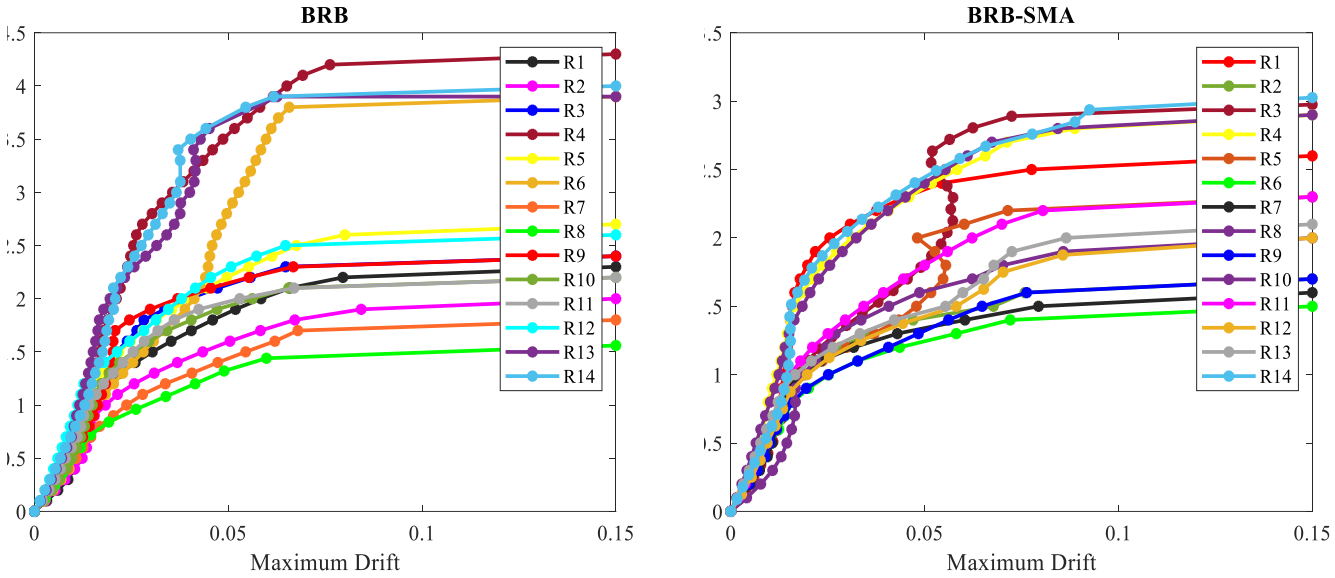
Fig. 9. The hysteresis curve comparison of numerical and experimental models

۵- بحث و بررسی نتایج

در این تحقیق، به منظور ارزیابی عملکرد قاب‌های فولادی دارای مهاربند کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی، از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل استفاده شده است. خروجی‌های این تحلیل شامل منحنی‌های IDA و شکنندگی می‌باشد. منحنی‌های شکنندگی را می‌توان برای سطوح احتمال ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد بر حسب توزیع احتمالاتی لوگ نرمال خلاصه نمود که این روش در گزارش PEER [۳۸] نیز ارائه شده است. در این تحقیق بر مبنای نشریه‌ی ۳۶۱ [۳۹]، مقادیر دریفت ۰/۷، ۲/۵ و ۵ درصد به عنوان سطوح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه (IO)[1]، ایمنی جانی (LS)[2] و آستانه‌ی فروریزش (CP)[3] در نظر گرفته شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی برای هر شتاب‌نگاشت با گام‌های شتاب طیفی g ۰/۱ اعمال شده است. ظرفیت فروریزش هر قاب بزرگترین شتاب طیفی است که قاب تحمل نموده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۰، شتاب طیفی در قاب ۵ طبقه دارای BRB در محدوده‌ی g ۱ تا g ۴ و در قاب ۵ طبقه‌ی دارای BRB-SMA در محدوده‌ی g ۱ تا g ۳ می‌باشد. شکل ۱۱ نیز نشان می‌دهد با اضافه شدن آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای قاب ۱۵ طبقه، ظرفیت فروریزش تحت شتاب‌نگاشت‌های پیشنهادی FEMA P۶۹۵ در محدوده‌ی g ۱/۲ تا g ۷ می‌باشد. نتایج، ظرفیت فروریزش بالاتر قاب‌های BRB-SMA را نسبت به قاب‌های BRB ارائه می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌گردد که بیشترین گریز طبقه‌ی در آستانه‌ی فروریزش سازه‌ها، در قاب‌های BRB مقادیر کمتر و در قاب‌های BRB-SMA مقادیر بیشتری می‌باشند. همچنین مطابق انتظار با افزایش ارتفاع ساختمان‌ها به ازای معیار شدت ثابت، تغییر مکان نسبی طبقات افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین سختی الاستیک اولیه با افزایش ارتفاع سازه‌ها کاهش می‌یابد.

