

Probabilistic Assessment the Seismic Collapse Capacity of Buckling-Restrained Braced Frames Equipped with Shape Memory Alloys

Seyede Vahide Hashemi¹, Majid Pouraminian^{2*}, Abbasali Sadeghi³, Somayyeh Pournakhshian⁴

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering (Shahid Nikbakht), University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University, Ramsar, Iran

3- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

4 - Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University, Ramsar, Iran

ABSTRACT

Today, Buckling-Restrained Braces (BRB's) are considered as lateral load-bearing systems due to their non-buckling in compression. But these braces also have disadvantages. Among these disadvantages is the creation of permanent deformation in the structure after the end of loading and also the costly replacement of these members after the failure and current of the steel core of these braces. Therefore, the use of Shape Memory Alloys (SMA's) in BRB systems, given the specific characteristics of these alloys, can be an effective step in improving seismic responses. In this paper, seismic behavior of frames with BRB's and the effect of utilizing SMA's were studied. Then, three 2D-frames with 6 and 12 story were utilized. The OpenSees software used for the nonlinear time history analysis of frames. The BRB's considered in two cases, with and without SMA's. For development of fragility curves, according to FEMA P695 seven strong ground motion records was utilized. Incremental Dynamic Analysis (IDA) procedure was utilized to achieve probability of frame collapse. The results show that the collapsing capacity of BRB frames equipped with SMA's is higher than that of the BRB frames. As an example, at the 50% probability level, the collapse capacity of a 12-story frame with a BRB equipped with SMA is 30% higher than that of a frame with BRB. The results also show that in 6-story frames for different spectral accelerations, the BRB system equipped with SMA compared to the BRB can reduce the probability of collapse by 28%. Using SMA's in these building systems can reduce the cost of restoring and recovering of damaged systems and make the more resilient building system.

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 June 2020

Revise Date: 21 July 2020

Accept Date: 27 July 2020

Keywords:

Buckling Restrained Brace
Shape Memory alloy
Incremental Dynamic Analysis
Far-Fault Earthquake Record
FEMA P695 Guideline
Resilience

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.236804.2174>

*Corresponding author: Majid Pouraminian
Email address: m.pouraminian@iauramsar.ac.ir

ارزیابی احتمالاتی ظرفیت فروریزش لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

سیده وحیده هاشمی^۱، مجید پورامینیان^{۲*}، عباسعلی صادقی^۳، سمیه پوربخشیان^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

چکیده

امروزه مهاربند‌های کمانش‌تاب با توجه به عدم کمانش در فشار، به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در نظر گرفته می‌شود. ولی این مهاربندها دارای معایبی نیز می‌باشند. از جمله این معایب ایجاد تغییرشکل‌های ماندگار در سازه بعد از پایان بارگذاری و همچنین هزینه‌بر بودن تعویض این اعضا پس از خرابی و جاری شدن هسته‌ی فولادی این مهاربندها می‌باشد. از این رو استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های مهاربندی کمانش‌تاب با توجه به ویژگی‌های خاص این آلیاژها، می‌تواند گام مؤثری در بهبود پاسخ‌های لرزه‌ای باشد. در این تحقیق، ابتدا دو قاب با تعداد طبقات ۶ و ۱۲ دارای مهاربند‌های کمانش‌تاب در نرم‌افزار ETABS بر اساس ضوابط آئین‌نامه‌ای به‌صورت سه بعدی طراحی و سپس قاب کناری آن‌ها در نرم‌افزار OpenSees به‌صورت دو بعدی در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی مدل‌سازی شده‌اند و در نهایت نقش آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در آن‌ها با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت دور از گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA P695 بررسی شده‌اند. بر اساس منحنی‌های حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی، ظرفیت فروریزش قاب‌های مذکور ارائه شده است. در نهایت منحنی‌های شکست برای سطح فروریزش توسعه داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت فروریزش قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به مهاربند کمانش‌تاب بیشتر می‌باشد. به‌عنوان نمونه، در سطح احتمال ۵۰ درصد، ظرفیت فروریزش قاب ۱۲ طبقه دارای مهاربند مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب دارای مهاربند کمانش‌تاب، ۳۰ درصد بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در قاب‌های ۶ طبقه به ازای شتاب‌های طیفی مختلف، سیستم مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به سیستم مهاربندی کمانش‌تاب می‌تواند ۲۸ درصد احتمال فروریزش را کاهش دهد. با به کارگیری آلیاژ حافظه‌دار شکلی در این قاب‌ها می‌توان هزینه‌ی بازیابی سیستم خسارت‌دیده‌ی ساختمانی را کاهش داده و سیستم برگشت پذیرتری داشت.

کلمات کلیدی: مهاربند کمانش‌تاب، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی، رکورد زلزله‌ی دور از گسل، دستورالعمل FEMA P695، برگشت پذیری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.236804.2174	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.236804.2174	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	۱۳۹۹/۰۵/۰۶	۱۳۹۹/۰۵/۰۶	۱۳۹۹/۰۴/۳۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۹
مجید پورامینیان m.pouraminian@iauramsar.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

با توجه به وقوع زلزله‌های قوی در کشورمان، بحث کنترل لرزه‌ای ساختمان‌ها در مقابل زلزله همواره چالش مهمی برای مهندسی سازه و زلزله بوده است. در این میان در تحقیقات مختلف روش‌های گوناگونی برای کنترل رفتار لرزه‌ای سازه‌های مختلف پیشنهاد شده است. مبنای کنترل رفتار سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف اتلاف انرژی زلزله و مصون ماندن المان‌های اصلی آن‌ها می‌باشد. به‌عنوان نمونه، کاربرد انواع میراگرها و جداسازها فلسفه عملکرد مشابهی در طراحی و کاربرد دارند. همچنین ایجاد حرکت گهواره‌ای^۱ و استفاده از میراگرهای تسلیمی در پای ستون‌ها نیز با همین مفهوم اجرا می‌شوند. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA)^۲، نیز مقاصد مختلفی دارد. علاوه بر اتلاف انرژی ورودی زلزله، تغییر شکل‌ها و نیروها یا تنش‌های پسماند در سازه را از بین می‌رود و در این حالت آسیب‌ها و تغییر شکل‌های پس از زلزله کنترل و مهار خواهد شد. یکی از راه‌های تأمین نیازهای سختی، مقاومت و شکل‌پذیری، استفاده از سیستم قاب خمشی یا مهاربندی فولادی است. این سیستم‌ها بر حسب میزان سختی، شکل‌پذیری و مقاومت دارای انواع مختلفی هستند که هر یک، عملکردهای متفاوتی از خود بروز می‌دهند. هنگامی که مهاربندها در معرض نیروهای فشاری بزرگ قرار می‌گیرند، در آن‌ها تغییر شکل کمانشی به وجود آمده و رفتار چرخه‌ای نامتقارن را در فشار و کشش نشان می‌دهند [۱]. تحقیقات بسیاری صرف بهسازی این مهاربندها جهت رسیدن به یک رفتار الاستوپلاستیک ایده‌آل گردیده است. برای رسیدن به این هدف لازم بود تا با استفاده از مکانیسمی مناسب از کمانش فشاری مهاربند که مانع از استهلاک انرژی مناسب در قاب می‌شد، جلوگیری شود و امکان تسلیم فشاری فولاد فراهم شود. این سیستم که قاب‌های مهاربندی شده با مهاربند کمانش‌تاب یا به‌اختصار (BRB)^۳ نامیده می‌شود، اگر بتوان این سیستم مهاربندی را به‌وسیله‌ی مصالح دارای خاصیت ارتجاعی بالا و کرنش پسماند اندک، نظیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تسلیح کرد، می‌توان به یک سیستم با برگشت-پذیری بالا دست یافت [۲].

در سال‌های اخیر، توجه محققان به استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های مهاربندی معطوف شده است. عسگریان و مرادی در سال ۲۰۱۱، مطالعات متعددی جهت بررسی قابلیت کاربرد این آلیاژها در مهندسی سازه و زلزله انجام دادند که نشان داد استفاده از این آلیاژها در سازه‌ها و به‌خصوص در مهاربندها می‌تواند موجب کاهش تغییر شکل‌های پسماند پس از زلزله گردد [۳]. ماوریا و همکاران در سال ۲۰۱۶، مهاربندهای کمانش‌تاب کوچکی با هسته‌ی کوچک‌تر و طول کوتاه پیشنهاد کردند که می‌توانند در سازه به‌عنوان فیوز و میراگر به‌کار روند [۴]. صاحبی و منتظری در سال ۲۰۱۶، کاربرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی را در مهاربندهای زانویی فولادی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سیستم مهاربندی زانویی، امکان استفاده مجدد سازه را پس از زلزله، فراهم می‌کند [۵]. اوزجلیک و همکاران در سال ۲۰۱۷، مهاربند کمانش‌تابی با شرایط اتصال متفاوت را به‌صورت تست‌های آزمایشگاهی پیشنهاد کردند. نوآوری این تحقیق ایجاد محدودیت‌های بیشتر در بخش‌های مختلف اتصال مصالح به هم بود. این قیود باعث کاهش نقص‌های موضعی و کمانش‌های آنی در بعضی بخش‌های مهاربند گردید [۶]. شن و همکاران در سال ۲۰۱۷، عملکرد لرزه‌ای قاب‌های با مهاربندهای هم‌محور را با و بدون مهاربندهای کمانش‌تاب مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که قاب‌های با مهاربند کمانش-تاب، دررفت‌های پسماند را کنترل نموده و ظرفیت تسلیم و فروریزش سازه را افزایش داده است [۷]. میرزاحسینی و گرامی در سال ۲۰۱۷، ضمن ارزیابی خواص آلیاژ نوبین پایه مس Cu-Al-Mn که توسط یکی از محققین ژاپنی به نام اراکی معرفی گردیده، قابلیت مدل‌های رفتاری برای شبیه‌سازی عددی این آلیاژ را بررسی نمودند. آلیاژ موردنظر ضمن برخورداری از خواصی نظیر سوپر الاستیسیته قابل قیاس با Ni-Ti، دارای قیمت مناسب‌تر و وابستگی ناچیز به نرخ کرنش می‌باشد. با بهره‌گیری از خواص این آلیاژ قابلیت سه مدل مستقل از نرخ؛ مدل گراسر کوزارلی، مدل فاگازا و مدل خود بازگشتی؛ در توصیف رفتار این آلیاژ نوبین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی عددی رفتار آلیاژ-Cu-Al-Mn در آزمایش کشش و شبه استاتیک 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 [۸]. هو و همکاران در سال ۲۰۱۷، سه نوع آلیاژ حافظه‌دار شکلی نظیر مسی، آهنی و نیکلی در مهاربند همگرای ۳ طبقه قرار داده‌اند و تأثیر این سه نوع آلیاژ را در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای

¹ Rocking Motion

² Shape Memory Alloy

³ Buckling Restrained Brace

مورد مقایسه قرار داده‌اند. در این تحقیق از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت سه زلزله‌ی نزدیک گسل استفاده شده است. نتایج نشان داد که آلیاژ حافظه‌دار شکلی آهنی باعث کاهش بیشتر پاسخ‌های لرزه‌ای شده است [۹]. فی و همکاران در سال ۲۰۱۸، سازه‌ی قاب خمشی فولادی ۴ طبقه مرجع را انتخاب کردند و رفتار آن تحت ۷ زلزله‌ی نزدیک گسل مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی قرار گرفته و نتایج نشان داد که سطح خسارت در حد آستانه‌ی فروریزش می‌باشد. سپس با استفاده از کابل‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی بهسازی شده و عملکرد سازه در سطح خسارت ایمنی جانی قرار گرفته است [۱۰].

