

Comparison of Seismic Response of Steel Frames Equipped with Buckling-Restrained Braces Made of Steel and Fe-Based Shape Memory Alloy Cores

Seyed Sina Kourehli^{1*}, Nader Hoveidae², Hadi Rajabi Heris³

1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- Associate professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

3- MSc. Student, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Braces are one of the structural elements used to withstand lateral forces and provide ductility and stiffness in structures. However, due to the weaknesses of conventional bracing systems such as deformation reduction, buckling under compressive forces, and reduced energy dissipation capacity in cyclic loading, a new generation of braces called shape memory braces has been introduced as a replacement for conventional bracing systems. In recent years, innovative materials such as iron-based shape memory alloys have been used in the construction industry. As a result, a new generation of these alloys, known as iron-based shape memory alloys, with features such as weldability, high formability, high rollability, and cost-effectiveness, has attracted the attention of many engineers and researchers for use in structural components. Given that shape memory alloys based on iron are almost the same price as steel, but have a much higher fatigue life and post-yield stiffness than soft steel, their use in the core of shape memory braces is justified. For this purpose, 4, 10, and 15-story structures were modeled and designed with shape memory bracing with a core made of soft steel and iron-based shape memory alloys, and their seismic behavior was investigated by performing non-linear analyses in SeismoStruct software using incremental dynamic analyses, the values of ductility coefficients, additional resistance, and behavior coefficients in the two bracing systems were evaluated and compared. According to the obtained results, the value of ductility factor is 5.11, additional resistance factor is 1.76, behavior factor is 8.67 for buckling bracing systems with steel core and for buckling bracing systems with iron-based shape memory alloy core, the value of ductility factor is 4.69 the added resistance coefficient was 2.29 and the behavior coefficient was 10.62.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 February 2024

Revise Date: 13 May 2024

Accept Date: 05 June 2024

Keywords:

Buckling-restrained braced frame
Steel core
Fe-based shape memory alloy core
Seismic response
Incremental Dynamic Analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.441239.3352](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.441239.3352)

*Corresponding author: Seyed Sina Kourehli
Email address: ss.kourehli@azaruniv.ac.ir

مقایسه رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی مجهز به مهاربندهای کمانش‌تاب ساخته‌شده از هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

سید سینا کوره‌لی^{1*}، نادر هویدائی²، هادی رجیبی هریس³

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

مهاربندها از جمله عناصر سازه‌ای می‌باشند که برای مقابله با نیروهای جانبی و تأمین شکل‌پذیری و سختی در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، با توجه به ضعف سیستم‌های مهاربندی معمولی از جمله افت شکل‌پذیری، کمانش در اثر نیروهای فشاری و همچنین کاهش ظرفیت استهلاک انرژی در بارگذاری‌های چرخه‌ای، نسل جدیدی از مهاربندها با نام مهاربندهای کمانش‌تاب، به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های مهاربندی معمولی ارائه شده است. در سال‌های اخیر، از مصالح نوینی نظیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در صنعت ساختمان استفاده گردیده است. از این رو نسل جدیدی از این نوع آلیاژها، با نام آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن با ویژگی‌هایی از جمله جوش‌پذیری، شکل‌پذیری بالا، قابلیت نورد بالا و ارزان قیمت بودن، توجه بسیاری از مهندسان و محققین را برای استفاده در اجزای سازه‌ای به خود جلب کرده است. با توجه به اینکه مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن تقریباً هم‌قیمت فولاد بوده و در عوض عمر خستگی بسیار بالایی داشته و سختی پس از تسلیم آنها نیز به مراتب بیشتر از فولاد نرمه می‌باشد، کاربرد آنها در هسته مهاربندهای کمانش‌تاب قابل توجهی می‌باشد. برای همین منظور، سازه‌های 4، 10 و 15 طبقه، مهاربندی کمانش‌تاب با هسته ساخته شده از فولاد نرمه و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن مدل‌سازی و طراحی شدند و با انجام تحلیل‌های غیرخطی در نرم‌افزار سایزموستراکت رفتار لرزه‌ای آنها مورد بررسی قرار داده شدند. با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی افزایشی، مقادیر ضریب شکل‌پذیری، اضافه مقاومت و ضریب رفتار در دو سیستم مهاربندی ارزیابی و مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار ضریب شکل‌پذیری 5/11، ضریب اضافه مقاومت 1/76، ضریب رفتار 8/67 برای سیستم‌های مهاربندی کمانش‌تاب با هسته فولادی و برای سیستم‌های مهاربندی کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن مقدار ضریب شکل‌پذیری 4/69، ضریب اضافه مقاومت 2/29 و ضریب رفتار 10/62 بدست آمد.

کلمات کلیدی: قاب مهاربندی کمانش‌تاب، هسته فولادی، هسته با آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، رفتار لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی افزایشی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.441239.3352	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.441239.3352	11/30 1403	11/30 1403	1403/03/ 16	1403/02/ 24	1402/11/23
			سید سینا کوره‌لی ss.kourehli@azaruniv.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

1- مقدمه

سیستم‌های باربر جانبی در یک سازه بایستی بتوانند در مقابل نیروهای جانبی ناشی از باد و زلزله، مقاومت، سختی و شکل‌پذیری کافی را تأمین نمایند. مهاربندها از جمله عناصر سازه‌ای می‌باشند که برای مقابله با نیروهای جانبی و تأمین شکل‌پذیری و سختی در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، با توجه به ضعف سیستم‌های مهاربندی معمولی از جمله افت شکل‌پذیری، کم‌انرژی بودن نیروهای فشاری و همچنین کاهش ظرفیت استهلاک انرژی در بارگذاری‌های چرخه‌ای، نسل جدیدی از مهاربندها با نام مهاربندهای کم‌انرژی تاب¹، به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های مهاربندی معمولی ارائه شده است [1]. با وجود اینکه سیستم مهاربندی کم‌انرژی تاب قابلیت اتلاف انرژی لرزه‌ای مطلوبی از خود نشان می‌دهد، سختی محوری پایین این مهاربندها پس از تسلیم هسته سبب ایجاد تغییر مکان‌های پسماند بزرگ در قاب مهاربندی گردیده و موجب افزایش هزینه مرمت سازه پس از زلزله‌های متوسط و شدید می‌شود [2].

در سال‌های اخیر از مصالح نوینی نظیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی² در صنعت ساختمان استفاده گردیده است. تحقیقات اخیر نشان داده است که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مهاربندهای کم‌انرژی تاب باعث ایجاد خاصیت خودمحروری در مهاربند شده و کاهش جابجایی پسماند قاب مهاربندی را به دنبال دارد. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به سبب وقوع تبدیل فاز در ساختار کریستالی خود قادر به بازگشت به شکل اولیه خود در تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشند. این توانایی در ریزساختار ماده دو خاصیت اصلی آلیاژهای حافظه‌دار یعنی اثر فوق‌الاستیک و اثر حافظه‌داری شکلی را به دنبال دارد. رفتار این آلیاژها علاوه بر تنش و کرنش به تغییرات حرارت هم وابسته بوده و گویای این است که این آلیاژها طبیعتی ترموالاستیک دارند [3].

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در حال حاضر به طور قابل توجهی گران‌تر از فولاد است. این امر می‌تواند هزینه ساخت و ساز را به طور قابل توجهی افزایش دهد، به خصوص برای پروژه‌های بزرگ مانند ساختمان‌های 10 و 15 طبقه. با این حال، پیش‌بینی می‌شود که با افزایش تقاضا و تولید انبوه، قیمت این نوع آلیاژها در سال‌های آینده به طور قابل توجهی کاهش یابد. ترکیب نیکل و تیتانیوم³ از مرسوم‌ترین انواع آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌باشند. با این حال، قیمت این رده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بالا بوده و برای مصرف در سازه‌های ساختمانی توجیه اقتصادی چندانی ندارد. در سال‌های اخیر، نسل جدید آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با نام آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن⁴، با دارا بودن ویژگی‌هایی از جمله جوش‌پذیری، شکل‌پذیری بالا، قابلیت نورد بالا و ارزان قیمت بودن، توجه بسیاری از مهندسين و محققین را برای استفاده در اجزای سازه‌ای به خود جلب کرده است. این آلیاژها قابل کاربرد در ساخت میراگرهای هیسترتیک نیز بوده و از ویژگی اصلی آنها عمر خستگی بالا در قیاس با فولاد معمولی می‌باشد. در کنار عمر خستگی بالا، یکی دیگر از ویژگی‌های اصلی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، سختی پس از تسلیم بالای آنها در مقایسه با فولاد نرمه ساختمانی می‌باشد [4]. یکی از مهمترین عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، طبیعت ذاتی زلزله است که از نوع عدم قطعیت‌های تصادفی بوده و برای کمی نمودن این عدم قطعیت، نیاز به لحاظ نمودن اثر تغییر رکورد زلزله بر پاسخ لرزه‌ای سازه توسط آنالیزهای دینامیکی متعدد توسط رکوردهای متفاوت زلزله است [5].

هویدایی و همکاران در سال 2015 به بررسی و مقایسه عددی رفتار لرزه‌ای دو نوع قاب مهاربندی کم‌انرژی تاب مجهز به هسته کوتاه و معمولی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که قاب مهاربندی مجهز به هسته کوتاه تا حد قابل توجهی قادر به کاهش جابجایی نسبی پسماند می‌باشد. همچنین مهاربندهای با طول هسته کوتاه قادر به تحمل تغییر شکل‌های بزرگ بدون شکست در اثر خستگی سیکل پایین هستند [6]. پانديکاداواس و ساهو در سال 2016 با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود، رفتار لرزه‌ای مهاربندهای کم‌انرژی تاب را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که کاهش طول هسته مهاربند کم‌انرژی تاب می‌تواند موجب کاهش جابجایی پسماند قاب مهاربندی

¹ Buckling Restrained Brace (BRB)

² Shape Memory Alloy (SMA)

³ Ni-Ti

⁴ Fe-based SMA (FSMA)

شود [7]. پانددیكاداواس و ساهو در سال 2017 در رابطه با رفتار سیستم‌های مهاربندی كمانش تاب با هسته چندجنسی مطالعاتی انجام داده و به این نتیجه رسیدند كه این سیستم شكل‌پذیری و ظرفیت استهلاك انرژی بالایی نسبت به مهاربند كمانش تاب متداول دارد [8].

