

بررسی عملکرد سازه فولادی همراه با آلیاژ حافظه‌دار در هنگام وقوع زلزله

رضا دادخواه تهرانی، کارشناسی ارشد مهندسی زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد

محسن اعتمادی (نویسنده مسؤل)، استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان، E-mail: etemaadi@cc.iut.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر سیستم‌های مستهلک‌کننده بسیاری برای جذب انرژی در سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مسائلی که در این حیطه توجه محققان را به خود جلب نموده، استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (shape memory alloy) است. ویژگی‌های مکانیکی و ترمودینامیکی این مواد به گونه‌ای است که در چند دهه اخیر به خصوص در صنعت ساختمان، توجه بسیاری از طراحان و محققان را به خود جلب کرده است. در این تحقیق استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به صورت کابل‌های پیش‌تنیده در سازه و نقش آنها به عنوان مستهلک‌کننده انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا به منظور یافتن مقاطع بهینه، یک سازه سه طبقه، در نرم‌افزار ایتبس (Etabs) طراحی گردیده؛ سپس به منظور تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی، یک قاب سه طبقه و یک دهانه را در نرم‌افزار آباکوس (Abaqus) مدل نموده و در انتها با تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی با استفاده از سه شتاب‌نگاشت طیس، منجیل و ایمپریال ولی (Imperial Valley) پاسخ سازه را بدون استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی و همراه با کابل‌های پیش‌تنیده از جنس آلیاژ حافظه‌دار بررسی می‌کنیم.

کلیدواژه‌ها: تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی، مستهلک‌کننده، کابل‌های پیش‌تنیده، شتاب‌نگاشت، نایتینول (Nitinol)

۱- مقدمه

برابر خستگی، جذب انرژی بالا، مقاوم بودن در برابر خوردگی، بازگشت به شکل اولیه، به گونه‌ای است که در چند دهه اخیر در صنعت ساختمان مورد توجه بسیاری از طراحان و محققان قرار گرفته است [۱-۳].

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی آلیاژهایی هستند که سختی کافی و شکل‌پذیری فوق‌العاده به همراه قابلیت بازگشت به حالت اولیه در هر حالتی از کرنش را دارا می‌باشند. این نوع آلیاژها بعد از تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک قابل توجه، امکان بازگشت به حالت و شکل اولیه خود را دارا بوده و یا در فاز رفتاری دیگر خود در صورت اعمال حرارت، تمایل به برگشت به شکل اولیه را پیدا می‌کنند؛ همچنین در بازه‌های خاصی از دما یا در شرایط مشخصی، رفتار این ماده به صورت سوپر

امروزه بیشتر سازه‌ها طوری طراحی می‌شوند که شامل بخش‌هایی با عنوان حلقه‌های ضعیف (ductile link) یا قسمت‌های شکل‌پذیر هستند. در واقع هدف این است که در هنگام زلزله بخشی از سازه از ناحیه الاستیک گذشته و وارد ناحیه پلاستیک شود و در حقیقت بخش زیادی از انرژی وارد به سازه را مستهلک کند و از آسیب دیدن بخش‌های دیگر سازه جلوگیری کند. در سال‌های اخیر سیستم‌های مستهلک‌کننده زیادی را برای جذب انرژی در سازه‌ها به کار برده‌اند، یکی از مسائلی که در حیطه جذب انرژی در سازه‌ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی است. ویژگی‌های مکانیکی و ترمودینامیکی این مواد از قبیل مقاومت بالا در

تقویت شده با جداگرهای لاستیکی و حافظه‌دار شکلی انجام گرفت و شاخص‌های خرابی سازه‌ای، غیرسازه‌ای و اعضاء تحت این زلزله‌ها به دست آمد. نتایج به دست آمده حاکی از برتری استفاده از جداگرهای پی حافظه‌دار شکلی در کاهش خطرات ناشی از زلزله بر روی سازه‌ها بود. همچنین در مقایسه بین میراگرهای لاستیکی و حافظه‌دار شکلی نشان داده شد که سیستم اخیر دارای رفتار مناسب‌تری است.

