بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتن‌آرمه به کمک مهاربندهای مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

نویسنده:
آتشی امیر

چکیده:

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتن‌آرمه مجهز به مهاربندهای حاوی آلیاژهای حافظه‌دار بررسی شده است؛ بدین منظور، ابتدا با انتخاب یک مقاله مرجع معتبر، یک قاب بتن‌آرمه دارای مهاربند فولادی معمولی تحت بارگذاری لرزه‌ای تحلیل و نتایج آن با نتایج گزارش‌شده در مقاله مرجع مقایسه شد تا صحت‌سنجی مدل عددی انجام گیرد. سپس، شش مدل عددی دیگر با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و تحلیل شدند که شامل سازه‌های ۳، ۹ و ۱۵ طبقه بودند و در هر یک، مهاربندها در دو حالت فولاد معمولی و آلیاژ حافظه‌دار در نظر گرفته شدند. در تمامی مدل‌ها، مشخصات مکانیکی بتن و میلگردها یکسان فرض شد و تنها پارامترهای متغیر، تعداد طبقات و نوع فولاد مورد استفاده در مهاربندها بودند. تمامی نمونه‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای بر اساس یک پروتکل استاندارد قرار گرفتند و در پایان تحلیل، پارامترهایی نظیر توزیع تنش، جابه‌جایی جانبی و ظرفیت باربری استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در مهاربندهای سازه‌های بتن‌آرمه می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای موجب کاهش تنش‌ها و جابه‌جایی‌های باقیمانده پس از بارگذاری لرزه‌ای شود، به‌طوری‌که به‌کارگیری این آلیاژها منجر به کاهش تنش تا حدود ۵۰ درصد و کاهش جابه‌جایی باقیمانده تا حدود ۹۰ درصد شده و در نتیجه، نیاز به ترمیم سازه پس از زلزله‌های شدید به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد.

Enhancement of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Structures Using Braces Equipped with Shape Memory Alloys

Abstract

In this study, the seismic performance of concrete structures equipped with braces containing shape memory alloys (SMAs) was investigated. To achieve this, a reference article was selected, and a reinforced concrete frame with conventional steel bracing was modeled and subjected to loading. The obtained results were then compared with those reported in the reference article to validate the modeling approach. Following the validation, six additional models were simulated and analyzed using ABAQUS software. The models included 3-, 9-, and 15-story structures, each analyzed under two conditions: once with conventional steel braces and once with SMA braces.

All specimens featured concrete and reinforcement with identical material properties; the only variables were the number of stories and the type of bracing material (conventional steel or SMA). All models were subjected to seismic loading according to a standard loading protocol. After completing the analyses, the stress distribution, displacement, and load-carrying capacity were extracted and compared among the samples.

The results demonstrated that employing SMAs in the bracing systems of concrete structures significantly enhanced their seismic performance by reducing residual stresses and displacements at the end of the loading. The need for post-earthquake repairs was notably decreased when SMAs were utilized. Specifically, the application of SMAs led to up to a 50% reduction in residual stresses and up to a 90% reduction in residual displacements.

Keyword: Seismic Behavior, Reinforced Concrete Structure, Brace, Shape Memory Alloy, ABAQUS

۱- مقدمه

بتن به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی، نزدیک به دو قرن است که در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود این سابقه طولانی، توجه به دوام بتن به‌عنوان یکی از معیارهای اصلی طراحی و اجرا، عمدتاً از چند دهه اخیر مورد توجه طراحان و سازندگان قرار گرفته است. سازه‌های ساختمانی در هنگام وقوع زلزله تحت اثر نیروهای لرزه‌ای دچار تغییرمکان می‌شوند که این تغییرمکان‌ها غالباً از نوع جانبی هستند و به‌وسیله سیستم‌های مقاوم باربر جانبی نظیر دیوارهای برشی، مهاربندها و قاب‌های خمشی مهار می‌گردند. در این میان، استفاده از مهاربندهای فلزی در سازه‌های بتن‌آرمه به دلیل سهولت اجرا، صرفه اقتصادی و قابلیت مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی موجود و ضعیف در برابر زلزله، طی چند دهه اخیر بیش از دیوارهای برشی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است که این تحقیقات همچنان در حال توسعه و تکامل می‌باشند [۱-۳].

آلیاژهای حافظه‌دار به‌عنوان یکی از مواد هوشمند پیشرفته، به دلیل قابلیت بازگشت به شکل اولیه، نقش مهمی در توسعه نسل جدید مصالح مهندسی ایفا می‌کنند. خاصیت حافظه‌داری در این آلیاژها به توانایی بازیابی شکل یا ابعاد اولیه پس از طی یک چرخه حرارتی اطلاق می‌شود. این مواد، به‌عنوان گروهی نوین از مصالح مهندسی، قابلیت تبدیل انرژی گرمایی به انرژی مکانیکی را دارا بوده و با حفظ شکل اولیه، پس از اعمال تغییرشکل قادر به بازگشت به وضعیت اولیه خود هستند. مکانیزم اصلی این رفتار در آلیاژهای حافظه‌دار مبتنی بر تحول فازی مارتنزیتی است. به‌طور مشخص، پدیده حافظه‌داری بدین‌صورت تعریف می‌شود که اگر نمونه‌ای در حالت کاملاً مارتنزیتی تا مقدار معینی تغییرشکل یابد، با اعمال حرارت و بازگشت ریزساختار به فاز برگشتی، شکل اولیه نمونه بازیابی می‌گردد [۴-۶].

در چند دهه اخیر، بررسی رفتار مواد از لحاظ شکل‌پذیری و مقاومت به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای و مقاوم‌سازی سازه‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از این مواد، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی هستند که به دلیل دو ویژگی ذاتی خود، یعنی اثر فوق‌ارتجاعی (بازگشت کرنش باقیمانده پس از باربرداری) و اثر حافظه‌ی شکلی (بازگشت کرنش باقیمانده با اعمال حرارت)، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. با توجه به قرار گرفتن ایران در کمربند زلزله و وقوع سالانه زلزله‌های متعدد، برخی از آن‌ها نسبتاً شدید و موجب خسارات جانی و مالی قابل‌توجه می‌شوند، ضرورت مقاوم‌سازی سازه‌ها به‌وضوح احساس می‌شود. از آنجایی که بتن به‌عنوان یکی از مصالح پرکاربرد در سازه‌ها و ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و در عین حال دارای ضعف‌هایی به ویژه در ناحیه کشش و خمش است، لازم است سازه‌های بتنی با استفاده از روش‌های مختلف مقاوم‌سازی شوند. همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، ساختمان‌ها در هنگام وقوع

ادامه در صفحه بعد

زلزله تحت اثر نیروهای جانبی قرار گرفته و دچار تغییرشـــکل‌های قابل‌توجه می‌شوند. به منظور کنترل و مهار این تغییرشکل‌های جانبی، معمولاً از سیستم‌های مقاوم جانبی نظیر دیوارهای برشی، مهاربندها و قاب‌های خمشی استفاده می‌شود [۷-۹].

در ساختمان‌های با سیستم سازه‌ای قاب خمشی، عمده شکل‌پذیری در نواحی انتهایی تیرها، با تشکیل مفاصل پلاســـتیک به هنگام تغییرشکل‌های بزرگ در حین زلزله تأمین می‌گردد. با توجه به ماندگاری تغییرشـــکل‌های پســـماند در ســـازه، پس از وقوع زلزله در سازه‌های رایج و عدم امکان بهره‌برداری از آن‌ها، استفاده از رفتار هوشمند فلزها و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، به‌جای میلگردهای طولی در تیرهای بتنی، موردتوجه محققان قرارگرفته اســـت. از مهم‌ترین ویژگی‌های بارز آلیاژهای حافظه‌دار شـــکلی، قابلیت حفظ شکل اولیه در کرنش‌های کمتر از ۸ درصد، خاصیت فوق ارتجاعی و کاهش تغییرشـــکل‌های پسماند می‌باشد. ازجمله این مصالح هوشمند می‌توان به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) اشاره نمود. به‌واســـطه‌ی قرارگیری اکثر مناطق کشور در پهنه‌بندی با خطر لرزه‌خیزی بالا، لزوم بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی امری لازم می‌باشد. عملکرد سازه‌های بتنی مسلح، به طرز چشـــمگیری وابسته به نحوه‌ی اجرای اتصال و اعضای متصل به آن مانند تیر و ستون اســـت. راهکارهای مختلفی برای تقویت اتصالات در سازه‌های بتنی وجود دارد. سعادتی و نوری [۱۰]، با استفاده از صفحات FRP محصورکننده برای بهبود خواص مکانیکی اتصالات تحت اثر بارهای چرخه‌ای رفت و برگشتی، به کمک اجزای محدود مطالعاتی صورت گرفته است. به کمک نرم‌افزار آباکوس، مدل‌ها مورد آنالیز واقع‌شده‌اند و با نتایج آزمایشگاهی مورد صحت ســـنجی قرارگرفته‌اند. در این مقاله ســـه نمونه اتصال تیر به ستون،یکی بدون ورق تقویتی FRP، اتصال تیر به ستون با ورق تقویتی FRP در تیر و اتصال تیر به ستون با ورق تقویتی FRP در ستون مورد آنالیز و بررسی قرارگرفته‌اند.