در مطالعه‌ای توسط هو و همكاران در سال 2018 بر روی تأثیر ویژگی‌های هیسترتیک آلیاژ حافظه‌دار شكلی بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی خودمحور، مشاهده شد كه آلیاژهای حافظه‌دار شكلی با قابلیت میرایی زیاد در كنترل حداكثر شتاب طبقات مؤثر عمل می‌نمایند [9]. بابایی و همكاران در سال 2019 به بررسی رفتار چرخه‌ای و شكل‌پذیری قاب‌های مهاربندی كمانش تاب پرداختند. برای این منظور، تجزیه و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی بر روی سه قاب مهاربندی شده كمانش تاب فولادی در سه ارتفاع مختلف، یعنی 5 طبقه، 10 طبقه و 15 طبقه، با توجه به هفت ركورد زلزله در نرم‌افزار آپنسیس اجرا شد. تجزیه و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی برای ترسیم منحنی‌های هیسترتیک برای هر طبقه انجام شد و تقاضای شكل‌پذیری و پارامترهای انرژی پسماند بر اساس این منحنی‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد كه توزیع تقاضای شكل‌پذیری طبقه‌های قاب‌های مهاربندی شده كمانش تاب كه مطابق با دستورالعمل‌های AISC360 طراحی شده‌اند يكسان نیستند. طبقات با تقاضای شكل‌پذیری بیشتر باید برای مقاطع مهاربندی بزرگ‌تر طراحی شوند، اگرچه از نظر استحکام، سطح مقطع مهاربندی نیازی به بزرگ‌تر بودن ندارد [10]. قوسی و همكاران در سال 2020 از آلیاژ حافظه‌دار شكلی بر پایه آهن به عنوان هسته در سیستم مهاربندی كمانش تاب استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند كه مهاربند پیشنهادی شكل‌پذیری مناسبی دارد. همچنین نتایج نشان داد كه قابلیت خودمحوری این سیستم بسیار محدود بوده و اتصالات هسته نیازمند ارائه جزئیات بهینه‌تری می‌باشد [11]. ویگنولی و همكاران در سال 2020 رفتار لرزه‌ای سازه‌های مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شكلی را بررسی كردند و نشان دادند كه استفاده از این مصالح می‌تواند جایگزین مناسبی برای سایر روش‌های کاهش خطر لرزه‌ای در سازه‌ها باشد [12]. پاچیده و همكاران در سال 2020 یک مطالعه تجربی و عددی از اثرات فولاد هسته و فاصله هسته از بدنه بر رفتار مهاربندهای كمانش تاب را ارائه دادند [13].

تی وانگ و همكاران در سال 2021 برای بررسی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای كمانش تاب تحت اثر زلزله، آزمایش میز لرزان را برای مدل دو طبقه در مقیاس 1/4 برای قاب فولادی معمولی و قاب فولادی مهاربند كمانش تاب با تنش تسلیم پایین را انجام دادند. نتایج آزمایش نشان داد كه تحت تحریك لرزه‌ای، ساختار قاب فولادی آسیب قابل ملاحظه‌ای را نشان داد، در حالی كه قاب فولادی مهاربند كمانش تاب هیچ آسیب جدی به اعضای فولادی را نشان نداد. همچنین مقادیر کرنش در تیرها و ستون‌های قاب فولادی به طور قابل توجهی بالاتر از قاب فولادی مهاربند كمانش تاب بود، كه نشان می‌دهد مهاربند كمانش تاب به طور مؤثر از اعضای ساختاری اولیه محافظت می‌كند. همچنین حداكثر نیروی برشی با افزایش ارتفاع کاهش یافت و پاسخ برشی در قاب فولادی مهاربند كمانش تاب نسبت به قاب فولادی كمتر بود [14]. روسا و همكاران در سال 2021 رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شكلی بر پایه آهن و فولاد نرمه را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند كه مقدار استهلاك انرژی در آلیاژ حافظه‌دار شكلی بر پایه آهن و فولاد در هر سیکل تقریباً برابر می‌باشد. با این حال، مقدار سخت‌شدگی کرنشی در آلیاژ حافظه‌دار شكلی به مراتب بالاتر از فولاد می‌باشد [15]. کیو و همكاران در سال 2022 رفتار قاب‌های مهاربندی كمانش تاب با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شكلی بر پایه آهن را مقایسه نمودند. نتایج تحقیقات نشان داد كه استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شكلی بر پایه آهن دریافت حداكثر و شتاب حداكثر طبقات را چندان تغییر نمی‌دهد ولی دریفت پسماند قاب‌های مهاربندی كمانش تاب را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهد [16]. خسروی خور و همكاران در سال 2023 به ارزیابی شكل‌پذیری و ضریب اصلاح پاسخ قاب‌های دیوار برشی ورق فولادی با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شكلی نیکل و تیتانیوم پرداختند. مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار آپنسیس به صورت عددی تحلیل شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد كه بهبود ویژگی‌های آلیاژ حافظه‌دار شكلی می‌تواند به طور قابل توجهی شكل‌پذیری و ضریب اصلاح پاسخ را بهبود بخشد [17]. میسرا و ویواهاره در سال 2024 نوع جدیدی از مهاربند كمانش تاب فولادی سبك وزن را پیشنهاد دادند. مهاربند پیشنهادی به صورت دوره‌ای آزمایش شد و با نمونه مهاربند كمانش تاب تمام فولادی معمولی برای رفتار هیسترتیک، الگوی شكست، ظرفیت اتلاف انرژی، تغییر شكل پلاستیک، شكل‌پذیری، ضریب تنظیم مقاومت فشاری و ضریب میرایی ویسكوز معادل، آزمایش و مقایسه شد. نمونه آزمایش شده نیز از نظر عددی توسط تجزیه و تحلیل اجزاء محدود غیر خطی تایید شد. نتایج نشان داد كه مهاربند پیشنهادی شكل‌پذیری بالاتری با اتلاف انرژی بهینه نشان می‌دهد. همچنین مشاهده شد كه این مهاربند رفتار

هیستریک کاملاً پایدار با مقادیر بالاتر حداکثر نیروهای فشاری و کششی را القا می‌کند و می‌تواند فراتر از ۲ درصد کرنش محوری برای اتلاف انرژی بیشتر بارگذاری شود [18].

در این تحقیق، ابتدا قاب‌های 4، 10، و 15 طبقه مهاربندی کمانش‌تاب با هسته ساخته شده از فولاد نرمه و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن بر اساس آیین‌نامه‌های ساختمانی و لرزه‌ای ایران طرح خواهند شد. مدل‌های دو بُعدی از قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب مجهز به هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن در نرم‌افزار ساینموستراکت⁵ مدل‌سازی شده و تحلیل‌های پوش‌آور، تاریخچه زمانی و دینامیکی افزایشی انجام خواهد گرفت. جهت انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی و دینامیکی افزایشی از رکوردهای دور از گسل مندرج در FEMA-P695 استفاده خواهد شد. با استفاده از نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی در دو سطح خطر DBE⁶ و MCE⁷، تقاضای شکل‌پذیری مهاربندها در دو سیستم ارزیابی و مقایسه خواهد شد. همچنین با استفاده از نتایج تحلیل‌های دینامیکی افزایشی، رفتار شکنندگی و نیز ضرایب رفتار در دو سیستم ارزیابی و مقایسه خواهد شد.

نوآوری این مقاله نسبت به پژوهش‌های قبلی از چند جنبه قابل طرح است: (1) آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن در مقایسه با فولاد از عمر خستگی بالاتری برخوردار بوده و نیز دارای خاصیت سخت‌شدگی بالاتری نیز می‌باشد [19]. (2) علاوه بر آن، قیمت این دو مصالح نیز در یک محدوده بوده و بنابراین آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای هسته فولادی در مهاربندهای کمانش‌تاب مدنظر قرار گیرد [20]. (3) جایگزینی فولاد نرمه با این مصالح در هسته مهاربند می‌تواند منجر به افزایش سختی پس از تسلیم و به تبع آن کاهش جابجایی‌های پسماند در قاب مهاربندی گردیده و بدین ترتیب یکی از ضعف‌های عمده قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب با هسته فولادی تا حد زیادی مرتفع شود [14]. (4) با توجه به پتانسیل بالای این مصالح در ساخت مهاربندهای کمانش‌تاب، جهت طرح و ساخت قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب با این مصالح نیاز به بررسی دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای و نیز دانستن پارامترهای لرزه‌ای قاب‌های مذکور می‌باشد. با توجه به ضرورت مطالعات بیشتر و دقیق‌تر جهت ارزیابی رفتار قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن و نیز با عنایت به اینکه پارامترهای لرزه‌ای این سیستم در آیین‌نامه‌های فعلی موجود نیست، در این تحقیق با استفاده از تحلیل‌های عددی مقایسه دقیقی بین پاسخ لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن صورت گرفته و از نتایج تحلیل‌ها پارامترهای لرزه‌ای دو سیستم استخراج و مقایسه خواهد شد [21].

2- مشخصات مدل‌های سازه‌ای

تعداد طبقات ساختمان نقش مهمی در مدل‌سازی و تحلیل سازه‌ای آن ایفا می‌کند. به طور کلی، با افزایش تعداد طبقات، پیچیدگی مدل‌سازی و تحلیل نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه (تا 4 طبقه)، مدل‌سازی ساده‌تر است و می‌توان از مدل‌های ساده‌تر با دقت کافی استفاده کرد. با این حال، در نظر گرفتن برخی از جزئیات مانند دیوارها و فونداسیون‌ها برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر ضروری است. در ساختمان‌های متوسط‌مرتبه (5 تا 10 طبقه)، پیچیدگی مدل‌سازی افزایش می‌یابد و باید به عواملی مانند سختی جانبی و لرزه‌ای توجه بیشتری شود. همچنین ممکن است لازم باشد از مدل‌های غیرخطی برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و اتصالات استفاده شود. در ساختمان‌های بلندمرتبه (بیش از 10 طبقه)، مدل‌سازی بسیار پیچیده است و باید به تمام عوامل ذکر شده در بالا و همچنین اثرات دینامیکی مانند لرزش باد و زلزله توجه شود. استفاده از مدل‌های پیشرفته و تکنیک‌های تحلیل دینامیکی برای دستیابی به نتایج دقیق ضروری است. بنابراین هدف از انتخاب ساختمان‌های 4، 10 و 15 طبقه در این پژوهش، بررسی تأثیر طبقات کوتاه، متوسط و بلند در مدل‌سازی است.