میرزا حسینی و گرامی در سال ۲۰۱۸، سازه‌ی مهاربندی یک طبقه یک دهانه دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی پایه مسی نوین در دماهای مختلف (۰، ۲۰، ۴۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و -۴۰) تحت ۷ زلزله نزدیک گسل مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار داده‌اند و میزان کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای در دماهای مختلف را ارزیابی نموده‌اند. نتایج نشان داد که کاهش دما، باعث می‌شود که آلیاژ حافظه‌دار شکلی بیشتر باعث کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مانند دریافت گردد. ضمناً در دماهای پایین عملکرد لرزه‌ای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پایه مسی بهتر می‌باشد [۱۱]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۸، نوعی میراگر سربی-آلیاژ حافظه‌دار شکلی به صورت آزمایشگاهی ابداع نموده‌اند. ابتدا این نوع میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و سپس منحنی‌های هیستریزس و پوش‌آور به دست آمده است. سپس این نوع میراگر را در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی نمودند. این نوع میراگر در پیکربندی‌های مختلف نمونه‌ی ۶ طبقه قرار گرفته است و عملکرد آن تحت ۳ زلزله نزدیک گسل با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بررسی شده است [۱۲]. 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 دوره‌ای در نرم‌افزار تحلیل OpenSees قرار دادند، همچنین یک نمونه دیوار برشی فولادی با ورق نازک بدون آلیاژ (SPSW-Base)^۴، تحت بار دوره‌ای مشابه قرار گرفت و نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های دیوار برشی فولادی دارای آلیاژ حافظه‌دار و نمونه دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ، با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش درصد آلیاژ مصرفی شکل‌پذیری نیز افزایش یافته است [۱۳]. 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 انرژی زلزله می‌گردد [۱۴]. سانزینگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، با به کار بردن آلیاژ حافظه‌دار در قاب‌های با مهاربندهای شورون هشتی کمانش‌تاب، عملکرد قاب‌های با مهاربندهای کمانش‌تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار را مطالعه کردند. در این تحقیق، عدم توانایی مهاربندهای کمانش‌تاب در مهار دریافت‌های پسماند بیان شده است، همچنین از توانایی این مهاربندها در کاهش دریافت طبقات تحت تحلیل‌های لرزه‌ای عنوان شده است [۱۵]. در سال ۲۰۱۹ نیز نظری مفرد در دو سازه ۴ و ۸ طبقه، آلیاژ حافظه‌دار شکلی را در هسته مهاربند کمانش‌تاب بکار بردند. سپس با انجام تحلیل پوش‌آور و دینامیکی افزایشی عملکرد لرزه‌ای آن را تحت ۶ شتاب‌نگاشت زلزله ارزیابی کردند [۱۶].

سعیدی دریان و همکاران در سال ۲۰۱۹، ۲۷ قاب شامل ۱۸ قاب با دیوارهای برشی صفحه فلزی نازک به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی و همچنین ۹ قاب خمشی با شکل‌پذیری ویژه با سه ارتفاع مختلف کوتاه، متوسط و بلند مورد بررسی قرار داده‌اند. خسارت هر قاب برای سطوح مختلف عملکردی با استفاده از شاخص خسارت پارک-انگ، حداکثر شاخص جابجایی نسبی، شاخص تغییر شکل و شاخص انعطاف‌پذیری پلاستیک محاسبه می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهد که شاخص آسیب سیستم‌های باربر جانبی دیوار برشی صفحه فلزی نازک در قاب‌های بلندتر منجر به نتایج بهتر و ایمنی بالاتر در مقایسه با سایر قاب‌ها می‌شود [۱۷]. خیرالدین و همکاران در سال ۲۰۱۹، تأثیر سیستم‌های مهاربندی هم‌محور و برون‌محور را بر عملکرد لرزه‌ای سیستم قاب خمشی بتن مسلح دوگانه با استفاده از ۷ زوج شتاب‌نگاشت زلزله نزدیک گسل بررسی کرده‌اند. بر این اساس، دو قاب بتنی مسلح با ۵ و ۱۰ طبقه با و بدون سیستم‌های مهاربندی مذکور با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد که ظرفیت تحمل قاب بتن مسلح با استفاده از مهاربندهای CBF^۵ و EBF^۶ به ترتیب تا ۲،۳ و ۲ برابر افزایش می‌یابد. استفاده از مهاربند EBF در یک قاب بتنی مسلح، میزان برش پایه اعمال شده در سازه را در مقایسه با قاب CBF تا ۷ برابر کاهش می‌دهد [۱۸]. قلهکی و همکاران در سال ۲۰۲۰، به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی اثرات

⁴ Steel Plate Shear Wall-Base

⁵ Concentric Braced Frame

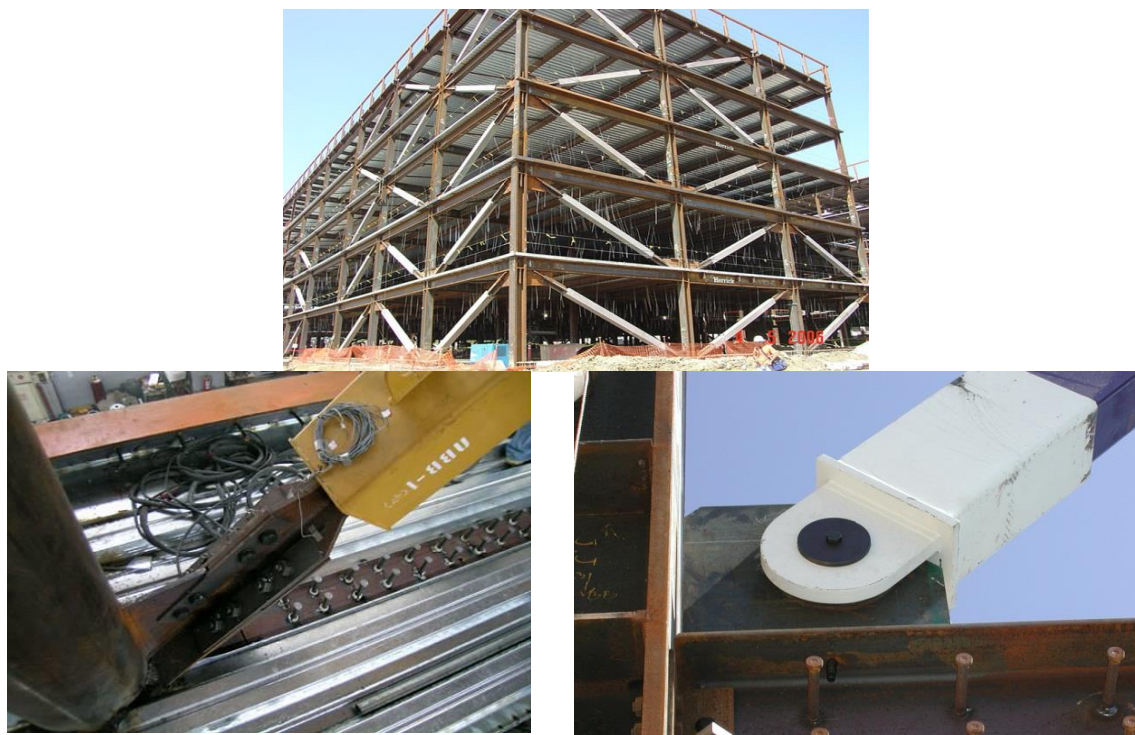
⁶ Eccentric Braced Frame

ناشی از نوع فولاد هسته و فاصله هسته از غلاف بر رفتار مهاربند کمانش تاب پرداخته‌اند. مدل‌های آزمایشگاهی شامل شش مهاربند با هسته‌ای از جنس فولاد ST37 معمولی و ST37-n (نرم شده در دمای ۱۰۰۰ درجه به روش اونیل) است که در آن‌ها فاصله هسته از غلاف برابر صفر، دو و سه میلی‌متر است. 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. اما مهاربند در تغییر مکان‌های کوچک‌تری شروع به اتلاف انرژی کرده است. افزایش فاصله هسته از غلاف نیز موجب کاهش ظرفیت باربری و استهلاک انرژی مهاربند می‌گردد [۱۹].

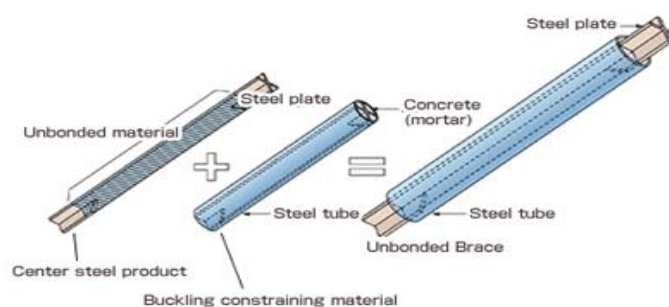
با توجه به اینکه فلسفه طراحی لرزه‌ای در آیین‌نامه‌ها بر مبنای رفتار غیرخطی سازه‌ها حین وقوع زلزله می‌باشد. لذا این امر سبب می‌گردد تا سیستم‌های سازه‌ای پس از زلزله‌های با شدت متوسط و یا بالا دچار تغییر شکل‌های گسترده شده و به این ترتیب پس از وقوع زلزله قابل بازسازی نبوده و یا بازسازی آن بسیار پرهزینه و غیراقتصادی باشد. با توجه به اینکه آلیاژ حافظه‌دار مشکل تغییر شکل‌های ماندگار سازه را تا حدودی مرتفع می‌کند. بنابراین در این تحقیق، بررسی سطح فروریزش سیستم‌های مهاربند کمانش تاب و کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت اثر ۷ زوج شتاب‌نگاشت دور از گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA P695 [۲۰] انجام شده است.