ظفر و آنداوز به بررسی روند تولید مفصل و رفتار تجربی ترکیب کامپوزیت آلیاژ حافظه‌دار شکلی-پلیمری مســـتحکم فیبری پرداختند. در پژوهش آن‌ها، عملکرد تحلیلی و تجربی میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شـــکلی-پلیمری مســـتحکم فیبری در ساختارهای بتن مسلح به پلیمر-فیبر بررسی شـــد، به‌ویژه هنگامی که این سازه‌ها تحت دنباله‌های پس‌لرزه و زلزله اصلی قرار گرفتند، و نتایج حاصل با عملکرد میله‌های فولادی سنتی مقایسه گردید [۱۱]. سیستم‌های هوشـــمند در مهندسی سازه، سیستم‌هایی هستند که به‌طور خودکار قابلیت انطباق رفتار ســـازه در پاســـخ به بارگذاری غیرمترقبه را دارا می‌باشند تا ایمنی، طول عمر و کارایی ســـازه تأمین شود. یکی از فناوری‌های نوین که دستیابی به این اهداف را ممکن می‌ســـازد، توسعه و استفاده از مواد هوشـــمند است. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نمونه‌ای از این مواد هستند که خاصیت سوپرالاستیک دارند. یکی از کاربردهای این آلیاژها در کنترل غیرفعال سازه‌ها، استفاده از آن‌ها به‌صورت میراگرهای چهارضلعی مفصلی است. به‌کارگیری مواد سوپرالاستیک در این نوع سیستم‌های استهلاک انرژی، باعث افزایش شکل‌پذیری و، مهم‌تر از آن، ایجاد قابلیت بازگردانندگی می‌شود و در نتیجه عملکرد لرزه‌ای قابل قبولی از سازه ارائه می‌کند. تمجید و همکاران [۱۲]

به‌منظور مقایســـه و بررسی لرزه‌ای، با اســـتفاده از نرم‌افزار آباکوس، سیستم چهارضلعی مفصلی را شبیه‌سازی نمودند و این سیستم را با سیستم‌های مهاربند ضربدری در سه‌طبقه مقایسه نمود. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که سیستم چهارضلعی مفصلی، عملکرد لرزه‌ای متفاوتی نســـبت به سیستم مهاربند ضربدری دارد و استفاده از این آلیاژ جابجایی پسماند طبقـــات را کاهش می‌دهد. در ضمن در طبقات پایین‌تر که نزدیک به ســـطح زمین اجرا می‌شود فونداسیون این نوع سازه، مقاومت بیشتری در مقایسه با نوع دیگر مهاربندی از خود نشـــان می‌دهد. رفتار حافظه شکلی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، این امکان را برای آن‌ها به وجود می‌آورد که پس از باربرداری با اعمال تنش و یا دما کرنش‌های پسماند خود را حذف کنند. از این خاصیت می‌توان جهت پیش فشرده کردن دیوارها استفاده نمود. هدف از این مقاله بررسی اثر استفاده از خاصیت حافظه شکلی مواد حافظه‌دار شکلی در دیوارهای برشی با درصدهای مختلف کاربرد میلگرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌باشد. همچنین اثر استفاده از خاصیت حافظه شـــکلی مواد قبل از بارگذاری و اثر پیش‌فشردگی بتن توسط این خاصیت موردبررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، رفتار مدل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از پژوهش قاسمیه و همکاران [۱۳]، نشـــان داد که، کرنش‌های پسماند در صورت اســـتفاده از میلگردهای آلیاژ حافظه شـــکلی مارتنزایتی کاهش می‌یابد که البته پیش‌کشیدگی قبل از بارگذاری براساس رفتار حافظه شکلی ضمن افزایش این اثر، موجب افزایش مقاومت نیز می‌گردد.

روش‌هـــای کنتـــرل غیرفعال با کاهش نیاز لـــرزه‌ای و افزایش شـــکل‌پذیری ، میزان آســـیب‌پذیری سازه‌ها را در برابر زلزله کاهش می‌دهند. یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل غیرفعال، اســـتفاده از تیر پیوند قائم می‌باشد که به‌عنوان یک عضو فرعی و فیوز شکل‌پذیر در ســـازه عمل می‌نماید. تیر پیوند قائم به‌صورت قائم بین گره دو مهاربند شـــورون و بال تیر کف نصب می‌شـــود و با جاری شدن برشی جان آن ، انرژی زلزله مستهلک‌شده و سایر عناصر سازه الاستیک باقی می‌مانند . ویمی [۱۴]، در پژوهش خود به بررسی، تأثیر استفاده از این سیســـتم قـــاب مهاربندی خارج از مرکز با تیر پیوند قائـــم مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شـــکلی (SMA) در افزایش شکل‌پذیری و اســـتهلاک انرژی اعمال‌شده به سازه پرداخت. آلیاژهای حافظه‌دار شـــکلی، به علت دارا بودن ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود ازجمله رفتار فوق الاســـتیک و حافظه‌داری شکلی و نیز خصوصیاتی مانند ظرفیت استهلاک بالا، دوام و مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، کاربردهای مختلفی درزمینه‌های مهندسی سازه دارند که از آن جمله می‌توان به مهاربندهایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی که به‌عنوان میراگر عمل می‌کنند اشـــاره نمود . وی در پژوهش خود، ۳۸۴ مدل قاب مجهز به این سیستم با میزان مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی با درصد ۸۰ ، ۶۰ ، ۴۰ ، ۲۰ ، ۰ و ۱۰۰ درصد را تهیه نمود. تحلیل با استفاده از دینامیکی غیرخطی انجام شد که با تاریخچه زلزله ال‌سنترو و با شتاب حداکثر ۰g/۶ و با استفاده از نرم‌افزارOpensees مدل‌سازی و تحلیل شد. نتایج مطالعات نشـــان داد که اســـتفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی برای مهاربندهای ترکیبی مقادیر بهینه‌ای را حاصل می‌دهد.

صفری در پژوهش خود به بررســـی سازه مهاربندی‌شده با استفاده از مهاربند ضربدری پرداخت. سیســـتم مهاربند خیمه‌ای ازجمله قاب‌ها با مهاربند هم‌محور می‌باشد که از سه عضو تشکیل‌شده و با چیدمانی Y شکل می‌تواند موجب فراهم آوردن بازشوهای موردنیاز در ساختمان گردد و به‌این‌ترتیب محدودیت دیگر سیستم‌های مهاربندی را در این زمینه برطرف می‌کند. او برای صحت‌ســـنجی مدل‌های موردبررســـی، از مدل‌های عددی سهیل مجید زمانی و مصطفی رســـولی اســـتفاده نمود. در این پژوهش ابتدا سازه‌های یک، دو و ســـه‌طبقه با استفاده از فولاد معمولی ســـاختمانی، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و مقادیر جابجایی نســـبی طبقات و جابجایی باقیمانده بام حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به دست آمد. ســـپس با جایگزینی SMA به‌جای فولاد ساختمانی معمولی در اعضای مهاربندی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی روی مدل در نرم‌افزار آباکوس انجام‌شده و نتایج حاصل با نتایج به‌دست‌آمده از قاب مهاربندی‌شده با مهاربند فولادی معمولی مورد مقایســـه قرارگرفته است. در این مطالعه سازه‌های ۱، ۲ و ۳ طبقه با طول دهانه‌های چهار و شـــش متری تحت سه زوج شتابنگاشـــت زمین‌لرزه در دو جهت متعامد قرار گرفت. در قاب‌های مدل‌سازی شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، به علت قدرت خود بازگردانندگی و اتلاف انرژی بالای این آلیاژها، مشاهده شد که میزان جابجایی باقیمانده طبقات در این نوع قاب‌ها نسبت به قاب‌های مدل شده با فولاد معمولی کمتر است، ولی تأثیر آن در جابجایی نسبی بین طبقات کم می‌باشد[۱۵].

یکـــی از روش‌هـــای معمول برای مقاوم‌ســـازی قاب‌های بتنی که در ســـال‌های اخیر موردتوجه محققین قرارگرفته، استفاده از روش‌های مهاربندی فولادی با خروج از مرکزیت (واگرا) می‌باشـــد. از انواع مختلف مهاربند واگرا می‌توان بـــه مهاربندی‌های خارج از مرکز فولادی با پیوند قائم تک و جفت اشـــاره کرد. امروزه اســـتفاده از مصالح هوشمند سازه‌ها موردتوجه بســـیاری از متخصصین سازه قرارگرفته اســـت. از متعارف‌ترین مواد هوشمند، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMAs) می‌باشند که یکی از کاربردهای آن استفاده در مهاربند سازه‌هاست. یزدخواه و خسروی، به بررسی تأثیر مواد حافظه‌دار در قاب‌های بتنی با مهاربند

ادامه در صفحه بعد

واگرا دارای پیوند قائم جفت با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشـــان داد که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در اعضای مهاربند باعث بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتن آرمه و کاهش تغییر مکان جانبی خواهد شد [۱۶].

گوغری در پژوهش خود، به بررسی رفتار اتصالات تیر و ستون از جنس فولاد و اتصالات تیر و ستون مجهز به پیچ‌های سوپرالاستیک آلیاژهای حافظه‌دار، در یک بارگذاری سیکلی پرداخت. خاصیت‌های برگشت‌پذیری به شکل اولیه (سوپرالاستیک) و بازیابی کرنش‌های بزرگ با افزایش دما (حافظه‌داری) از ویژگی‌های شـــاخص آلیاژهای حافظه‌دار هست که می‌توان از آن‌ها برای تقویت اتصالات بهره برد. در این مطالعه برای مدل‌سازی اتصالات از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۶/۱۴ استفاده‌شده است. پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش، اثر نیرو، اثر قطر پیچ و ضخامت ورق میانی بر پاسخ نمودار تنش-کرنش در پیچ‌ها می‌باشد. نتایج نشـــان می‌دهد که با اعمال نیرو، تنش در پیچ‌های سوپرالاستیک SMA نسبت به پیچ‌های فولادی بیشـــتر است و کرنش‌های باقی‌مانده در پیچ‌های فولادی نسبتاً بزرگ و ماندگار هستند درحالی‌که این کرنش‌ها در پیچ‌های SMA تقریباً صفر است [۱۷].