در این پژوهش، به منظور مقایسه رفتار لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب، از دو نوع مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن استفاده شد. ساختمان‌های 4، 10 و 15 طبقه فولادی با سیستم مهاربندی کمانش‌تاب با آرایش قطری

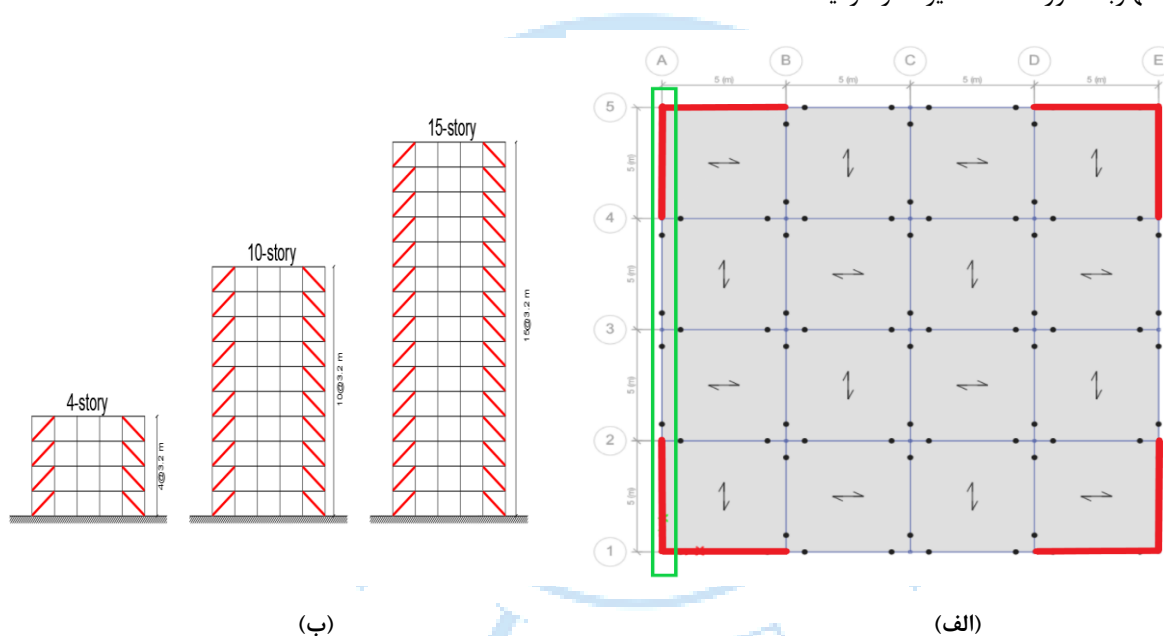
⁵ SeismoStruct

⁶ Design-basis earthquake

⁷ Maximum considered earthquake

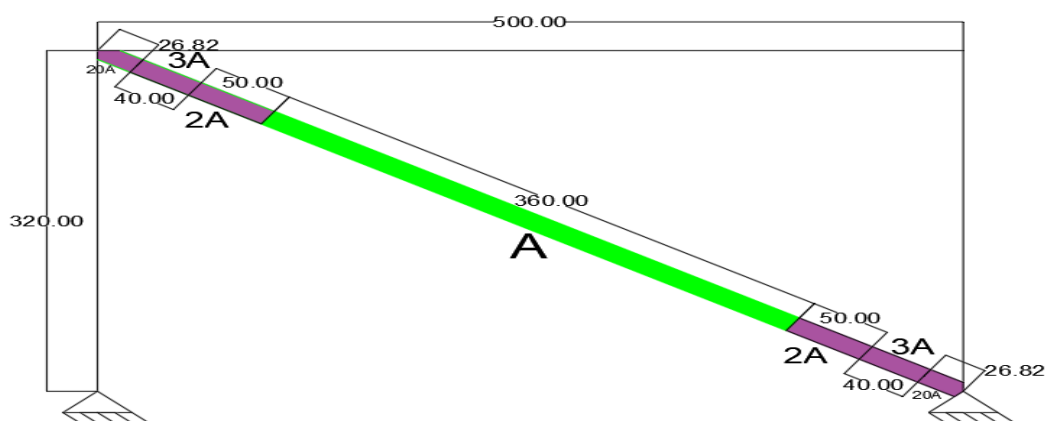
براساس آیین‌نامه‌های ساختمانی و لرزه‌ای ایران طرح و محاسبه گردیده است. با توجه به اینکه محل قرارگیری ساختمان، شهر تبریز با خطر نسبی خیلی زیاد در نظر گرفته شده است، شتاب مبنای طرح برابر با $0/35$ می‌باشد. همچنین خاک محل احداث ساختمان از نوع خاک 3 و کاربری آن مسکونی در نظر گرفته شده است. در مجموع شش سازه چهار دهانه با طول دهانه‌های 5 متری و ارتفاع طبقات $3/2$ متری با آرایش مهاربندی قطری، در نرم‌افزار ایتبس⁸ طراحی شده است. پلان سازه‌ها به صورت مربعی و متقارن بوده و ابعاد آن‌ها 20×20 متر و سیستم کف طبقات از نوع کامپوزیت می‌باشند. با توجه به منظم بودن سازه‌ها در پلان و ارتفاع و همچنین مفصلی بودن اتصال تیر به ستون رفتار ساختمان سه بُعدی با قاب دو بُعدی تفاوت چندانی نخواهد داشت. لذا یکی از قاب‌های دارای دهانه مهاربندی از مدل سه بُعدی استخراج گردیده و در نرم‌افزار ساینزمواستراکت به صورت دو بُعدی مدل‌سازی شده است. در شکل (1) پلان و قاب‌های 4، 10 و 15 طبقه و در شکل (2) اجزای مهاربند کمانش‌تاب مورد مطالعه در این پژوهش نشان داده شده است.

همچنین در جدول (1) الی (5) به ترتیب مشخصات بارهای ثقلی وارد بر طبقات و بام، ضوابط بارگذاری لرزه‌ای، مشخصات مصالح مصرفی در نرم‌افزار ایتبس، که برگرفته از تحقیقات کیو و همکاران (Qiu et al., 2022) می‌باشد، ارائه شده است [16]. همچنین طول و مساحت اجزای مهاربند مورد مطالعه نیز ذکر گردیده است.



شکل (1) الف-پلان، ب- قاب‌های 4، 10 و 15 طبقه

⁸ ETABS



شکل (2) شکل شماتیک اجزای مهاربند کمانش تاب مورد مطالعه در این پژوهش

جدول (1) بارهای ثقلی وارد بر طبقات و بام

موقعیت	بار مرده	بار تیغه‌بندی	بار زنده	بار برف
بام	167	246/2	150	105
طبقات	167	875/2	200	-

بارها بر حسب کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد.

جدول (2) ضوابط بارگذاری لرزه‌ای

سازه	ارتفاع سازه (m)	شتاب مبنای طرح (A)	ضریب رفتار (R)	ضریب اهمیت (I)	ضریب بازتاب (B)	ضریب زلزله (C)
4 طبقه	12/8	0/35	7	1	2/75	0/14
10 طبقه	32	0/35	7	1	2/36	0/118
15 طبقه	48	0/35	7	1	1/85	0/092

جدول (3) مشخصات مصالح مصرفی در نرم افزار ایتبس

مصالح	تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
تیرها و ستونها	370	210
مهاربند با هسته فولادی	370	210
مهاربند با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن	285	190

جدول (4) طول اجزای مهاربند مورد مطالعه

20A (cm)	3A (cm)	2A (cm)	A (cm)	قاب مجهز به مهاربند کمانش تاب
26/82	40	50	360	با هسته فولادی
26/82	40	50	360	با آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

جدول (5) مساحت اجزای مهاربند مورد مطالعه

مساحت ناحیه صلب	مساحت ناحیه اتصال	مساحت ناحیه الاستیک	مساحت هسته	قاب مجهز به مهاربند کمانش تاب
20A	3A	2A	A	با هسته فولادی
20A	3A	2A	A	با آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

A، مساحت هسته مهاربند کمانش تاب در نرم‌افزار ایتبس می‌باشد.

3- نتایج طراحی و سطح مقطع اعضای سازه‌ای

همواره در فرآیند تحلیل سعی بر آن بود تا هر شش سازه به صورت بهینه طراحی گردند. مطابق نتایج تحلیل استاتیکی معادل در نرم‌افزار ایتبس، زمان تناوب مود اول سازه‌ها در جدول (6) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (6) دوره تناوب مدل‌های طراحی شده در نرم‌افزار ایتبس

زمان تناوب (s)	مدل سازه‌ای مجهز به مهاربند	سازه
0/884	کمانش تاب با هسته فولادی	4 طبقه
0/832	کمانش تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن	
1/654	کمانش تاب با هسته فولادی	10 طبقه
1/574	کمانش تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن	
2/355	کمانش تاب با هسته فولادی	15 طبقه
2/253	کمانش تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن	

در جدول (7) و (8) به عنوان نمونه مقاطع طراحی شده برای مدل‌های 4 طبقه در نرم‌افزار ایتبس ذکر گردیده است.

جدول (7) مقاطع طراحی شده برای سازه 4 طبقه مجهز به مهاربند کمانش تاب با هسته فولادی

ستون	تیر	مساحت مهاربند (cm ²)	طبقه
TUBO 180X180X14.2	IPE 220 IPE 160	15	1
TUBO 140X140X12.5			
TUBO 120X120X8			
TUBO 140X140X14.2	IPE 220 IPE 160	13	2
TUBO 120X120X8			
TUBO 140X140X10	IPE 220 IPE 160	9	3
TUBO 120X120X8			
TUBO 120X120X8	IPE 200	5	4
	IPE 100		

جدول (8) مقاطع طراحی شده برای سازه 4 طبقه مجهز به مهاربند کمانش تاب با هسته آلیاژ حافظه دار شکلی بر پایه آهن

ستون	تیر	مساحت مهاربند (cm ²)	طبقه
TUBO 180X180X14.2	IPE 220 IPE 160	19	1
TUBO 140X140X12.5			
TUBO 120X120X8			
TUBO 140X140X14.2	IPE 220 IPE 160	16	2
TUBO 120X120X8			
TUBO 140X140X10	IPE 220 IPE 160	12	3
TUBO 120X120X8			
TUBO 120X120X8	IPE 200	6	4
	IPE 100		

4- مدل سازی قاب های مهاربندی در نرم افزار سایزمواستراکت

با توجه به اینکه اتصال تیر به ستون و همچنین اتصال ستون به فونداسیون به صورت مفصلی می باشند و قاب های سه بُعدی، هم در پلان و هم در ارتفاع منظم هستند، رفتار ساختمان سه بُعدی با قاب دو بُعدی تفاوت چندانی نخواهد داشت؛ بنابراین قاب های دو بُعدی محور A که در شکل (1-الف) مشخص شده اند، جهت انجام تحلیل های غیرخطی، از مدل سه بُعدی استخراج گردیده و در نرم افزار سایزمواستراکت مدل سازی شدند.

