

Volume 25, Issue 2, 2025, 21-34 DOI: 10.22034/25.2.21



# The Optimal Percentage of Shape Memory Alloy in Steel Structures Equipped with Buckling Restrained Brace (BRB) under Successive Earthquakes

Daniyal Saberi<sup>1</sup> and Elham Rajabi<sup>2\*</sup>

- 1. MSc Student, Qualitative and Quantitative Analysis of Fluids and Environmental Research Group, Department of Civil Engineering, Tafresh University, 39518-79611 Tafresh, Iran.
- 2. Assistant Professor, Qualitative and Quantitative Analysis of Fluids and Environmental Research Group, Department of Civil Engineering, Tafresh University, 39518-79611 Tafresh, Iran.

#### Abstract

In the seismic active areas, strong ground motions usually consist of the numerous successive shocks (Foreshock-mainshock or mainshock-aftershock), which have the significant potential to increase the structural response and cumulative damage. This phenomenon (as called seismic sequence) can affect on the behavior of structures, control the seismic performace of buildings. Multiple earthquakes which have been recorded in all parts of the world are proven that the structures located in the mentioned areas are not only experienced a single event, but also, they withstand a series of shocks. Due to the high importance of consecutive earthquakes, application of buckling restrained braces (BRB) and shape memory alloy (SMA) materials as smart materials in engineering sciences in the past decades, this paper tries to evaluate the seismic performance of steel frames equipped with buckling restrained brace by determination of the optimal percentage of shape memory alloy under successive earthquakes. Because SMA has unique advantages and characteristics such as no need to replace after an earthquake, high resistance to corrosion and fatigue, the ability to absorb high energy, the ability to return to the original state by applying temperature, tolerating strain up to about 10% without leaving residual strain after an earthquake, and tolerating multiple cycles of loading and unloading, various applications can be found separately and combined in controlling the behavior of structures. It should be noted that despite the high damage potential of successive earthquakes, they are neglected in the seismic codes and design earthquake is still proposed without successive shocks.

Hence, the acceptance of new methods for improving the seismic performance of structures under consecutive shocks seems necessary by the engineering community. Therefore, in this regard, 4 and 7 story steel frames with diagonal buckling restrained braces representing short and mid-rise structures were designed based on Iranian codes in ETABS software and then implemented in OpenSees software. After selecting the reference model, the performance of the studied models is verified for the linear and non-linear region through comparison of periods and pushover curve of reference and implemented model. In the following, different percentages of shape memory alloys including 20, 40, 60, 80 and 100% for the 4 story steel frames and 5, 10, 15, 20 and 25% for 7 story steel structure has been considered. The studied models are analyzed with/without shape memory alloys under seismic scenarios with and without seismic sequence in Opensees software. For this purpose, critical successive shocks are selected based on effective peak acceleration (EPA) from PEER center. For compatibility aspects between the seismic analysis and seismic design, the selected records should be scaled by designing spectrum for each fundamental period of studied structure in order to have identical spectral acceleration. The results of nonlinear dynamic analysis show that with the increase in the percentage of shape memory alloy in the 4-story steel frame, the response ratio of steel frames under single and consecutive earthquakes increased, but in the 7-story steel frame, it almost decreased, and this reduction is better felt in the higher stories under the single earthquake. Finally, the optimal percentage of shape memory alloy among the selected percentages in the present study is suggested to be 20% for 4 story steel frame and 15% for 7 story steel frame.

Corresponding Author Email: rajabi@tafreshu.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1384-1792

### **Review History**

Received: Apr 03, 2024 Revised: May 05, 2024 Accepted: Aug 13, 2024

Keywords Buckling Restrained Brace Shape Memory Alloys Seismic Sequence Steel Structures



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



# مجله علمي مهندسي عمران مدرس

دوره ۲۵، شماره ۲، سال ۱۴۰۴ – صفحات ۲۱ تا ۳۴ DOI: 10.22034/25.2.21



# تعیین درصد بهینه آلیاژ حافظهدار شکلی در سازههای فولادی مجهز به مهاربند کمانشتاب تحت زلزلههای متوالی بحرانی

دانیال صابری'، الهام رجبی 🔟

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه پژوهشی تحلیل کمی و کیفی سیالات و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.
۱. استادیار، گروه پژوهشی تحلیل کمی و کیفی سیالات و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

#### تاريخچه داوري

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳ کلمات کلیدی مهاربند کمانش تاب آلیاژهای حافظهدار شکلی توالی لرزهای نظر به پتانسیل بالای خسارتزایی زلزلههای متوالی، نادیده گرفته شدن این زلزلهها در آیین نامههای لرزهای و استقبال جامعه مهندسین از روش های نوین بهبود عملکرد لرزهای، این مطالعه به بررسی اثر آلیاژ حافظ دار شکلی در سازه های فولادی مجهز به مهاربند کمانش تاب جهت تعیین درصد بهینه آن تحت زلزله های متوالی می باشد. لذا در این راستا قاب های ساده فولادی ۴ و ۷ طبقه با مهاربند قطری کمانش تاب نماینده سازههای کوتاه مرتبه و میان مرتبه براساس ضوابط آیین نامه های کشور ایران در نرم افزار ETABS طراحی و سپس در نرمافزار OpenSees پیاده سازی شدند. بعد از صحت سنجی عملکرد مدل های مورد مطالعه در محدوده خطی و غیر خطی، با لحاظ نمودن درصدهای مختلف آلیاژهای حافظه دار شکلی شامل ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد در قاب فولادی ۴ طبقه و ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و می درصد در قاب فولادی ۷ طبقه، تحت سناریوهای لرزهای با و بدون توالی لرزهای بررسی شدهاند. نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد آلیاژ حافظه دار شکلی در قاب فولادی ۴ طبقه و ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و می دهد که با افزایش درصد آلیاژ حافظه دار شکلی در قاب فولادی ۴ طبقه و ۱۵، داند. نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد آلیاژ حافظه دار شکلی در قاب فولادی ۴ طبقه و ۱۵ ما، دار در می دره دو متوالی افزایش درصد آلیاژ حافظه دار شکلی در قاب فولادی ۴ طبقه و ۱۰ در دو حالت می دهد که با افزایش درصد آلیاژ حافظه دار شکلی در قاب فولادی ۴ طبقه پاسخ نسبت تغییر مکان طبقات در دو حالت می دهد که با افزایش درصد آلیاژ حافظه دار شکلی در قاب فولادی ۴ طبقه پاسخ نسبت تغییر مکان طبقات در دو حالت مازه منفرد به تر احساس می شود. در نهایت درصد بهینه آلیاژ حافظه دار شکلی از میان درصدهای انتخابی در مطالعه حاض بر برای قاب فولادی ۴ طبقه ۲۰ درصد و برای قاب فولادی ۷ طبقه ۵ درصد پیشنهاد می شود.

#### ۱- مقدمه

در مناطق زلزله خیز وقوع زلزله های قوی بویژه زلزله های متوالی شامل لرزه نخست – لرزه دوم متوالی، که دارای پتانسیل افزایش پاسخ های سازه می باشد، باعث بررسی وکنترل رفتار لرزه ای سازه ها شده است. سوابق لرزه ای در اقصی نقاط دنیا ثابت کرده است که سازه های واقع شده در مناطق مذکور تحت یک رویداد لرزه ای قرار ندارند، بلکه تحت توالی لرزه ای متشکل از زلزله اصلی و لرزه دوم می باشند. با توجه به پیشرفت و کاربرد مهاربنده ای کمانش تاب و

مصالح آلیاژ حافظ دار شکلی به عنوان مصالح هوشمند در علوم مهندسی در دهههای گذشته، که دارای مزایا و ویژگی های منحصر به فردی از جمله عدم نیاز به تعویض پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت جذب انرژی بالا، قابلیت بازگشت به حالت اولیه بوسیله اعمال دما، تحمل کرنش تا حدود ۱۰ درصد بدون باقی گذاشتن کرنش پسماند پس از زلزله و تحمل چرخههای متعدد بارگذاری و باربرداری میباشد، کاربردهای مختلفی به صورت مجزا و ترکیبی در کنترل رفتار سازهها پیدا کردهاند. پژوهش های انجام شده در

\* رايانامه نويسنده مسئول: ORCID - rajabi@tafreshu.ac.ir: رايانامه نويسنده مسئول:

Creative کپی رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین المللی Creative کپی رایت © ۲۰۲۵، انتشار شده و تحت مجوز بین المللی Inttps://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0 قرار دارد (Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار می توانید این مجوز، شما می توانید این مطلب را در هر قالب و رسانهای کپی، بازنشر و باز آفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.