۲- مهاربند کمانش تاب

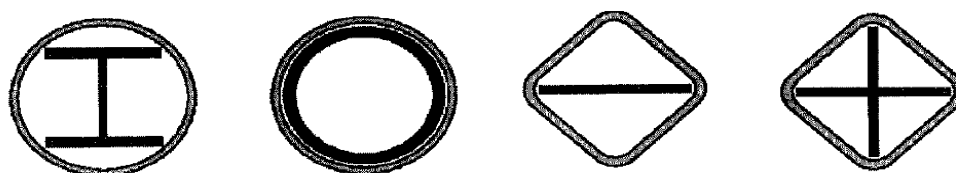
یکی از رایج‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی، مهاربند می‌باشد. در کشور ما این مهاربندها به علت صرفه‌ی اقتصادی و راحتی اجرا، علی‌رغم ضعف‌های عمده‌ی آن در بسیاری از سازه‌ها به کار برده شده‌اند [۲۱]. تحقیقات بسیاری صرف بهسازی این مهاربندها جهت رسیدن به یک رفتار الاستوپلاستیک ایده‌آل گردیده است. برای رسیدن به این هدف لازم بود تا با استفاده از مکانیسم مناسبی از کمانش فشاری مهاربند که مانع از استهلاک انرژی مناسب در قاب می‌شود، جلوگیری شود و امکان تسلیم فشاری فولاد فراهم شود. این سیستم که قاب‌های مهاربندی شده با مهاربند کمانش تاب نامیده می‌شود، به صورت گسترده‌ای در ژاپن و آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد. روشی که مد نظر قرار گرفت عبارت است از محصورسازی یک هسته‌ی فلزی شکل‌پذیر در میان حجمی از بتن که خود توسط یک غشای فلزی در بر گرفته شده است. وقتی این نوع مهاربندها به صورت مناسب طراحی و جزییات بندی شوند، غلاف فولادی نباید هیچ‌گونه نیروی محوری را تحمل کند [۲۲]. مبانی اصلی عملکرد این مکانیسم، جلوگیری از وقوع کمانش هسته‌ی فولادی به منظور امکان وقوع پدیده‌ی تسلیم فشاری در آن و در نتیجه امکان جذب انرژی در این عضو از سازه می‌باشد. این امر با پوشاندن سراسر طول هسته‌ی فولادی در لوله‌ی فولادی پر شده با بتن یا ملات میسر می‌گردد. در این سیستم نیاز به فراهم آوردن یک سطح لغزش یا لایه ناپیوستگی بین هسته فلزی و بتن محصورکننده وجود دارد. هدف از این امر آن است که نیروی مهاربندی فقط توسط هسته‌ی فولادی تحمل شود [۲۱ و ۲۲]. مصالح و هندسه‌ی لایه‌ی لغزشی مذکور باید به گونه‌ای طراحی شود که امکان حرکت نسبی بین هسته‌ی فولادی و بتن که به سبب وجود برش و اثر پواسون ایجاد می‌گردد، فراهم شود. در نتیجه ضمن جلوگیری از کمانش موضعی هسته، امکان تسلیم آن در حالت بارگذاری فشاری فراهم شود. بتن و محفظه‌ی لوله‌ای شکل فولادی، سختی و مقاومت خمشی لازم را برای جلوگیری از کمانش کلی مهاربند فراهم آورده و امکان تحمل بار توسط هسته‌ی فولادی را تا حد تسلیم، بدون آن که کاهشی در سختی و مقاومت مهاربند طی چرخه‌های بارگذاری ایجاد گردد فراهم می‌آورد. همچنین بتن و محفظه‌ی فولادی از کمانش موضعی هسته جلوگیری می‌کند. رفتار چرخه‌ای غیرالاستیک این مهاربندها با انجام آزمایش‌های زیادی بررسی شده است. این آزمایش‌ها که با مطالعات اجزا محدود نیز همخوانی داشت، نشان داد که برخلاف مهاربندهای معمول، چرخه‌های هیستریزس پایدار در کشش و فشار حاصل می‌گردد و در نتیجه ظرفیت بالایی برای جذب انرژی زلزله در سازه ایجاد می‌گردد [۲۳]. مختصری از جزییات این مهاربند در شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱: مهاربند کمانش ناپذیر در ارتفاع طبقات و جزئیات مهاربند [۲۳]



شکل ۲: شمای کلی مهاربند مقاوم در برابر کمانش [۲۳]

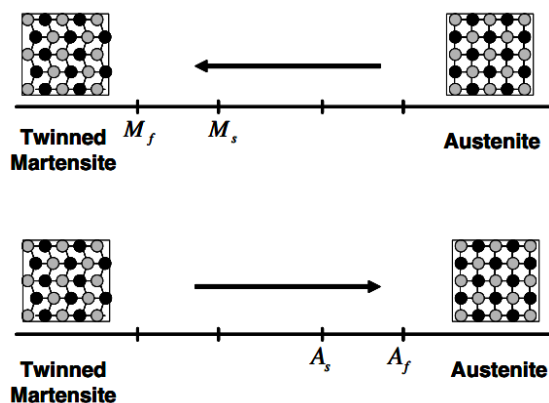


شکل ۳: انواع سطح مقطع مهاربند کمانش ناپذیر [۲۳]

۳- آلیاژ حافظه دار شکلی

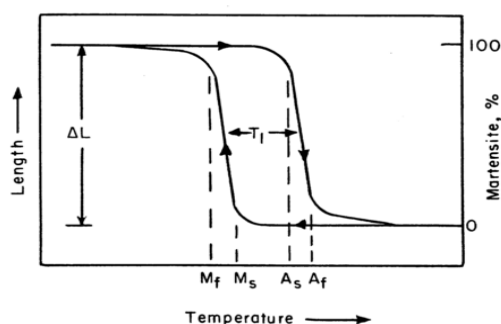
آلیاژهای حافظه دار عنوان گروهی از مواد محرک می باشد که خاصیت متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس العمل شدید این مواد نسبت به برخی از پارامترهای ترمودینامیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال پارامترهای مذکور به گونه ای است که می تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. وقتی یک آلیاژ معمولی تحت بار خارجی بیش از حد الاستیک قرار می گیرد، تغییر شکل می دهد و این نوع تغییر شکل بعد از حذف بار باقی می ماند. اما آلیاژهای حافظه دار رفتار متفاوتی را از خود بروز می دهند. در دمای پایین یک نمونه حافظه دار می تواند تغییر شکل پلاستیک چند درصدی را تحمل کند و سپس به شکل اولیه خود در دمای بالا باز گردد [۲۴]. آلیاژهای

حافظه دار دارای دو فاز با اشکال کریستالی متفاوت و در نتیجه خصوصیات متفاوت هستند. یکی از این فازها آستنیت است که فاز پایدار آن در دمای بالا است و دیگری مارتنزیت که فاز پایدار آن در دمای پایین است. تغییر حالت SMA بین این دو حالت که با اعوجاج برشی شبکه بندی اتفاق می افتد تغییر شکل مارتنزیتی نامیده می شود. تغییر شکل برگشت پذیر مارتنزیتی با سرد و گرم کردن در غیاب بار خارجی در شکل (۴) نمایش داده شده است [۲۵].



شکل ۴: تغییر شکل مارتنزیتی با تغییر دما در غیاب بار خارجی [۲۵]

در حالت بدون تنش، یک آلیاژ حافظه دار شکلی دارای چهار دمای مشخصه می باشد. M_s دمای آغاز حالت آستنیت، M_f دمای پایان حالت آستنیت، A_s دمای آغاز حالت مارتنزیت، A_f دمای پایان حالت مارتنزیت می باشد. اگر دمای محیط بالاتر از A_f باشد ماده اصطلاحاً در حالت آستنیت قرار دارد و رفتار فوق الاستیک از خود بروز خواهد داد و اگر دمای محیط کمتر از M_f باشد، ماده اصطلاحاً در حالت مارتنزیت قرار دارد و رفتار حافظه شکلی از خود بروز خواهد داد. در شکل (۵) زمانی را نشان می دهد که ماده تحت حالت بدون تنش قرار گرفته است و تحت بار گرمایی است. تا زمانی که ماده به دمای A_s نرسیده است، به صورت کاملاً مارتنزیت است، زمانی که دما به A_s برسد، تبدیل از مارتنزیت به آستنیت آغاز شده تا به دمای بالاتر A_s و به سمت A_f برود. سرانجام زمانی که به دمای A_f برسد، تبدیل فاز پایان پذیرفته شده و ماده به حالت کاملاً آستنیت در خواهد آمد. در تبدیل معکوس، زمانی که ماده تحت کاهش دما قرار دارد، تا زمانی که ماده به دمای M_s نرسیده است، در حالت کامل آستنیت قرار دارد. زمانی که به دمای M_s می رسد، کریستال های آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت می کنند و زمانی که به دمای M_f می رسد، تبدیل آستنیت به مارتنزیت کامل شده است. در تبدیل معکوس، در دمای بین M_f و M_s ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت می باشد. حالت مارتنزیت می تواند هم توسط دما و هم توسط تنش ایجاد شود [۲۵].



شکل ۵: نسبت مارتنزیت در برابر دما برای یک ماده حافظه دار شکلی [۲۵]

اگرچه بیشترین کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی مربوط به میراگرها و مهاربندها است، نمونه هایی از استفاده آن ها در سیستم های جداساز نیز دیده می شود. در این سیستم ها علاوه بر جدا کردن سازه از فونداسیون خود، جذب انرژی و توانایی بازگشت به مرکز نیز فراهم می شود. آن ها از انتقال انرژی زلزله به سازه جلوگیری می کنند و در نتیجه، خسارت های به وجود آمده در سازه به شدت کاهش می یابد.

کری از این نوع جداساز در مدل چند درجه آزادی یک سازه استفاده کرد. نتایج کاهش شدید خسارت در سازه را نشان دادند [۲۶]. شوک و همکاران [۲۷] از جداساز ترکیبی ساخته شده از مصالح الاستوپلاستیک و میله‌های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به منظور کاهش خسارت در سازه‌ها استفاده کردند. نتایج نشان دادند که این جداساز باعث رفتار مناسب سازه بالای آن و کاهش شدید دررفت‌های بین طبقه‌ای شده است. دولک و همکاران [۲۸] نیز در پژوهشی از جداسازی ترکیبی، شامل میله‌های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و مؤلفه‌های فولادی استفاده کردند.

پژوهشگران زیادی در زمینه تقویت و بهسازی پل‌ها برای مقابله با خسارت‌های لرزه‌ای مطالعاتی را انجام داده‌اند. اندرا و همکاران [۲۹] و دسروچس و همکاران [۳۰] کارامدی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را برای مقاوم‌سازی و تقویت پل‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. این ابزارها با هدف جذب انرژی به صورت متمرکز در محل‌هایی از سازه که کنترل آن در دسترس‌تر باشد و هم‌چنین کاهش خسارت در پل‌های چند دهانه در آن‌ها قرار گرفتند. نمونه‌های عددی نشان می‌دهند که این آلیاژها نسبت به فولادها به‌طور مؤثرتری جابجایی‌های پل‌ها در مفصل‌ها را کاهش می‌دهند. ویژگی فوق ارتجاعی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی این امکان را فراهم می‌کنند که تغییرشکل‌های بزرگ ایجاد شده در محل اتصال دو دهانه پل را بدون وارد شدن به محدوده پلاستیک تحمل کنند. علاوه بر این، در اثر چرخه‌های هیستریزس این آلیاژها، آن‌ها باعث جذب انرژی در محل اتصال دهانه پل می‌شوند. از این‌رو، استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در تقویت پل‌ها روشی کارآمد برای جلوگیری از بروز خسارت‌های شدید در آن‌ها خواهد شد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در مورد استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مهندسی عمران، قیمت بالای آن‌ها در مقایسه با مصالح معمول ساختمانی است. هم‌چنین، مقدار زیادی از مصالح دیگر که در کنار آن‌ها مورد نیاز است عامل دیگری در محدودیت استفاده از این آلیاژها است. علاوه بر آن، آماده‌سازی ابعاد مورد نیاز با توجه به سختی خیلی زیاد این آلیاژها برای کاربردهای مختلف است. کمبود دانش کافی در زمینه تبادیل علم مواد و مهندسی عمران، استفاده از این آلیاژها را محدود کرده است [۳۱].

۴- مبانی تحلیل

الف) تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی^۷

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی یک روش تحلیل پارامتری می‌باشد که در سال‌های اخیر برای تخمین‌های مختلف سطح عملکردی یک ساختمان تحت اثر بارهای لرزه‌ای، فراگیر شده است. مدل‌های ساختمانی تحت یک یا چند رکورد زلزله با شدت‌های مختلف مدل گردیده و یک یا چند منحنی پاسخ در اثر مقدار شدت لرزه‌ای تولید می‌گردد.