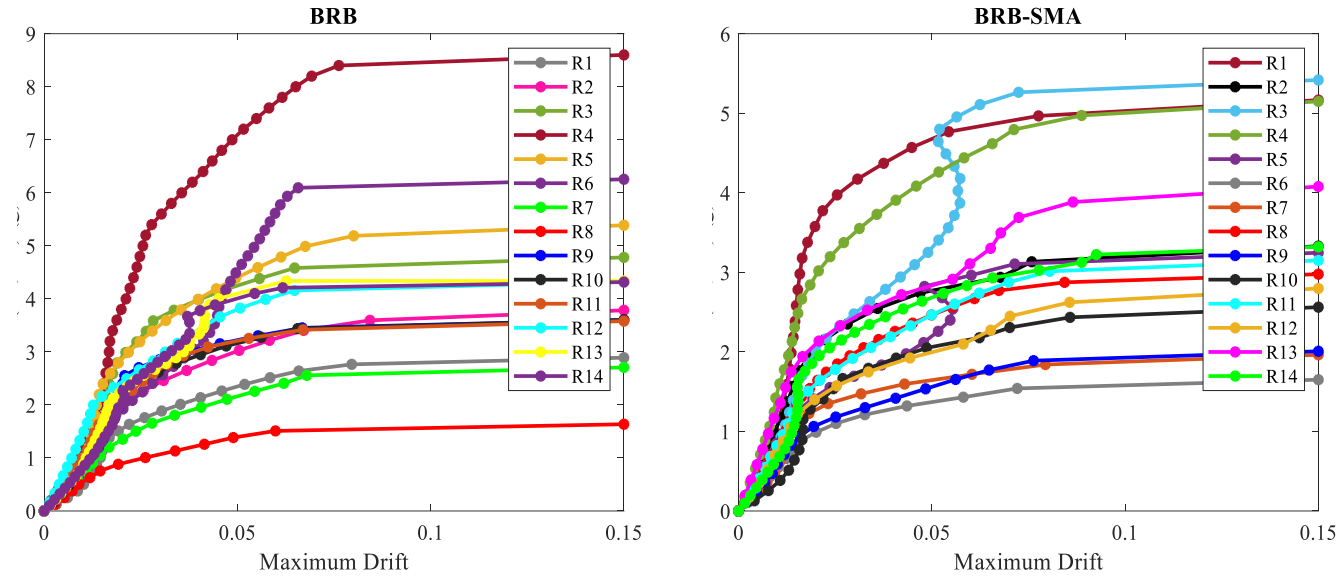
با توجه به حجم بالای خروجی تحلیل‌های IDA لازم است که منحنی‌های به دست آمده خلاصه‌سازی گردند. در این تحقیق، خلاصه کردن منحنی‌های IDA در سه سطح ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ انجام گرفت. مطابق شکل ۱۲ منحنی‌های خلاصه شده‌ی تحلیل‌های IDA برای هر دو حالت قاب مطابقت می‌کند. مشخص است که ظرفیت فروریزش تدریجی قاب BRB-SMA بیش از سایر قاب‌ها است. مطابق شکل ذیل به عنوان نمونه سطح ۵۰٪ قاب BRB در یک نمودار آورده شده است. مطابق این شکل به عنوان نمونه در قاب ۵ طبقه، سطح ۸۴٪ قاب BRB با سطح ۵۰٪ قاب BRB-SMA مطابقت خوبی با سطح ۱۶٪ قاب BRB-SMA دارد.

1 Immediate Occupancy
2 Life Safety
3 Collapse Prevention



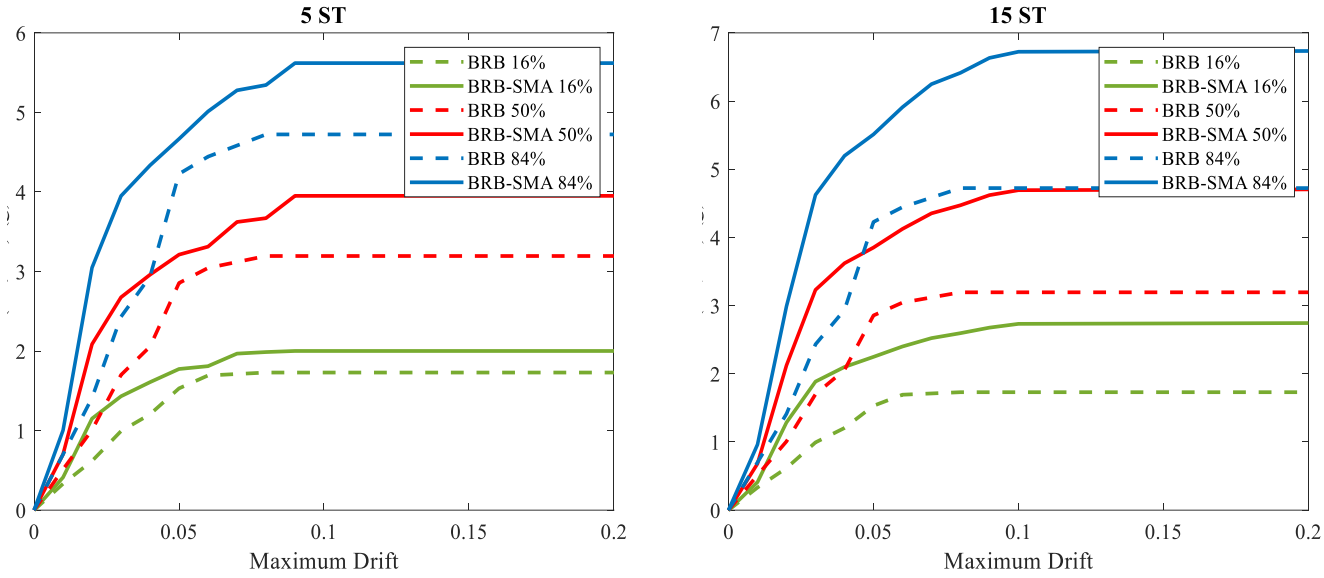
شکل ۱۰. نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب های ۵ طبقه با مهاربند کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی

Fig. 10. Results of incremental dynamic analysis of 5-story frames with BRB in two modes with and without SMA



شکل ۱۱. نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب های ۱۵ طبقه با مهاربند کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی

Fig. 11. Results of incremental dynamic analysis of 15-story frames with BRB in two modes with and without SMA



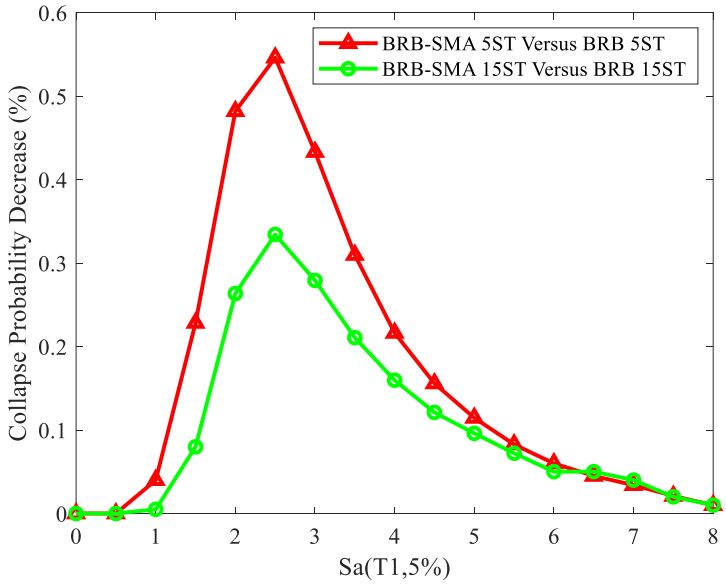
شکل ۱۲. خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب ۵ و ۱۵ طبقه با مهاربند کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی

Fig.12. The summarized results of incremental dynamic analysis of 5 and 15-story frames with BRB in two modes with and without SMA

شکل ۱۳ اختلاف احتمال فروریزش قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین نقش قاب مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار در کاهش فروریزش سازه به ازای شتاب‌های طیفی g ۲ الی g ۳ می‌باشد. مثلا به ازای شتاب طیفی g ۳، قاب BRB-SMA نسبت به BRB، ۴۵/۵ درصد باعث کاهش رخداد فروریزش شده است. به ازای شتاب‌های طیفی کمتر از g و بیش از g ۵ اختلاف محسوسی در عملکرد قاب‌ها در سطح فروریزش ملاحظه نمی‌شود. احتمال فروریزش در حالت BRB-SMA نسبت به BRB در قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

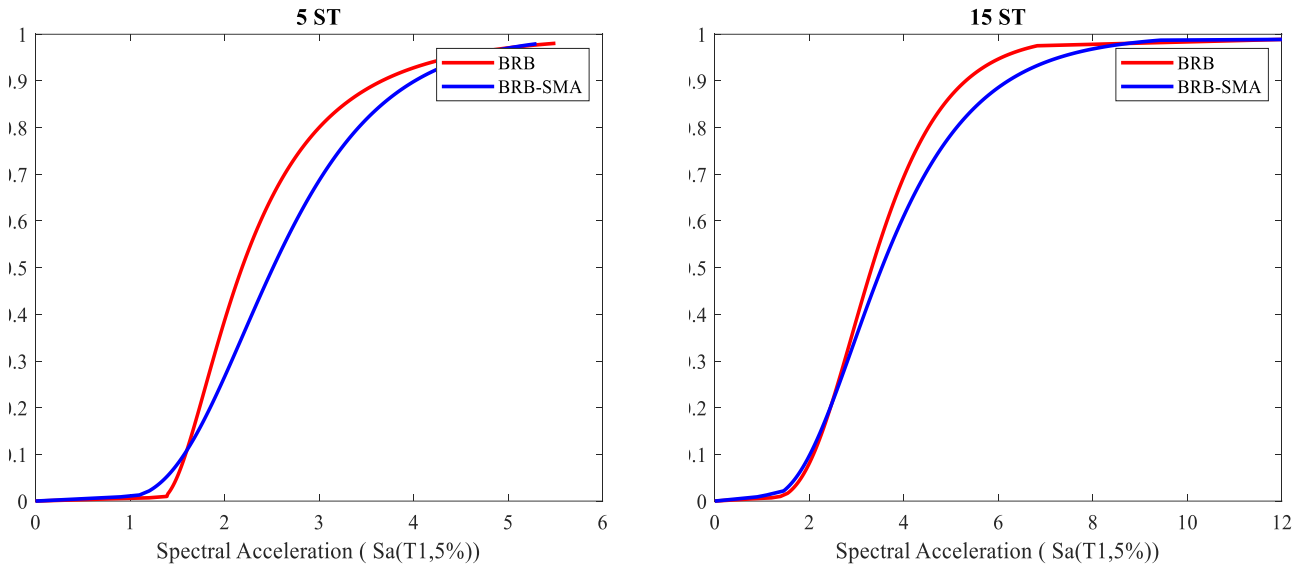
شکل ۱۴ منحنی‌های شکنندگی را برای ظرفیت فروریزش قاب‌ها نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، قاب‌های با سیستم مهاربندی BRB-SMA در سطوح عملکردی مختلف دارای بیشترین شتاب طیفی می‌باشند. همان‌طور که این نمودارها نشان می‌دهند، قاب BRB-SMA ظرفیت فروریزش بزرگ‌تری نسبت به سایر قاب‌ها نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، به عنوان نمونه به ازای شتاب طیفی g۳، احتمال فروریزش برای قاب BRB–SMA ۳۸ درصد و برای قاب BRB ۶۰ درصد می‌باشد. برای شتاب طیفی کمتر از g اختلاف محسوسی در میزان کاهش احتمال رخداد فروریزش پیش‌رونده در قاب‌ها مشاهده نمی‌شود، برای شتاب طیفی بزرگ‌تر از g ۵ نیز اختلاف بین عملکرد قاب‌ها چندان محسوس نیست. به نظر می‌رسد برای شتاب‌های طیفی بزرگ قاب‌ها در شرایط فروریزش قرار گرفته‌اند. مطابق شکل ۱۵، منحنی شکنندگی بر اساس دریفت ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که قاب BRB-SMA دریفت‌های بزرگ‌تری نسبت به سایر قاب‌ها تحمل کرده است.