مقايسه با مهاربند ساخته شده از فولاد ST37 استفاده از فولاد ST37-n منجر به کاهش ۳۲ درصدی استحکام کششی و فشاری مهاربند می گردد [6]. مطالعهای در سال ۲۰۱۸ نشان داده است که قابهای مجهز به مهاربند کمانش تاب مستعد تغییر شکل های پسماند در مواجه ه با زمینلرزهها هستند که آنها را در برابر حوادث لـرزه دوم آسـیبپـذیر میسازد و ظرفیت فروپاشی این قابها را تحت لرزه دوم به شدت تشدید میکند. به ویژه زمانی که سازه در طول لرزه نخست، تغییر شکل های نسبی پسماند بزرگ را تحمل کند [7]. در مناطق زلزلهخيز اگر چه سازه ها معمولاً در معرض توالي لرزه نخست-لرزههای دوم قرار می گیرند، اغلب زمانی برای تعمیر یا مقاومسازی بین رویدادها باقی نمیماند. تجمع تقاضای شکل پذیری و یا تغییرشکلهای نسبی پسماند القاء شده توسط لرزه نخست میتوانـد در عملکرد سازه در حین لرزه دوم تأثیر گذارد. در سال ۲۰۱۹ روش طرح بهینه برای سیستمهای دوگانه فولادی که در آن قابهای مجهز به مهاربند کمانش تاب با قرابه ای خمشمی ترکیب شده و ظرفیت مهاربند كمانش تاب تحت تاثير زلزك هاى چندگانه باعث تجمع کرنش های پلاستیک در داخل سیستم گردیده، با این حال نتایج مقدماتی هنگام بررسی توالی لرزه نخست-لرزه دوم، به طور قابل توجهي تقاضاهاي شكل پذيري تجمعي ناشي از لرزههاي متوالي را در مهاربند کمانش تاب افزایش ندادند [8]. در سال ۲۰۲۰ ارزیابی تقاضای پاسخ تغییرشکل نسبی قابهای مجهز به مهاربند کمانش تاب تحت عملکرد ترکیبی از لرزه نخست و زمینلرزه های ثانویه متوالی برای یک قاب ۶ طبقه انجام شده است و نتایج آن نشاندهنده افـزایش تقاضای پاسخ تغییرشکل نسبی بین طبقه و پسماند تحت زمین لرزههای ثانویه متوالی نیز میباشد [9]. در سال ۲۰۲۲ رفتار لرزهای و توسعه منحنىهاي شكنندگي قابهاي مهاربندي شده واگرا تحت اثر زلزلههای متوالی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر مقاومـت بـالا و ظرفيت باربري مناسب قابهاي مهاربندي شده واگرا تحت زلزلههاي چندگانه میباشد که قادر به دستیابی به سطوح بالای عملکردی می باشند [10]. در مطالعه ای در سال ۲۰۲۰ نتایج تحلیل یک قاب ۹ طبقه فولادي مجهز به مهاربند كمانش تاب بـا آليـاژ حافظـهدار شـكلي براساس SC-BRBs<sup>۲</sup> تحت حرکات زمین لرزهای نزدیک به گسل با درصدهای مختلف از آلیاژهای حافظهدار شکلی، قابلیت تمرکز مجدد بهتر را با افزایش اندک تغییرشکل نسبی بین طبقه نشان داده است

رابطه با عملکرد لرزهای سازههای فولادی مجهز به مهاربند کمانش تاب و آلیاژ حافظهدار شکلی برخی صرفاً به صورت مدلسازی نرمافـزاری و برخی دیگر علاوه بر مدلسازی نرمافزاری، به صورت آزمایشگاهی نیـز می باشند و نتایج بدست آمده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته شدهاند. زلزلههای متوالی پتانسیل بالایی برای افزایش تغییرشکل نسبی بین طبقات، تغییرشکل نسبی پسماند، شاخص خسارت و عامل شکل پذیری کلی قاب های مجهـز بـه مهاربنـد کمـانش تـاب را دارد و همچنین شتاب طیفی لرزه دوم دنبال کننده لرزه نخست در مقایسه با زلزله منفرد به طور قابل توجهي بر عملكرد قاب مجهز به مهاربند كمانش تاب تحت زلزله متوالى تاثير مي گذارد [1]. در سال ۲۰۲۱ قـاب فولادي مجهز به مهاربند كمانش تاب با ناحيه شكل يـذير (فيوز) بررسي شده که از قابلیت اتلاف انرژی مناسبی برخوردار بوده و میتواند مسئله شكست مفاصل جوش داده شده بين مهاربند كمانش تاب و قاب فولادی بعد از لرزه دوم را برطرف نماید [2]. در سال ۲۰۱۹ بررسی رفتار لرزهای قاب فولادی مختلط شامل قاب های با مهاربند کمانش تاب به صورت محیطی و قابهای خمشی به صورت داخلی با خروج از مرکزیت طبیعی تک محوری تحت تحریک لرزهای حـوزه دور، نشان داده است که خروج از مرکزیت بر رابطه میان مقادیر متوسط شکل پذیری و ضریب رفتار قاب های مختلط خمشی و مهاربند کمانش تاب، به طور قابل ملاحظهای بی تأثیر میباشد [3]. دو مشکل اصلی برای سازه ای فولادی با مقاومت بالا در طراحی لرزهای، ظرفیت اتلاف کم انرژی و سختی جانبی کم میاشد، نتایج مطالعه عملكرد لرزهاي سازه هاي تركيبي از قاب هاي فولادي با مقاومت بالا و مهاربند کمانش تاب در سال ۲۰۲۱، عملکرد انعطاف پذیر کلی نمونه ها با سختی الاستیک بالا، شکل پذیری قابل توجه و ظرفیت اتلاف انـرژی عـالی را نشـان داده اسـت [4]. بررسـی تجربي عملكرد لرزهاي قاب مجهز به مهاربند كمانش تاب متشكل از اتصالات مقطع تیر کاهش یافته (RBS') در سال ۲۰۲۲، نشان داده است که بخش های کاهش یافته مقطع تیر در انتهای تیر به طور مؤثری از اتصالات تیر به ستون محافظت میکند و همچنین حداکثر تغيير شكل نسبى بام قبل از شكست توسط ظرفيت چرخشي اتصالات تیر-ستون و عملکرد پایداری مهاربند کمانش تـاب اداره مـیشـود [5]. در سال ۲۰۲۰ مطالعه تجربي و عـددي در خصـوص اثـرات فـولاد و فاصله هسته از بدنه بر رفتار مهاربندهای کمانش تـاب نشـان داد کـه در

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-08-01

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Self Centering-Buckling Restrained Brace