۳- اهمیت و اهداف تحقیق

امکان کنترل مکانیکی سازه به وسیله اعضایی که ویژگی‌های سختی و میراکنندگی قابل توجهی داشته باشند و از طرفی پس از اتمام بارگذاری بحرانی زلزله کرنش‌ها و تغییرشکل‌های پسماند ناچیزی در آنها به جای بماند، در چپ‌ای به سوی کاهش خسارات و لطمات زلزله و سرویس‌دهی بهتر ساختمان‌ها پس از اتمام این بارگذاری سنگین خواهد بود. هنگامی که ساختمان‌ها در معرض زلزله یا امواج تحریک ناشی از انفجار قرار می‌گیرند، ضروری است بخشی از محتوای انرژی تحمیل شده به سازه از طریق مسیرها و فرایندهای مشخص و دارای ظرفیت جذب انرژی کافی، به شیوه ایمن و با کمترین خسارات ممکن، مستهلک گردد؛ تا از تأثیرات مخرب یک چنین پدیده‌ای با الگوهای بارگذاری نامشخص و غیرقابل-پیش‌بینی کاسته شود. تجربیات زلزله‌های اخیر نشان داده که نبود ساز و کارهای جذب انرژی مناسب یکی از دلایل رفتار ضعیف ساختمان‌ها می‌باشد. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سازه‌ها با توجه به خواص فوق‌العاده آنها می‌تواند نقش مؤثری در روند کاهش خسارات جانی و مالی داشته باشد. در این تحقیق با به کار بردن کابل‌های پیش‌تنیده شده از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی (نایتینول) در یک سازه فولادی سعی در بهبود رفتار سازه در هنگام وارد شدن نیروهای زلزله و در نتیجه کاهش خسارات جانی و مالی شده است.

۴- رفتار آلیاژهای حافظه‌دار

خاصیت حافظه‌داری در این آلیاژها به وسیله تغییر

الاستیک دما یا در شرایط مشخصی، رفتار این ماده به صورت سوپر الاستیک است (تا حدود کرنش‌های ده درصد) که در این شرایط پس از مراحل باربرداری به شکل اولیه خود باز می‌گردد [۴].

۲- بررسی نظریه‌ها و تحقیق‌های پیرامون موضوع

اولین مشاهدات ثبت شده در مورد حافظه‌داری به سال ۱۹۳۲ میلادی در مورد آلیاژ AU-CU برمی‌گردد. سپس طی سال‌های ۱۹۴۹ تا ۱۹۵۱ رفتار حافظه‌داری و ترمو الاستیک (Thermoelastic) تشریح و تفسیر یافت [۵-۶]. در دهه ۱۹۶۰ میلادی، بهلر و همکارانش [۷] آزمایش‌های وسیعی روی نیکل و تیتانیوم به عمل آوردند و ترکیب آنها را نایتینول نامیدند [۷]. در سال ۱۹۹۱ برای اولین بار گراسر و کوتزارلی [۸] این آلیاژ را در مهندسی عمران، در زمینه میراگرها استفاده کردند. آنها اثر فرکانس و تاریخچه بارگذاری را بر روی میزان استهلاک انرژی سیم‌های نایتینول بررسی کردند. همچنین دلچپه و کاردونه [۹] با انجام تحقیقات گسترده، وابستگی پاسخ رفتاری به دما، سرعت بارگذاری و تعداد چرخه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. پیشنهاد آنها میراگرهای متفاوت بازگرداننده و مستهلک کننده ساخته شده از حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دار شکلی بود که به کمک نتایج آزمایشگاهی نشان می‌داد با ترکیب آنها می‌توان به رفتار مناسبی در برابر بارگذاری‌های زلزله دست یافت. سپس دسروش و دلمونت [۱۰] مطالعاتی را در خصوص امکان استفاده از نگهدارنده‌های حافظه‌دار شکلی برای کاهش پاسخ بدنه یک پل چند دهانه انجام دادند. همچنین ابوالمعالی و همکاران [۱۱] نیز مشخصات استهلاک انرژی اتصالات تی شکل با پیچ‌های فولادی و حافظه‌دار شکلی را بررسی کردند. برونو و والنته [۱۲] با روش‌های تحلیلی و با استفاده از ایده شاخص‌های خرابی و با استفاده از مدل ساده شده مواد حافظه‌دار شکلی، امکان استفاده از این مواد را به صورت تحلیلی بررسی کردند؛ تعداد زیادی تحلیل غیرخطی با افزایش تدریجی شدت زلزله روی سازه‌های با مهاربند فولادی و حافظه‌دار شکلی و همچنین سازه‌های

۴- دمای پایان آستنیت (A^{of}) که در آن تغییر فاز مارتنزیت به آستنیت کامل شده است.