طاهری و اســـتری در پژوهش خود به بررســـی رفتار لرزه‌ای سیســـتم‌های فولادی مجهز به مهاربندهای زانویی که با یک عضو زانویی به تیر و ســـتون قاب متصل شـــده‌اند، پرداختند. برای صحت سنجی مدل ساخته‌شده نیز، پاسخ مدل با مدل آزمایشگاهی دکتر زهرایی و مدل ساخته‌شـــده در نرم‌افزارANSYS توسط دکتر زهرایی مقایسه شده است. در این تحقیق، عضو زانویی از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شـــکلی (SMA) بود. به همین منظـــور، ابتدا قاب‌های مهاربندی ۳ و ۶ و ۹ و۱۲ طبقـــه به‌صورت دوبعدی، با دهانه‌های ۳، ۴/۵ و ۶ متر مدل‌ســـازی شدند. همچنین برای مقایسه، همین قاب‌ها با عضو زانویی از جنس فولاد معمولی مدل‌ســـازی گردیدند. این کار توسط نرم‌افزار OpenSees انجام‌شده اســـت و میزان دریفت طبقات، جابجایی باقیمانده بام، ضریب رفتار اســـتاتیکی و میزان شکل‌پذیری سازه‌ها محاســـبه گردید. پاسخ‌های لرزه‌ای سیستم نوین لرزه‌بر با پاسخ‌های حاصل از سازه مهاربندی‌شده با فولاد معمولی مورد مقایسه و ارزیابی قرارگرفته است. در قاب‌های مدل‌سازی شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، به علت قدرت خود بازگردانندگی و اتلاف انرژی بالای این آلیاژها، مشاهده شد که میزان جابجایی باقیمانده طبقات در این نوع قاب‌ها نسبت به قاب‌های مدل شده با فولاد معمولی کمتر است. همچنین تأثیر طول عضو زانویی، اندازه دهانه‌ها و تعداد طبقات قاب، بر عملکرد لرزه‌ای ســـازه مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شـــکلی بررسی‌شده است [۱۸]. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی کاربردهای متنوعی در مهندسی ســـازه دارند. استفاده از این مصالح به‌عنوان میراگر در مهاربندها نمونه‌ای از کاربردها می‌باشد. هرچند تحقیق در مورداســـتفاده از این آلیاژها به‌عنوان میراگر بیشتر شده اســـت، اما این میراگرها به دلیل داشتن هزینه‌های ساخت بالا، خیلی جنبه اجرایی به خود نگرفته و بیشـــتر حالت تحقیقاتی دارند. هوشمند و همکاران، در پژوهش خود به بررسی مهاربندهایی ترکیبی از جنس فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار پرداخت. به‌طوری‌که این مهاربندهای ترکیبی، هم ازلحاظ اقتصادی قابل توجیه باشند و هم ازلحاظ عملکرد لرزه‌ای، رفتار قابل قبولی را داشته باشند. به همین دلیل از شش مدل مهاربند ترکیبی استفاده‌شده اســـت که در این مدل‌ها میزان مصرف طولی آلیاژ حافظـــه‌دار به ترتیب صفر ، ۲۰ ، ۴۰ ، ۶۰ ، ۸۰ و ۱۰۰ درصد می‌باشـــند. بـــرای ارزیابی مدل‌ها از تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده‌شده است که تحت زلزله ال‌سنترو مقیاس شده با شتاب‌های حداکثر ۰/۶ g و ۰/۹ g قرارگرفته‌اند و در نرم‌افزار ANSYS v11 مدل‌سازی و تحلیل گردیده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که می‌توان با استفاده از طرح ارائه‌شده، سازه‌هایی با رفتار لرزه‌ای مناسب و با هزینه ساخت قابل توجیه طراحی و اجرا نمود [۱۹].

صدیق و همکاران [۲۰]، ایمنی فروپاشـــی لرزه‌ای و ضریب اصلاح پاسخ در سازه‌های بتنی تقویت شـــده با میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی را بررسی نمودند. آنها در پژوهش خود با اســـتفاده از نسبت حد فروپاشی به بررسی رفتار این سازه‌ها پرداختند. نسبت حد فروپاشی به صورت نسبت شدت حرکت زمین در فروپاشی متوسط سازه به شدت حرکت زمین در زمان زمین‌لرزه در دوره نتاوب ســـازه می‌باشد. آنها در پژوهش خود با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی و با استفاده از ۲۰ شتابنگاشت زلزله به تجزیه و تحلیل فروپاشی ســـازه مذکور پرداختند. نتایج نشـــان دهنده افزایش ظرفیت فروپاشی سازه با استفاده از میلگردها ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی بود.

اودال و ال هاچا [۲۱]، به بررســـی عملکرد اتصال تیر و ســـتون بتنی تقویت شـــده با میلگرد های آلیاژ حافظه‌دار شکلی پرداختند. نتایج پژوهش انها نشان از تاثیر بسیار زیاد میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در بهبود رفتار اتصال تیر به ستون بتنی بود.

عبدولریدها و همکاران [۲۲]، به بررسی تیر بتن آرمه تقویت شده با میلگردهای از نوع آلیاژ حافظه‌دار شـــکلی به عنوان تقویت کننده کششی به صورت آزمایشگاهی، پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشـــان دهنده بهبود ظرفیت اتلاف انرژی و همچنین تغییر شکل‌های دائمی کمتر به اســـتفاده از میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شـــکلی بود. ال- هاچا و همکاران [۲۳]، به بررسی رفتار ستون‌های دایره‌ای بتن آرمه دارای میلگرد هایی از آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت بارگذاری خارج از مرکز پرداختند. آنها بیان نمودند که آلیاژ حافظه‌دار شکلی اخیراً برای تقویت و تعمیر ســـازه‌های بتنی مورد اســـتفاده قرار می‌گیرد. آنها در پژوهش خود به اســـتفاده از میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در ســـتون‌های دایروی بتن آرمه پرداختند. نتایج این پژوهش نشـــان داد که اســـتفاده از این مواد مقاومت و شکل‌پذیری بتن را افزایش می‌دهد. نهر و همکاران [۲۴]، به بررسی و ارزیابی ایمنی فروپاشی لرزه‌ای اتصال تیر به ستون بتنی تقویت شده با انواع میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی پرداختند. آنها در پژوهش خود به بررسی ۵ نوع اتصال تیر به ستون تقویت شده با میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی پرداختند و نتایج را با اتصال دارای میلگردهای ساده مقایسه نمودند. آنها از طریق تحلیل دینامیکی افزایشی، منحنی‌های شـــکنندگی فروپاشی را در این سازه‌ها یافته و تحلیل‌های خود را ابا اســـتفاده از ۲۰ شتابنگاشت زلزله انجام دادند. نتایج نشان از بهبود ایمنی فروپاشی از ۲۵ تا ۶۰ درصد با به کار بردن میلگردهای دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی داد.

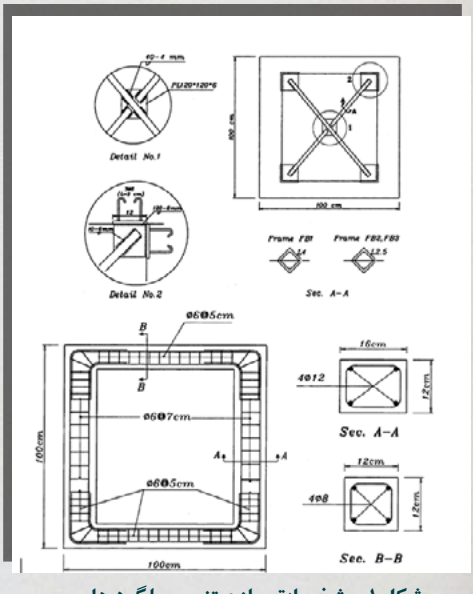
در این میان، مهاربند فلزی در سازه‌های بتن‌آرمه به دلیل اجرای آسان، مسائل اقتصادی و امکان مقاوم‌ســـازی ساختمان‌های بتنی، کاربردهای فراوانی را دارند. مهاربندهای فلزی دارای شکل‌های مختلفی هستند. در این پژوهش با توجه به توضیحات ارائه‌شده، به بررسی رفتار یک سازه بتنی با قاب‌های مهاربندی‌شده در ساختمانی با تعداد طبقات مختلف در دو حالت مهاربندی‌هایی از جنس فولاد کمانش پذیر بدون آلیاژحافظه دار و فولاد کمانش پذیر مجهز به آلیاژحافظه دار پرداخته خواهد شـــد و رفتار این دو ســـازه تحت بار لرزه‌ای ازنظر تغییر مکان جانبی، حداکثر تغییر مکان بین طبقات و ... موردبررســـی قرار خواهد گرفت.