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Reduced Beam Section

یک سطح قابل توجه از بازیابی و به حداقل رساندن بیشتر آسیبهای سازهای قابل دستیابی است [15]. در سال ۲۰۲۴ یک اتصال قاب فولادی خودمحور مجهز به صفحات و واشرهای آلیاژ حافظ دار شکلی از طریق آزمایش های بارگذاری چرخهای شبهاستاتیکی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار خود محورانـه نسـبتاً رضایتبخشی مشاهده شده است. براساس مدل ساده شده اجزاء محدود، یک قاب ۶ طبقه فولادی هیبریدی خود محور در ناحیـه اتصال در نظر گرفته شده است. سپس از سه نوع آلیاژ حافظهدار شکلی در ناحیه اتصال استفاده شده و مقایسه بـا قـاب فـولادی بـا اتصال معمولي مورد بررسي قرار گرفته است. نتايج تحليل تاریخچه زمانی غیرخطی نشان داده که قاب هیبریدی خـود محـور تغییرشکل های پسماند ناچیز را حتی زمانی که عمل غیر ارتجاعی در ستون ها اتفاق افتاده دارد. خصوصيات مصالح آلياژ حافظ دار، تاثیرات مختلف در عملکرد لرزهای از قاب هیبریدی خود محور داشته، به گونهای که تغییرشکل پسماند افزایش یافته از صفحات SMA یک تأثیر حداقلی در پاسخ دینامیکی سازه دارد، در حالیکه کاهش مدول SMA به طور قابل ملاحظهای پاسخ دینامیکی قـاب فولادی هیبریدی خود محور را افزایش داده است. در نهایت قاب اولیه مجهز به اتصالات معمولی حساسیت بیشتری به تـوالی لـرزه نخست-لرزه دوم در مقایسه با قاب مجهز به صفحات SMA دارد [16]. در سال ۲۰۲۳ مطالعهای بـا هـدف ارزیـابی شـکل.پـذیری و ضريب اصلاح پاسخ قابهاي ديوار برشي صفحه فولادي (SPSW)با و بدون آلیاژ حافظهدار شکل Ni-Ti صورت پذیرفته است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که بهبود ویژگیهای حافظه شکل آلیاژها می تواند تا حد زیادی شکل پـذیری و ضـریب اصلاح پاسخ را افزایش دهد [17]. در سال ۲۰۲۱ یک مهاربند کمانش تاب جدید که در آن یک غلاف تمام فولادی در غلاف BRB ترکیب شده از یک هسته ترکیبی(در یک مورد ترکیب BRB و مصالح دیگر) با طول کوتاه که به صورت سری به یک عضو مقاوم بدون تسليم متصل شده، پيشنهاد شده است. سـپس پاسـخ کلی از نمونه اولیه قابهای مجهز به مهاربند کمانش تاب شامل مهاربندهای متعارف و پیشنهاد شده از طریق تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی و پوش اُور ارزیابی شدند. نتایج تحلیل، کارایی قابل توجه از مهاربندهای پیشنهاد شده برای کاهش تغییرمکان نسبی بین طبقه و به ویژه تغییر مکان نسبی پسماند در قابهای

[11]. در سال ۲۰۲۲ عملکرد لرزهای قابهای مجهز به مهاربند کمانش تاب خود محور در معرض توالی لرزهای، لـرزه نخسـت-لـرزه دوم تجزیه و تحلیل شده است، که به خاطر منحنی هیسترتیک پـرچم شکل اعضای مهاربند کمانش تاب خود محور، مقدار زیادی از انرژی در حین حرکت اتلاف شده، تغییرشکل پسماند سازهای را کاهش داده و لرزه دوم رخ داده بعد از لرزه نخست خسارت و پاسخ های لرزهای سازه را افزایش داده است [12]. در سال ۲۰۱۹ رفتار ۲ قاب فولادی با تعداد طبقات متفاوت (۴ و ۸ طبقه) در معرض زلزله های مختلف تحت تحلیل تاریخچه زمانی و دینامیکی افزایشی قرار گرفتهانـد. نتـایج نشان داده است که استفاده BRB' ساخته شده از ترکیب فـولاد و SMA<sup>۲</sup> شکلپذیری سازه را افزایش داده و جابهجاییهای پسماند سازه را کاهش میدهد [13]. در سال ۲۰۲۲ به منظور بهبود رفتار لرزهای از قابهای فولادی با مهاربندهای همگرا مجهز به آلیاژ حافظهدار شکلی و مهاربندهای کمانش تاب، سه قاب ۴، ۸ و ۱۴ طبقـه با مهاربند شورون (V معکوس) در نظر گرفته شده است. تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از نرمافزار Opensees انجام شده است. پاسخ دینامیکی قاب،ای با مهاربندهای کمانش تاب و آلیاژ حافظهدار شکلی مقایسه شدهاند. نتایج نشان داده است که مهاربندهای کمانش تاب و آلیاژ حافظهدار شکلی اتلاف انرژی در ناحیـه غیرخطـی را فراهم کرده است و میتواند حداکثر تغییرشکل نسبی بین طبقـه را کاهش دهد، همچنین مقایسه این سیستمهای مهاربندی آشکار کرده که پیادهسازی SMA در مهاربندها منجر به کاهش جابجایی دائمی سازهها به دلیل خاصیت ارتجاعی از سیسـتم مهاربنـدی SMA شـده و اتلاف انرژی از سازه ها با سیستم مهاربندی BRB نسبت به سازه های با سیستم مهاربندی SMA بزرگتر میباشد [14].

در سال ۲۰۲۳ رفتار یک قاب یک طبقه مجهز به مهاربند کمانش تاب ساخته شده از آلیاژ حافظه دار شکلی زمانی که در معرض مواد منفجره قرار گرفته، بررسی شده است. نتایج تحلیل نشان داده که افزایش مقدار مواد انفجاری، جابه جایی و تنش در نمونه ها را افزایش داده است و با ترکیب آلیاژ حافظه دار شکلی در نمونه ها بویژه مقادیر کمتر مواد انفجاری، امکان بازیابی (بازسازی) به وضعیت اولیه تا حدی انجام شده و در نتیجه کاهش شدت آسیب برآن تحمیل شده است. حتی با مقادیر بالاتر مواد انفجاری،

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Buckling Restrained Brace

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Shape Memory Alloy

مرتبه)، طراحی و عملکرد لرزهای آنها بررسی شده و صحتسنجی انجام شده است. سپس با افزودن درصدهای مختلف آلیاژ حافظهدار شکلی در سازههای مذکور تحت سناریوهای لرزهای منفرد (لرزه نخست) و متوالی (لرزه نخست-لرزه دوم) در تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته و براساس نتایج مربوط به پاسخ حداکثر تغییرشکل نسبی بین طبقه و جابهجایی تجمعی پسماند، به تعیین درصد بهینه آلیاژ حافظهدار شکلی پرداخته شده است. مجهز به مهاربند کمانش تاب را تعیین نمود [18]. با توجه به مطالب فوق، نظر به نادیده گرفته شدن زلزلههای متوالی در آیین نامه های لرزه ای علیرغم پتانسیل بالای خسارت زایی و استقبال جامعه مهندسین از روش های نوین بهبود عملکرد لرزه ای، این مقاله به بررسی اثر آلیاژ حافظه دار شکلی در سازه های فولادی مجهز به مهاربند کمانش تاب جهت تعیین درصد بهینه آن تحت زلزله های متوالی پرداخته است. در این راستا مطابق شکل (۱) ابتدا سازه های فولادی مجهز به مهاربند کمانش تاب (سازه کوتاه و میان

شکل ۱. فلوچارت روند مطالعه پیشرو جهت تعیین درصد بهینه آلیاژ حافظهدار شکلی در سازههای فولادی مجهز به مهاربند کمانش تاب



Fig. 1. The Flowchart of this study to determine the optimal percentage of SMA in Steel Structures Equipped with BRB