اگر بارگذاری مکانیکی روی آلیاژ در فاز مارتنزیت دوقلویی انجام شود، مارتنزیت از حالت دوقلویی خارج و تغییر شکل می‌دهد و به محض برداشتن بار، مارتنزیت به همان حالت باقی می‌ماند. با گرم کردن آلیاژ بالاتر از دمای فاز مارتنزیت به آستنیت تغییر می‌یابد. در نتیجه این تغییر فاز، آلیاژ شکل اولیه خود را باز می‌یابد. آنچه در اینجا شرح داده شد به‌عنوان رفتار حافظه‌داری شناخته می‌شود. اگر بارگذاری در فاز آستنیت انجام و ماده سرد شود، تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت دوقلویی نشده مشاهده می‌شود؛ که نتیجه آن یک کرنش (در حدود ۵-۸ درصد) است. ولی با گرمای مجدد و تغییر فاز معکوس، آلیاژ به شکل قبلی خود باز می‌گردد. چهار نقطه اختصاصی که در نمودار تغییر فاز دما موجود هستند، به‌عنوان دمای انتقال شناخته می‌شوند. این نقاط وابسته به شدت بارگذاری بوده و یک رابطه خطی بین دمای انتقال و شدت بارگذاری موجود است.

همچنین می‌توان تغییر فاز در آلیاژ را فقط با بارگذاری مکانیکی ایجاد نمود، که نتیجه این عمل مارتنزیت دوقلویی نشده به همراه مقدار زیادی کرنش است. حال اگر دمای آلیاژ بالای (A_f) باشد؛ به محض عدم بارگذاری، آلیاژ به شکل اول خود باز می‌گردد؛ بنابراین رفتار ماده به‌نوعی الاستیک خواهد بود. از این خاصیت به‌عنوان رفتار شبه الاستیک نام برده می‌شود. در جدول (۱) مشخصات آلیاژ حافظه‌دار از خواص تعریف‌شده توسط برینسون آورده شده است [۱۳-۱۴].

۵- معرفی مدل

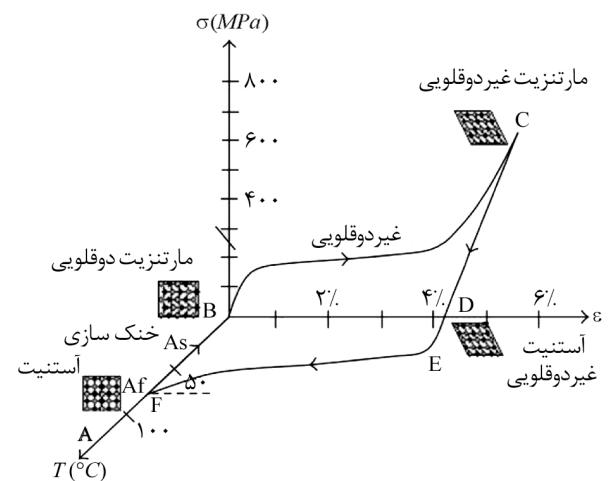
در این قسمت ابتدا مشخصات سازه و قاب‌های مورد استفاده، شامل تعداد طبقات و دهانه‌ها، اندازه آن‌ها، مشخصات مقاطع و ... در نظر گرفته‌شده و مشخصات دینامیکی سازه، آورده شده است. در ادامه، نرم‌افزارهای مورد استفاده جهت مدل‌سازی‌ها و فرضیاتی که در مدل‌سازی استفاده شده، ذکر شده است. مشخصات و موقعیت قاب‌های مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است.