در این پژوهش، از مدل فایبر⁹ و نوع المان Inelastic force based Frame Element برای مدل سازی رفتار غیرخطی اجزای سازه ای و با مش بندی های عرضی 200 عددی استفاده شد. همچنین، برای تیرها و ستون ها از مصالح فولادی با مدل رفتاری دو خطی و نوع المان Elastic Frame Element استفاده شده است. لنگرها در دو انتهای تیرها و مهاربندها با توجه به مفصلی بودن اتصالات، آزاد شدند.

⁹ Fiber

همچنین جرم مؤثر به صورت متمرکز و بار ثقلی به صورت بار گسترده روی تیرها، در تراز هر طبقه اعمال گردید. مدل سازی با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه¹⁰ و مقایسه زمان تناوب مود اول مدل با زمان تناوب مود اول سازه مدل سازی شده در نرم افزار ایتبس صحت سنجی شد. همچنین میرایی رایلی با تنظیم نسبت میرایی بر روی 5٪، با زمان تناوب طبیعی مود اول و دوم ارتعاش سازه استفاده شد. جرم سازه از خروجی نرم افزار ایتبس استخراج و در نرم افزار ساینمو استراکت به صورت جرم متمرکز¹¹ در تراز طبقات اعمال گردید. دیافراگم صلب در سطوح طبقات مدل سازی شد. در این پژوهش از مصالح پیش فرض موجود در نرم افزار ساینمو استراکت با نام sti-brb برای مهارندهای کمانش تاب و برای تیرها و ستون ها از مصالح فولادی با مدل رفتاری دو خطی که در نرم افزار ساینمو استراکت با نام sti-bl وجود دارد استفاده شده است. در جدول (9) و (10) به ترتیب مشخصات مصالح مصرفی تیر و ستون و مهاربند مصرفی در نرم افزار ساینمو استراکت که برگرفته از تحقیقات کیو و همکاران (Qiu et al., 2022) می باشد، ارائه شده است [16].

جدول (9) مشخصات مصالح تیر و ستون مصرفی در نرم افزار ساینمو استراکت

مصلح	تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
تیرها و ستون ها	370	210

جدول (10) مشخصات مصالح مهاربند مصرفی در نرم افزار ساینمو استراکت

مصلح	E (GPa)	σ_{YT} (MPa)	σ_{YC} (MPa)	α_T	β_T	δ_T	α_c	β_c	δ_c
Steel	210	370	581	1.7	0.011	0.1	1.3	0.03	0.08
FeSMA	190	285	661	2.5	0.05	0.25	1.2	0.05	0.1

5- شتاب نگاشت های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی افزایشی

در این پژوهش، شتاب نگاشت های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی افزایشی با استفاده از نرم افزار ساینمو سیگنال¹² مقیاس (نرمالایز¹³) شدند. به این صورت که بیشینه شتاب زمین¹⁴ در تمامی شتاب نگاشت ها برابر شتاب ثقل (g) در نظر گرفته شدند. به عبارت دیگر بیشینه شتاب همه شتاب نگاشت ها برابر با 1g شد.

برای انجام تحلیل دینامیکی افزایشی، از 11 شتاب نگاشت دور از گسل مندرج در FEMA-P695 استفاده شده است. مشخصات این شتاب نگاشت ها در جدول (11) ذکر شده است. این شتاب نگاشت ها دارای مکانیزم دور از گسل با فاصله سایت تا چشمه در محدوده بیش از 15 کیلومتر می باشند.

¹⁰ Eigenvalue

¹¹ Lumped mass

¹² SeismoSignal

¹³ Normalize

¹⁴ PGA

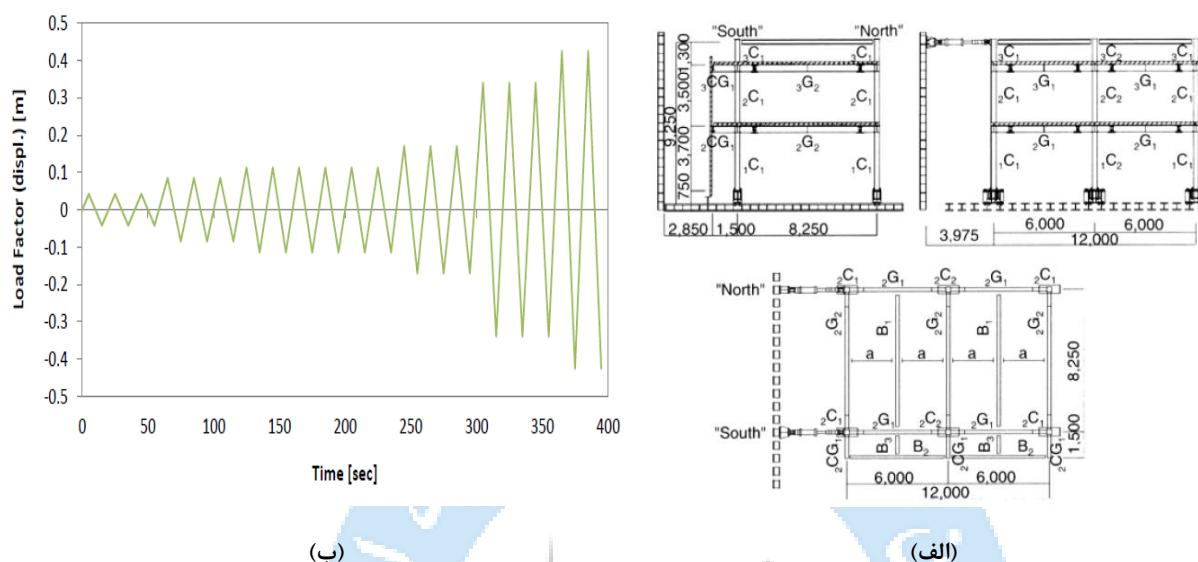
جدول (11) مشخصات شتاب‌نگاشت‌های بررسی شده در این پژوهش

ID No.	RSN	Year	Event	Station	M_w	PGA_{max} (g)	PGV_{max} (cm/s)
1	953	1994	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	6.7	0.52	63
2	960	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	6.7	0.48	45
3	1602	1999	Duzce, Turkey	Bolu	7.1	0.82	62
4	1111	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	6.9	0.51	37
5	752	1989	Loma Prieta	Capitola	6.9	0.53	35
6	767	1989	Loma Prieta	Gilroy Array #3	6.9	0.56	45
7	1633	1990	Manjil, Iran	Abbar	7.4	0.51	54
8	725	1987	Superstition Hills	Poe Road (temp)	6.5	0.45	36
9	829	1992	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	7	0.55	44
10	1244	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	7.6	0.44	115
11	1485	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	7.6	0.51	39

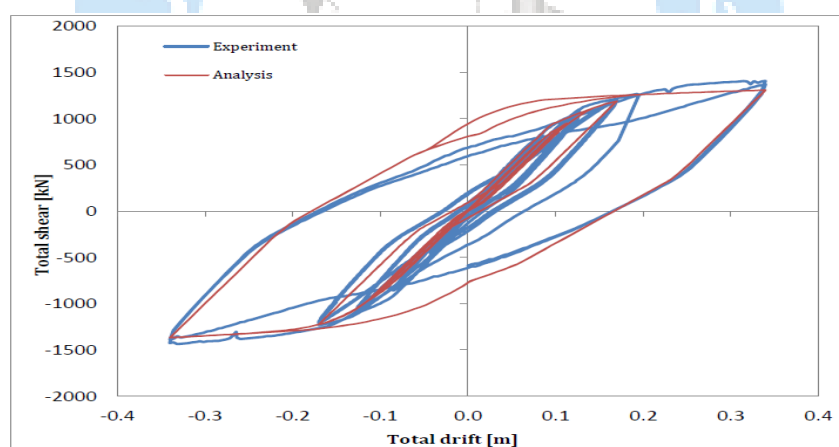
6- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی یک قاب خمشی فولادی سه طبقه سه بُعدی، آزمایش شده در دانشگاه توکیو توسط پروفسور Nakashima و تیم تحقیق او تحت بارگذاری سیکلی شبه استاتیکی، مورد بررسی قرار گرفته است. در این ساختمان به دنبال معمول‌ترین ملاحظات طراحی تجربه شده در ژاپن برای قاب‌های خمشی فولادی بعد از زلزله کوبه بوده‌اند [22]. نتایج تحلیل بدست آمده از نرم‌افزار تحلیل اجزاء محدود سازه‌مواستراکت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. ابعاد پلان سازه آزمایش شده ۱۲ متر در جهت طولی و ۸/۵ متر در جهت عرضی می‌باشد. ارتفاع کل ۸/۵ متر است. سازه آزمایشی از دو قاب فولادی مقاوم جانبی تشکیل شده است. این قاب‌ها به صورت طولی قرار داشته و چون بصورت مستقل کار می‌کنند، فقط یکی از آنها مدل شده است. مدل فولادی دو خطی برای تعریف مصالح فولادی استفاده شده است. قاب مقاوم جانبی با المان‌های تیر و ستون فولادی که در آن‌ها از یک مدل هیسترتیک دو خطی، با توجه به خواص اندازه‌گیری شده مصالح بعد از آزمایش، انتخاب شده است. تیرها و ستون‌های فولادی از طریق المان‌های قابی سه بُعدی غیرالاستیک مبتنی بر نیرو (infrmFB) با ۴ مقطع انتگرال‌گیری مدل شده است. تعداد فایبرهای مورد استفاده در مقطع برای محاسبات تعادل برابر ۱۰۰ تنظیم شده است. چشمه‌های اتصال با در نظر گرفتن عمق چشمه ۴۰۰ میلیمتری و عرض ۳۰۰ میلیمتری مدل شده است. فنرهای چرخشی در کف ستون‌های طبقه اول قرار داده شده است تا امکان انعطاف‌پذیری چرخشی پی یا کف ستون را بدهند. این فنرها با المان‌های لینک مدل شده‌اند و برای درجات آزادی M_1, F_1, F_2, F_3, M_2 و M_3 منحنی پاسخ متقارن خطی با مقدار سختی k_0 برابر با $9E+1$ استفاده شده است. در حالی که برای درجه آزادی M_2 یک منحنی پاسخ متقارن سه خطی انتخاب شده است. گره‌های پی کاملاً مقید در نظر گرفته شده است. بارهای قائم تخصیص داده شده برای هر قاب به هر اتصال تیر و ستون به عنوان بارهای دائمی برحسب نیرو در جهت Z تعریف شده است. یک بارگذاری سیکلی شبه استاتیکی با دامنه افزایشی تغییرمکان برای بارگذاری تعریف شده است. بازه زمانی خروجی مورد استفاده

برابر ۰.۱ ثانیه تنظیم شده است. بارگذاری سیکلی در بالای گره جانبی به عنوان بار استاتیکی تاریخچه زمانی در جهت X اعمال شده است [۲۳]. نتایج دلالت بر آن دارند که تطابق مناسبی با هم داشته و شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار دقت کافی را نشان داده است. در شکل (۳) تراز و پلان سازه و بارگذاری سیکلی نشان داده شده است. همچنین در شکل (۴) نمودار برش کل در برابر تغییر مکان نسبی کل نشان داده شده است.