#### ۲- مدلسازی

در این مطالعه، به عنوان گام نخست ساختمان مسکونی فولادی ۴ طبقه با الهام گرفتن از مطالعه هویدایی و رادپور در سال ۲۰۲۰ [1] و ۷ طبقه مطابق شکل (۲) به عنوان تعداد طبقات رایج در کشور ایران، با سیتم سقف عرشه فولادی کامپوزیت، مجهز به سیستم باربر جانبی مهاربند کمانش تاب با چیدمان قطری در تمام طبقات با اتصالات مفصلي و طول تقريبي ۵/۹۴ متر از نقطه نصب تا نقطه نصب بر طبق مشخصات هندسی از قابهای مهاربندی شده، منظم در پلان و ارتفاع، شامل ۴ دهانه ۵ متری در هر راستا و ارتفاع تیپ طبقات ۳/۲ متر برای هر طبقه در محیط نرمافزاری ETABS مدلسازی شدهاند. طراحی براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ویرایش پنجم سال ۱۴۰۱ انجام شده است. پس از استخراج بهینه ترین مقاطع مطابق جدول های (۱) و (۲) در نرمافزار OpenSees پیادہ سازی شدہ اند. لازم به ذکر است، بارگذاری ثقلی براساس مبحث ششم مقررات ملي ساختمان ويرايش چهارم سال ۱۳۹۸ و بارگذاری جانبی براساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم انجام شده است، به این منظور محل استقرار سازههای مورد نظر در شهر تهران با خطر نسبی خیلی زیاد و نسبت شتاب مبنای طرح به

شتاب ثقل ۲۹۵، خاک نوع ۳ و ضریب اهمیت سازه ۱، و شتاب ثقل ۲۹۵، خاک نوع ۳ و ضریب اهمیت سازه ۱، و قابهای دو بُعدی مورد نظر ابتدا تمام گرههای موجود در مدلها در نرمافزار OpenSees تعریف شده و المانهای تیر و ستون و مهاربندهای کمانش تاب در بین آنها ایجاد شدهاند. فولاد گرید ۵۰ با مصالح Steel02 و نسبت سخت شوندگی کرنشی برابر ۲۰۰۵ مدلسازی شده و در تحلیل استاتیکی غیرخطی به تمامی تیرها و ستونها و مهاربندهای کمانش تاب اختصاص داده شده است. همچنین براساس مطالعه ترمبلی و همکاران در سال ۲۰۰۶ [19]، در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای مهاربند از مصالح Steel02 با نسبت سخت شده ایران در سال ۲۰۰۶ وا ستونها و مهاربندهای کمانش تاب اختصاص داده شده است. مدلسازی شده و در تحلیل استاتیکی غیرخطی به تمامی تیرها و موزندگی کرنشی براین در سال ۲۰۰۶ است. در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای مهاربند از مصالح در تحلیل اسبت سخت شدگی کرنشی برابر ۲۰۰۸ استفاده شده در تحلیل المان تیر-ستون غیرخطی برای تیرها و ستونها اختصاص داده شده و به گونهای میباشد که توزیع گسترده پلاستیسیته در طول المان را در نظر می گیرد.

علاوه بر این المان های تراس چرخشی<sup>۲</sup> برای مهاربندهای کمانش تاب در نظر گرفته شدند. اتصال مفصلی با استفاده از عضو

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> NonLinear Beam-Column Element

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Corotational Truss Element

طول صفر نیز در انتهای تیرها و ستونها مشخص شدند. ستونهای ساختگی به عنوان اعضای تیر-ستون الاستیک، دارای ممان اینرسی و سطح مقطع بزرگتر قابل توجه نسبت به ستونهای قاب، برای محاسبه اثرات Δ-P به کار گرفته شدند.

#### جدول ۱. مقاطع نهایی مورد استفاده در قاب ۴ طبقه

Model	story	Columns	Beams	BRB core area(cm <sup>2</sup> )
	1	W12*53	W12*19	16
4 - 4	2	W12*53	W12*19	14.6
4story	3	W12*35	W12*19	12
	4	W12*35	W12*19	7

Table 1. The cross-sections of 4 story frame

جدول ۲. مقاطع نهایی مورد استفاده در قاب ۷ طبقه

Model	story	Columns	Beams	BRB core area(cm <sup>2</sup> )
	1	W12*87	W12*19	34
7story	2	W12*87	W12*19	34
	3	W12*87	W12*19	34
	4	W12*87	W12*19	34
	5	W12*35	W12*19	32.5
	6	W12*35	W12*19	32.5
	7	W12*35	W12*19	8

**Table 2.** The cross-sections of 7 story frame

اعضای فنر چرخشی با طول صفر<sup><sup>4</sup></sup> و با سختی کم برای اتصال ستونهای ساختگی به اتصالات تیر – ستون استفاده شدند. همچنین لینکهای صلب<sup>6</sup> با استفاده از المانهای truss تعریف شده و وظیفه اتصال ستونهای ساختگی و قاب اصلی را بر عهده دارند. همچنین دیافراگم صلب در ترازهای طبقه با استفاده از قید برابر درجه آزادی از گرههای طبقه مدلسازی شده و تغییر شکل هندسی Pdelta درجه آزادی از گرههای طبقه مدلسازی شده و تغییر شکل هندسی نشان دهنده مدلهای دو بعدی پیاده سازی شده در نرمافزار openSees می باشد. به منظور صحت سنجی روش مدلسازی، به دو آمده در مطالعه حاضر و پژوهش های مرجع در سالهای اخیر محت سنجی انجام شده است. همانطور که در جدول (۳) و شکل (۴) مشاهده می گردد، مقادیر بسیار نزدیک بهم بوده و دارای اختلاف ناچیز می باشند. به منظور مدلسازی مهاربند کمانش تاب به مراه آلیاژ حافظهدار در نرمافزار معاربان کمانش تاب به



Fig. 2. The Schematic view of plan and elevation of studied models

4@5m

Base

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-08-01

DOI: 10.22034/25.2.21 ]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Zero-Length Element

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Dummy Columns

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Elastic Beam Column Element

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Zero-Length Rotational Spring Elements

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Rigid Links

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-08-01

حافظه دار شکلی به موازات مهاربندهای کمانش تاب استفاده شده است و براساس مطالعه جلالوندی و همکاران در سال ۲۰۲۲ [14]، شامل دو بخش آلیاژ حافظه دار و صلب نیز می باشد. از آنجایی که طول اعضای آلیاژ حافظه دار در مقایسه با طول کل مهاربند کوتاه تر می باشد، بخش صلب استفاده شده است. با انجام این کار تغییر شکل کلی مهاربند ناشی از تغییر شکل اعضای حافظه دار تضمین شده است. بخش صلب با استفاده از المانهای تیر – ستون الاستیک، و بخش آلیاژ حافظه دار در هر دو دهانه مهاربندی، با Self-Centering و رفتار آن توسط دستور تراس که دو انتها شبیه سازی شده است. به منظور اتصال بخش تراس که دو انتها مفصل محسوب می شود، از یکسان سازی درجات آزادی توسط دستور Equal DOF استفاده شده است.





جدول ۳. مقایسه زمان تناوب ها در قاب فولادی ۴ طبقه

درصد	زمان تناوب	زمان تناوب حاصل
خطا	حاصل از مرجع [۱]	از مطالعه حاضر
۵/۶۱ درصد	۸۲/ • ثانیه	۸۶۶/ • ثانیه



شکل ۴. نمودار پوش اور قاب ۴ طبقه فولادی مجهز به مهاربند کمانش تاب



Fig. 4. Pushover curves of the reference and implemented frames طول بحرانی برای حداکثر کرنش قابل بازگشت آلیاژ حافظهدار که براساس مطالعه تزارو و سعیدی در سال ۲۰۱۵ [19]، برابر با ۶ درصد میباشد، تنظیم شده است و در این مطالعه طول بخش آلیاژ حافظهدار برابر با ۲۰، متر و سطح مقطع آن براساس مطالعه قویسی و ساهو در سال ۲۰۲۰ [11]، در قاب فولادی ۶ طبقه به صورت درصدهای مختلف شامل، ۲۰، ۴۰، ۴۰، ۲۰، درصد و در قاب فولادی ۷ طبقه شامل، ۵، ۱۰، ۵۱، ۲۰، ۵۲، درصد از سطح مقطع مهاربندهای کمانش تاب در هر طبقه نیز انتخاب شدهاند. در جدول (۴) مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظهدار شکلی و در شکل (۵) مدل قابهای فولادی مجهز به مهاربند کمانش تاب با آلیاژ حافظ هدار شکلی برای قابهای ۴ و ۷ طبقه نمایش داده شده است.