موقعیت فاز جامد است که در آن، چیدمان مجدد مولکولی رخ می‌دهد. آلیاژهای حافظه‌دار دارای دو فاز ثابت هستند: الف) فاز در دمای بالا که آستنیت (Austenite) نامیده می‌شود و ساختمان آن مکعبی بوده و به علت دارا بودن تقارن بالا محکم‌تر است، ب) فاز با دمای پایین که مارتنزیت نامیده می‌شود و می‌تواند به حالت دوقلویی و غیر دوقلویی موجود باشد؛ شکل آن منوکلینیک بوده و نسبت به آستنیت تقارن کمتری دارد. فاز مارتنزیت (Martensite) از نوع فاز ترموالاستیک بوده که دو خصوصیت لغزنده بودن و انرژی کم فصل مشترک را دارا است؛ که با تغییر کوچک دما و تنش تغییر می‌کند. به محض سرد کردن آلیاژ در نبود بارگذاری تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت صورت می‌پذیرد که نتیجه این تغییر فاز قابل مشاهده میکروسکوپیک نیست. به محض گرم کردن ماده در فاز مارتنزیت، برگشت فاز اتفاق می‌افتد. در نمودار تغییر فاز این آلیاژ چهار نقطه اختصاصی مشخص شده است:

۱- دمای آغاز مارتنزیت (M^{0s}) که در این دما، بسته‌های مارتنزیت شروع به بزرگ شدن می‌کنند؛

۲- دمای پایان مارتنزیت (M^{0f}) که در این دما تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت به‌طور کامل صورت گرفته است و ما مارتنزیت داریم، شکل (۱)؛

۳- دمای شروع آستنیت (A^{0s}) که دمای شروع تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت است؛ و



شکل (۱): نمودار تنش-کرنش-دما برای نمایش خاصیت حافظه‌داری.

جدول (۱): مشخصات آلیاژ حافظه‌دار (نایتینول) [۱۱].

| مدول | دمای انتقال | دگرگونی | حداکثر فشار باقی‌مانده |
|---|------------------------------|--|------------------------|
| $D_a = 67 \times 10^3 \text{ MPa}$ | $M_f = 9^\circ \text{ C}$ | $C_M = 8 \text{ MPa / } ^\circ \text{ C}$ | $\epsilon_L = 0.067$ |
| $D_m = 26.3 \times 10^3 \text{ MPa}$ | $M_s = 18.4^\circ \text{ C}$ | $C_A = 13.8 \text{ MPa / } ^\circ \text{ C}$ | |
| $\theta = 0.55 \text{ MPa / } ^\circ \text{ C}$ | $A_s = 34.5^\circ \text{ C}$ | $\sigma_s^{cr} = 100 \text{ MPa}$ | |
| | $A_f = 49^\circ \text{ C}$ | $\sigma_f^{cr} = 170 \text{ MPa}$ | |

جدول (۲): مشخصات فولاد St37.

| بام | نوع بارگذاری | طبقات |
|-----|---------------------------------------|-------|
| ۶۵۰ | بار زنده (کیلوگرم بر متر مربع) | ۶۰۰ |
| ۱۵۰ | بار مرده (کیلوگرم بر متر مربع) | ۲۰۰ |
| ۳۰۰ | بار دیوارهای پیرامون (کیلوگرم بر متر) | ۷۰۰ |

جدول (۳): جزئیات مقاطع در قاب.

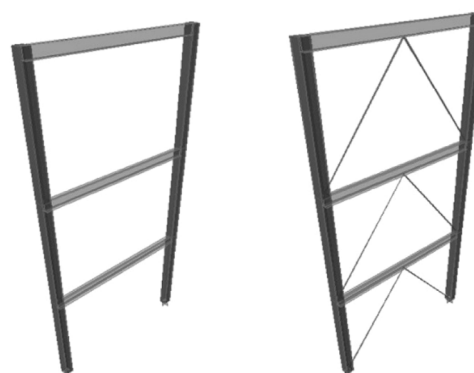
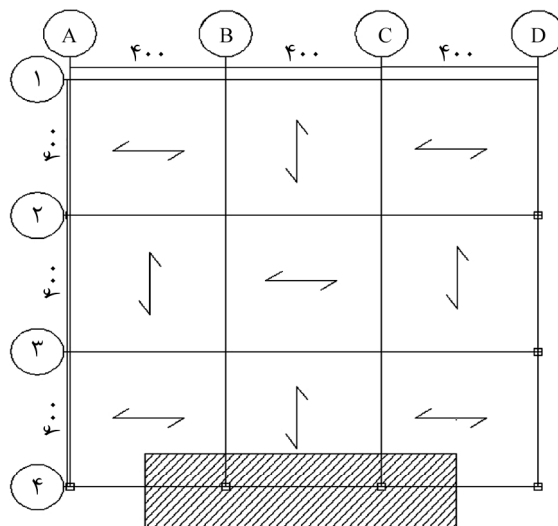
| نوع بارگذاری | طبقات |
|-----------------------|------------------------------------|
| F_y (تنش تسلیم) | $2400 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ |
| F_u (تنش نهایی) | $3600 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ |
| W (وزن واحد حجم) | 7850 kg/m^3 |
| E (مدول الاستیسیته) | $2/1 \times 10^9 \text{ kgf/m}^2$ |
| ν (ضریب پواسون) | ۰/۳ |
| M (جرم واحد حجم) | 800 kgf/m^3 |