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- شبیه‌سازی نمونه صحت‌سنجی

جهت صحت سنجی نتایج و درست بودن روند حل در این بخش سازه شبیه‌سازی‌شده در مقاله ماهری و همکاران [۲۵]، بـــرای هـــر دو حالت بـــدون مهاربنـــد و دارای مهاربنـــد همگـــرای نوه X مدل‌ســـازی خواهد شـــد و نمـــودار بـــار - جابه‌جایـــی مربوطه جهت صحت سنجی استخراج می‌شود. این سازه یک دهانه و یک طبقه دارای

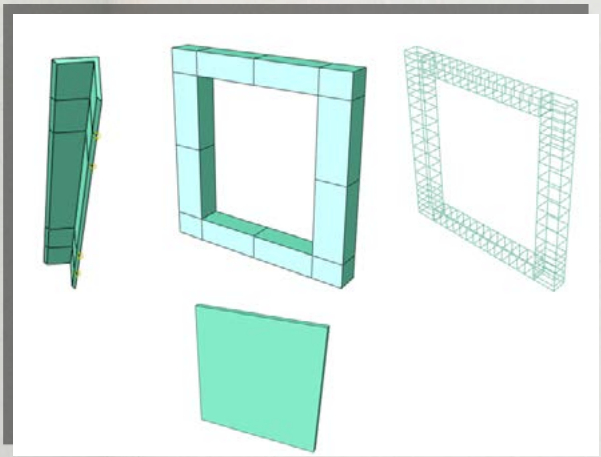
ادامه در صفحه بعد



شکل ۱. مشخصات سازه بتنی و میلگردها و خاموت‌های به‌کاررفته در مدل مرجع [۲۰]

ابعاد ۱ متر در یک متر بوده که در دو ناحیه در بخش‌های پایین سازه بسته‌شده و با یک نیروی جانبی نیز از سمت چپ به سازه وارد می‌شود. هندسه به‌کاررفته در این سازه در شکل ۱، ارائه‌شده است.

همان‌طور که در شکل ۳-۱، مشاهده می‌شود سازه بتنی دارای ابعاد ۱متر در ۱ متر می‌باشد و به عبارتی همان‌طور که در مرجع [۲۵]، توضیح داده‌شده به دلیل محدودیت‌های موجود در تست نمونه، از مقیاس ۱ به ۳ برای نمونه آزمایش‌شده استفاده‌شده است. ستون‌های بتنی در این مدل دارای ابعاد ۱۲*۱۶ سانتی‌متر و تیرها دارای ابعاد ۱۲*۱۲ سانتی‌متر می‌باشد. جزئیات نوع میلگرد ها و خا موت‌ها و فاصله بین آن‌ها نیز در شکل ۳-۱ به‌طور کامل نشان داده‌شده است. مهاربند به‌کاررفته در این مدل، مهاربند همگرایی از نوع X می‌باشد که از پروفیل‌ها L شکل با ابعاد ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر ساخته‌شده است. پلت‌های قرارگرفته بر ۴ گوشه و همچنین ورق مرکزی دارای ابعاد ۱۲۰*۱۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر می‌باشد. مدل موردنظر برای شبیه‌سازی که در شکل ۱، ارائه‌شده است از یک جزء بتنی که شامل ۲ تیر و دو ستون می‌باشد به همراه ۵ ورق ۱۲*۱۲ سانتی‌متری با ضخامت ۶ میلی‌متر و ۲ جزء L شکل تشکیل‌شده است. میلگرد های داخل بتن نیز به‌صورت مجزا مدل‌سازی شده است. در شکل۲، قطعات به‌کاررفته در مدل نشان داده‌شده‌اند.



شکل ۲. شماتیکی از قاب بتنی، میلگرد بندی، مهاربند و ورق متصل کننده در مدل

برای شبیه‌سازی بتن از مدل آسیب پلاستیک بتن استفاده‌شده است. در این مدل باید علاوه بر خواص چگالی و خواص ناحیه الاستیک، خواص مربوط به نمودار تنش - کرنش فشاری و کششی همچنین پارامترهای آسیب در آن‌ها وارد شود. این پارامترهای برای بتن متناسب با آیین‌نامه ACI ۳۱۸-۱۴ از مرجع [۲۶] استخراج‌شده است.

جدول ۱. چگالی و خواص ناحیه الاستیک بتن [۲۶]

جدول 1 .چگالی و خواص ناحیه الاستیک بتن [26]

چگالی (Kg/m3)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
2400	23	0/2

جدول 2 .پارامترهای مدل خسارت پلاستیک بتن [26]

Delation Angle	Eccentrivity	fb0/fco	K
15	0/1	1/16	0/6667

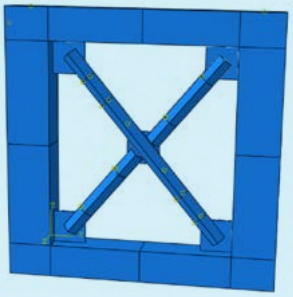
میلگرد ها و خاموت‌ها و فولادهای به‌کاررفته در بخش‌های مهاربند همگرا و همچنین صفحات به‌کاررفته در محل اتصال مهاربند و بتن از جنس فولاد ساختمانی یا ST۳۷ می‌باشد که خواص مکانیکی آن در جدول ۳، ارائه‌شده است.

جدول ۳ .چگالی و خواص الاستیک فولاد به‌کاررفته در میلگرد ها و قطعات فلزی مدل

چگالی (Kg/m3)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
7890	210	0/3

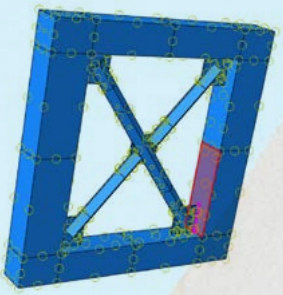
بعد از کشیدن قطعات و تخصیص مواد به هر بخش نوبت مونتاژ مدل می‌رسد. مدل مونتاژی از سازه بتنی با مهاربند همگرای نوع X در شکل ۳، نشان داده‌شده است.

شکل ۳. مدل مونتاژی سازه بتنی مرجع [۲۰] با مهاربند همگرای نوع X



برای اتصال صفحات ورق به بخش بتنی و همچنین اتصال قطعات مربوط به مهاربند همگرا به این ورق‌ها از قید پیوند در نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید. قید پیوند مانند جوش دادن دو قطعه به همدیگر عمل می‌کند. نمونه‌ای از یک بخش که قید پیوند بر روی آن اعمال‌شده در شکل ۴، نشان داده‌شده است.

شکل ۴. نمونه‌ای از یک بخش سازه دارای قید پیوند

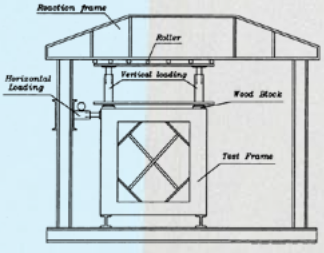


قید دیگری که در این بخش از آن استفاده‌شده است قید مدفون سازی میلگرد های درون بخش بتنی می‌باشد که برای این منظور از قید Embedded Region استفاده‌شده است. که با انتخاب تمام میلگرد ها و در مرحله بعد سازه بتنی عملیات مسلح سازی و مدفون سازی این میلگرد ها در دل بتن در نرم‌افزار صورت می‌پذیرد. شکل ۵، بخشی که این قید درون آن اعمال‌شده است را نشان می‌دهد.

شکل ۵. محل اعمال قید Embedded Region

بارگذاری و شرایط مرزی مطابق با آنچه در مقاله مرجع [۲۵] ارائه‌شده بود پیاده‌سازی شد. نحوه بارگذاری و شرایط مرزی ارائه‌شده در مرجع [۲۵] در شکل ۶، ارائه‌شده است.

شکل ۶. نحوه بارگذاری و شرایط مرزی در مرجع [۲۵]

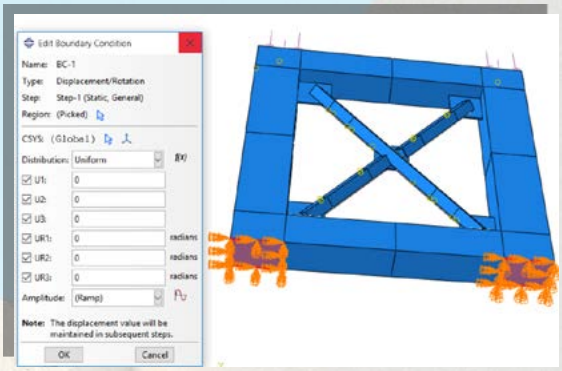


برای همین منظور ابتدا مطابق با شکل ۷، دو گوشه پایین مدل بسته‌شده است. در گام بعدی دونیروی فشاری مطابق با جک‌های اعمال کننده نیرو برای برقراری تعادل در هنگام جابه‌جایی و شباهت سازه با بارگذاری واقعی از سمت بالا به سازه واردشده است. مقدار این نیرو تأثیر زیادی درروند حل

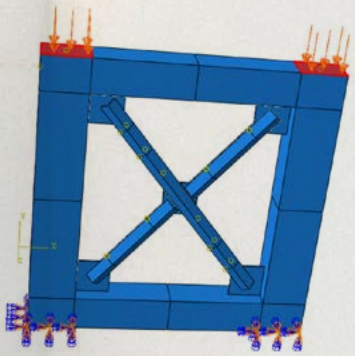
ادامه در صفحه بعد

نداشته و صرفاً برای برقرار تعادل سازه در هنگام اعمال بارگذاری می‌باشد.

شکل۷. بسته شدن دو گوشه پایین مدل

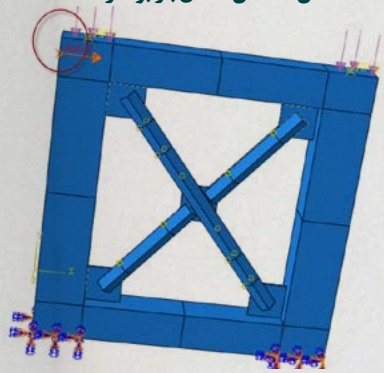


شکل۸. اعمال بارهای فشاری از بالا

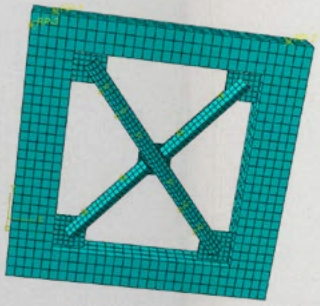


بعد از اعمال مراحل بالا نوبت به بارگذاری اصلی که نیروی جانبی وارد برسازه می‌باشد، خواهد رسید. با توجه به مقدار ذکرشده در مقاله مرجع [۲۵]، بیشترین مقدار این نیرو برای سازه بتنی ساده ۳۳ کیلونیوتون و برای سازه با مهاربند همگرا نوع X مقدار آن برابر با ۱۲۴ کیلونیوتون می‌باشد که از سمت چپ مطابق با شکل ۹، برسازه اعمال می‌شود.