#### جدول ۴. مشخصات مكانيكي آلياژ حافظهدار شكلي [21]

Material	Initial stiffness(K1) (N/m <sup>2</sup> )	Final stiffness(K2) (N/m <sup>2</sup> )	Activation stress (N/m <sup>2</sup> )	β
Shape Memory Alloy	63431792000	2080412987	268895640	0.5

Table 4. Mechanical properties of SMA

به منظ ور کنترل عملکرد مدل در معرض زلزله در قالب استخراج حلقههای هیسترزیس و کنترل روند اتلاف انرژی با منحنی رفتاری معرفی شده، در روند مدلسازی نیاز است تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شود. لذا میرایی ذاتی توسط میرایی رایلی از طریق تنظیم نسبت میرایی بحرانی ۵٪ در مودهای اول و سوم از سازه مدلسازی شده است. سختی و مقاومت از پارامترهای مهم منحنی هیسترزیس یک عضو است. کاهش سختی ناشی از اثرات غیرخطی هندسی و زوال مقاومت ناشی از کاهش مقاومت جانبی عضو میباشد.

شکل ۵. قابهای فولادی ۴ و ۷ طبقه مجهز به مهاربند کمانش تاب با آلیاژ



Fig. 5. Steel frames with BRB and SMA

بعد از اعمال شتابنگاشت مقیاس شده زلزله (1994) Northridge که از سایت PEER دریافت شده، نمودار نیرو – تغییر شکل برای مهاربند کمانش تاب و بخش آلیاژ حافظهدار شکلی در شکل (۶) به نمایش گذاشته شده است. همانطور که مشاهده می شود نحوه رفتار المانها به گونهای است که حلقه های هیسترزیس از منحنی رفتاری مصالح مورد استفاده تبعیت می کنند و به خوبی رفتار مشابه در کشش و فشار مشاهده می گردد. در منحنی هیسترزیس المانها، زوال چندانی مشاهده نمی شود، اما انتظار می رود با وقوع لرزه های ثانویه و به دلیل خسارات تجمعی از لرزه نخست، سازه زوال بیشتری را تجربه نماید.

#### ۳- سناريوهاي لرزهاي

در مطالعه حاضر به منظور بررسی اثر زلزلههای متوالی در تعیین درصد بهینه آلیاژ حافظهدار شکلی در سازههای فولادی (قابهای ۴ طبقه و ۷ طبقه) مجهز به مهاربند کمانش تاب، از ۱۶ رکورد لرزهای شامل لرزههای متوالی واقعی ثبت شده (جدول ۵) برگرفته از مطالعه قدرتی امیری و رجبی در سال ۲۰۱۷ [22]، که

براساس پارامتر حـداکثر شـتاب مـوثر (EPA') انتخـاب شـدهانـد. استفاده شده است.

شکل ۶. منحنی نیرو-تغییرشکل (الف) مهاربند کمانش تاب و (ب) آلیاژ حافظهدار تحت شتاینگاشت زلزله Northridge یا PGA=0.99g



**Fig. 6.** Hysteresic loops and backbone curve of (a) BRB and (b) SMA for studied model under Northridge (PGA=0.99g)

پارامتر EPA طبق تعریف برابر با متوسط شتاب طیفی زلزله بـا میرایی ۵ درصد در زمان تناوب ۰/۱ ثانیه تــا ۰/۵ ثانیـه تقسـیم بـر ضریب بزرگنمایی استاندارد ۲/۵ است. همچنین این یارامتر مانند PGA از جنس شتاب بوده و نشان دهنده دامنه و محتوای فرکانس حرکت زمین لرزهای نیز میباشد [22]. در واقع دلیل استفاده از رکوردهای ثبت شده در مطالعه حاضر اجتناب از ایجاد عدم قطعیتها در معرفی مشخصات لرزهای دنبال کننده به واسطه استفاده از روش های مصنوعی می باشد. شرایط انتخاب لرزه های متوالی مورد استفاده در این مطالعه، علاوه بر یکسان بودن ایستگاه ثبت لرزه اول و دوم و فاصله زمانی کمتر از ۱۰ روز میان آنها. بحث در میزان حداکثر شتاب مؤثر این لرزههاست. مدت زمان ۲۰ ثانیه با شتاب صفر بین دو لرزه اولیه و ثانویه براساس مطالعه هویدایی و رادپور در سال ۲۰۲۰ [1]، در نظر گرفته شده است، که این زمان برای اطمینان از بقای سازه در پایان زلزله نخست و قبل از لرزه دوم مشخص شده و در شکل (۷) شتابنگاشت مربوط لرزههای متوالی مورد استفاده در این مطالعه نمایش داده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Effective Peak Acceleration

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Peak Ground Acceleration

ID	Name	Date	EPA (g)	PGA (g)	Station
1	Chalfant Wallas?	20/07/1986	0.2451	0.2382	CDMG 54428 Zack Brothers Ranch
1	Challant valleys	21/07/1986	0.4854	0.4246	CDMG 54428 Zack Brothers Ranch
2	Castinan	22/07/1983	0.0993	0.1539	CDMG 46617 Coalinga-14th & Elm (Old CHP)
Ζ	Coannga	25/07/1983	0.3513	0.5813	CDMG 46617 Coalinga-14th & Elm (Old CHP)
2	Mammoth	27/05/1980	0.1722	0.2178	USC 37 USC McGee Creek Inn
3	Wiammour4	31/05/1980	0.2767	0.3689	USC 37 USC McGee Creek Inn
4	Mammoth 5	25/05/1980	0.2726	0.3289	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
4	Maninouis	27/05/1980	0.4287	0.6293	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
5	Mammoth6	26/05/1980	0.1117	0.0926	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
3	Wallinoulo	27/05/1980	0.4287	0.6293	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
6	Chalfant Vallav0	20/07/1986	0.088	0.1105	CDMG 54171 Bishop - LADWP South St
0	Chanant Valley9	21/07/1986	0.2197	0.2058	CDMG 54171 Bishop - LADWP South St
7	Livermore	24/01/1980	0.086	0.1066	CDMG 57187 San Ramon - Eastman Kodak
/	Livermore	27/01/1980	0.2119	0.1917	CDMG 57187 San Ramon - Eastman Kodak
8	Mammoth 1	25/05/1980	0.2387	0.2818	CDMG 54301 Mammoth Lakes H. S.
0	Wammourr	25/05/1980	0.4091	0.4143	CDMG 54301 Mammoth Lakes H. S.
0	Mammoth7	25/05/1980	0.3443	0.4193	CDMG 54099 Convict Creek
,	Wanninour/	25/05/1980	0.1563	0.1669	CDMG 54099 Convict Creek
10	Mammoth0	25/05/1980	0.1563	0.1669	CDMG 54099 Convict Creek
10	Wiammour)	25/05/1980	0.2618	0.3169	CDMG 54099 Convict Creek
11	Mammoth 10	25/05/1980	0.1563	0.1669	CDMG 54099 Convict Creek
11	Wallinouiiio	27/05/1980	0.2207	0.3169	CDMG 54099 Convict Creek
12	Mammoth12	25/05/1980	0.2041	0.2172	CDMG 54099 Convict Creek
12	Wallinou 12	25/05/1980	0.2618	0.3169	CDMG 54099 Convict Creek
13	Mammoth 15	25/05/1980	0.2041	0.1234	CDMG 54099 Convict Creek
13	Wanniou 15	27/05/1980	0.2207	0.3169	CDMG 54099 Convict Creek
14	Mammoth17	25/05/1980	0.2635	0.3403	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
14	Wiammouri /	25/05/1980	0.2726	0.3289	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
15	Mammoth20	25/05/1980	0.2635	0.3403	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
15	14141111001120	27/05/1980	0.4287	0.6293	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
16	Mammoth21	25/05/1980	0.0884	0.1369	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
10	manniou121	25/05/1980	0.2726	0.3289	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)