در شکل ۱۶ به ترتیب مقایسه‌ای از شتاب طیفی قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه با سیستم‌های مهاربندی مذکور در سطوح عملکردی ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برای قاب ۵ طبقه در سطح عملکرد ۸۴٪ اختلاف شتاب طیفی در دو سیستم مهاربندی تفاوت دارد و شتاب طیفی قاب با سیستم مهاربندی BRB-SMA حدود ۱۶ درصد بیشتر از قاب با سیستم BRB می‌باشد. برای قاب ۱۵ طبقه در سطح عملکرد ۸۴٪ شتاب طیفی در دو سیستم مهاربندی تفاوت دارد و شتاب طیفی قاب با سیستم مهاربندی BRB-SMA حدود ۱۲ درصد بیشتر از قاب با سیستم BRB می‌باشد. مطابق شکل ۱۷، مقایسه مدت زمان فروریزش قاب‌های مورد مطالعه تحت اثر زلزله‌های مورد مطالعه ارائه شده است. مشخص است زمان فروریزش تحت مولفه‌ی دوم زلزله Irpinia بیشینه و تحت مولفه‌ی اول زلزله‌ی Cape Mendocino



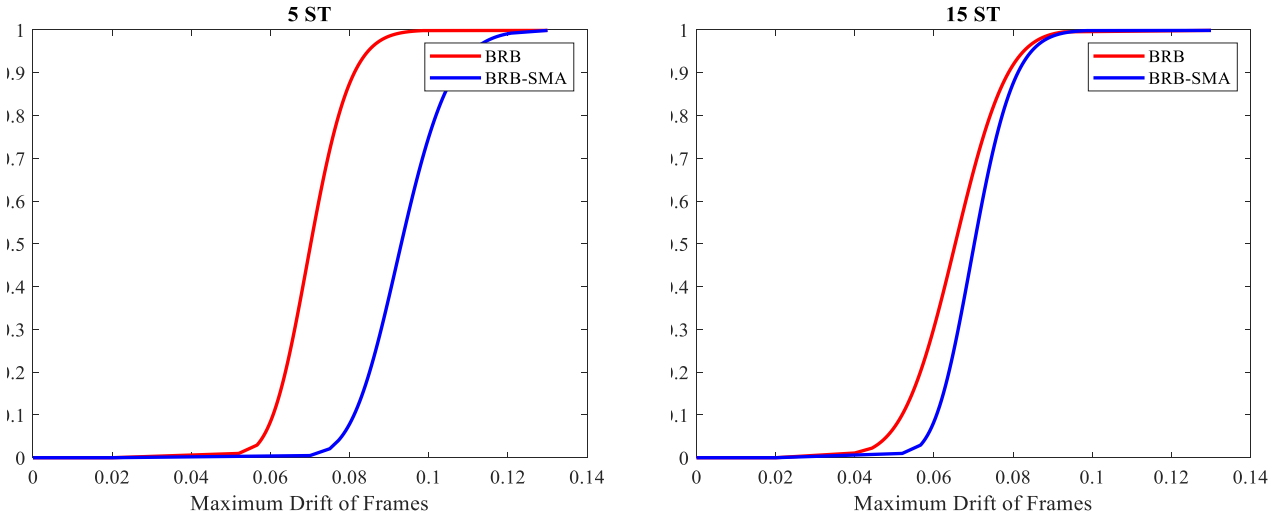
شکل ۱۳. درصد کاهش احتمال فروریزش قاب های ۵ و ۱۵ طبقه مهاربندی کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به مهاربند کمانش تاب

Fig. 13. Reduction percentage of collapse of 5 and 15-story frames with BRB in two modes with and without SMA