شکل۹. محل اعمال بار برسازه

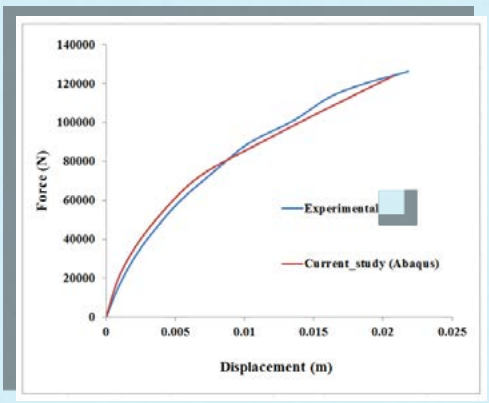


بعد از تنظیم شرایط مرزی نوبت به مش‌بندی مدل می‌رسد. مدل مش‌بندی شده در شکل ۱۰، ارائه‌شده است.



شکل۱۰. مدل مش‌بندی شده.

نتایج مربوط به مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی ارائه‌شده در مقاله مرجع [۲۵] و تحلیل انجام‌شده در این پژوهش در شکل ۱۱، ارائه شده است.



شکل۱۱. مقایسه نمودار نیرو جابه‌جایی مرجع [۲۵] و تحلیل کنونی برای نمونه بتنی دارای مهاربند همگرا

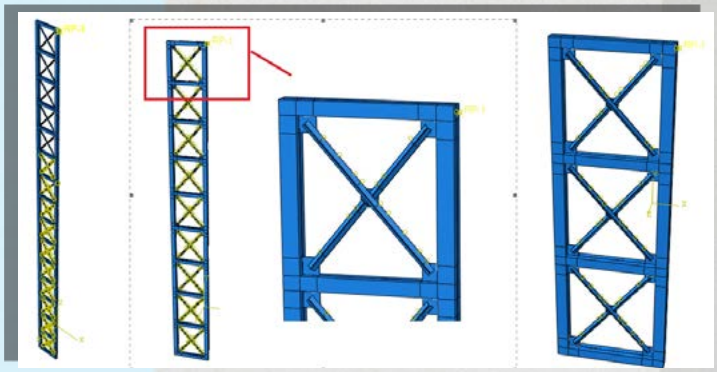
همان‌طور که در شکل‌های ۱۱، مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش که خروجی نرم‌افزار آباکوس می‌باشد تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از پژوهش مرجع [۲۵] از خود نشان داده است.

۲-۲- شبیه سازی مدل های اصلی در این پژوهش

بعد از انجام صحت‌سنجی که در بخش قبل صورت گرفت، در این بخش مشخصات مدل‌های تحلیل‌شده در این پژوهش ارائه‌شده است. در ادامه ۶ مدل در طول این پژوهش تحلیل‌شده است که مدل‌های تحلیلی مدل‌هایی با ۳، ۹ و ۱۵ طبقه بودند که در دو حالت ساده و با آلیاژحافظه دار در مهاربندهایشان مورد تحلیل لرزه‌ای قرار گرفتند.

برای واقعی شدن ابعاد، ابعاد هر طبقه تقریباً ۳ متر و ارتفاع آن نیز در حدود ۳ متر و در نظر گرفته‌شده است و ابعاد تیر و ستون‌ها ۳۰*۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته‌شده است. مشخصات مربوط به میلگرد های ازلحاظ قطر و سطح مقطع مهاربندها مشابه با مدل صحت‌سنجی بوده است.

ارتفاع سازه ۳ طبقه ۹ متر، ارتفاع سازه ۹ طبقه ۲۷ متر و ارتفاع سازه ۱۵ طبقه ۴۵ متر در نظر گرفته‌شده است. مشخصات نمونه ها در جدول ۴ و هندسه قاب‌های ۳، ۹ و ۱۵ طبقه در شکل ۱۲، ارائه شده است. خواص آلیاژحافظه دار از مرجع [۲۷]، استخراج و وارد نرم افزار آباکوس گردید.



شکل۱۲. هندسه سازه بتنی ۳ و ۹ و ۱۵ طبقه با مهاربند

ادامه در صفحه بعد

جدول ۴. مشخصات کلی مدل‌های تحلیل‌شده در این پژوهش

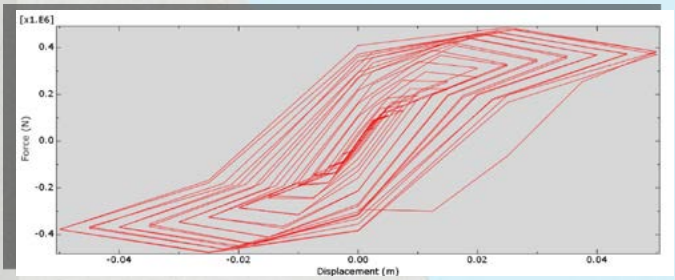
نام مدل	نوع آلیاژ	تعداد طبقات
شماره ۱	فولادنرمه	۳ طبقه
شماره ۲	آلیاژحافظه دار	۳ طبقه
شماره ۳	فولادنرمه	۹ طبقه
شماره ۴	آلیاژحافظه دار	۹ طبقه
شماره ۵	فولادنرمه	۱۵ طبقه
شماره ۶	آلیاژحافظه دار	۱۵ طبقه

۳- ارائه نتایج مدل‌های اصلی تحلیل شد در این پژوهش

در این بخش نتایج مربوط به ۶ مدل تحلیل‌شـــده در این پژوهش ارائه‌شـــده است. ۶ مدل تحلیل‌شـــده شامل سازه‌های ۳، ۹ و ۱۵ طبقه بود که در دو حالت فولادنرمه و آلیاژحافظه دار در نرم‌افزار آباکوس تحلیل گردید.

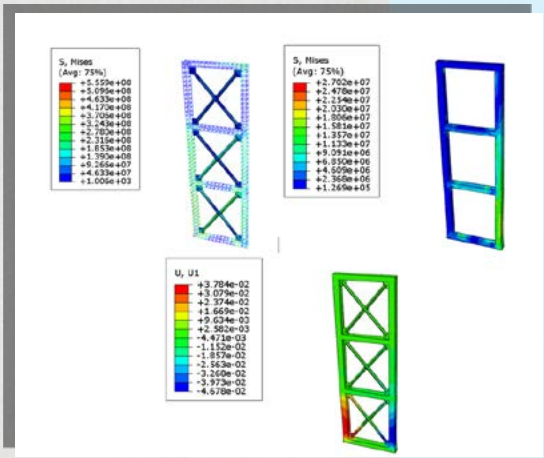
۳-۱- ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۱ (مدل سه‌طبقه با فولادنرمه)

در این بخش نتایج مربوط به مدل شماره ۱، ارائه‌شده است. در این مدل سازه دارای ۳ طبقه بوده و فولادنرمه در تمامی بخش‌های آن به‌کاررفته است. سازه همان‌طور که در بخش قبل ارائه شـــد، تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفت. در ادامه و در شکل ۱۳، نمودار ظرفیت باربری در این نمونه ارائه‌شده است.



شکل ۱۳. نمودار نیرو- جابه‌جایی (نمودار هیسترزیس) به‌دست‌آمده برای مدل شماره ۱ (دارای فولادنرمه و ۳ طبقه)

همان‌طور که در شـــکل مشاهده می‌شـــود، مقدار ظرفیت باربری در مدل شماره ۱، برابر با ۵۰۰ کیلونیوتون می‌باشـــد. در ادامه و در شکل ۲، توزیع تنش در بخش بتنی و فولادی ارائه‌شده است.

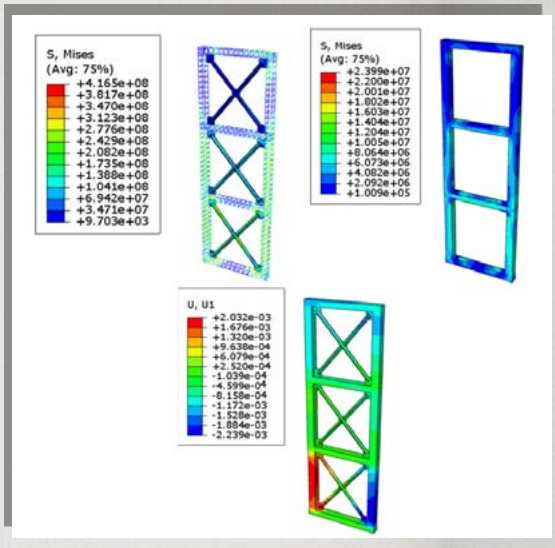


شـــکل ۱۴. توزیع تنش در بخش بتنی و فولادی در مدل شماره ۱ به همراه کانتور جابه جایی (دارای فولادنرمه و ۳ طبقه)

همان‌طور که در شـــکل‌های ۱۴، مشـــاهده می‌شود، بیشترین تنش در بخش بتنی برابر با ۲۷ مگاپاسکال، و میانگین تنش در بخش بتنی برابر ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. در بخش‌های غیر بتنی و فولادی بیشترین تنش مطابق با شکل ۱۴، برابر با ۵۵۵ مگاپاسکال و میانگین تنش در این بخش برابر با ۳۶۰ مگاپاســـکال می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شـــود بیشـــترین تنش در بخش بتنی و فولادی در طبقه اول و نزدیک به تکیه‌گاه به دلیل تمرکز تنش و همچنین بارهای ثقلی بیشـــتر در این نواحی می‌باشـــد که تأثیر بار لرزه‌ای در این ناحیه را تشـــدید نموده است. بیشترین جابه‌جایی در مدل در نواحی بیشترین تنش و برابر با ۴/۶۷ سانتی‌متر می‌باشد.