[22]	غير خطى	ديناميكي	در تحليل	استفاده شده	لەھاي	۵. زلز	جدول
------	---------	----------	----------	-------------	-------	--------	------

Table 5. The features of the selected records for nonlinear dynamic analysis [22]

لرزه دوم مربوط به آن را به دست آورده و سپس نسبت این دو طیف در هر زمان تناوب برای هر مولف افقی در هر ایستگاه محاسبه می گردد. سپس مقادیر متوسط نسبت طیف لرزه نخست و لرزه ثانویه در زمان تناوبهای مختلف محاسبه گردیده و معادله تغییرات در مقادیر میانگین نسبت طیف پاسخ لرزه نخست و لرزه ثانویه برای زمان تناوبهای مختلف به دست میآید، که معمولا یک چند جملهای از درجه n پیش بینی می گردد. سپس با توجه به این منحنی و انتخاب یک طیف طرح استاندارد، یک طیف طرح لرزه دوم استاندارد را می توان با تقسیم طیف طرح استاندارد برای سطح خطر مورد نظر بر مقادیر محاسبه شده در هر زمان تناوب به دست آورد، و در نتیجه شتابنگاشت لرزه دوم برای سطح خطر دلخواه را می توان با مقیاس بندی لرزه های ثاویه به این طیف به دست آورد.

# ۴- میانگین پاسخ حداکثر تغییرشکل نسبی بین طبقه

مطابق شکل،های (۸) و (۹) مشاهده میشود که در سازه

$$(b) = 0.5 - 0.5$$

شکل ۷. شتابنگاشت لرزههای متوالی مورد استفاده در این مطالعه



به منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی لازم است که زلزلهها مقیاس گردند. برای این هدف رکوردهای لرزه نخست به طیف آیین نامه طراحی استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم برای سطح خطر در نظر گرفته شده مقیاس شدهاند. مقیاس نمودن لرزه دوم برای سطح خطر در نظر گرفته شده براساس مطالعهی انجام شده توسط عبدالله زاده و همکاران در سال ۲۰۱۸ [23]، انجام شده است. در این راستا به منظور مقیاس نمودن لرزههای دوم برای سطح خطر دلخواه، ابتدا طیف پاسخ شتاب از هر لرزه نخست و

فولادي ۴ طبقه، با افزايش درصد آلياژ حافظهدار شكلي ياسخ حداکثر تغییرشکل نسبی بین طبقات تحت لرزه منفرد و لرزه متوالی افزایش می یابد، به گونه ای که در مقادیر ۶۰ تـ ۱۰۰ درصـد به طور قطعی از مقدار مجاز عبور کرده و به طور کلی سازه تحت لرزه دوم نسبت به لرزه نخست، به دلیل خسارتهای تجمعی ناشی از لرزه نخست زوال بیشتری را در مقاومت تجرب کرده است. همچنین پاسخ حداکثر تغییرشکل نسبی بین طبقات تحت لرزههای متوالی نسبت به حالت لرزه منفرد برای هر کدام از درصدهای آلیاژ حافظهدار، افزایشی بوده و این نیز نشان دهنده اینست که زلزله متوالی پاسخ سازه را نسبت به زلزله منفرد افزایش داده است، ایس موضوع ضرورت لحاظ نمودن پدیده توالی لرزهای را بیش از پیش آشکار میسازد. بیشترین مقدار حداکثر تغییرشکل نسبی بین طبقات در مقدار ۱۰۰ درصد آلیاژ حافظه دار شکلی رخ داده است، كه مقدار آن تحت لرزه منفرد ۴/۱۳ ٪ و تحت لرزه متـوالي ۴/۶۱ ٪ نیز می باشد و کمترین مقدار حداکثر تغییر شکل نسبی بین طبقات در حالت بدون آلیاژ حافظهدار شکلی و با مهاربند کمانش تاب به تنهایی رخ داده است، کـه مقـدار آن تحـت لـرزه منفـرد ۲/۶۱ ٪ و تحت لرزه متوالي ۲/۸۱ ٪ نيز ميباشد.

همچنین با توجه به شکل های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می شود که در قاب فولادی ۷ طبقه مجهز به مهاربند کمانش تاب، با افزایش درصدهای آلیاژ حافظ دار شکلی در مقایسه با حالت بدون آلیاژ حافظهدار شكلي مقادير حداكثر تغيير شكل نسبى بين طبقات تحت لرزه منفرد کاهش یافته و این کاهش در طبقات ۵ تــا ۷ بهتـر احسـاس می گردد. اگر چه مقادیر تغییرشکل نسبی تحت لرزه متوالی در مقایسه با لرزه منفرد افزایش پیدا کرده و نشان دهنده اینست که زلزله متوالی پاسخ سازه را نسبت به زلزله منفرد افزایش داده است و به مقدار مجاز آیین نامه ای در طبقات ۱ تا ۵ نزدیک تر شده، اما در مقایسه بین درصدها تحت زلزله متوالى با افزايش درصدها، در طبقات ۱ تا ۵ مقادیر تغییرشکل نسبی بین طبقات تقریباً افزایش یافته و در طبقـات ۶ و ۷ تقریباً کاهش یافته است. در همه مقادیر، بـا و بـدون درصـد آلیـاژ حافظهدار شکلی در طبقات ۶ و ۷ تحت زلزله متوالی مقادیر حداکثر تغييرشكل نسبى بين طبقات به طور قطعي از مقدار مجاز عبور كرده و به طور کلی سازه تحت لرزه دوم نسبت به لرزه نخست، به دلیل خسارت های تجمعی ناشی از لرزه نخست زوال بیشتری را در مقاومت تجربه كرده است. اين موضوع همچنان ضرورت لحاظ نمودن پدیده توالی لرزهای را آشکار میسازد. بیشترین مقدار حداکثر

تغییرشکل نسبی بین طبقات در حالت بـدون درصـد آلیـاژ حافظـهدار شکلی در طبقه ۷ رخ داده است، که مقدار آن تحت لرزه منفـرد ۳/۲۳٪ و تحت لرزههای متوالی ۳/۵۹ ٪ نیز میباشد.

**شکل ۸** میانگین حداکثر پاسخ تغییرشکل نسبی بین طبقات تحت لرزه منفرد در قاب فولادی ۴ طبقه



Fig. 8. Average maximum inter-story drift of 4 story frame under single shocks

**شکل ۹**. میانگین حداکثر پاسخ تغییرشکل نسبی بین طبقات تحت لرزه متوالی در قاب فولادی ۴ طبقه



Fig. 9. Average maximum inter-story drift of 4 story frame under succesive shocks

شکل ۱۰. میانگین حداکثر پاسخ تغییرشکل نسبی بین طبقات تحت لرزه منفرد



Fig. 10. Average maximum inter-story drift of 7 story frame under single shocks

۳.

DOI: 10.22034/25.2.21

درصد آلیاژ حافظهدار شکلی ۱۳٬۰۴ سانتیمتر میباشد.