شکل (۳) الف - تراز و پلان سازه (واحد: mm) [Nakashima et al., 2006]، ب - بارگذاری سیکلی



شکل (۴) برش کل در برابر تغییر مکان نسبی کل

7- نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور

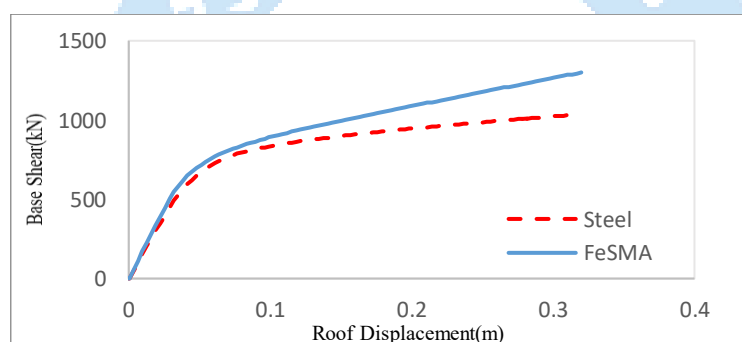
تحلیل پوش‌آور برای سازه‌های 4 طبقه با الگوی بار جانبی مثلثی تا جابجایی بام 2/5٪ ارتفاع سازه، و برای سازه‌های 10 و 15 طبقه نیز با استفاده از الگوی بار جانبی مثلثی و جابجایی بام 2٪ ارتفاع سازه انجام شد. با انجام این تحلیل، نمودار برش پایه - جابجایی سازه‌ها به ترتیب برای سازه‌های 4، 10 و 15 طبقه مطابق شکل (3) الی (5) بدست آمد. محور قائم نشان دهنده برش پایه برحسب

کیلونیوتن و محور افقی نشان دهنده جابجایی بام بر حسب متر می‌باشد. در نرم‌افزار ساینمو استراکت برای انجام تحلیل پوش‌آور از روش کنترل پاسخ¹⁵ استفاده گردید.

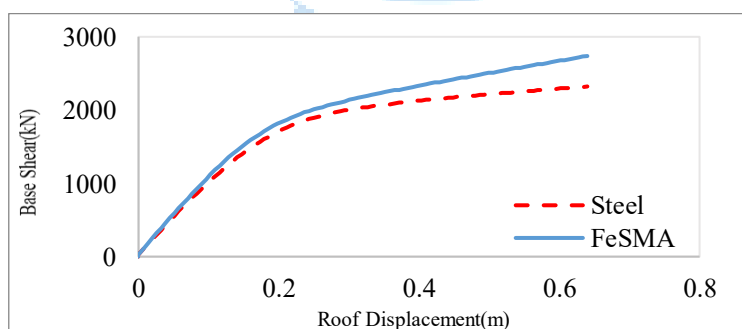
شیب اولیه (سختی الاستیک): در همه قاب‌ها، شیب اولیه منحنی پوش‌آور نشان‌دهنده سختی الاستیک سازه است. قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، سختی الاستیک بیشتری نسبت به قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته فولادی را نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن در ابتدای بارگذاری، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان می‌دهد.

شیب پس از تسلیم: پس از تسلیم شدن مهاربندها، شیب منحنی پوش‌آور نشان‌دهنده رفتار غیرخطی سازه است. قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، شیب بیشتری نسبت به قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته فولادی نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، پس از تسلیم شدن مهاربندها، شکل‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهد و می‌تواند انرژی بیشتری را جذب کند.

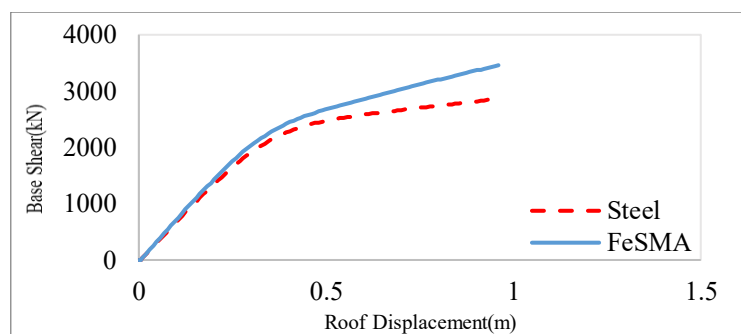
ظرفیت باربری: ظرفیت باربری نهایی قاب‌ها، حداکثر باری است که می‌توانند قبل از فروپاشی تحمل کنند. قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته فولادی نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که قاب مجهز به مهاربند کم‌انرژی تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، از نظر کلی قوی‌تر و مقاوم‌تر است.



شکل (3) مقایسه منحنی‌های پوش‌آور قاب‌های 4 طبقه



شکل (4) مقایسه منحنی‌های پوش‌آور قاب‌های 10 طبقه

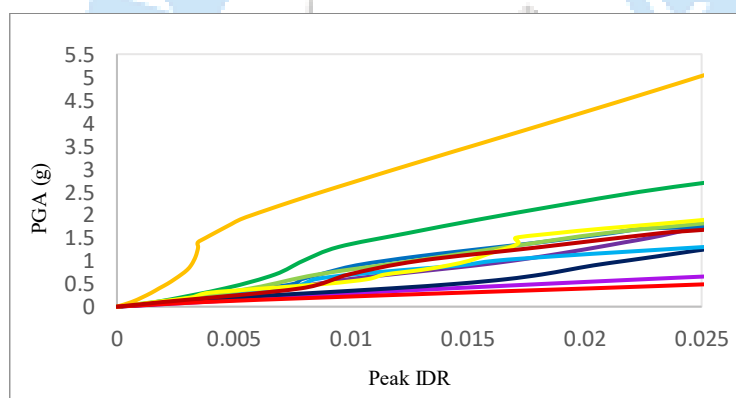


شکل (5) مقایسه منحنی‌های پوش‌آور قاب‌های 15 طبقه

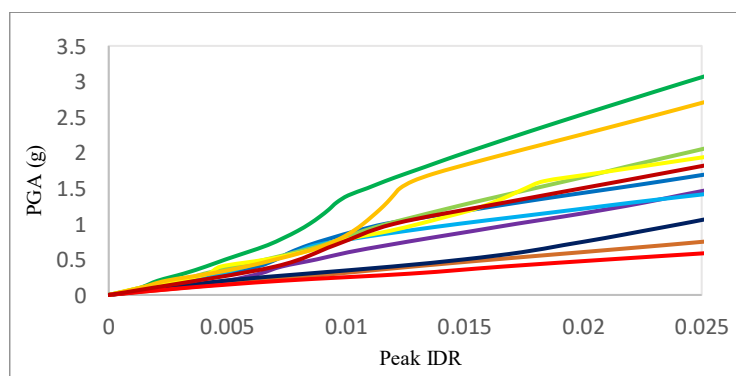
8- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی

8-1- نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌های 4 طبقه

برای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب 4 طبقه، تحلیل دینامیکی افزایشی تحت 11 رکورد زلزله دور از گسل مطابق جدول (11)، تا دریافت حداکثر 2/5 درصد به عنوان DM انجام شد و منحنی‌های IDA مربوط به این قاب‌ها ترسیم گردیدند. در شکل‌های (6) و (7) منحنی‌های IDA مربوط به قاب‌های 4 طبقه با مهاربند کمانش‌تاب مجهز به هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن به ترتیب نشان داده شده‌اند.



شکل (6) منحنی‌های IDA قاب 4 طبقه با هسته فولادی

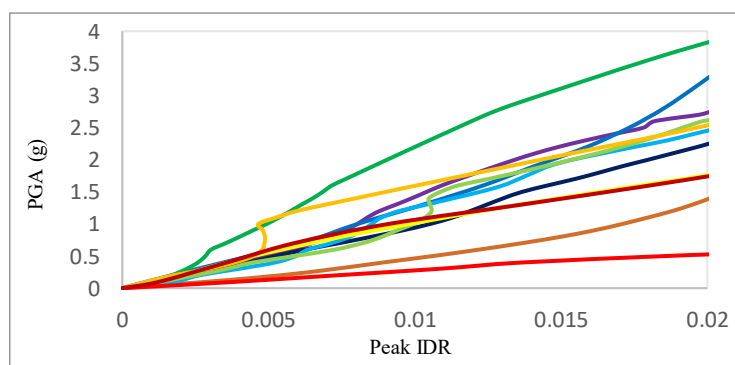


شکل (7) منحنی‌های IDA قاب 4 طبقه با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

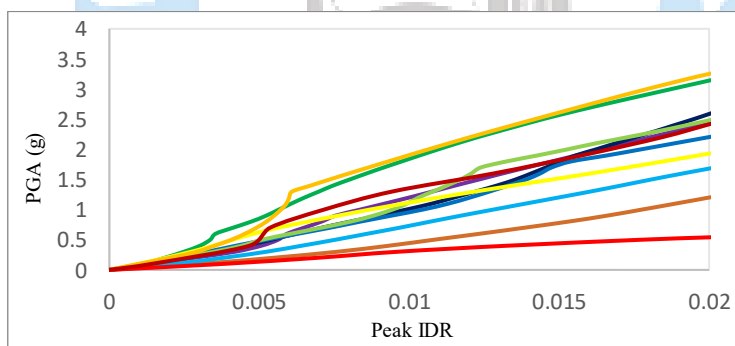
با توجه به منحنی‌های IDA بدست آمده برای قاب‌های 4 طبقه، دامنه تغییرات بیشینه شتاب زمین در مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی از 0/5 تا 5 و برای مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن از 0/5 تا 3 بر حسب شتاب ثقل (g) می‌باشد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که برای مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی شدت لرزه‌ای بیشتری لازم است تا به حداکثر دریفت 2/5 درصد برسد.