۳-۲- ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۲ (مدل سه‌طبقه با آلیاژحافظه دار)

در این بخش نتایج مربوط به مدل شماره ۲، ارائه‌شده است. در این مدل، آلیاژحافظه دار در بخش مهاربندهای آن به‌کاررفته اســـت و بقیه بخش‌های فولادی شامل اتصالات و میلگرد ها فولادنرمه می‌باشـــد. این مدل به‌طور مجدد تحت بارگذاری لرزه‌ای مشابه با مدل شماره ۱ قرارگرفته است و تمامی شرایط این مدل مشابه با مدل شماره ۱ می-باشد. ظرفیت باربری در این نمونه مشابه با نمونه دارای فولادنرمه می‌باشد و دلیل آن نیز این می‌باشد که مقاومت فولاد آلیاژحافظه دار مشابه با فولادنرمه می‌باشد و فقط آلیاژحافظه دار این خاصیت را دارا می‌باشـــد که بعد از برداشتن بار به حالت اولیه بازگردد و خود را بازیابی نماید. در ادامه و در شکل ۱۵، توزیع تنش در بخش بتنی، ولادی به همراه کانتور جابه جایی ارائه‌شده است.



شکل ۱۵. توزیع تنش در بخش بتنی و فولادی به همراه کانتور جابه جایی در مدل شماره ۲ (دارای آلیاژحافظه دار و ۳ طبقه)

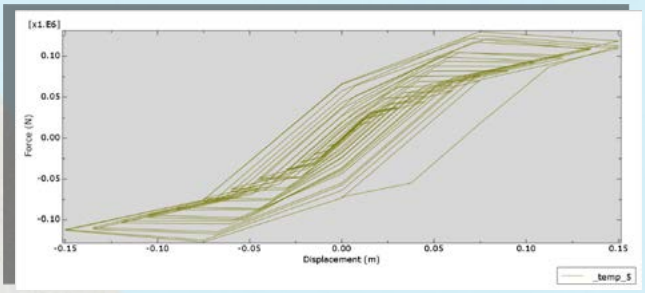
همان‌طور که در شـــکل ۱۵، مشاهده می‌شود، مقدار بیشترین تنش در مدل شماره ۲ برابر با ۲۴ مگاپاسکال و میانگین تنش در سازه برابر با ۱۲ مگاپاسکال می‌باشد که در مقایســـه با سازه ۳ طبقه با فولادنرمه (مدل شماره ۱) هم بیشترین تنش و هم میانگین تنش در سازه کاهش‌یافته است که شدت آن در بخش میانگین تنش بیشتر بوده است و نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که با به کار بردن آلیاژحافظه دار در مهاربندها، می‌توان بیشترین تنش در سازه و نواحی پرتنش را به دلیل بازیابی مهاربندها بعد از برداشتن بار کاهش داد. مطابق با شکل ۱۵، نواحی پرتنش در بخش-های فولادی نیز با کاهش همراه بوده و از مقدار ۵۵۵ مگاپاسکال در مدل شماره ۱ به مقدار ۴۱۶ مگاپاسکال کاهش‌یافته اســـت و میانگین تنش نیز در این نواحی به مقدار ۲۶۰ مگاپاســـکال کاهش‌یافته است. مقدار جابه‌جایی در انتهای تحلیل در این نمونه برابر با ۲ میلی‌متر شده است که نسبت به نمونه دارای فولادنرمه که برابر با تقریباً ۵ سانتی‌متر بود کاهش چشمگیری پیدا نموده

ادامه در صفحه بعد

اســـت و این موضوع نشان‌دهنده این است که با استفاده از آلیاژحافظه دار می‌توان تا حد زیادی جابه‌جایی در انتهای تحلیل را کاهش داد و نیاز به تزمیم سازه بعد از بارهای لرزه‌ای شدید کاهش می‌یابد.

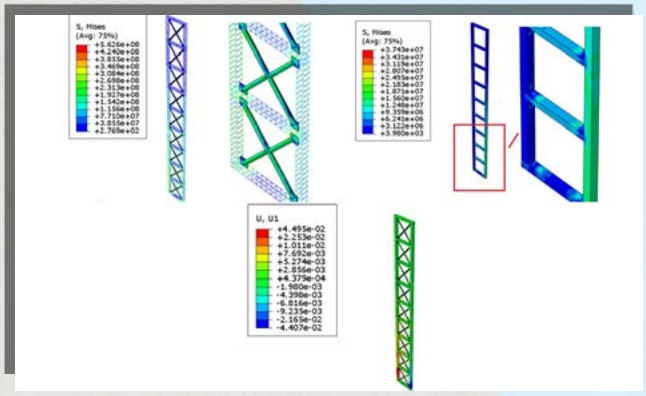
۳-۳- ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۳ (مدل ۹ طبقه با فولادنرمه)

در این بخش نتایج مربوط به مدل شـــماره ۳ که دارای ۹ طبقه و فولادنرمه می‌باشد ارائه‌شـــده اســـت. اولین نتیجه ارائه‌شـــده در این بخش مربوط به ظرفیت باربری نمونه می‌باشد که در شکل ۱۶، ارائه‌شده است.



شکل ۱۶. ظرفیت باربری در مدل شماره ۳ (۹ طبقه با فولادنرمه)

همان‌طور که در شـــکل ۱۶، مشاهده می‌شـــود، مقدار ظرفیت باربری برابر با ۱۲۰۰ کیلونیوتون شده است که نســـبت به سازه ۳ طبقه به دلیل افزایش سختی و جرم سازه و افزایش طبقات، ظرفیت باربری آن افزایش‌یافته اســـت. در ادامه و در شکل ۱۷، توزیع تنش در این نمونه در بخش بتنی و غیر بتنی به همراه کانتور جابه جایی، ارائه‌شده است.

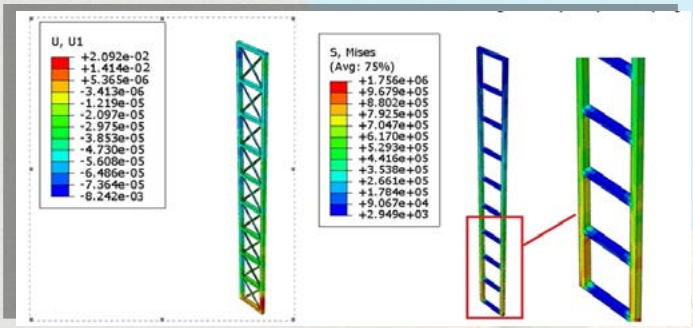


شکل ۱۷. توزیع تنش در بخش بتنی و فولادی به همراه کانتور جابه جایی در مدل شماره ۳ (دارای فولادنرمه و ۹ طبقه)

همان‌طور که در شـــکل ۱۷، مشـــاهده می‌شود، مقدار بیشترین تنش در بخش بتنی در مدل شماره ۳ برابر با ۳۷ مگاپاسکال و میانگین تنش در سازه برابر با ۲۲ مگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با سازه ۳ طبقه فولادی ساده اندکی افزایش در مقادیر تنش دیده می‌شود. همچنین مقدار تنش در بخش‌های فولادی برابر با ۵۶۲ و میانگین تنش برابر با ۳۷۰ مگاپاســـکال می‌باشد که بازهم اندکی افزایش به دلیل افزایش طبقات و ارتعاش در ســـازه در مقادیر تنش ایجادشده است. بیشترین جابه‌جایی در مدل در نواحی بیشترین تنش و برابر با ۴/۴۹ ســـانتی‌متر می‌باشد و با مقدار به‌دست‌آمده در سازه ۳ طبقه تقریباً برابر می‌باشد.

۳-۴- ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۴ (مدل ۹ طبقه با آلیاژحافظه دار)

در این بخش نتایج مربوط به مدل شـــماره ۴ که دارای ۹ طبقه و با آلیاژحافظه دار می‌باشـــد، ارائه‌شده است. در این نمونه مشـــابه با مدل ۳ طبقه، آلیاژحافظه دار فقط در بخش مهاربندها به‌کاررفته است و بقیه بخش‌ها دارای فولادنرمه می‌باشد. ظرفیت باربری در این نمونه نیز مشابه با مدل شماره ۳ و دارای فولادنرمه می‌باشد. در ادامه و در شکل ۱۸، توزیع تنش در این نمونه، به همراه کانتور جابه جایی، ارائه‌شده است.