**شکل ۱۲.** میانگین پاسخ تاریخچه زمانی جابه جایی بام در قاب فولادی ۴ طبقه بدون آلیاژ حافظهدار شکلی تحت توالی لرزه نخست –لرزه دوم



Fig. 12. Average displacement of 4 story frame without SMA under successive shocks شکل ۱۳. میانگین پاسخ تاریخچه زمانی جابهجایی بام در قاب فولادی ۴ طبقه با درصدهای مختلف آلیاژ حافظهدار شکلی تحت توالی لرزه نخست-لرزه دوم



Fig. 13. Average displacement of 4 story frame with different SMA under successive shocks

**شکل ۱۱.** میانگین حداکثر پاسخ تغییرشکل نسبی بین طبقات تحت لرزه متوالی در قاب فولادی ۷ طبقه



Fig. 11. Average maximum inter-story drift of 7 story frame under successive shocks

به طور کلی با توجه به اینکه مقادیر و بازهی تغییرات درصدهای آلیاژ حافظهدار شکلی افزوده شده به قاب ۷ طبقه فولادی با مهاربند کمانش تاب کاهش پیدا کرده، لذا عملکرد سازه به لحاظ تغییرشکل نسبی بین طبقه در درصدهای بالاتر تحت لرزه منفرد بهبود یافته و تحت لرزه متوالی تغییرات چندانی مشاهده نمی شود. شاید بتوان دلیل این امر را به دلیل نوع مکانیسم مدلسازی آلیاژ حافظهدار شکلی با مهاربند کمانش تاب (مکانیسم هیبریدی) یا رفتار خود مصالح آلیاژ حافظهدار شکلی به عنوان یک مصالح هوشمند در مقایسه با قاب فولادی ۴ طبقه دانست، که در آن با حافظهدار شکلی رو به افزایش پاسخ حداکثر تغییرشکل نسبی بین طبقات میباشد، اما در مورد قاب ۷ طبقه با توجه میان مرتبه بودن سازه و رفتار نرمتر، آلیاژ حافظهدار شکلی تایا دارد پاسخ حداکثر ماین مرتبه بودن سازه و سختی بیشتر آن تمایل آلیاژ ماین مرتبه بودن میازه و سختی بیشتر آن تمایا آلیاژ ماین مرتبه بودن میازه مورد قاب ۷ طبقه با توجه میان مرتبه بودن مازه و رفتار نرمتر، آلیاژ حافظهدار شکلی تمایل دارد پاسخ حداکثر مازه و رفتار نرمتر، آلیاژ حافظهدار شکلی تمایل دارد پاسخ حداکثر مازه و رفتار نرمتر، آلیاژ حافظهدار شکلی تمایل دارد پاسخ حداکثر مازه و رفتار نرمتر، آلیاژ حافظهدار شکلی تا توجه میان مرتبه بودن

## ۵- میانگین پاسخ تاریخچه زمانی جابهجایی بام

نتایج میانگین پاسخ تاریخچه زمانی جابهجایی بام در قابهای فولادی ۴ و ۷ طبقه در دو حالت کلی بدون آلیاژ حافظهدار شکلی و با درصدهای مختلف آلیاژ حافظهدار شکلی تحت توالی لرزه نخست-لرزه دوم به دست آمده است. مطابق شکل (۱۲) و (۱۳) برای قاب فولادی ۴ طبقه مشخص است، حداکثر جابهجایی بام تحت لرزه نخست رخ داده است و مقدار آن در حالت بدون آلیاژ حافظهدار شکلی ۱۱ سانتیمتر و بیشترین مقدار آن در حالت با ۸۰

DOI: 10.22034/25.2.21

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-08-01

با افزودن درصدهای آلیاژ حافظه دار، مقدار حداکثر جابه جایی بام تحت لرزه نخست نسبت به حالت بدون آلیاژ افزایش یافته و این روند افزایشی تا افزودن ۱۰۰ درصد آلیاژ حافظه دار ادامه داشته، اما در مقایسه بین درصدها، در ۱۰۰ درصد آلیاژ حافظه دار شکلی، مقدار حداکثر جابه جایی بام کاهش ناچیزی داشته است. همچنین با توجه به اعداد قرمز رنگ روی نمودارها مشاهده می شود که با افزودن آلیاژ حافظه دار شکلی مقدار جابه جایی تجمعی پسماند ناشی لرزه نخست – لرزه دوم متوالی به مراتب نسبت به حالت بدون آلیاژ حافظه دار کاهش یافته، و این کاهش تا مقدار ۶۰ درصد آلیاژ حافظه دار ادامه پیدا کرده است. اما در مقادیر مقدار ۱۰۰ درصد در مقایسه با درصدهای دیگر کمی افزایش پیدا کرده است.

بیشترین درصد کاهش با مقدار ۹۴/۴٪ مربوط به حالت با ۶۰ درصد آلیاژ حافظهدار شکلی می باشد. در قاب فولادی ۷ طبقه مطابق شکلهای (۱۴) و (۱۵) حداکثر جابه جایی بام در حالت مجهز به مهاربند کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظهدار شکلی تحت لرزه نخست رخ داده است. بیشترین مقدار آن در حالت بدون آلیاژ حافظهدار شکلی برابر با ۲۴/۴۲ سانتیمتر و در حالت با آلیاژ حافظهدار نیز می باشد.

با افزایش درصدهای آلیاژ حافظهدار شکلی مقادیر حداکثر جابهجایی بام تحت لرزه نخست منفرد تا ۱۰ درصد آلیاژ حافظهدار افزایشی بوده و از ۱۵ تا ۲۵ درصد آلیاژ حافظهدار روند کاهشی ناچیزی داشته است، به گونهای که در ۲۵ درصد مقدار حداکثر جابهجایی بام به ۲۲/۳ سانتیمتر رسیده است.

با افزایش درصدهای آلیاژ حافظه دار شکلی مقادیر حداکثر جابه جایی بام قاب ۷ طبقه فولادی مجهز به مهاربند کمانش تحت لرزه منفرد و متوالی در مقایسه با حالت بدون آلیاژ حافظه دار شکلی کاهش یافته است و این روند کاهشی تا افزودن ۲۵ درصد آلیاژ حافظه دار شکلی ادامه داشته است. همچنین با افزایش آلیاژ حافظه دار در مقایسه با حالت بدون آلیاژ حافظه دار مقادیر جابه جایی تجمعی پسماند ناشی از توالی لرزه نخست و دوم به مراتب کاهش یافته و این کاهش تا ۱۵ درصد آلیاژ حافظه دار شکلی ادامه پیدا کرده است. اما در مقادیر ۲۰ و ۲۵ درصد در مقایسه بین درصدها، کمی افزایش پیدا کرده است که می توان به

**شکل ۱۴**. میانگین پاسخ تاریخچه زمانی جابهجایی بام در قاب فولادی ۷ طبقه بدون آلیاژ حافظهدار شکلی تحت توالی لرزه نخست-لرزه دوم متوالی



Fig. 14. Average displacement of 7 story frame without SMA under successive shocks

**شکل ۱۵**. میانگین پاسخ تاریخچه زمانی جابهجایی بام در قاب فولادی ۷ طبقه با درصدهای مختلف آلیاژ حافظهدار شکلی تحت توالی لرزه نخست-لرزه دوم



Fig. 15. Average displacement of 7 story frame with different SMA under successive shocks

این نتیجه رسید استفاده از درصدهای بالاتر آلیاژ حافظهدار شکلی در یک سازه فولادی میان مرتبه لزوماً جابهجاییهای پسماند تجمعی ناشی از لرزه نخست-لرزه دوم در زلزلههای متوالی را کاهش نمیدهند. این نتیجه برای قابهای فولادی کوتاه مرتبه نیز در بخش مربوط به جابهجایی تجمعی پسماند یکسان میباشد.

# ۶- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه، تعیین درصد بهینه آلیاژ حافظ مدار شکلم, در قابهای فولادی مجهز به مهاربند کمانش تاب تحت زلزلههای متوالی انتخابی در این مطالعه می باشد. نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی در قابهای فولادی ۴ و ۷ طبقه مجهز به مهاربند کمانش تاب نشان میدهد که از نظر میانگین پاسخ حداکثر تغيير شكل نسبى بين طبقه با افزايش درصد آلياژ حافظ هدار شكلي پاسخ حداکثر تغییرشکل نسبی بین طبقات تحت لرزه منفرد و لرزههای متوالی در قاب فولادی ۴ طبقه نسبت به حالت بدون آلیاژ حافظهدار افزایش یافته، و در قاب ۷ طبقه تحت تحت لـرزه منفـرد به خصوص در طبقات ۶ و ۷ کاهش و تحت لرزه های متوالی چندان تغییری نداشته است. از نظر میانگین پاسخ تاریخچه زمانی بام تحت زلزلههای متوالی با افزایش درصد آلیاژ حافظهدار شکلی جابهجایی تجمعی پسماند در هر دو قاب فولادی مجهز به مهاربند كمانش تاب ۴ و ۷ طبقه نسبت به حالت بدون آلياژ حافظ مدار کاهش یافته است، اما در مقایسهی بین درصدهای آلیاژ حافظهدار شکلی در قاب ۴ طبقه فولادی در مقادیر درصدهای ۸۰ و ۱۰۰، و در قاب فولادی ۷ طبقه در مقادیر درصدهای ۲۰ و ۲۵ با کمی

restrained braces. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 21, pp.1-13.