8-2- نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌های 10 طبقه

تحلیل دینامیکی افزایشی برای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب 10 طبقه همانند قاب‌های 4 طبقه، تحت 11 رکورد زلزله دور از گسل ارائه شده در جدول (11) انجام گردید. شکل‌های (8) و (9) منحنی‌های IDA بدست آمده از این تحلیل‌ها را برای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب 10 طبقه با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن را به ترتیب نشان می‌دهد.



شکل (8) منحنی‌های IDA قاب‌های 10 طبقه با هسته فولادی

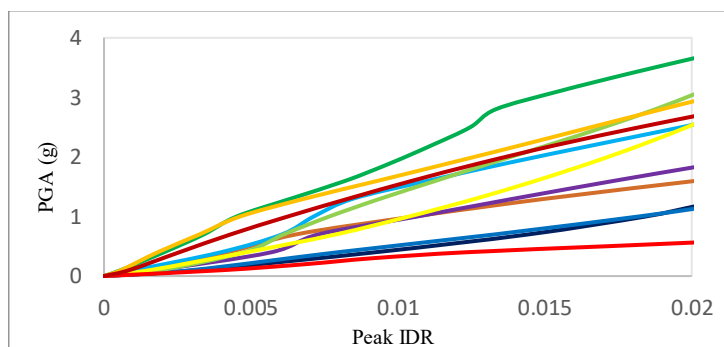


شکل (9) منحنی‌های IDA قاب‌های 10 طبقه با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

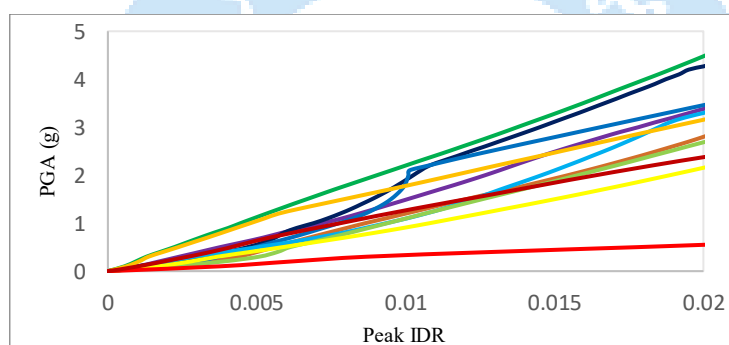
با توجه به منحنی‌های IDA بدست آمده برای قاب‌های 10 طبقه، دامنه تغییرات بیشینه شتاب زمین در مهاربند کمانش‌تاب 2 درصد برای مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی از 0/5 تا 3/8 و برای مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن از 0/5 تا 3/2 بر حسب شتاب ثقل (g) می‌باشد بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که برای هر دو نوع مهاربند کمانش‌تاب شدت لرزه‌ای تقریباً یکسانی لازم است تا به حداکثر دریفت 2 درصد برسد.

3-8- نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌های 15 طبقه

برای سازه‌های 15 طبقه نیز تحلیل دینامیکی افزایشی تحت 11 رکورد زلزله مندرج در جدول (11) با شاخص آسیب حداکثر دریافت 2 درصد انجام شد. منحنی‌های IDA بدست آمده از این تحلیل‌ها در شکل‌های (10) و (11) به ترتیب برای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب 15 طبقه با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن آمده است.



شکل (10) منحنی‌های IDA قاب 15 طبقه با هسته فولادی



شکل (11) منحنی‌های IDA قاب 15 طبقه با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

با توجه به منحنی‌های IDA بدست آمده برای قاب‌های 15 طبقه، دامنه تغییرات بیشینه شتاب زمین در دریافت حداکثر 2 درصد برای مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی از 0/5 تا 3/6 و برای مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن از 0/5 تا 4/5 بر حسب شتاب ثقل (g) می‌باشد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که برای مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن شدت لرزه‌ای بیشتری لازم است تا به حداکثر دریافت 2 درصد برسد.

9- منحنی شکنندگی^{۱۶}

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 مانند PGA، PGV و PGD بیان کرد. تکرار این عملیات برای مقادیر مختلف PGA یا سایر تک پارامترها، منجر به تولید منحنی‌های نرمال شده‌ای مرسوم به منحنی شکنندگی می‌شود. منحنی‌های شکست، خرابی را بین

¹⁶ Fragility Curve

حالات ناچیز، متوسط و سنگین توزیع می‌کنند. این منحنی‌ها که می‌توانند به صورت نمودار نیز نشان داده شوند، برای هر حالت خرابی در هر جنبش زمین جداگانه رسم می‌شوند و به عنوان ورودی در جریان محاسبه خسارت سازه‌ای وارد می‌شوند.

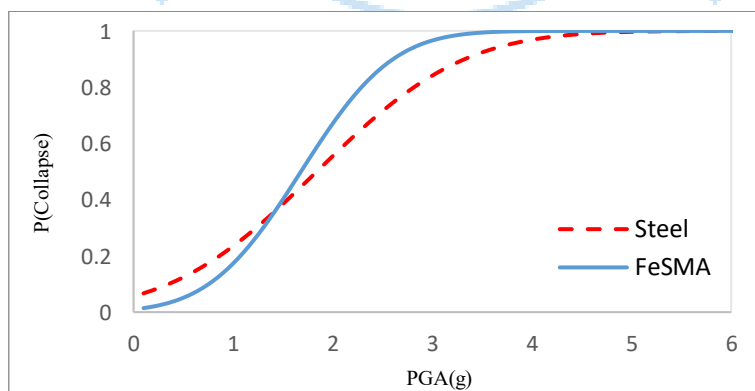
9-1- منحنی‌های شکنندگی قاب‌های 4 طبقه

همانطور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، برای سازه‌های 4 طبقه، رفتار لرزه‌ای قاب‌های دارای مهاربند کمانش‌تاب با هسته‌های مختلف در دو ناحیه شدت لرزه‌ای متمایز قابل بررسی است:

1- شدت‌های لرزه‌ای کمتر از $1/5$ g: در این ناحیه، احتمال شکست در قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی بیشتر از قاب‌های دارای هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن است. به عبارت دیگر، قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی در برابر زلزله‌های با شدت کم، عملکرد لرزه‌ای ضعیف‌تری نسبت به قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن نشان می‌دهند.

2- شدت‌های لرزه‌ای بیشتر از $1/5$ g: برخلاف ناحیه اول، در این محدوده احتمال شکست در قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن بیشتر از قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی می‌شود. به این معنی که قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن در برابر زلزله‌های شدید، عملکرد لرزه‌ای مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند.

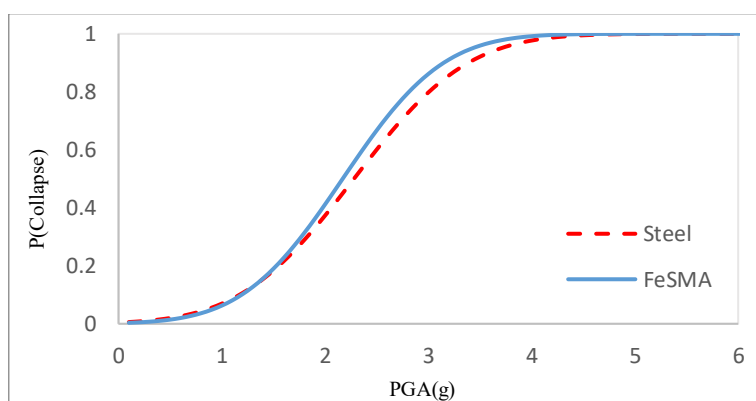
این تفاوت رفتار ناشی از ویژگی‌های متمایز دو نوع هسته است. هسته‌های فولادی در برابر بارهای اولیه (مانند وزن خود سازه) عملکرد مطلوبی دارند، اما در برابر بارهای دینامیکی ناگهانی (مانند زلزله) به دلیل عدم شکل‌پذیری کافی، مستعد شکست هستند. در مقابل، هسته‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، به دلیل قابلیت تغییر شکل‌پذیری بالا، می‌توانند انرژی زلزله را بهتر جذب و مستهلک کنند و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر بارهای دینامیکی از خود نشان می‌دهند. علاوه بر موارد فوق، پارامترهای دیگری نیز بر رفتار لرزه‌ای قاب‌ها مانند کیفیت مصالح، هندسه قاب، و کیفیت ساخت تأثیرگذار هستند. در نهایت، انتخاب نوع هسته مناسب برای مهاربندهای کمانش‌تاب در قاب‌های 4 طبقه به شدت لرزه‌ای مورد انتظار و سایر عوامل مؤثر بستگی دارد.