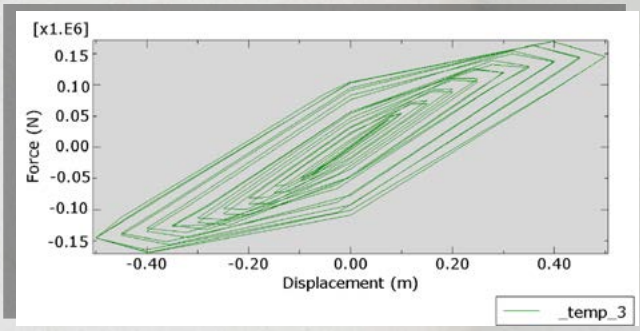


شکل ۱۸. توزیع تنش در بخش بتنی به همراه کانتور جابه جایی در مدل شماره ۴ (دارای آلیاژحافظه دار و ۹ طبقه)

همان‌طور که در شـــکل ۱۸، مشـــاهده می‌شود، مقدار بیشترین تنش در بخش بتنی در مدل شماره ۴ برابر با ۱۷ مگاپاسکال و میانگین تنش در سازه برابر با ۱۲ مگاپاسکال می‌باشـــد و همچنین مقادیر تنش در بخش‌های فولادی برابر با ۳۹۶ و با میانگینی برابر با ۲۵۰ مگاپاســـکال می‌باشد که در مقایسه با سازه ۹ طبقه فولادی ساده، سازه توانسته اســـت تا حد زیادی خود را بازیابی نمـــوده و از مقادیر تنش در هر دو بخش بتنی و غیر بتنی بکاهد. بیشترین جابه-جایی در مدل در نواحی بیشترین تنش و برابر با ۲ سانتی‌متر می‌باشد که نسبت به ســـازه ۹ طبقه دارای فولادنرمه تقریباً به میزان ۶۰ درصد کاهش داشته است. دلیل اینکه سازه به‌طور کامل به حالت اولیه خود بازنگشته است این می‌باشد که بخش‌های بتنی و بخش‌هایی که دارای فولادنرمه هستند در مقابل بازگشت به حالت اولیه از خود مقاومت نشـــان می‌دهد و این موضوع باعث می‌شـــود که سازه نتواند به‌طور کامل به حالت اولیه بازگردد.

۳-۵- ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۵ (مدل ۱۵ طبقه با فولادنرمه)

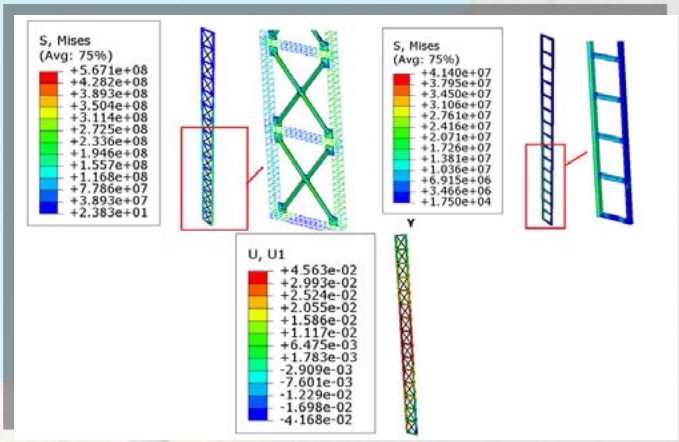
در ایـــن بخـــش نتایـــج مربوط به مدل شـــماره ۵ که دارای ۱۵ طبقـــه و فولادنرمه می‌باشـــد ارائه‌شده است. اولین نتیجه ارائه‌شـــده در این بخش مربوط به ظرفیت باربری نمونه می‌باشد که در شکل ۱۹، ارائه‌شده است.



شکل ۱۹. ظرفیت باربری در مدل شماره ۵ (۱۵ طبقه با فولادنرمه)

همان‌طور که در شـــکل ۱۹، مشـــاهده می‌شود، مقدار ظرفیت باربری برابر با ۱۶۰۰ کیلونیوتون شده است که نسبت به سازه ۳ و ۹ طبقه به دلیل افزایش سختی و جرم سازه و افزایش طبقات، ظرفیت باربری آن افزایش‌یافته اســـت. در ادامه و در شکل ۲۰، توزیع تنش به همراه کانتور جابه جایی، ارائه‌شده است.

ادامه در صفحه بعد

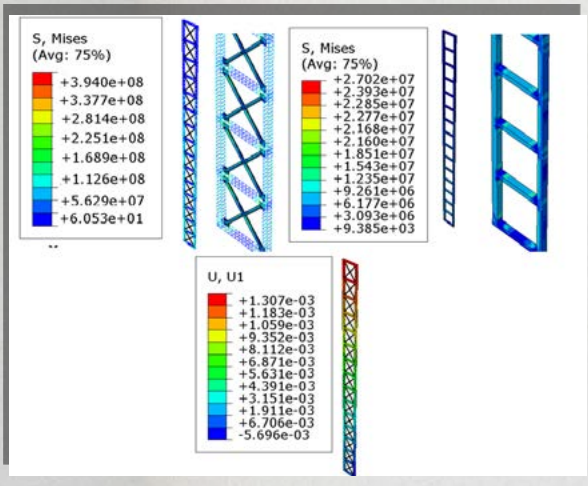


شکل ۲۰. توزیع تنش و جابه جایی در مدل شماره ۵
(دارای فولادنرمه و ۱۵ طبقه)

همان‌طور که در شکل ۲۰، مشاهده می‌شود، مقدار بیشترین تنش در بخش بتنی در مدل شماره ۵ برابر با ۱۴/۷ مگاپاسکال و میانگین تنش در سازه برابر با ۲۸ مگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با سازه ۳ و ۹ طبقه فولادی ساده اندکی افزایش در مقادیر تنش دیده می‌شود. همچنین مقدار تنش در بخش‌های فولادی برابر با ۵۶۷ و میانگین تنش برابر با ۴۰۰ مگاپاسکال می‌باشد که بازهم اندکی افزایش به دلیل افزایش طبقات و ارتعاش در سازه در مقادیر تنش ایجادشده است. جابه‌جایی در مدل در نواحی بیشترین تنش و برابر با ۴/۵۶ سانتی‌متر می‌باشد و با مقدار به‌دست‌آمده در سازه ۳ و ۹ طبقه تقریباً برابر می‌باشد.

۶-۳- ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۶ (مدل ۱۵ طبقه با آلیاژحافظه دار)

در این بخش نتایج مربوط به مدل شماره ۶ که دارای ۱۵ طبقه و با آلیاژحافظه دار می‌باشد، ارائه‌شده است. در این نمونه مشابه با مدل ۳ و ۹ طبقه، آلیاژحافظه دار فقط در بخش مهاربندها به‌کاررفته است و بقیه بخش‌ها دارای فولادنرمه می‌باشد. ظرفیت باربری در این نمونه نیز مشابه با مدل شماره ۵ و دارای فولادنرمه می‌باشد. در ادامه و در شکل ۲۱، توزیع تنش در این نمونه در بخش بتنی و غیر بتنی ارائه‌شده است.

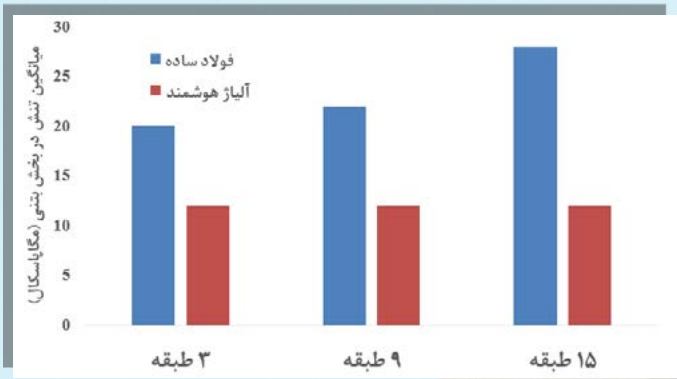


شکل ۲۱. توزیع تنش و جابه جایی در مدل شماره ۶
(دارای آلیاژحافظه دار و ۱۵ طبقه)

همان‌طور که در شکل ۲۱، مشاهده می‌شود، مقدار بیشترین تنش در بخش بتنی در مدل شماره ۶ برابر با ۲۷ مگاپاسکال و میانگین تنش در سازه برابر با ۱۲ مگاپاسکال می‌باشد و همچنین مقادیر تنش در بخش‌های فولادی برابر با ۳۹۴ و با میانگینی برابر با ۲۴۰ مگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با سازه ۱۵ طبقه فولادی ساده، سازه توانسته است تا حد زیادی خود را بازیابی نموده و از مقادیر تنش در هر دو بخش بتنی و غیر بتنی بکاهد. بیشترین جابه-جایی در مدل در نواحی بیشترین تنش و برابر با ۱/۳ میلی می‌باشد که سازه نسبت به سازه دارای فولادنرمه توانسته است خود را به‌خوبی بازیابی نموده و مقدار جابه‌جایی را به‌شدت کاهش دهد.

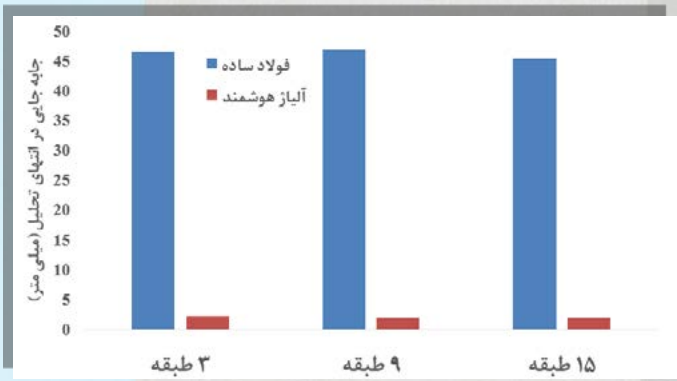
۷-۳- مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش

در این بخش مقایسه نتایج مربوط به بیشترین تنش در بخش بتنی، بیشترین تنش در بخش غیر بتنی و جابه‌جایی انتهای تحلیل در ۶ مدل تحلیل‌شده ارائه‌شده است.