شدت رکوردهای اعمالی بر سازه که در طول تحلیل‌ها اضافه می‌گردد با پارامتر سنجی شدت (IM)^۸ و خروجی تحلیل‌ها که پاسخ سازه می‌باشد با پارامتر سنجی خسارت (DM)^۹ نمایش داده می‌شود. منحنی‌های (IDA) در واقع ترسیم رابطه‌ی بین پاسخ سازه (DM) نسبت به تغییر شدت رکوردها (IM) است. پارامترهای انتخابی برای (IM) و (DM) باید به‌خوبی نمایانگر اثر زلزله و رفتار سازه باشد. الگوریتم مورد استفاده جهت مقیاس رکوردها به الگوریتم گام‌به‌گام مرسوم می‌باشد. الگوریتم گام‌به‌گام را می‌توان ساده‌ترین روش جهت فهم و برنامه‌نویسی دانست. تحلیل‌ها با افزایش سطوح (IM) با گام‌های مساوی تا زمانی که همگرایی حاصل گردد (نشانه‌ای از پایداری دینامیکی کلی) ادامه می‌یابد. در این صورت لازم است که کاربر فقط گام (IM) و حداکثر تعداد تحلیل‌های دینامیکی را انتخاب نموده تا نتایج حاصل گردد. جهت بیان سطح مقیاس، لازم است انتخاب اولیه و موقتی از (IM) (که قابل مقیاس باشد) صورت گیرد. پس از انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، یک یا چند منحنی از پاسخ سازه (DM) در مقابل سطوح مختلف جنبش زمین (IM) حاصل می‌شود. در نهایت با تعریف حالات حدی و پردازش نتایج با استفاده از روابط احتمالاتی، عملکرد سازه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اطلاعات حاصله از تحلیل (IDA) بینشی از رفتار و پلی بین نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون و پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌ها می‌باشد [۳۲ و ۳۳].

⁷ Nonlinear Incremental Dynamic Analysis

⁸ Intensity Measure

⁹ Damage Measure

باید به این نکته توجه داشت که در تعیین شدت‌های خرابی ممکن است در برخی موارد، مکانیسم خرابی به صورتی باشد که توسط تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون شناسایی نگردد. برای رفع این مشکل، دو معیار دیگر برای تشخیص نقطه‌ی خرابی کلی در سازه‌های مورد بررسی در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از:

الف) بر طبق ضوابط آیین‌نامه‌ی FEMA-350 حداکثر تغییرشکل نسبی میان طبقه‌ای معادل خرابی سازه‌های قاب خمشی برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

ب) بر طبق پیشنهاد بیکر حداکثر شتاب طیفی مد اول سازه $S_a(T_1)$ معادل هشت برابر شتاب گرانش زمین در نظر گرفته می‌شود.

ب) تحلیل شکست^{۱۰}

برای تولید منحنی‌های شکست بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی افزایشی (IDA)، از روش‌های آماری استفاده شده است. هدف استخراج منحنی‌های شکست برای حد فروریزش و تفسیر احتمالاتی و مقایسه‌ی رفتار قاب‌های مورد نظر بوده است. برای شرایط فوق منحنی‌های شکست بر اساس رابطه‌ی (۱) به دست آمده است [۳۳ و ۳۴]:

$$Fragility(x) = P[S_a \geq S_{a,c} | S_a = x] = P[S_{a,c} \leq x] \quad (1)$$

تابع $Fragility(x)$ مقدار عددی منحنی شکست فروریزش به ازای شتاب طیفی X می‌باشد. S_a شتاب طیفی و $S_{a,c}$ ظرفیت فروریزش سازه می‌باشد. $P[S_{a,c} \leq x]$ احتمال فراگذشت شتاب طیفی X از ظرفیت فروریزش سازه می‌باشد. منحنی شکست می‌تواند به عنوان تابع توزیع تجمعی^{۱۱} (CDF) شتاب‌های فروریزش تحلیل‌های دینامیکی افزایشی تحت زلزله‌های مختلف نیز برآورد گردد.

۵- روش تحقیق

در این تحقیق، رفتار لرزه‌ای سازه‌های دارای سیستم مهاربندی کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی بررسی می‌شود به منظور نیل به اهداف این تحقیق، ابتدا دو سازه‌ی ۶ و ۱۲ طبقه به صورت سه بعدی بر اساس آئین‌نامه‌ی داخلی (مبحث ششم و دهم مقررات ملی [۳۵ و ۳۶]) و استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۳۷] طراحی گردید. مقاطع طراحی شده برای قاب‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی از ۷ زوج شتاب‌نگاشت FEMA P 695 استفاده شد. این دستورالعمل ارزیابی احتمالاتی فروریزش سازه‌ها را در بر می‌گیرد. در این دستورالعمل مجموعه‌ای از ۲۲ زوج زلزله‌ی دور از گسل که بزرگی آن‌ها بین ۶/۵ تا ۷/۶ در مقیاس ریشتر و فاصله‌ی آن‌ها بیش از ۱۰ کیلومتری گسل می‌باشد ارائه شده است [۲۰]. همچنین ۱۴ زوج زلزله نزدیک گسل بدون پالس و ۱۴ زوج زلزله نزدیک گسل با پالس نیز پیشنهاد شده است. مطابق FEMA P 695، به منظور کاهش پراکندگی نتایج، این شتاب‌نگاشت‌ها ابتدا نسبت به سرعت حداکثر شتاب‌نگاشت^{۱۲} (PGV) مقیاس شده‌اند. همچنین در تحقیق حاضر شتاب طیفی همه‌ی رکوردها در زمان تناوب مد اول سازه $S_a(T_1, 5\%)$ به عدد یک مقیاس گردید. 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. جدول (۳) مشخصات زلزله‌های دور از گسل منتخب را نشان می‌دهد. 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. گام به گام روش تحقیق به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

الف) انتخاب ۴ عدد قاب فولادی دارای مهاربند کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی با تعداد طبقات ۶ و ۱۲ و پیکربندی منظم و در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده‌ای در مدل‌سازی آن‌ها.

ب) طراحی سازه‌ها بر اساس ضوابط مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم.

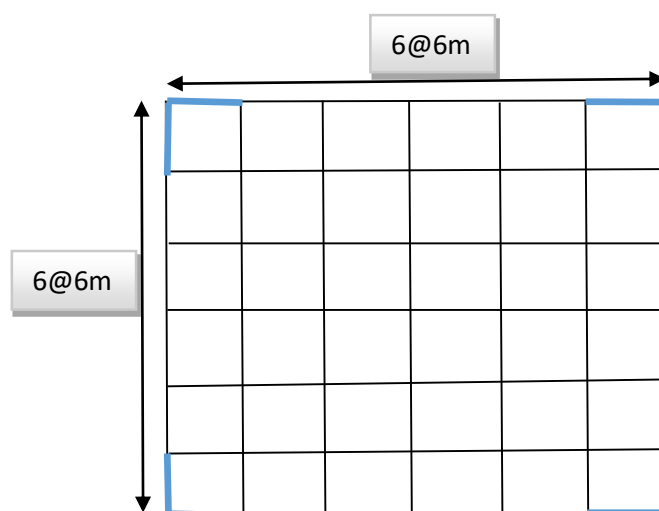
¹⁰ Fragility Analysis

¹¹ Cumulative Distribution Function

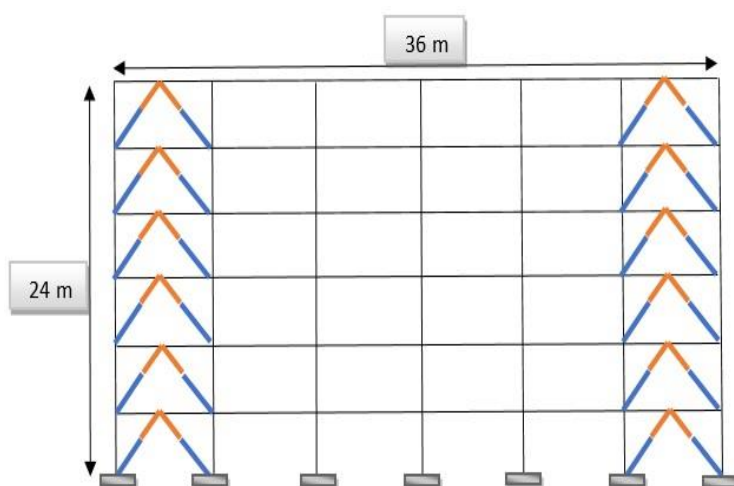
¹² Peak Ground Velocity

- ت) تهیه مدل‌های غیرخطی قاب‌های مورد مطالعه.
- ث) انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بار افزون قاب‌های مورد مطالعه.
- ج) انتخاب ۷ زوج رکورد شتاب زلزله‌ی دور از گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA P695 و پردازش آن‌ها جهت استفاده در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و مقیاس آن‌ها بر اساس $S_a(T_1)$.
- ح) انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی قاب‌ها تحت رکوردهای انتخابی.
- خ) برآورد تغییرشکل نسبی میان طبقه‌ای متناظر با لحظه‌ی خرابی با تلفیق نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بار افزون و دینامیکی غیرخطی افزایشی.
- د) ارزیابی تغییرات مکانیسم خرابی و تغییرشکل نسبی میان طبقه‌ای متناظر با حد فروریزش برای قاب‌های نمونه تحت رکوردهای انتخابی.
- ذ) مقایسه‌ی مقادیر تغییرشکل نسبی میان طبقه‌ای حد فروریزش با مقادیر ارائه‌شده توسط آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای.
- ر) توسعه منحنی‌های شکست لرزه‌ای و بررسی سطوح عملکرد (IO، LS و CP).

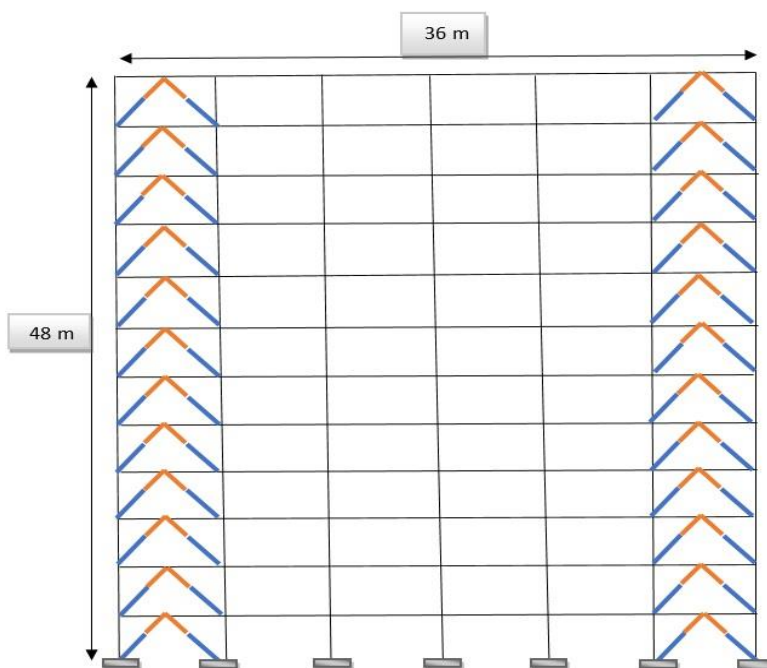
در ادامه‌ی مدل‌سازی، در هر سازه یکی از قاب‌های کناری با استفاده از نرم‌افزار OpenSees به صورت دو بعدی مدل شده و رفتار غیر ارتجاعی قاب‌ها، که در دهانه‌های مختلف دارای مهاربندند، در دو حالت مهاربند کمانش‌تاب و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی تحت ۱۴ شتاب‌نگاشت پیشنهادی دستورالعمل FEMA-P695 بررسی شده است. سپس منحنی‌های شکست با استفاده از خروجی‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی توسط نرم‌افزار آماری Easyfit 5.5 ترسیم شده‌اند و از تفسیر نتایج آن در جهت تعیین سطوح عملکرد سازه بهره گرفته می‌شود. پلان سازه‌های مذکور مطابق شکل (۶) در هر طرف دارای ۶ دهانه می‌باشد. فاصله‌ی دهانه‌ها ۶ متر و ارتفاع طبقات ۴ متر در نظر گرفته شده است. بار مرده‌ی طبقات ۴۲۵ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده‌ی طبقات و بام به ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع لحاظ گردید. تنش تسلیم فولاد ۲۷۵ مگاپاسکال و مدل الاستیسیته آن ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال لحاظ شد. شکل (۷) و (۸) نمای قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد. مدل‌های موردنظر در تحلیل‌ها، قاب‌های دو بعدی ۶ و ۱۲ طبقه‌ی ۶ دهانه، استخراج شده از سازه‌های سه بعدی می‌باشند. اتصال تیر به ستون در این قاب‌ها مفصلی و اتصال ستون‌ها در تراز زمین مفصلی در نظر گرفته شده است. به منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی از نرم‌افزار کد باز OpenSees استفاده شده است. این نرم‌افزار اجزای محدود است که به وسیله‌ی مازونی و همکاران تهیه شده است و همچنان در حال توسعه می‌باشد [۳۸]. این نرم‌افزار به طور تخصصی در حوزه سیستم‌های عملکردی خاک و سازه تحت زلزله ارائه شده است.