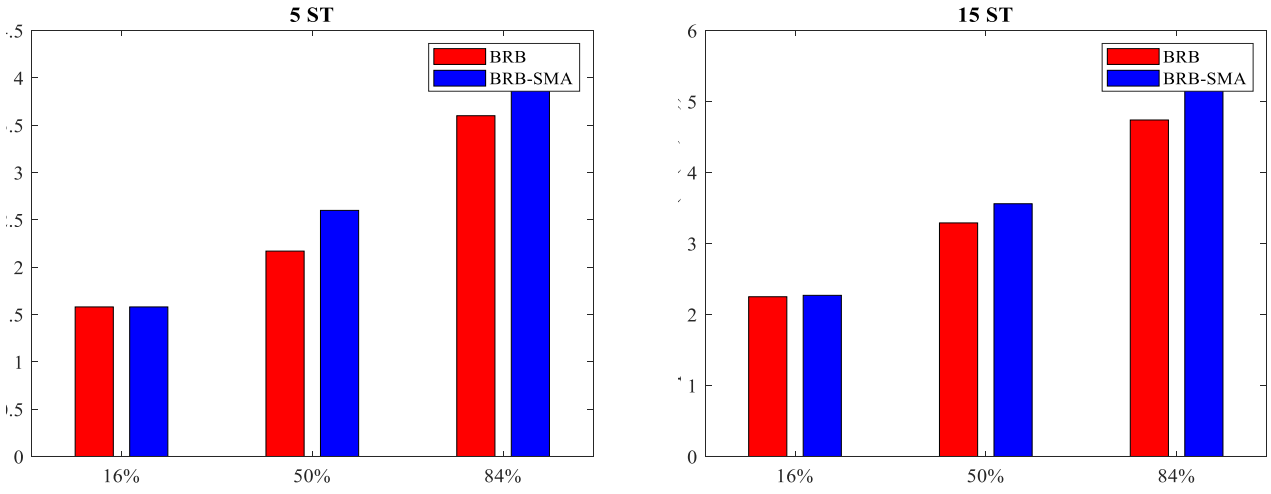
شکل ۱۴. منحنی های شکنندگی لرزه ای ظرفیت فروریزش قاب های ۵ و ۱۵ طبقه

Fig. 14. The seismic fragility curves of collapse capacity of 5 and 15-story frames



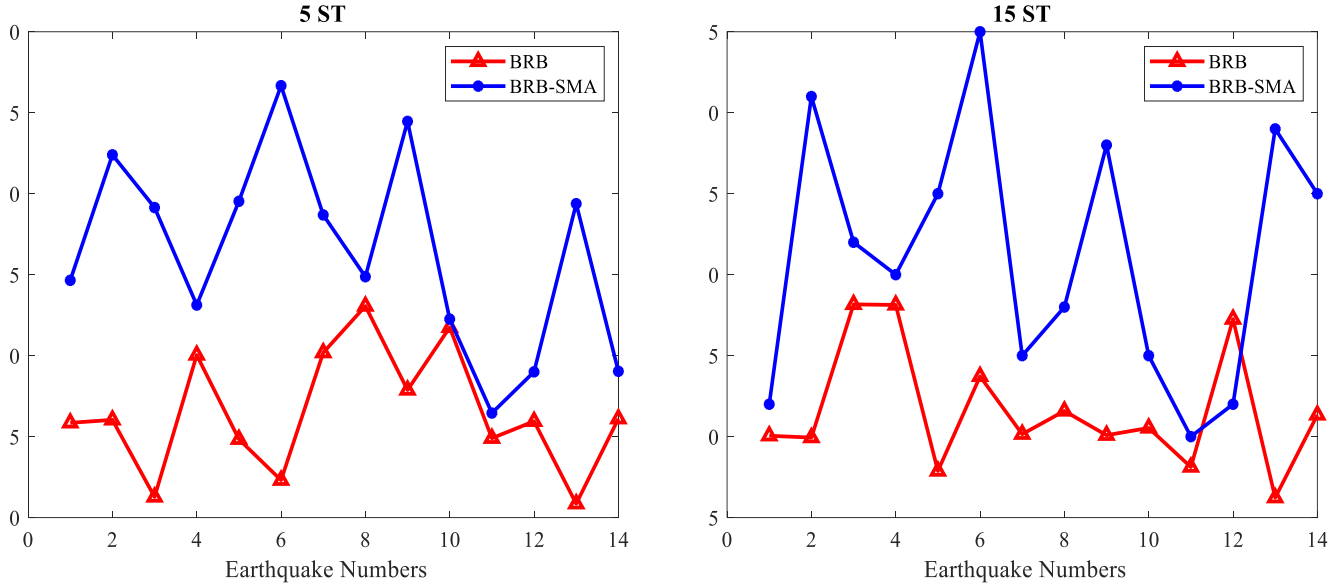
شکل ۱۵. منحنی های شکنندگی لرزه ای دریفت قاب های ۵ و ۱۵ طبقه

Fig. 15. The seismic fragility curves of drift of 5 and 15-story frames



شکل ۱۶. مقایسه شتاب طیفی قاب های مورد مطالعه در سطوح عملکردی ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد

Fig. 16. Comparison of spectral acceleration of the studied frames at performance levels of 16, 50 and 84%



شکل ۱۷. مقایسه مدت زمان فروریزش قاب های مورد مطالعه تحت اثر زلزله های نزدیک گسل

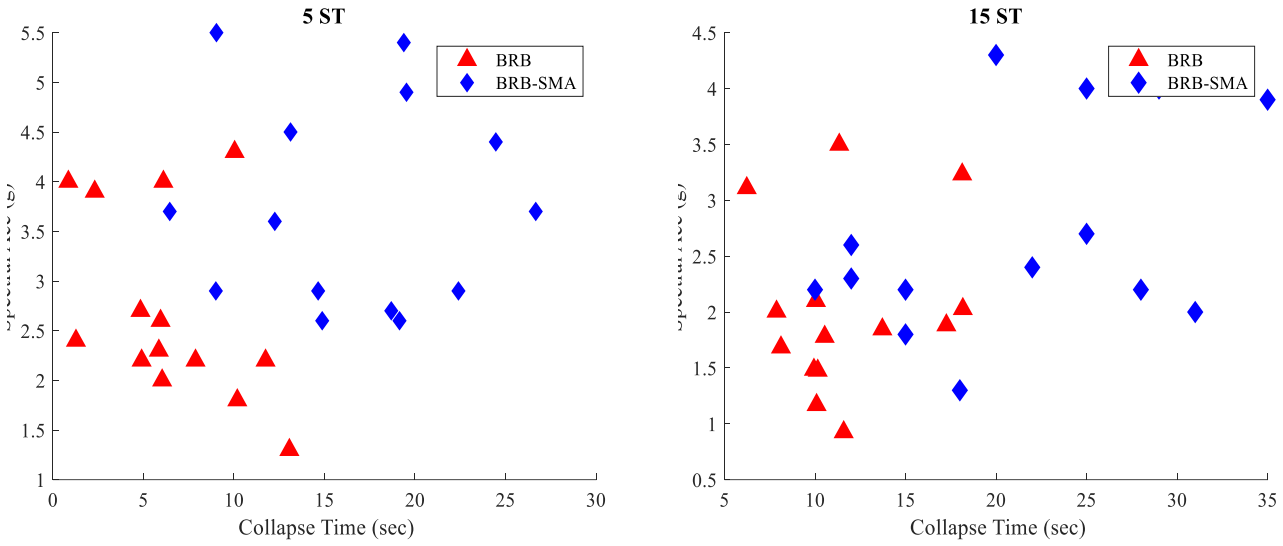
Fig. 17. Comparison the collapse duration of the studied frames due to near fault earthquakes