شکل ۲۲. مقایسه بیشترین تنش در بخش بتنی در مدل‌های مختلف

شکل ۲۳. مقایسه بیشترین تنش در بخش فلزی (مهاربندها)
در مدل‌های مختلف



شکل ۲۴. مقایسه بیشترین جابه‌جایی در مدل‌های مختلف

ادامه در صفحه بعد

همان‌طور که در نمودار ۲۲ و ۲۳ مشـــاهده می‌شـــود با افزایش طبقات در حالت ساده بیشـــترین تنش اندکی افزایش‌یافته و با به کار بردن آلیاژحافظه دار سازه توانسته است تا حدود زیادی خود را بازیابی نموده و از تنش‌های پســـماند در ســـازه بکاهد. همچنین این موضوع در شـــکل ۲۴، نیز قابل‌مشاهده است که جابه‌جایی در انتهای تحلیل در سازه‌های دارای آلیاژحافظه دار نسبت به مدل فولادی ساده با کاهش همراه بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در ایـــن پژوهش به بررســـی رفتار ســـازه‌های بتنی دارای مهاربند بـــا آلیاژحافظه دار پرداخته شـــد. برای این منظور با انتخاب مقاله مرجع [۲۵]، یک قاب بتنی دارای مهاربند در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل گردید و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج مقاله مقایسه و صحت‌سنجی گردید. در ادامه پژوهش ۶ مدل دیگر در نرم‌افزار آباکوس تحلیل شد. در این ۶ مدل سه مدل دارای فولادنرمه و سه مدل دارای آلیاژحافظه دار بود. در مدل شماره ۱ و ۲ سازه دارای سه‌طبقه، در مدل‌های ۳ و ۴ سازه دارای ۹ طبقه و در مدل‌های ۵ و ۶ سازه دارای ۱۵ طبقه بود. مدل‌ها دارای عرض سه متر و ارتفاع هر طبقه ۳ متر بود که دارای تیر و ستونی با سطح مقطع ۳۰*۳۰ سانتی‌متر بود. تمامی نمونه‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفت و نتایج شـــامل تنش، جابه‌جایی و ظرفیت باربری از نمونه‌ها استخراج شد که نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود.

۱- با به کاربردن آلیاژحافظه دار در سازه‌ها می‌توان تا ۵۰ درصد مقادیر تنش و تا ۶۰ درصد جابه‌جایی انتهای تحلیل را در سازه کاهش داد و نیاز به ترمیم در سازه بعد از بارگذاری‌های لرزه‌ای شدید را کاهش داد.

۲- بـــا افزایش ارتفاع ســـازه (تعداد طبقات) ظرفیت برابری ســـازه افزایش خواهد یافت و نمونه‌های ساده و دارای آلیاژحافظه دار دارای ظرفیت باربری یکسانی بودند.

۳- به دلیل وجود فولاد ســـازه در بخش میلگرد ها و همچنین بتن و عدم توانایی بازگشت به حالت اولیه در این بخش‌ها سازه نتوانست خود را به‌طور کامل بازیابی نموده و به عبارتی در هنگام بازیابی این بخش‌ها در مقابل بازگشت به حالت اولیه از خود مقاومت نشان داده و سازه نمی‌تواند به‌طور کامل به حالت اولیه بازگردد.

۴- به‌طورکلی با به کار بردن آلیاژحافظه دار در سازه می‌توان امکان بازیابی در سازه را فعال نموده و بدون نیاز به ترمیم سازه را بعد از بارگذاری‌های شدید به حالت اولیه برگرداند.

مراجع

[۱] اصغری سرخی، مجتبی؛ یحیی شربتی ناوان و الهام بخشیان لموکی، ۱۳۸۷، روش‌های مقاوم‌سازی ســـازه‌های بتنی، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، سمنان، دانشگاه سمنان.

[۲] حجت الله عادلی، "مهندسی زلزله"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۵۹.

[۳] اکبر ترکاشـــوند، "راهنما و تفســـیر آئین نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله و مهندسی زلزله"، انتشارات مؤسسه فرازاندیس سبز، ۱۳۸۴.

[4] Hung Zhen, LI Qing-song and CHEN Long-zhu,Elastoplastic analysis of knee bracing frame, Journal of Zhejiang University Science , 2004.

[5] A.Roufegarinejad a BRACING FRAMES 15th ASCE Engineering Mechanics Conference June 2-5, 2002, Columbia University, New York, NY.

[6] Jason McCormick, SEISMIC PERFORMANCE OF A CONC FRA WITH AN INNOVATIVE BRACING SYSTEM Submitted in Fulfillment of the Requirements of the CBE Institute January 6-12, 2005, College Station, TX.

[7] Ali Akbar Golafshani, Ehsan Kabiri Rahani, Mohammad Reza Tabeshpour, A new high performance semi-active bracing system, Article in press in journal of Engineering Structures2006.

[۸] قاســـمیه, مهدی؛ حسین سلحشـــور و محمدجواد عابدینی، ۱۳۸۸، کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شـــکلی در مهندسی عمران، اولین کنفرانس ملی مهندســـی و مدیریت زیر ساختها، تهران، دانشگاه تهران.

[۹] حق بیان, ســـید آرمان و منصور باقری، ۱۳۹۶، کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شـــکلی در مهندسی عمران، پنجمین کنگره بین المللی عمران ، معماری و توســـعه شـــهری، تهـــران، دبیرخانه دایمی کنفرانس.

[۱۰] ســـعادتی, بهبود و مهدی نوری، ۱۳۹۴، بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال تیر به ســـتون به کمک ورق‌هـــای FRP با اســـتفاده از نرم‌افزار المـــان محدود ABAQUS، ســـومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در علوم، مهندسی و تکنولوژی، دبی، شرکت پندار اندیش رهپو.

[۱۱] Zafar, A. and B. Andrawes, Seismic behavior of SMA-FRP reinforced concrete frames under sequential seismic hazard. Engineering Structures, ۹۸ .۲۰۱۵: p. ۱۷۳-۱۶۳.

[۱۲] تمجید, نیما؛ عبدالرحیم جلالی و میکائیل یوســـف زاده، ۱۳۹۲، بهسازی رفتار لرزه‌ای سیستم مهاربندی چهارضلعی مفصلی بر پایه آلیاژهای حافظه‌دار شـــکلی، اولین کنفرانس ملی مهندســـی ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی.

[۱۳] قاسمیه, مهدی؛ مریم صابردل ساده و مهناز مصطفی زاده، ۱۳۹۵، بررسی رفتار دیوارهای بتنی مجهز به آلیاژهای حافظه شکلی مارتنزایتی، فصلنامه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز.

[۱۴] ویمـــی, کامبیز، ۱۳۹۴، ارزیابی رفتار لرزه‌ای بادبند خارج از مرکز (EBF) دارای تیر پیوند قائم مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شـــکلی (SMA) با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی،سومین همایش ملی مصالح ســـاختمانی و فناوری‌های نوین در صنعت ســـاختمان، میبد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد.

[۱۵] صفری منوچهر،"بررسی رفتار لرزه‌ای بادبند خیمه‌ای از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی"، پایانامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۱۳۹۵.

[۱۶] یزدخواه, امین و حسین خســـروی، ۱۳۹۴، بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتن آرمه با مهاربند واگرا دارای پیوند قائم جفت با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA)،همایش ملی استفاده از فناوری ها و تکنولوژی‌های نوین طراحی، محاسبه و اجرا در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، مراغه، گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه.

[۱۷] گوغری, ب، "بررسی اتصالات تیر و ستون مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار"، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۹۵.

[۱۸] طاهری, زهرا و پیام اشتری، ۱۳۹۴، بررسی رفتار لرزه‌ای مهاربندهای زانویی دارای عضو زانویی مجهز به آلیاژ حافظه‌دارشـــکلی، دومین کنفرانس بین المللی ژئوتکنیک و مهندسی لرزه‌ای شهری، تبریز، شرکت دانش بنیان لرزه پایدار آذربایجان زیر نظر دانشگاه تبریز.

[۱۹] هوشـــمند, محمد؛ بهزاد رافضی و جعفر خلیل علافی، ۱۳۹۲، بررســـی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی با استفاده از مهار بندی ترکیبی از جنس فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی،فصلنامه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز.

[20] Kader Newaj Siddiquee.,AHM MuntasirBillah., AnasIssa., Seismic collapse safety and response modification factor of concrete frame buildings reinforced with superelastic shape memory alloy (SMA) rebar, Journal of Building Engineering, Volume 42, 2021.

[21] F. Oudah et al., Innovative self-centering concrete beam-column connection reinforced using shape memory alloy, ACI Struct. J., 2018.

[22] A. Abdulridha et al., Behaviour and modelling of hybrid SMA-steel reinforced concrete slender shear wall, Eng. Struct., 2017.

[23] RaafatEl-Hacha., KhaledAbdelrahman., Behaviour of circular SMA-confined reinforced concrete columns subjected to eccentric loading, Engineering Structures, Volume 215, 2020.

[24] Nahar, M., Islam, K., Billah, M., Seismic collapse safety assessment of concrete beam-column joints reinforced with different types of shape memory alloy rebars, Journal of Building Engineering, 29, 2019

[25] M.R. Maheri, R. Kousari, M. Razazan., Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames, Engineering Structures, 25,1697-1705, 2003.

[۲۶] موســـوی، م. ن.، رافضی، ب.، عثمـــان‌زاده، ف.، آهنی، ا.، " تعیین پارامترهای مدل خســـارت پلاستیک بتن برای مدل-ســـازی عددی قاب‌های بتن آرمه"، هفتمین کنگره ملی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان، ۱۳۹۲.

[27] Nuno Rebelo, Xiao-Yan Gong, Amy Hall, Alan R. Pelton and Tom W. Duerig, Finite Element Analysis on the Cyclic Properties of Superelastic Nitinol, ABAQUS Users Conference, 2004.