شکل ۶: پلان سازه‌ی ۶ طبقه سه بعدی مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۷: قاب کناری استخراج شده از سازه‌ی ۶ طبقه‌ی سه بعدی مورد نظر



شکل ۸: قاب کناری استخراج شده از سازه‌ی ۱۲ طبقه‌ی سه بعدی مورد نظر

جدول ۱: مقاطع طراحی شده قاب ۶ طبقه

مهاربند	تیر		ستون		شماره طبقه
	دهانه های وسط	دهانه های کناری	دهانه های وسط	دهانه های کناری	
BOX 18*18*1	IPE 270	IPE 550	BOX 25*25*2	BOX 30*30*3	طبقه ۱ و ۲
BOX 18*18*1	IPE 270	IPE 550	BOX 20*20*1.5	BOX 20*20*1.5	طبقه ۳ و ۴
BOX 12*12*1	IPE 270	IPE 360	BOX 20*20*1.5	BOX 20*20*1.5	طبقه ۵
BOX 12*12*1	IPE 220	IPE 270	BOX 20*20*1.5	BOX 20*20*1.5	طبقه ۶

جدول ۲: مقاطع طراحی شده قاب ۱۲ طبقه

مهاربند	تیر		ستون		شماره طبقه
	دهانه های وسط	دهانه های کناری	دهانه های وسط	دهانه های کناری	
BOX 18*18*1.5	IPE 360	IPE 600	BOX 30*30*2.5	BOX 50*50*1	طبقه ۱ و ۲ و ۳
BOX 18*18*1.2	IPE 360	IPE 600	BOX 30*30*2	BOX 40*40*3	طبقه ۴ و ۵ و ۶
BOX 18*18*1	IPE 330	IPE 500	BOX 25*25*2	BOX 25*25*2	طبقه ۷ و ۸
BOX 12*12*1	IPE 330	IPE 450	BOX 25*25*1.5	BOX 25*25*1.5	طبقه ۹
BOX 12*12*1	IPE 300	IPE 400	BOX 25*25*1.5	BOX 25*25*1.5	طبقه ۱۰
BOX 12*12*1	IPE 270	IPE 360	BOX 25*25*1.5	BOX 25*25*1.5	طبقه ۱۱
BOX 12*12*1	IPE 240	IPE 300	BOX 25*25*1.5	BOX 25*25*1.5	طبقه ۱۲
BOX 18*18*1.5	IPE 360	IPE 600	BOX 30*30*2.5	BOX 50*50*1	طبقه ۱ و ۲ و ۳
BOX 18*18*1.2	IPE 360	IPE 600	BOX 30*30*2	BOX 40*40*3	طبقه ۴ و ۵ و ۶

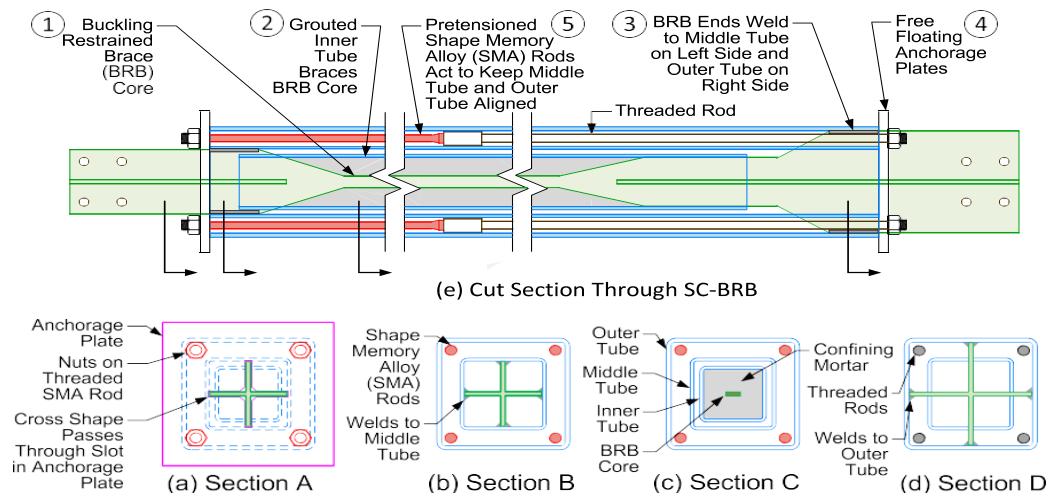
جدول ۳: زلزله های مورد نظر در تحلیل دینامیکی افزایشی با ضرایب مقیاس نهائی اعمال شده [۴۱]

شماره	بزرگی (M)	سال وقوع	زلزله	ایستگاه زلزله	ضرایب مقیاس نهائی (g)
	(R _i)				
			زلزله های دور از گسل		
۱	۶٫۷	۱۹۹۴	Northridge	Beverly Hills-Mulhol	مولفه L: ۱٫۱۳ مولفه T: ۱٫۱۵
۲	۶٫۷	۱۹۹۴	Northridge	Canyon Country-WLC	۱٫۰۹
۳	۷٫۱	۱۹۹۹	Duzce. Turkey	Bolu	۰٫۷۵
۴	۷٫۱	۱۹۹۹	Hector Mine	Hector	۳٫۰۱
۵	۶٫۵	۱۹۷۹	Imperial Valley	Delta	۱٫۹۰
۶	۶٫۵	۱۹۷۹	Imperial Valley	El Santro Array #11	۲٫۰۳
۷	۶٫۹	۱۹۹۵	Kobe. Japan	Nishi-Akashi	۱٫۶۵
۸	۶٫۹	۱۹۹۵	Kobe. Japan	Shin-Osaka	۱٫۶۷
۹	۷٫۹	۱۹۹۹	Kocaeli. Turkey	Duzce	۱٫۸۰
۱۰	۷٫۵	۱۹۹۹	Kocaeli. Turkey	Arcelik	۵٫۲۷
۱۱	۷٫۳	۱۹۹۲	Landers	Yermo Fire Station	۳٫۹۹
۱۲	۷٫۳	۱۹۹۲	Landers	Cool water	۱٫۰۸
۱۳	۶٫۹	۱۹۸۹	Loma Prieta	Capitola	۱٫۲۴
۱۴	۶٫۹	۱۹۸۹	Loma Prieta	Gilroy Array #3	۲٫۱۲

۵-۱- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی مدل سازی و شبیه سازی در نرم افزار OpenSees از مدل آزمایشگاهی شامل مهاربند کمانش تاب با میله های آلیاژ حافظه دار شکلی، ارائه شده در مطالعه اسرتون و همکاران استفاده شده است [۳۹]. سیستم SC - BRB در شکل (۹) توصیف شده است. در بطن این سیستم، هسته ی BRB قرار گرفته است که توسط ملات درون غلاف پوشانده شده است. جوش هسته میانی با غلاف های بیرونی و میانی از طریق المان گپ مدلسازی شده است که منجر به عملکرد مناسب آلیاژهای حافظه دار شکلی با المان سازه ای شده است. برای مدل سازی مهاربند کمانش تاب در نرم افزار المان خربایی Corot Truss بهره برده می شود که عملکرد همزمان میله های آلیاژ حافظه دار شکلی و همچنین تیوپ های داخلی و میانی و بیرونی در آن تعبیه شده است. جهت ممانعت از کمانش مهاربند مورد نظر در

مدل آزمایشگاهی از ملات استفاده شده است، همچنین ۴ میله آلیاژ حافظه‌دار شکلی به کار برده شده نیز در شکل (۹) نشان داده شده است.

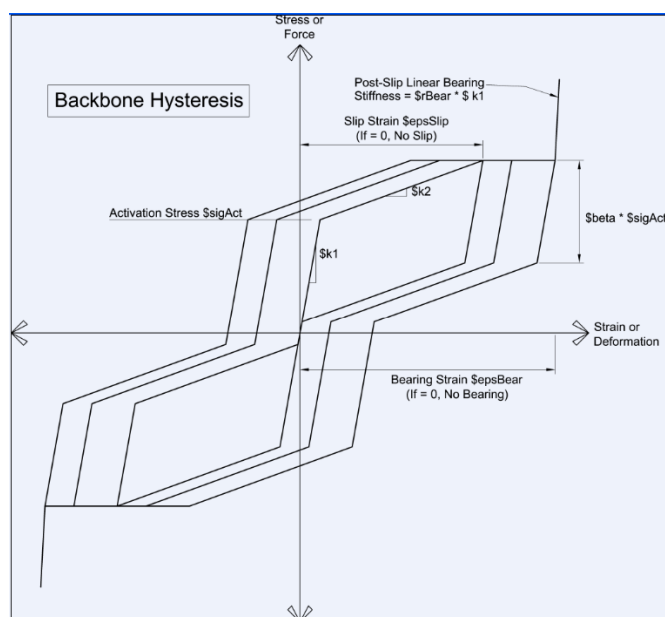


شکل ۹: مدل آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب مجهز به میله‌های SMA [۳۹]

رفتار آلیاژ حافظه‌دار شکلی مورد استفاده در این تحقیق مطابق شکل (۱۰) در اثر بارگذاری و باربرداری بدون کرنش پسماند می‌باشد.