- [5] Jia, M., He, J. and Lu, D., 2022, July. Experimental research of seismic performance of buckling-restrained braced frame with ductile connections. In *Structures*, *41*, pp. 908-924.
- [6] Gholhaki, M., Pachideh, G., Lashkari, R. and Rezayfar, O., 2021. Behaviour of buckling-restrained brace equipped with steel and polyamide casing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 174(8), pp.694-705.
- [7] Veismoradi, S., Cheraghi, A. and Darvishan, E., 2018. Probabilistic mainshock-aftershock collapse risk assessment of buckling restrained braced frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, pp.205-216.
- [8] Morfuni, F., Freddi, F. and Galasso, C., 2019, May.

افزایش جابه جایی تجمعی پسماند روبه رو هستیم. حال برای تعیین درصد بهینه آلیاژ حافظه دار در قابهای فولادی ۴ و ۷ طبقه مجهز به مهاربند کمانش تاب که به ترتیب نماینده ای از سازه های قاب فولادی کوتاه مرتبه و میان مرتبه نیز می باشند و با در نظر گرفتن درصدهای استفاده شده شامل ۲۰، ۴۰، ۴۰، ۶۰، ۱۰ و ۱۰۰ درصد در قاب فولادی ۴ طبقه و درصدهای ۵، ۴۰، ۵۱، ۲۰ و ۲۵ درصد در حداکثر تغییر شکل نسبی بین طبقه و جابه جایی تجمعی پسماند در بام و با هدف نزدیک شدن پاسخ به حد مجاز به دلیل استفاده از مقاطع، درصد بهینه آلیاژ حافظه دار شکلی تحت زلزله های متوالی در قاب فولادی ۷ طبقه ۲۰ درصد و در قاب فولادی ۷ طبقه ۵ بام و با هدف نزدیک شدن پاسخ به حد مجاز به دلیل استفاده از مقاطع، درصد بهینه آلیاژ حافظه دار شکلی تحت زلزله های متوالی در قاب فولادی ۴ طبقه ۲۰ درصد و در قاب فولادی ۷ طبقه ۵ درصد پیشنهاد می گردد. همان طور که مشاهده می شود هرچه ارتفاع طبقات افزایش یافته درصد بهینه آلیاژ حافظه دار نیز کاهش می یابد.

شایان ذکر است که که نتایج به دست آمده براساس زلزلههای متوالی انتخابی در این مطالعه میباشد. در حالی که ممکن است با انتخاب لرزههای متوالی با شرط لرزه اصلی و پسلرزه الزاماً این نتایج حاصل نگردد. از اینرو احتیاط در استفاده از نتایج این مطالعه ضروری به نظر میرسد.

## تعارض منافع

نویسندگان اعلام میکنند که هیچ گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

#### References

- [1] Hoveidae, N. and Radpour, S., 2021. Performance evaluation of buckling-restrained braced frames under repeated earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(1), pp.241-262.
- [2] Yin, Z., Yang, B. and An, S., 2021. Seismic performance analysis of buckling-restrained braced steel frames with ductile castings. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(10), pp.3879-3896.
- [3] Tzimas, A.S., Kamaris, G.S. and Stefopoulos, G., 2019. Seismic analysis and behaviour of mixed MRF/BRB regular steel space frames with uniaxial eccentricity. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *123*, pp.31-35.
- [4] Pei, S., Zhang, Z., Deng, E.F. and Wang, Y.B., 2021. Experimental study on seismic performance of ultrahigh-strength steel frames with buckling-

دانیال صابری و الهام رجبی

Seismic performance of dual systems with BRBs under mainshock-aftershock sequences. In 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13) (Vol. 13). Seoul National University.

- [9] Pandikkadavath, M.S., Mangalathu, S., Oinam, R.M., Kumar, P.A., Sahoo, D.R. and Krishnan, N.A., 2020, September. Drift Response Evaluation of Buckling-Restrained Braced Frames (BRBFs) under Sequential Seismic Disturbances. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 936(1), p. 012040.
- [10] Moradiyan, M., Pachideh, G. and Moshtagh, A., 2022. Study of seismic behavior and development of fragility curves of divergent braced frames under successive earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 4), pp.156-175.
- [11] Ghowsi, A.F. and Sahoo, D.R., 2020. Seismic performance of nine-story self-centering bucklingrestrained braced frames. In *Structural Integrity Assessment: Proceedings of ICONS 2018*, pp. 801-813.
- [12] Gong, C., Jia, M., Cheng, X. and Gritcuk, M., 2022, March. Seismic performance of buckling-restrained braced steel frames subjected to earthquake main shock-aftershock sequences. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2230(1), p. 012026.
- [13] Nazarimofrad, E. and Shokrgozar, A., 2019. Seismic performance of steel braced frames with self-centering buckling-restrained brace utilizing superelastic shape memory alloys. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(16), p.e1666.
- [14] Jalalvandi, M., Soraghi, A., Farooghi-Mehr, S.M., Haghollahi, A. and Abasi, A., 2023. Study and Comparison of the Performance of Steel Frames with BRB and SMA Bracing. *Structural Engineering International*, 33(3), pp.413-424.
- [15] Sadeghipour, A. and Khorramabadi, R., 2023. Analyzing the Explosive Behavior of a Buckling Restrained Brace Frame Made of Shape Memory

Alloy by Using Finite Element Method. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 12(09), pp. 144-155.

- [16] Huang, Y., Xu, G., Zhang, Y., Zhou, Z. and Ke, K., 2024. Seismic behaviour of self-centring hybrid steel frames equipped with SMA plates under mainshock– aftershock sequences. *Case Studies in Construction Materials*, 20, p.e02875.
- [17] Khosravikhor, A., Gholhaki, M., Rezaifar, O. and Pachideh, G., 2023. Effect of Ni-Ti shape memory alloy on ductility and response modification factor of SPSW systems. *Steel and Composite Structures*, 48(3), p.353-365.
- [18] Hoveidae, N. and Radpour, S., 2021. A novel all-steel buckling restrained brace for seismic drift mitigation of steel frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *19*, pp.1537-1567.
- [19] Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R. and DeVall, R., 2006. Seismic testing and performance of bucklingrestrained bracing systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2), pp.183-198.
- [20] Tazarv, M. and Saiid Saiidi, M., 2015. Reinforcing NiTi superelastic SMA for concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 141(8), p.04014197.
- [21] aftali, B., 2007. Probabilistic seismic demand assessment of steel frames with shape memory alloy connections. PhD. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- [22] Ghodrati Amiri, G. and Rajabi, E., 2017. Damage evaluation of reinforced concrete and steel frames under critical successive scenarios. *International Journal of Steel Structures*, *17*, pp.1495-1514.
- [23] Abdollahzadeh, G., Mohammadgholipour, A. and Omranian, E., 2019. Seismic evaluation of steel moment frames under Mainshock–aftershock sequence designed by elastic design and PBPD methods. *Journal of Earthquake Engineering*, 23(10), pp.1605-1628.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Saberi, D. and Rajabi, E., 2025. The Optimal Percentage of Shape Memory Alloy in Steel Structures Equipped with Buckling Restrained Brace (BRB) under Successive Earthquakes. *Modares Civil Engineering journal*, 25(2), pp.21-34.

DOI: 10.22034/25.2.21