شکل (12) منحنی‌های شکنندگی قاب‌های 4 طبقه

9-2- منحنی‌های شکنندگی قاب‌های 10 طبقه

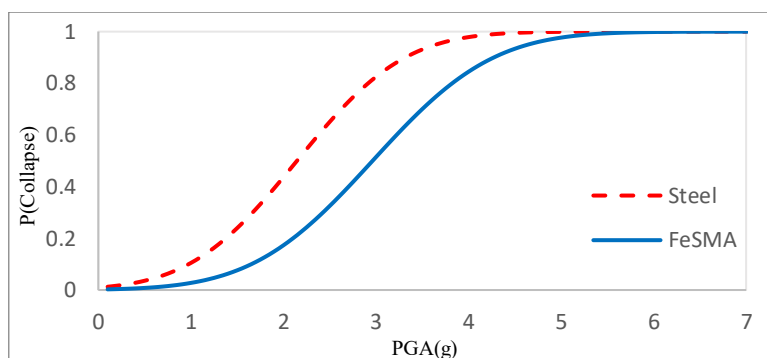
همانطور که در شکل 13 نشان داده شده است، احتمال شکست در قاب‌های 10 طبقه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارد. به عبارت دیگر، احتمال خرابی در هر دو نوع مهاربند تقریباً یکسان است. این موضوع نشان می‌دهد که در مورد قاب‌های 10 طبقه، انتخاب نوع هسته (فولادی یا آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن) تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر عملکرد لرزه‌ای قاب ندارد. با وجود این، ممکن است در شرایط خاص، یکی از دو نوع هسته عملکرد اندکی بهتر از دیگری داشته باشد. دلایل این امر عبارتند از: عدم قطعیت در مدل‌سازی و تحلیل، تنوع در پارامترهای سازه‌ای و محدودیت‌های نمودار. با توجه به موارد فوق، نمی‌توان به طور قطعی گفت که کدام نوع هسته برای قاب‌های 10 طبقه مناسب‌تر است. انتخاب نوع هسته باید بر اساس مطالعات دقیق‌تر با در نظر گرفتن شرایط خاص پروژه انجام شود.



شکل (13) منحنی‌های شکنندگی قاب‌های 10 طبقه

9-3- منحنی‌های شکنندگی قاب‌های 15 طبقه

همانطور که در شکل 14 نشان داده شده است، احتمال شکست در قاب‌های 15 طبقه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن کمتر از قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی است. به عبارت دیگر، قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن برای رسیدن به مرحله خرابی به شدت لرزه‌ای بیشتری نیاز دارند. این موضوع نشان می‌دهد که در مورد قاب‌های 15 طبقه، استفاده از هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن می‌تواند عملکرد لرزه‌ای را به طور معنایی بهبود بخشد. دلایل این امر عبارتند از: 1- قابلیت شکل‌پذیری بالاتر: هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی قابلیت شکل‌پذیری بسیار بیشتری نسبت به هسته فولادی دارند. این امر به آنها اجازه می‌دهد تا انرژی زلزله را به طور مؤثرتری جذب و مستهلک کنند و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر بارهای دینامیکی از خود نشان دهند. 2- مقاومت در برابر کمانش: هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن مقاومت بیشتری در برابر کمانش نسبت به هسته فولادی دارند. این امر به افزایش پایداری قاب و کاهش احتمال فروریزش آن در هنگام زلزله کمک می‌کند. با توجه به این مزایا، استفاده از هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن در قاب‌های 15 طبقه بسیار توصیه می‌شود. البته هزینه این نوع هسته‌ها بیشتر از هسته‌های فولادی است. بنابراین انتخاب نهایی باید با در نظر گرفتن مزایا و معایب هر دو نوع هسته و شرایط اقتصادی پروژه انجام شود.



شکل (14) منحنی‌های شکنندگی قاب‌های 15 طبقه

10- محاسبه‌ی ضریب رفتار¹⁷

رفتار سازه در زلزله، می‌تواند خطی یا غیرخطی باشد. در زلزله شدید، استراتژی آیین‌نامه‌ها این است که سازه وارد ناحیه غیرخطی شود. زیرا اگر قرار باشد سازه در ناحیه خطی باقی بماند، هزینه اجرای سازه چندین برابر می‌شود. پس منطقی است که به سازه اجازه داده شود تا وارد ناحیه غیرخطی شود. با این کار انرژی بسیار زیادی از زلزله مستهلک می‌شود. به جهت عدم دسترسی به رفتار فرا ارتجاعی در تحلیل‌های خطی، ضریب رفتار به صورت غیرمستقیم این امکان را فراهم می‌سازد تا در حد قابل قبولی رفتار سازه را در ناحیه غیرخطی پیش‌بینی کرد.

ضریب رفتار سازه یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در محاسبه نیروی زلزله برای تحلیل‌های خطی از جمله تحلیل استاتیکی معادل و تحلیل دینامیکی طیفی به شمار می‌رود. این ضریب در واقع بیانگر عوامل مختلفی از جمله شکل‌پذیری، اضافه مقاومت، نامعینی و سایر موارد می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام گرفته توسط عسگریان و همکاران (Asgariyan et al., 2021) برای محاسبه ضریب رفتار قاب‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر، از رابطه (1) استفاده گردید [24]:

$$R = \frac{V_e}{V_s} = \frac{V_e}{V_y} \times \frac{V_y}{V_s} = R_{\mu} \times R_s \quad (1)$$

در این رابطه R_{μ} ضریب شکل‌پذیری، R_s ضریب اضافه مقاومت، V_y برش پایه تسلیم مستخرج از تحلیل دینامیکی افزایشی تحت رکورد خام در سطح عملکرد آستانه فروریزش سازه، V_e برش پایه الاستیک به ازای تحلیل تاریخچه زمانی تحت رکورد خام در شرایطی که تمام مصالح الاستیک در نظر گرفته شود و V_s مقدار برش پایه طراحی از تحلیل پوش‌آور به هنگام تشکیل اولین مفصل پلاستیک در هسته‌های مهاربند می‌باشد.

10-1- ضریب رفتار قاب‌های 4 طبقه

مطابق رابطه (1)، پارامترهای ضریب رفتار قاب‌های 4 طبقه از تحلیل پوش‌آور، تاریخچه زمانی و دینامیکی افزایشی محاسبه گردید. این پارامترها در جدول‌های (12) و (13) به ترتیب برای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب 4 طبقه با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن آمده است.

¹⁷ Response Modification Factor (R)

جدول (12) پارامترهای ضریب رفتار قاب 4 طبقه با هسته فولادی

R	R _s	R _μ	V _c (kN)	V _y (kN)	V _s (kN)	شتاب‌نگاشت
6/88	1/61	4/26	5527/38	1296/60	802/66	1
11/67	1/73	6/74	9371/65	1388/98	802/66	2
9/44	1/63	5/80	7578/39	1306/8	802/66	3
9/44	1/53	6/18	7582/02	1226/92	802/66	4
9/12	1/73	5/26	7327/15	1393/52	802/66	5
12/19	1/59	7/69	9788/79	1274/03	802/66	6
12/46	1/80	6/94	10008/06	1440/80	802/66	7
9/74	3/77	2/58	7823/81	3027/41	802/66	8
17/11	1/90	8/98	13737/91	1529/16	802/66	9
5/39	1/48	3/64	4329/15	1189/03	802/66	10
10/66	1/74	6/10	8557/39	1400/90	802/66	11
10/37	1/86	5/83	میانگین			

جدول (13) پارامترهای ضریب رفتار قاب 4 طبقه با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

R	R _s	R _μ	V _c (kN)	V _y (kN)	V _s (kN)	شتاب‌نگاشت
7/22	2/56	2/81	5031/69	1787/08	696/66	1
14/73	2/81	5/23	10262/78	1962/97	696/66	2
9/03	2/32	3/89	6291/68	1616/19	696/66	3
10/45	2/78	3/75	7286/98	1940/99	696/66	4
12/57	2/60	4/82	8762/76	1817/12	696/66	5
17/08	2/72	6/26	11904/48	1900/30	696/66	6
15/52	2/76	5/61	10811/82	1926/04	696/66	7
11/73	3/01	3/88	8173/51	2102/63	696/66	8
12/60	3/58	3/51	8784/05	2500/18	696/66	9
6/66	2/37	2/80	4640/18	1656/56	696/66	10
13/85	2/92	4/74	9654/04	2036/30	696/66	11
11/95	2/77	4/30	میانگین			

با توجه به جدول (12) و (13) ضریب رفتار به ترتیب برای سازه 4 طبقه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی مقدار 10/37 و برای سازه 4 طبقه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن مقدار 11/95 بدست می‌آید.

10-2- ضریب رفتار قاب‌های 10 طبقه

پارامترهای ضریب رفتار قاب‌های 10 طبقه نیز مانند قاب‌های 4 طبقه، از تحلیل پوش‌آور، تاریخچه زمانی و دینامیکی افزایشی محاسبه گردید. این پارامترها در جدول‌های (14) و (15) به ترتیب برای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب 10 طبقه با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن آمده است.

جدول (14) پارامترهای ضریب رفتار قاب 10 طبقه با هسته فولادی

R	R _s	R _μ	V _c (kN)	V _y (kN)	V _s (kN)	شتاب‌نگاشت
9/56	1/77	5/38	18564/1	3448/35	1941/58	1
10/49	2/19	4/78	20366/34	4260/43	1941/58	2
7/77	1/51	5/12	15091/18	2943/22	1941/58	3
12/47	4/85	2/57	24225/83	9415/92	1941/58	4
11	1/61	6/81	21340/58	3132/28	1941/58	5
10/92	1/70	6/42	21202/45	3301/73	1941/58	6
6/74	1/51	4/45	13098/58	2943/14	1941/58	7
5/04	1/36	3/70	9797/02	2641/92	1941/58	8
8/78	1/14	7/66	17061/05	2225/95	1941/58	9
3/20	1/27	2/51	6212/55	2475/16	1941/58	10
6/08	1/28	4/72	11805/46	2497	1941/58	11
8/37	1/83	4/92	میانگین			

جدول (15) پارامترهای ضریب رفتار قاب 10 طبقه با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

R	R _s	R _μ	V _c (kN)	V _y (kN)	V _s (kN)	شتاب‌نگاشت
10/30	2/20	4/67	19015/66	4066/43	1844/76	1
10/85	1/74	6/20	20016/53	3226/37	1844/76	2
9/56	1/80	5/29	17634/77	3329/35	1844/76	3
9/97	2/11	4/72	18397/99	3890/51	1844/76	4
9/13	1/65	5/52	16842/87	3051/96	1844/76	5
9/8	2/10	4/67	18078/61	3870/91	1844/76	6
6/11	2/48	2/46	11278/48	4581/41	1844/76	7
6/96	1/65	4/19	12840/13	3059/39	1844/76	8
14/51	1/92	7/53	26779/44	3553/44	1844/76	9
4/02	1/83	2/19	7429/58	3381/02	1844/76	10
7/95	2/22	3/57	14674/99	4101/50	1844/76	11
9	1/97	4/64	میانگین			

با توجه به جدول (14) و (15) ضریب رفتار به ترتیب برای سازه 10 طبقه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی مقدار 8/37 و برای سازه 10 طبقه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن مقدار 9 بدست می‌آید.