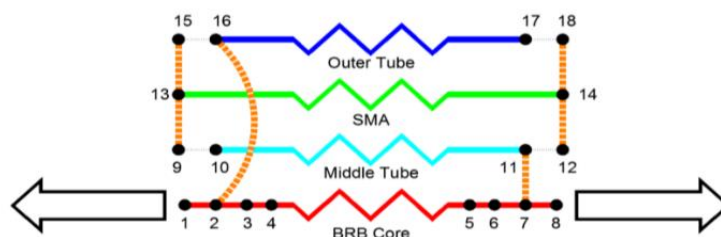
جدول ۴: مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار بر اساس منحنی رفتار ارائه شده [۴۰]

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

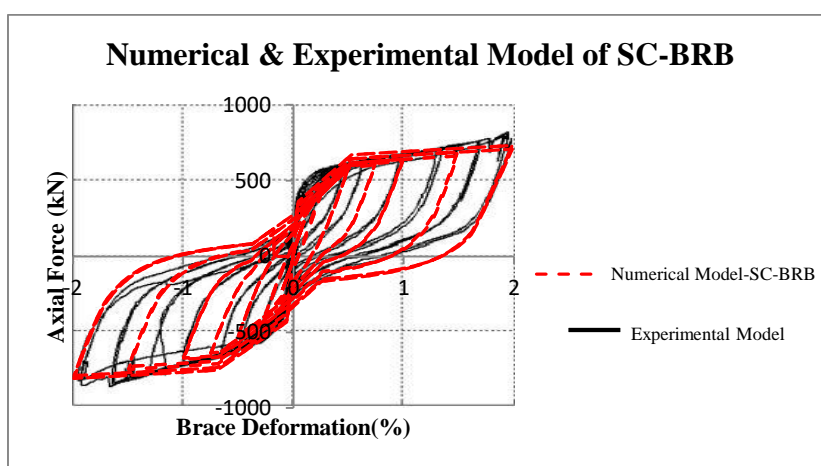


شکل ۱۰: رفتار آلیاژ حافظه‌دار بر اساس شبیه‌سازی با دستور Self-Centering در نرم‌افزار OpenSees [۴۰]

مدل آزمایشگاهی مهاربند صلیبی شکل است و هسته آن مستطیل شکل می‌باشد و رفتار پرچمی شکل دارد. به منظور شبیه‌سازی اتصال بین غلاف‌های داخلی، میانی، بیرونی و میله آلیاژ حافظه‌دار در نرم‌افزار OpenSees از المان‌های گپ استفاده شده است. المان Gap به‌عنوان المان Zero length با سختی کم اما غیر صفر در حالت فشاری تعریف شده است. در شکل (۱۱) نمودار شماتیک مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees در نظر گرفته شده است. هم‌پوشانی نمودارهای هیستریزس نیروی محوری-تغییر شکل مهاربند مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار OpenSees در شکل (۱۲) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با مدل‌سازی این مهاربند در نرم‌افزار OpenSees نتایج قابل قبولی در ارزیابی صحت مدل‌سازی به‌دست آمده است. درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه در نمونه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی مطابق جدول (۵) ارائه شده است.



شکل ۱۱: نمودار شماتیک مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار OpenSees



شکل ۱۲: مقایسه منحنی هیستریزس نمونه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی

جدول ۵: درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه در نمونه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی

پارامترهای مورد مطالعه	نیروی تسلیم (kN)	نیروی نهایی (kN)	سختی اولیه (kN/m)
نمونه‌ی آزمایشگاهی	۳۲۶	۵۳۸	۱۱۲۰۰۰
نمونه‌ی تحلیلی	۳۱۹	۵۲۹	۱۰۷۰۰۰
درصد خطا	۴,۴	۲,۹	۴,۵

۵-۲- مکانیسم مدل‌سازی سازه‌های دارای مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی

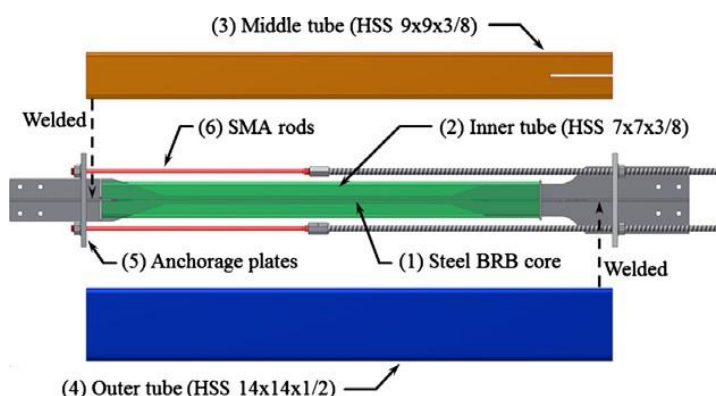
مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی مطابق پیکربندی موجود در مرجع [۳۹] مدل‌سازی شده است. این مکانیسم مطابق شکل (۱۳) شامل هسته BRB، غلاف داخلی، غلاف میانی، غلاف خارجی و ۴ میله آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌باشد. به منظور محاسبه سطح مقطع هسته مهاربند کمانش تاب و میله‌های آلیاژ حافظه‌دار رابطه‌های (۲) تا (۵) به کار برده می‌شوند. سطح مقطع آلیاژ حافظه‌دار چنان تعیین شده است که به هنگام تسلیم هسته‌ی مهاربندهای کمانش تاب جاری گردد.

$$P_{u-SC-BRB} = \phi P_{yBRB} + \phi P_{i-SMA} = 0.9F_{ySC}A_{SC} + 0.9F_{i-SMA}A_{SMA} \quad (2)$$

$$P_{adj-BRB} = \beta \omega F_{ySC}A_{SC} \leq F_{i-SMA}A_{SMA} \quad (3)$$

$$A_{SC} = \frac{P_{u-SC-BRB}}{\phi F_{ySC}(1 + \beta \omega)} \quad (4)$$

$$A_{SMA} = \frac{\beta \omega F_{ySC}A_{SC}}{F_{i-SMA}} \quad (5)$$



شکل ۱۳: مکانیسم مدل سازی مهاربند کمانش ناپذیر مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی [۳۹]

۶- نتایج تحلیل

به منظور ارزیابی عملکرد سازه‌ها تحت بار جانبی، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی تحت ۷ زوج شتابگاشت دور از گسل انجام گردید. خروجی‌های تحلیل شامل منحنی‌های شکست می‌باشد. منحنی‌های شکست را می‌توان برای سطوح احتمال ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد (معادل $Z=1$ و $Z=0$ ، $Z=-1$ در توزیع لوگ نرمال) خلاصه نمود که این روش در تحقیقات مختلف مانند گزارش‌های PEER رایج می‌باشد [۴۱].

در نشریه‌ی ۳۶۱ (بهسازی) [۴۲] دریافت ۰/۷، ۲/۵ و ۵ درصد به عنوان سطوح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه (IO)^{۱۳}، ایمنی جانی (LS)^{۱۴} و آستانه‌ی فروریزش (CP)^{۱۵} بیان شده است. لازم به ذکر است که سطح عملکردی: نشان دهنده حداکثر خرابی مورد انتظار سازه می‌باشد به طوری که اگر خرابی از این حد افزایش یابد، سطح عملکردی سازه نیز تغییر پیدا خواهد کرد. وضعیت کلیه اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در تعریف این سطوح عملکردی دخیل می‌باشند. هر سطح عملکردی، شرایطی را جهت محدود کردن ماکزیمم خسارت وارد به سازه، در اثر یک زمین‌لرزه معین ارائه می‌نماید. در ادامه سطوح عملکردی معرفی می‌شود: **سطح عملکرد قابلیت استفاده‌ی بی‌وقفه**، به سطح عملکردی اطلاق می‌شود که پیش‌بینی شود در اثر وقوع زلزله، مقاومت و سختی اجزای ساده تغییر قابل توجهی پیدا نکند و استفاده‌ی بی‌وقفه از آن ممکن باشد و اجزای غیر سازه‌ای در اثر زلزله دچار خرابی جزئی شوند، به گونه‌ای که پس از زلزله، راه‌های دسترسی و فرار مانند درها، راهروها، پله‌ها، آسانسورها و روشنایی آن‌ها مختل نشده و استفاده از ساختمان بی‌وقفه میسر باشد. **سطح عملکرد ایمنی جانی**، به سطح عملکردی اطلاق می‌شود که پیش‌بینی شود در اثر وقوع زلزله، خرابی در سازه ایجاد شود، اما میزان خرابی‌ها به اندازه‌ای نباشد که منجر به خسارت جانی شود و خرابی اجزای غیر سازه‌ای در اثر زلزله خطر، جدی برای جان ساکنین به وجود نیارد.

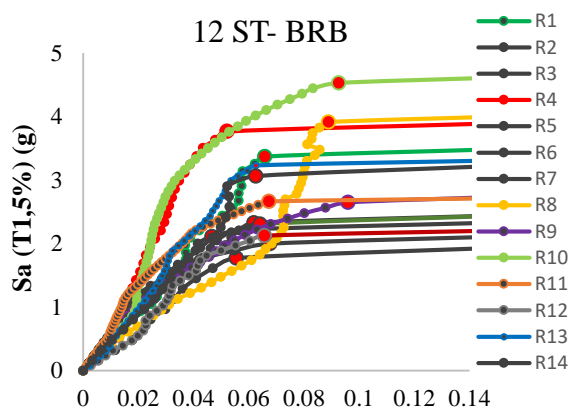
سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش، به سطح عملکردی اطلاق می‌شود که پیش‌بینی شود در اثر وقوع زلزله، خرابی

¹³ Immediate Occupancy

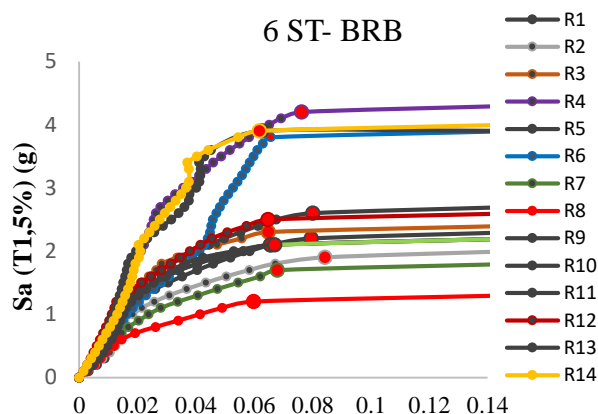
¹⁴ Life Safety

¹⁵ Collapse Prevention

گسترده‌ای در سازه ایجاد می‌شود، اما ساختمان فرونریزد و تلفات جانی به حداقل برسد [۴۲]. این تحلیل‌ها برای هر شتاب‌نگاشت با گام‌های شتاب طیفی $0.1g$ اعمال شده است. ظرفیت فروریزش هر قاب بزرگترین شتاب طیفی است که قاب تحمل نموده است. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد. ظرفیت‌های فروریزش قاب‌ها تحت هر شتاب‌نگاشت با نقاط قرمز نمایش داده شده است. مطابق شکل (۱۴) در قاب ۶ طبقه با مهاربند کماتش‌تاب این محدوده g $1/2$ تا g $4/2$ و در قاب ۱۲ طبقه با مهاربند کماتش-تاب g $1/3$ تا g $4/8$ می‌باشد. شکل (۱۵) نیز نشان می‌دهد با اضافه شدن آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای قاب ۶ طبقه ظرفیت فروریزش تحت شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل پیشنهادی FEMA P695 در محدوده g $2/5$ تا g $5/4$ و برای قاب ۱۲ طبقه نیز g $2/6$ تا g $5/6$ می‌باشد. نتایج، ظرفیت فروریزش بالاتر قاب‌های دارای مهاربند کماتش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی را نسبت به قاب‌های با مهاربند کماتش‌تاب نشان می‌دهند.