کمینه است. دلیل این تفاوت به علت ماهیت زلزله‌های نزدیک به گسل می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که مدت زمان فروریزش قاب BRB-SMA برای بیشتر زلزله‌ها بزرگ‌تر از مدت زمان لازم فروریزش قاب BRB می‌باشد. قاب BRB کمترین مدت زمان مورد نیاز برای فروریزش تدریجی را ارائه می‌دهد. مطابق شکل ۱۸، قاب BRB-SMA مدت زمان فروریزش بیشتری نسبت به سایر قاب‌ها نشان داده است. در قاب ۱۵ طبقه به عنوان نمونه در سطح ۱۶٪ شتاب‌نگاشت‌های ورودی، مدت زمان فروریزش قاب BRB-SMA، ۱۷ثانیه و قاب BRB، ۵ ثانیه می‌باشد. همچنین در سطح ۵۰٪ شتاب‌نگاشت‌های ورودی، مدت زمان فروریزش قاب BRB-SMA، ۲۵/۶ثانیه و قاب BRB، ۱۰ ثانیه می‌باشد و در سطح ۸۴٪ شتاب‌نگاشت‌های ورودی، مدت زمان فروریزش قاب BRB-SMA، ۳۲ ثانیه و قاب BRB، ۱۸ثانیه است.

مطابق شکل ۱۹، مدت زمان فروریزش قاب‌های ۵ طبقه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل مورد نظر در مقابل ظرفیت‌های فروریزش آن‌ها ارائه شده است. در ارائه‌ی این شکل شتاب‌های طیفی فروریزش به بازه‌هایی با فواصل ۰/۵ g تقسیم‌بندی شده و به ازای هر بازه مدت زمان فروریزش هر قاب محاسبه شده است. ملاحظه می‌گردد که در شتاب‌های طیفی بالا مدت زمان فروریزش تدریجی کاهش یافته و از طرفی در محدوده‌ی مشخصی از ظرفیت‌های فروریزش، مدت زمان فروریزش حداکثر بوده است. به عبارتی همواره با افزایش شتاب طیفی فروریزش، مدت زمان فروریزش کاهش نیافته است. حداکثر شتاب طیفی مد اول قاب ۵ طبقه، ۴/۳ g می‌باشد در حالی که در قاب ۱۵ طبقه این مقدار معادل ۳/۳ g است.

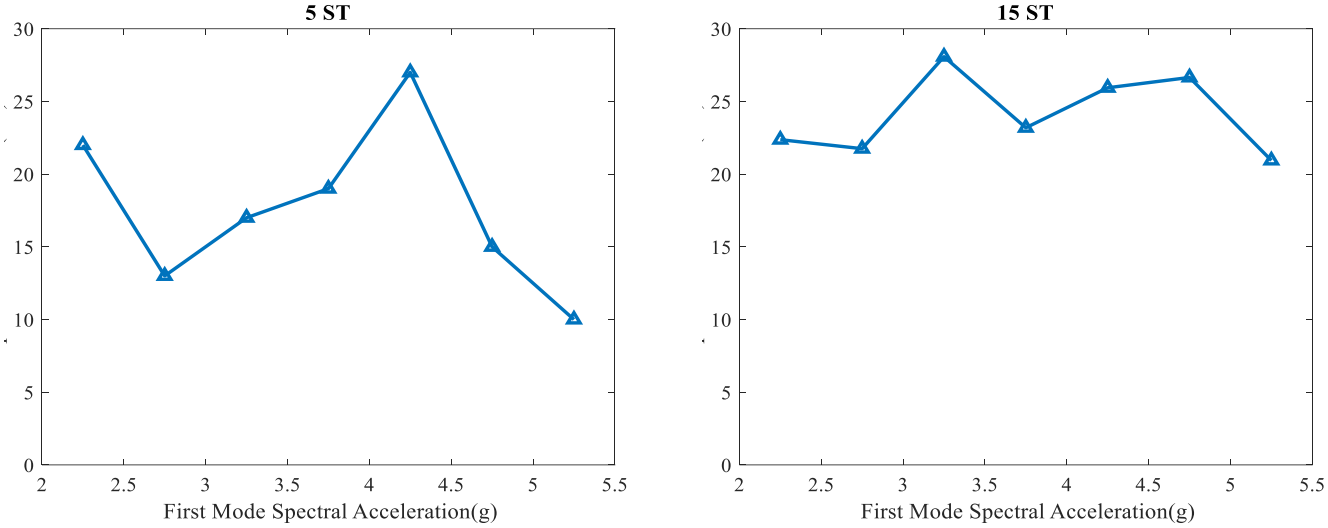
۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نقش آلیاژ حافظه‌دار شکلی در افزایش مدت زمان فروریزش و ظرفیت فروریزش تدریجی تحت زلزله‌های نزدیک به گسل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به صحت‌سنجی‌های انجام گرفته که نتایج قابل قبولی ارائه دادند، می‌توان به مدل‌های ایجاد شده و پاسخ‌های به دست آمده، اطمینان داشت. با بررسی نتایج و نمودارهای ارائه شده در بخش قبلی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:



شکل ۱۸. ظرفیت فروریزش قاب های مورد مطالعه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت مورد نظر

Fig. 18. The collapse capacity of the studied frames under 7 pairs of earthquakes



شکل ۱۹. مدت زمان فروریزش قاب های مورد مطالعه در مقابل شتاب طیفی فروریزش تدریجی

Fig. 19. Collapse duration of the studied frames versus spectral acceleration of sidesway collapse

۱-بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی، قاب‌های با سیستم مهاربندی BRB-SMA بیشترین ظرفیت فروریزش و قاب‌های با سیستم BRB کمترین ظرفیت فروریزش را نشان داد. همچنین میزان شتاب طیفی با افزایش ارتفاع نمونه‌ها در نمونه‌های دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی افزایش یافته است.

۲-بر اساس منحنی‌های شکنندگی، سطوح عملکرد استفاده بدون وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) قاب‌ها مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم مهاربندی کمانش‌تاب به میزان محسوسی ظرفیت فروریزش سازه‌های میان مرتبه و بلند مرتبه را افزایش داده است. به عنوان نمونه در سطح احتمال ۸۴ درصد، ظرفیت فروریزش قاب ۱۵ طبقه با سیستم BRB-SMA نسبت به قاب با سیستم BRB، ۱۶ درصد افزایش نشان داد. ضمنا با مقایسه‌ی منحنی‌های شکنندگی گریز طبقه‌ی قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه، مشخص شد که حداکثر گریز طبقه در مورد قاب BRB-SMA بیشترین و در مورد قاب BRB کمترین است.

۳-به ازای شتاب‌های طیفی۱ g تا۴ g، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های مهاربندی کمانش‌تاب بیشترین تأثیر را در جلوگیری از فروریزش داشت. به عنوان نمونه، در قاب‌های ۵ طبقه به ازای شتاب‌های طیفی فروریزش مختلف، کاربرد سیستم مهاربندی BRB-SMA به جای BRB توانست تا ۱۵درصد احتمال فروریزش را کاهش دهد.

۴-مدت زمان فروریزش تدریجی در قاب‌های مهاربند کمانش‌تاب دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به حالت بدون آن افزایش یافته است. همچنین نتایج مربوط به مدت زمان فروریزش نشان داد که در شتاب‌های طیفی بالا مدت زمان فروریزش تدریجی قاب‌ها کاهش یافته است.

۵-مهاربند کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب با ارتفاع بلندتر (۱۵ طبقه) در گستره‌ی وسیع‌تری از سطح تقاضای لرزه‌ای باعث ایمن بودن و آسیب‌پذیری کمتری نسبت به قاب با ارتفاع کوتاه‌تر (۵ طبقه) می‌باشد.

۶-به کارگیری آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم ساختمانی قاب فولادی دارای مهاربند کمانش‌تاب باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سیستم باربر جانبی، کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای و هزینه‌های بازسازی و تعمیرِ سیستم ساختمانی آسیب دیده شده و به نوعی موجب ارتقای برگشت‌پذیری سیستم می‌شود.

منابع

[1] E. Miranda, V. Betro, Evaluation of strength Reduction Factors for Earthquake Resistant Design Earthquake Spectra, 10(2) (1994) 357-379.

[2] F. Hashemi Rezvani, B. Asgarian, Element loss analysis of concentrically braced frames considering structural performance criteria, Steel and Composite Structures, 12(3) (2012) 231-248.

[3] C. Wang, T. Usami, J. Funayama, Evaluation the Influence of Stoppers on the Low-Cycle Fatigue Properties of High Performance Buckling Restrained Braces, Engineering Structures, 41 (2012) 167-176.

[4] C.M. Uang, K.C. Tsai, Research and application of buckling-restrained braced frames, International journal of steel structures, 4(4) (2004) 301-13.

[5] M. S. Alam, M. A. Youssef, M. Nehdi, Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review. Canadian Journal of Civil Engineering 34 (2007) 1075–1086.

[6] M. Pouraminian, S.V. Hashemi, A. Sadeghi, S. Pourbakhshian, Probabilistic Assessment the Seismic Collapse Capacity of Buckling-Restrained Braced Frames Equipped with Shape Memory Alloys. Journal of Structural and Construction Engineering, (2020). (In Persian).

[7] D.J. Miller, Development and experimental validation of self-centering buckling-restrained braces with shape memory alloy, Master's dissertation, University of Illinois at Urbana–Champaign, (2011).

[8] Y.L. Han, Q. Li, A.Q. Li, A. Leung, P.H. Lin, Structural vibration control by shape memory alloy damper, Earthquake engineering & structural dynamics, 32(3) (2003) 483-94.

[9] S.V. Hashemi, M. Pouraminian, A. Sadeghi, Seismic Fragility Curve Development of Frames with BRB's Equipped with Smart Materials subjected to Mainshock-Aftershock Ground Motion. Journal of Structural and Construction Engineering, (2021). (In Persian).