10-3- ضریب رفتار قاب‌های 15 طبقه

پارامترهای ضریب رفتار قاب‌های 15 طبقه نیز از تحلیل پوش‌آور، تاریخچه زمانی و دینامیکی افزایشی محاسبه گردید. این پارامترها در جدول‌های (16) و (17) به ترتیب برای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب 15 طبقه با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن آمده است.

جدول (16) پارامترهای ضریب رفتار قاب 15 طبقه با هسته فولادی

R	R _s	R _μ	V _c (kN)	V _y (kN)	V _s (kN)	شتاب‌نگاشت
9/26	1/57	5/88	22051/11	3750/9	2379/43	1
5/33	1/35	3/95	12694/32	3212/6	2379/43	2
3/60	1/81	2	8583/02	4308/96	2379/43	3
4	1/39	2/86	9516/7	3325/76	2379/43	4
6/41	1/97	3/25	15249	4687	2379/43	5
9/17	1/77	5/15	21820/76	4232/61	2379/43	6
12/35	1/57	7/84	29395/3	3746/75	2379/43	7
9/29	1/57	5/91	22121/75	3743/48	2379/43	8
7/77	1/87	4/14	18500/82	4464/55	2379/43	9
5/54	1/55	3/56	13200/07	3704/14	2379/43	10
7/22	1/18	6/08	17180/75	2824/63	2379/43	11
7/27	1/60	4/60	میانگین			

جدول (17) پارامترهای ضریب رفتار قاب 15 طبقه با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

R	R _s	R _μ	V _c (kN)	V _y (kN)	V _s (kN)	شتاب‌نگاشت
15/45	3/22	4/79	36383/25	7587/14	2354/64	1
12/33	1/97	6/24	29046/67	4650/63	2354/64	2
14/64	1/68	8/69	34477/72	3964/44	2354/64	3
12/74	2/85	4/46	30008/22	6727/82	2354/64	4
10/92	2/38	4/58	25724/03	5615/49	2354/64	5
11/74	2/34	5/02	27659/43	5513/03	2354/64	6
12/29	2/14	5/74	28942/27	5038/18	2354/64	7
7/52	1/73	4/34	17724/71	4083/65	2354/64	8
8/78	2/06	4/24	20673/78	4870/38	2354/64	9
5/14	1/68	3/05	12107/18	3962/18	2354/64	10
8/43	1/52	5/52	19847/94	3594/66	2354/64	11
10/91	2/14	5/15	میانگین			

با توجه به جدول (16) و (17) ضریب رفتار به ترتیب برای سازه 15 طبقه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی مقدار 7/27 و برای سازه 15 طبقه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن مقدار 10/91 بدست می‌آید.

10-4- میانگین ضریب رفتار سازه‌ها

با توجه به نتایج حاصل شده از محاسبات، می‌توان میانگین ضریب رفتار قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن را محاسبه نمود. جدول (18) میانگین ضریب رفتار سازه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (18) میانگین ضریب رفتار سازه‌ها

میانگین	R	R_s	R_{ii}	تعداد طبقات	مدل
8/67	10/37	1/86	5/83	4	قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب
	8/37	1/83	4/92	10	با هسته فولادی
	7/27	1/60	4/60	15	
10/62	11/95	2/77	4/30	4	قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب
	9	1/97	4/64	10	با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی
	10/91	2/14	5/15	15	بر پایه آهن

11- نتیجه‌گیری

در حالی که برخی از جنبه‌های کلی نتایج این تحقیق قابل پیش‌بینی بود، اما ظرافت‌ها و جزئیاتی وجود دارد که ممکن است از قبل واضح نبوده باشد. این امر نشان‌دهنده پیچیدگی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها و چالش‌های مرتبط با مدل‌سازی و پیش‌بینی دقیق این رفتار است. با توجه به خواص منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، مانند شکل‌پذیری و میرایی بالا، انتظار برتری قاب مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن نسبت به قاب مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی وجود داشت، اما میزان این برتری از قبل قابل پیش‌بینی نبود که این امر در نتایج مشاهده شده تأیید می‌شود.

- با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، مقادیر ضریب رفتار برای سیستم‌های مهاربندی کمانش‌تاب با هسته فولادی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن به شرح زیر به دست آمد:

☐- قاب مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی: 8/67

☐- قاب مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن: 10/62

با توجه به نتایج بدست آمده در محاسبه ضریب رفتار سازه‌ها این نتیجه حاصل می‌گردد که ضریب شکل‌پذیری برای قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن بر خلاف قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با هسته فولادی با افزایش تعداد طبقات، افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] M. H. Hatampour, "A Review on Buckling Restrained Braces," *Journal of Civil Engineering Researchers*, vol. 4, no. 3, pp. 1-10, 2022.
- [2] M. J. Ebrahimi Majumerd, "Feasibility study of using endurance time method for seismic evaluation of self-centering buckling restrained braced frame (SC-BRC-BF)," *Modares Civil Engineering journal*, vol. 22, no. 2, pp. 107-123, 2022.
- [3] W. Carofilis, E. Kim, D. Jung, and J. Pinargote, "Numerical Evaluation of Self-Centering Buckling-Restrained Braces with Prestressed Iron-Based Shape Memory Alloy Tendons," in *Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference, 2022: Springer*, pp. 671-683.
- [4] G. FIRSTOV, Y. M. KOVAL, V. FILATOVA, V. ODNOSUM, G. GERSTEIN, and H. MAIER, "DEVELOPMENT OF HIGH-ENTROPY SHAPE-MEMORY ALLOYS: STRUCTURE AND PROPERTIES," *Uspehi Fiziki Metallov*, vol. 24, no. 4, 2023.
- [5] M. Gholhaki, G. Pachideh, O. Rezaifar, and S. Ghazvini, "Specification of response modification factor for steel plate shear wall by incremental dynamic analysis method [IDA]," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 6, no. Special Issue 2, pp. 211-224, 2019.
- [6] Hoveidae, N., Tremblay, R., Rafezy, B., and Davaran, A. (2015). Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 89-99.
- [7] Pandikkadavath, M. S., and Sahoo, D. R. (2016). Analytical investigation on cyclic response of buckling-restrained braces with short yielding core segments. *International Journal of Steel Structures*, 16(4), 1273-1285.
- [8] Pandikkadavath, M. S., and Sahoo, D. R. (2017). Cyclic testing on hybrid buckling-restrained Braces (HBRBs), *Proceeding of Eurosteel 2017, Copenhagen, Denmark*, 3200-320.
- [9] Hou, H., Li, H., Qiu, C., and Zhang, Y. (2018). Effect of hysteretic properties of SMAs on seismic behavior of self-centering concentrically braced frames. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(3), 2110.
- [10] N. Babaei, E. Dehghani, and A. Zarrineghbal, "Investigation of the Distribution of Cumulative Ductility Demand Parameter in Various Stories of Buckling Restrained Braced Frames," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 100-113, 2019.
- [11] Ghowsi, A. F., Sahoo, D. R., and Kumar, P. A. (2020). Cyclic tests on hybrid buckling-restrained braces with Fe-based SMA core elements. *Journal of Constructional Steel Research*, 175, 106323.
- [12] Vignoli, L. L., Savi, M. A., and El-Borgi, S. (2020). Nonlinear dynamics of earthquake-resistant structures using shape memory alloy composites. *Journal of intelligent material systems and structures*, 31(5), 771-787.
- [13] G. Pachideh, M. Gholhaki, R. Lashkari, and O. Rezaifar, "Behavior of BRB equipped with a casing comprised of steel and polyamide," *Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2020.
- [14] T. Wang, J. Shao, C. Zhao, W. Liu, and Z. Wang, "Shaking table test for evaluating the seismic performance of steel frame retrofitted by buckling-restrained braces," *Shock and vibration*, vol. 2021, pp. 1-17, 2021.
- [15] Rosa, D. I. H., Hartloper, A., e Sousa, A. d. C., Lignos, D. G., Motavalli, M., and Ghafoori, E. (2021). Experimental behavior of iron-based shape memory alloys under cyclic loading histories. *Construction and Building Materials*, 272, 121712.
- [16] Qiu, C., Zhang, A., Jiang, T., and Du, X. (2022). Seismic performance analysis of multi-story steel frames equipped with FeSMA BRBs. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 161, 107392.
- [17] A. Khosravikhor, M. Gholhaki, O. Rezaifar, and G. Pachideh, "Effect of Ni-Ti shape memory alloy on ductility and response modification factor of SPSW systems," *Steel and Composite Structures*, vol. 48, no. 3, p. 353, 2023.
- [18] P. Mishra and A. Y. Vyavahare, "Experimental and Numerical Studies on All-Steel Buckling Restrained Brace with Light-Weighted Restrainer," *International Journal of Steel Structures*, pp. 1-14, 2024.
- [19] Z.-X. Zhang, J. Zhang, C. Fang, Y. Zhang, and Y. Li, "Emerging steel frames with Fe-SMA U-shaped dampers for enhancing seismic resilience," *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, vol. 4, no. 1, p. 6, 2023.
- [20] Y. Wang, T. Jiang, C. Qiu, A. Zhang, J. Liu, and X. Du, "Experimental tests and numerical simulations of miniature buckling-restrained braces using iron-shape memory alloy bar," *Smart Materials and Structures*, vol. 33, no. 2, p. 025013, 2024.

- [21] T. Alkateeb and A. Sunny, "Seismic performance of steel frames with shape memory alloy (SMA) bracing system," in Recent Developments in Sustainable Infrastructure (ICRDSI-2020)—Structure and Construction Management: Conference Proceedings from ICRDSI-2020 Volume 1, 2022: Springer, pp. 839-846.
- [22] Matsumiya T, Suita K, Chusilp P, Nakashima M. [2004] "Full-scale test of three-storey steel moment frames for examination of extremely large deformation and collapse behaviour", Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Paper No. 3471, 1–6 August 2004.
- [23] Nakashima M., Matsumiya T, Suita K, Liu D. [2006] "Test on full-scale three-storey steel moment frame and assessment of ability of numerical simulation to trace cyclic inelastic behaviour", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 35, pp. 3-19.
- [24] Asgarian, B., Jamalain, A. and Jalaeefar, A. (2021). Response Modification Factor of Steel Braced Frames Equipped with Smart Hybrid Re-Centering Device. International Journal of Steel Structures, 21, 2004-2017.