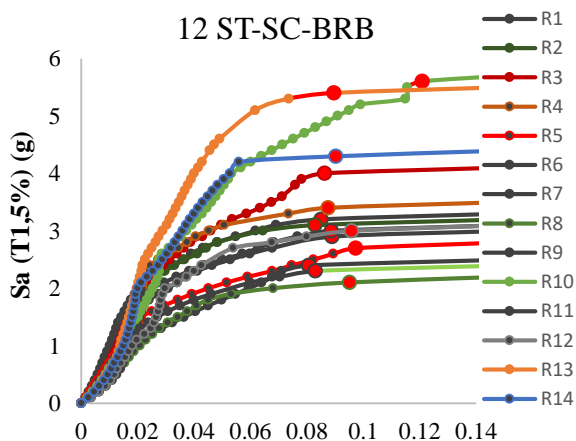


Maximum Drift of Stories

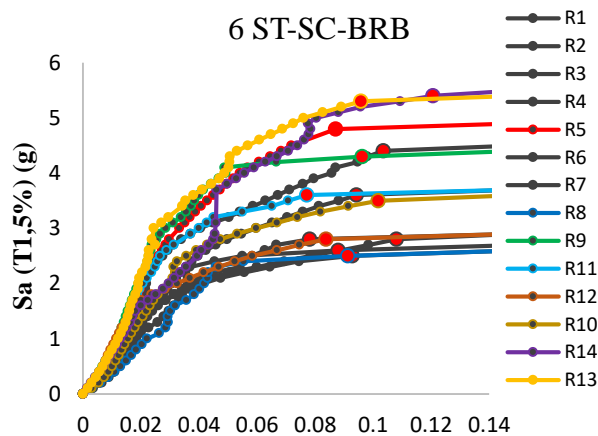


Maximum Drift of Stories

شکل ۱۴: نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه با مهاربند کماتش‌تاب پذیر



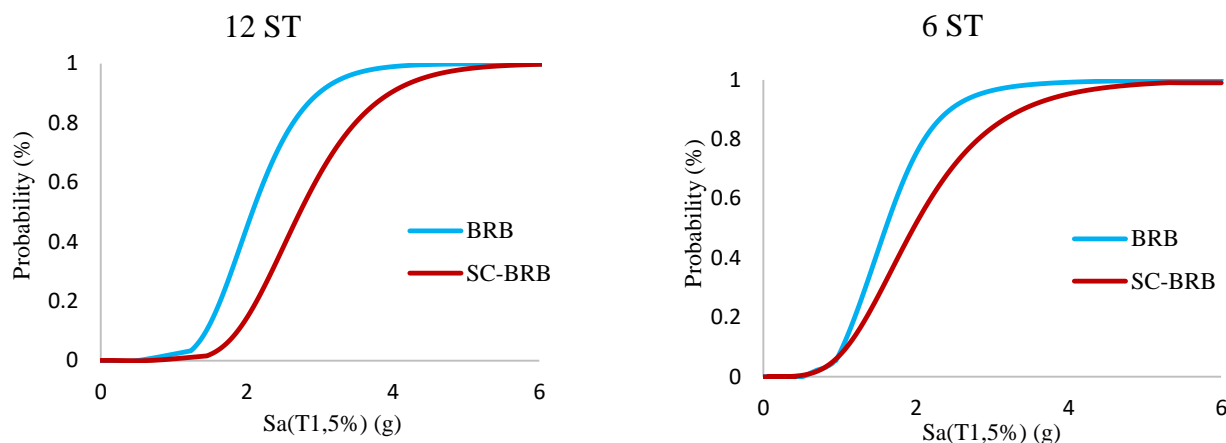
Maximum Drift of Stories



Maximum Drift of Stories

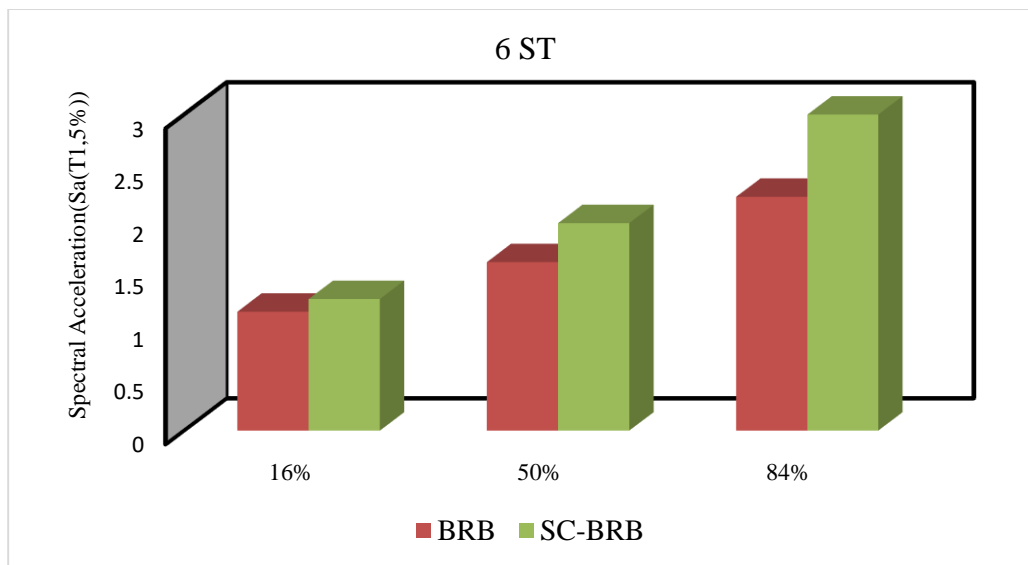
شکل ۱۵: نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه با مهاربند کماتش‌تاب پذیر مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی

شکل (۱۶) منحنی‌های شکست لرزه‌ای ظرفیت فروریزش قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه را برای سیستم‌های مهاربندی مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، قاب‌های با سیستم مهاربندی SC-BRB در سطوح عملکردی IO، LS و CP دارای بیشترین شتاب طیفی می‌باشند.

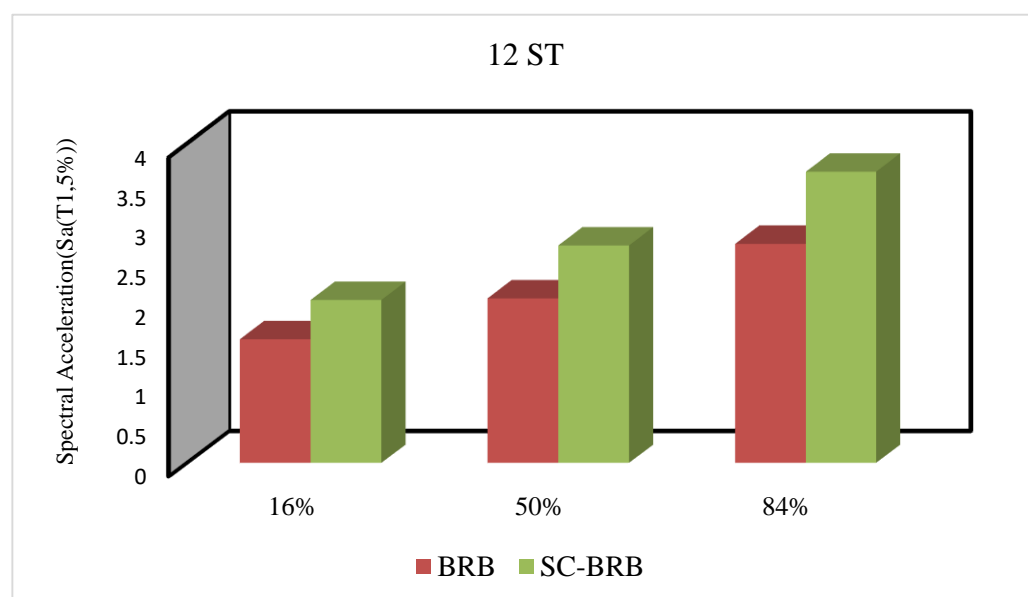


شکل ۱۶: منحنی‌های شکست لرزه‌ای ظرفیت فروریزش قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه

در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب مقایسه‌ای از شتاب طیفی قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه با سیستم‌های مهاربندی مذکور در سطوح عملکردی IO، LS و CP ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برای قاب ۶ طبقه در سطح عملکرد ۰.۸۴٪ (CP) اختلاف شتاب طیفی در دو سیستم مهاربندی تفاوت دارد و شتاب طیفی قاب با سیستم مهاربندی SC-BRB ۳۵ درصد بیشتر از قاب با سیستم BRB می‌باشد. برای قاب ۱۲ طبقه در سطح عملکرد ۰.۸۴٪ (CP) اختلاف شتاب طیفی در دو سیستم مهاربندی تفاوت دارد و شتاب طیفی قاب با سیستم مهاربندی SC-BRB ۵۰ درصد بیشتر از قاب با سیستم BRB می‌باشد.

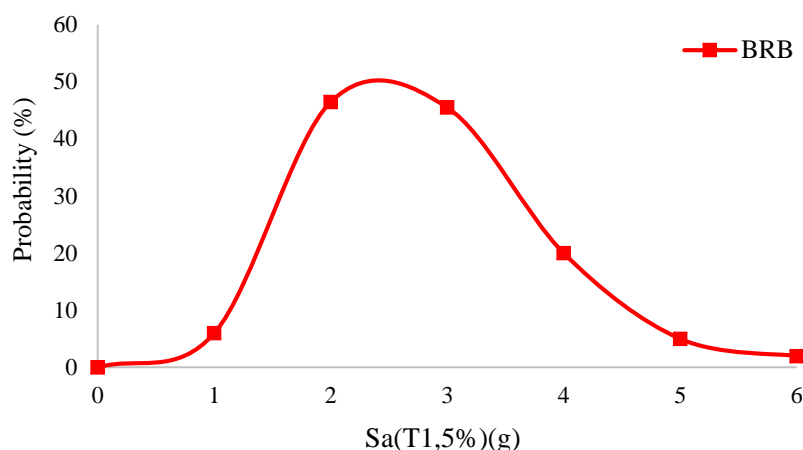


شکل ۱۷: مقایسه شتاب طیفی سازه‌ی ۶ طبقه در سطوح عملکردی LS، IO و CP



شکل ۱۸: مقایسه شتاب طیفی سازه‌ی ۱۲ طبقه در سطوح عملکردی LS و CP

شکل (۱۹) اختلاف احتمال فروریزش قاب مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب مهاربندی کمانش‌تاب را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین نقش قاب مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار در کاهش فروریزش سازه به‌ازای شتاب‌های طیفی ۲g الی ۳g می‌باشد. مثلاً به‌ازای شتاب طیفی ۳g، قاب SC-BRB نسبت به BRB، ۴۵٫۵ درصد باعث کاهش رخداد فروریزش شده است. به‌ازای شتاب‌های طیفی کمتر از ۲g و بیش از ۵g اختلاف محسوسی در عملکرد قاب‌ها در سطح فروریزش ملاحظه نمی‌شود.



شکل ۱۹: درصد کاهش احتمال فروریزش قاب مهاربندی کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به مهاربند کمانش تاب

با توجه به قیمت نسبی بالای آلیاژهای حافظه دار امکان استفاده کامل آن‌ها در سازه‌ها موجود نمی‌باشد و بایستی بوسیله یک طرح بهینه حداکثر استفاده از مصالح موجود صورت می‌پذیرفت. لذا استفاده از این مواد به صورت متمرکز در یک میراگر تنها راه منطقی و عملی بود که محققین می‌توانستند انتخاب کنند. لذا مهاربندهای آلیاژ حافظه دار شکلی با افزودن این مواد به قسمتی از مهاربند با جزئیات خاص ساخته شده‌اند. در تحقیق حاضر، با اضافه کردن میله‌های آلیاژ حافظه دار شکلی با طول بهینه به مهاربند کمانش تاب، ضمن ایجاد طرحی اقتصادی، کارایی آن نیز افزایش یافته است. در آینده نزدیک امید است که با پیشرفت تکنولوژی در صنعت ساختمان‌سازی، دسترسی به آلیاژهای حافظه دار شکلی در کشور با قیمت بصره تری افزایش یابد.