[10] B. Asgarian, S. Moradi, Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces, Journal of Construction steel research, Elsevier, 67(1) (2011) 65-74.

[11] D. J. Miller, L. A. Fahnestock, M. R. Eatherton, Development and experimental validation of a nickel–titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace, Engineering Structures, 40 (2012) 288–298.

[12] M. Mirzahosseini, M. Gerami, Evaluation of appropriate behavioral models for numerical simulation of new Cu based shape memory alloy. Journal of Structural and Construction Engineering, 4(4) (2017) 5-15.

[13] H. Hou, H. Li, C. Qiu, Y. Zhang, Effect of hysteretic properties of SMAs on seismic behavior of self-centering concentrically braced frames, Structural

.(Control and Health Monitoring. (2017

F. Shi, G. Saygili, O. E. Ozbulut, Probabilis- [14] tic seismic performance evaluation of SMAbraced steel frames considering SMA brace failure, Bulletin of .(Earthquake Engineering, (2018

[15] M. Gholhaki, A. Khosravikhor, O. Rezayfar, Study Effect of Ni-Ti Shape Memory Alloy on Ductility of Steel Plate Shear Walls. Journal of Structural and Construction Engineering, (2018) (In Persian).

[16] N. Mirzai, R. Attarnejad, Performance of EBFs equipped with an innovative shape memory alloy damper, International Journal of Science & Technology, (2018).

[17] Q. Canxing, Z. Yichen, L. Han, Q. Bing, H. Hetao, T. Li, Seismic performance of Concentrically Braced Frames with non-buckling braces, Engineering Structures, 154 (2018) 93-102.

[18] E. Nazarimofrad, A. Shokrgozar, Seismic performance of steel braced frames with self-centering buckling-restrained brace utilizing superelastic shape memory alloys, Struct Design Tall Spec Build, (2019).

[19] Gh. Pachideh, M. Gholhaki, M. Kafi, Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper. Steel and Composite Structures, 36(2) (2020) 197–211.

V. Saberi, H. Saberi, O. Mazaheri, A. Sadeghi, Numeri- [20] cal Investigation of Shape Memory Alloys and Side Plates Perforation Effect on Hysteresis Performance of Connections. Amirkabir Journal of Civil Engineering (2020). (In .(Persian

[21] Gh. Pachideh, M. Kafi, M. Gholhaki, Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, Structures, 28 (2020) 467-481.

[22] A. Sadeghi, S.V. Hashemi, K. Mehdizadeh, Probabilistic Assessment of Seismic Collapse Capacity of 3D Steel Moment-Resisting Frame Structures. Journal of Structural and Construction Engineering, (2020). (In Persian).

[23] K. Mehdizadeh, A. Karamodin, A. Sadeghi, Progressive Sidesway Collapse Analysis of Steel Moment-Resisting Frames Under Earthquake Excitations. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng (2020).

[24] V. Saberi, H. Saberi, A. Sadeghi, Collapse Assessment of Steel Moment Frames Based on Development of Plastic Hinges. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 52(11) (2020) 1-21. (In Persian).

Quantification of Building Seismic Perfor- .695 FEMA P [25] mance Factors. Washington, D.C. Federal Emergency Man- .(agement Agency, USA, (2009

[26] INBC. Design Loads for Buildings. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6, (2013). (In Persian).

[27] INBC. Design and Construction of Steel Structures. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10, (2013). (In Persian).

[28] BHRC. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800, (2014). (In Persian).

[29] V. Saberi, H. Saberi, M. Babanegar, A. Sadeghi, A. Moafi. Investigation the Effect of Cutting the Lateral Bearing System and Very Soft Story Irregularities on the Seismic Performance of Concentric Braced Frames. Journal of Structural and Construction Engineering, (2021). (In Persian).

[30] S. Mazzoni, F. Mckenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, OpenSees Command Language Manual. http://OpenSees.Berkeley.edu/OpenSees/manuals/user_manual/OpenSees Command Language Manual June 2006.pdf.

[31] J. Kim, J. Park, and T. Lee, Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss, Engineering Structures, 33(2) (2011) 421-432.

[32] A. Fayeq Ghowsi, D. Ranjan Sahoo, Seismic response of SMA-based self-centering buckling-restrained braced frames under near-fault ground motions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 139 (2020).

[33] PEER Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, Web Site: http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database.

[34] SeismoSignal. Constitutes a simple, yet efficient, package for the processing of strong-motion data. 2018.

[35] S. Sabouri, and S. R. Asad Sajadi, Experimental Investigation of Force Modification Factor and Energy Absorption Ductile Steel Plate Shear Walls with Stiffeners and without Stiffener, Journal of Structure and Steel, 4(3) (2008) 13-25.

[36] ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied Technology Council, California, U.S.A. (1992).

[37] B. Taftali, Probabilistic seismic demand assessment of steel frames with shape memory alloy connections, PhD. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, (2007).

[38] L. F. Ibarra, H. Krawinkler, Global collapse of frame structures under seismic excitations. Report No. PEER 2005/06, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California at Berkeley, Berkeley, California, (2005).

[39] Commentary of Instruction for seismic Rehabilitation of Existing Buildings, NO: 361. Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, (2018). (In Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. V. Hashemi, M. Miri , M. Rashki, S. Etedali, Investigation the Sidesway Collapse and Seismic Fragility Analysis of Frames with BRB Equipped with SMAs, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 737-758.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19082.7060