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق، سازه‌های فولادی ۶ و ۱۲ طبقه با سیستم‌های مهاربندی معمولی، کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی مطابق آئین‌نامه‌های داخلی طراحی گردید. با استخراج قاب کناری سازه، مدل غیرخطی هر ۶ قاب در نرم‌افزار OpenSees ایجاد شد. با اعمال ۷ زوج شتاب‌نگاشت دور از گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA P695 و انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی، مقادیر خروجی و ظرفیت‌های فروریزش کافی جهت ارزیابی پتانسیل فروریزش سازه‌ها و نقش سیستم مهاربندی در آن فراهم گردید. با بررسی نتایج و نمودارهای ارائه شده در بخش قبلی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد و با توجه به صحت‌سنجی‌هایی که نتایج مورد قبولی ارائه دادند، می‌توان به مدل‌های ایجاد شده و پاسخ‌های به دست آمده، اطمینان داشت. در ادامه نتایج این تحقیق به اختصار به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

- بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌ها برای ۷ زوج شتاب‌نگاشت مذکور، قاب‌های با سیستم مهاربندی SC-BRB بیشترین ظرفیت فروریزش و قاب‌های با سیستم BRB کمترین ظرفیت فروریزش را نشان داد. در مورد قاب ۶ طبقه با سیستم مهاربندی SC-BRB بیشترین شتاب طیفی فروریزش g ۵/۴ به دست آمد. بیشتر فروریزش‌های این سازه در شتاب‌های طیفی کمتر از g ۴/۸ رخ داد. در قاب با سیستم BRB کمترین و بیشترین شتاب فروریزش به ترتیب g ۱/۲ و g ۴/۲ به دست آمد.
- در مورد قاب‌های ۱۲ طبقه نیز قاب‌های با سیستم مهاربندی SC-BRB بیشترین ظرفیت فروریزش و قاب‌های با سیستم BRB کمترین ظرفیت فروریزش را نشان داد. برای قاب با سیستم مهاربندی SC-BRB کمترین و بیشترین شتاب فروریزش به ترتیب g ۲/۶ و g ۵/۶، برای قاب با سیستم BRB، g ۱/۳ و g ۴/۸ به دست آمد.
- بر اساس منحنی‌های شکست، سطوح عملکرد استفاده بلادرنگ (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) قاب‌ها مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی در سیستم مهاربندی کمانش تاب به میزان محسوس ظرفیت فروریزش

- سازه‌های میان مرتبه و بلندمرتبه را افزایش داده است. به‌عنوان نمونه در سطح احتمال ۵۰ درصد، ظرفیت فروریزش قاب ۱۲ طبقه با سیستم SC-BRB نسبت به قاب با سیستم BRB، ۳۰ درصد افزایش نشان داد.
- به ازای شتاب‌های طیفی ۲ الی ۴ g، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های مهاربندی کمانش‌تاب بیشترین تأثیر را در جلوگیری از فروریزش داشت. به‌عنوان نمونه، در قاب‌های ۶ طبقه به ازای شتاب‌های طیفی فروریزش مختلف، کاربرد سیستم مهاربندی SC-BRB بجای BRB توانست تا ۲۸ درصد احتمال فروریزش را کاهش دهد.
 - مهاربند کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب با ارتفاع بلندتر (۱۲ طبقه) در گستره‌ی وسیع‌تری از سطح تقاضای لرزه‌ای باعث ایمن بودن و آسیب‌پذیری کمتری نسبت به قاب با ارتفاع کوتاه‌تر (۶ طبقه) می‌باشد.
 - به‌کارگیری آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم ساختمانی قاب فولادی دارای مهاربند کمانش‌تاب باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سیستم شده و موجب کاهش هزینه‌های بازسازی و تعمیر سیستم ساختمانی آسیب‌دیده شده و به‌نوعی موجب ارتقای برگشت‌پذیری سیستم می‌شود.

مراجع

- [1] Miranda, E., Betro, V. (1994), Evaluation of strength Reduction Factors for Earthquake Resistant Design Earthquake Spectra, 10(2), 357-379.
- [2] 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.
- [3] Asgarian, B., Moradi, S. (2011). Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces, *Journal of Construction steel research*, Elsevier, Vol. 67, Issue 1, Pages 65-74.
- [4] Maurya, A., Eatherton, M.R., Ryota Matsui, R., Florig, S.H. (2016), Experimental investigation of miniature buckling restrained braces for use as structural fuses, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 127, 54-65.
- [5] Mahmoudi, M., Montazeri, S. (2016). Seismic performance assessment of knee bracing equipped with shape memory alloys. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(2), 5-18.
- [6] Ozelik, R., Dikiciasik, E., Erdil, F. (2017), The development of the buckling restrained braces with new end restrains, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 138, 208-220.
- [7] Shen, J., Seker, O., Akbas, B., Seker, P., Momenzadeh, S.B., Faytarouni, M. (2017), Seismic performance of concentrically braced frames with and without brace buckling, *Engineering Structures*, Volume 141, 461-481.
- [8] Mirzahasosheini, M., Gerami, M. (2017). Evaluation of appropriate behavioral models for numerical simulation of new Cu based shape memory alloy. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(4), 5-15. doi: 10.22065/jsce.2016.41240
- [9] Hetao Hou, Han Li, Canxing Qiu, Yichen Zhang, Effect of hysteretic properties of SMAs on seismic behavior of self-centering concentrically braced frames, (2017), *STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING*.
- [10] Fei Shi, Gokhan Saygili, Osman E. Ozbulut, Probabilistic seismic performance evaluation of SMA-braced steel frames considering SMA brace failure, (2018), *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- [11] Mehra Mirzahasosheini, Mohsen Gerami, the Effect of Temperature on Seismic Response of Cu–Al–Mn SMA Braced Frame, (2018), *International Journal of Civil Engineering*.
- [12] Hong-Nan Li, Ming-Ming Liu, Xing Fu, An innovative re-centering SMA-lead damper and its application to steel frame structures, (2018), *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*.
- [13] Gholhaki, M., khosravikhor, A., Rezayfar, O. (2018). Study Effect of Ni-Ti Shape Memory Alloy on Ductility of Steel Plate Shear Walls. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (), doi: 10.22065/jsce.2018.114376.1431
- [14] N. Mirzai, R. Attarnejad, Performance of EBFs equipped with an innovative shape memory alloy damper, *International Journal of Science & Technology*, (2018).
- [15] Canxing, Q., Yichen, Z., Han, L., Bing, Q., Hetao, H., Li, T. (2018), Seismic performance of Concentrically Braced Frames with non-buckling braces, *Engineering Structures*, Volume 154, 93-102.
- [16] Nazarimofrad, E., Shokrgozar, A., (2019), Seismic performance of steel braced frames with self-centering buckling-restrained brace utilizing superelastic shape memory alloys, *Struct Design Tall Spec Build*, DOI: 10.1002/tal.1666.
- [17] Ghasem Pachideh, Majid Gholhaki, AmirSaedi Daryan, Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis, *Structures*, Volume 20, August 2019, Pages 437-451
- [18] A. Kheyroddin, M. Gholhaki and Gh. Pachideh, Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Moment Frames Retrofitted with Steel Braces Using IDA and Pushover Methods in the Near-Fault Field, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 7-1 (2019) 159-173.

- [19] Ghasem Pachideh Majid Gholhaki Rahim Lashkari, Omid Rezayfar, Behavior of BRB Equipped with a Casing Comprised of Steel and Polyamide, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, March 16, 2020.
- [20] FEMA P 695. (2009). Quantification of Building Seismic Performance Factors. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency, USA.
- [21] Wang, C., Usami, T., Funayama, J., (2012). "Evaluation the Influence of Stoppers on the Low-Cycle Fatigue Properties of High Performance Buckling Restrained Braces", Engineering Structures, Vol. 41, pp. 167-176.
- [22] Uang, C.M., Tsai, K.C. (2004), Research and application of buckling-restrained braced frames, Steel Structures, 4(4), 301-13.
- [23] Han, Y.L., Li, Q., Li A.Q., Leung, A., Lin, P.H. (2003), Structural vibration control by shape memory alloy damper, Earthquake engineering & structural dynamics, 32(3), 483-94.
- [24] Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R.T., Hess, W.G., Krumme, R., Hayes, J.R. (2005), Steel beam-column connections using shape memory alloys, Structural engineering, 130(5).
- [25] Cismasiu, C., Dos Santos, F.P.A. (2008), Numerical simulation of a semi-active vibration control device based on super elastic shape memory alloy wires, Smart Materials and Structures, 17(2), 936-954.
- [26] Corbi, O. (2003), Shape memory alloys and their application in structural oscillations attenuation, Simulation Modelling Practice and Theory, 11, 387-402.
- [27] Shook, D.A., Roschke, P.N., and Ozbulut, O. E. (2008), Superelastic semiactive damping of a base-isolated structure. Structural Control and Health Monitoring, 15, 746-768.
- [28] Dolce, M., Donatello, C., and Ponzo, F.C. (2007), Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, 573-596.
- [29] Andrawes, B., DesRoches, R. (2007), Comparison between Shape Memory Alloy Restrainers and and Other Bridge Retrofit Devices. ASCE Journal of Bridge Engineering 12(6), 700-709.
- [30] DesRoches, R., Delemont, M. (2002), Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. Engineering Structures, 24, 325-332.
- [31] Alam, M. S., Youssef, M. A., and Nehdi, M. (2007), Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review. Canadian Journal of Civil Engineering 34, 1075-1086.
- [32] Sandi, H., Vacareanu, R. (1997), parametric analysis of cumulative damage, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam.
- [33] Nasseradi, K. Ghafory-Ashtiany, M. Eshghi, S. Zolfaghari, M.R. (2009), Developing Seismic Fragility Function of Structures By Stochastic Approach, Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 10(2), 183-200.
- [34] Lignos, D.G. Karamanci, E. (2013), Drift-Based and Dual-Parameter Fragility Curves for Concentrically Braced Frames in Seismic Regions. Journal of Constructional Steel Research 90, 209-220.
- [35] INBC. (2013). *Design and Construction of Steel Structures*. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10. (In Persian).
- [36] INBC. (2013). *Design Loads for Buildings*. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6. (In Persian).
- [37] BHRC. (2014). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings*. Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800. (In Persian).
- [38] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L. (2006) OpenSees Command Language Manual. [http://OpenSees.Berkeley.edu/OpenSees/manuals/ user manual/OpenSees Command Language Manual.pdf](http://OpenSees.Berkeley.edu/OpenSees/manuals/user%20manual/OpenSees%20Command%20Language%20Manual.pdf).
- [39] Miller, D.J. (2011), Development and experimental validation of self-centering buckling-restrained braces with shape memory alloy, Master's dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [40] Taftali, B. (2007), Probabilistic seismic demand assessment of steel frames with shape memory alloy connections, PhD. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- [41] PEER report.
- [42] Commentary of Instruction for seismic Rehabilitation of Existing Buildings, NO: 361. Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2018, (In Persian).