جدول (۴): بارگذاری.

| طبقه | ستون | شعاع | بست |
|------|--------------|--------|----------------------|
| اول | BOX20×20×1.5 | IPE240 | Cable (2cm diameter) |
| دوم | BOX20×20×1.5 | IPE240 | Cable (2cm diameter) |
| سوم | BOX20×20×1.5 | IPE240 | Cable (2cm diameter) |

پس از یافتن مقاطع بهینه در نرم‌افزار ایتبس، قاب‌های مورد نظر را به منظور تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی در نرم‌افزار قدرتمند اجزاء محدود آباکوس مدل می‌کنیم. با توجه به اینکه رفتار آلیاژهای حافظه‌دار، خاص و پیچیده است، نرم‌افزار آباکوس رفتار این مواد را در بر نمی‌گیرد. به همین دلیل با لینک کردن سه نرم‌افزار اینتل فرتن (Intel Fortran Compiler)، ویژوال استودیو (Microsoft Visual Studio) و آباکوس (Abaqus) و استفاده از یک سابروتین یومت (Subroutine Umat) رفتار این آلیاژ را در نرم‌افزار تعریف می‌کنیم [۱۷-۱۵].

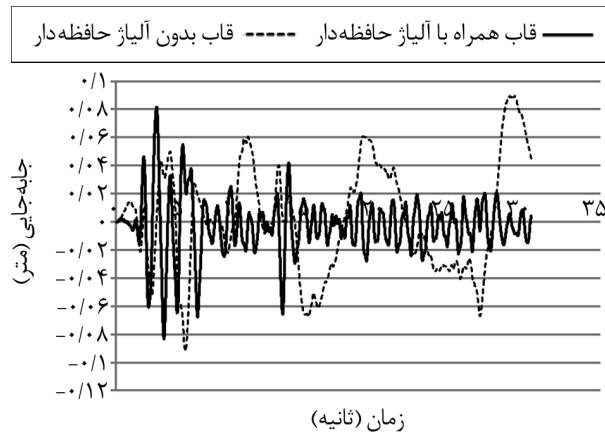
با توجه به اهداف پروژه حاضر، قاب‌های مورد بررسی



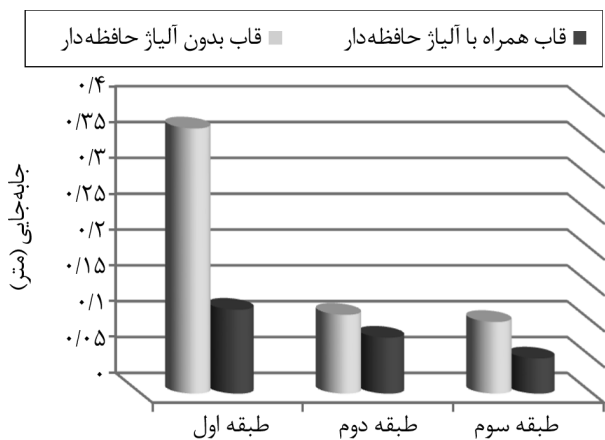
شکل (۲): مشخصات قاب‌های مدل شده در نرم‌افزار.

قاب مورد نظر دارای ارتفاع طبقات ۳ متر و عرض دهانه ۴ متر می‌باشد. در مدل‌سازی از فولاد St37 برای مقاطع تیر و ستون استفاده شده که مشخصات آن در جدول (۲) آورده شده است. همچنین مقاطع و بارگذاری مورد استفاده به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) ذکر شده است. برای کابل‌های پیش‌تنیده از جنس آلیاژ حافظه‌دار در این پروژه از خواص تعریف‌شده توسط برینسون [۱۳] مورد استفاده قرار گرفته است که در جدول (۱) آورده شده است.

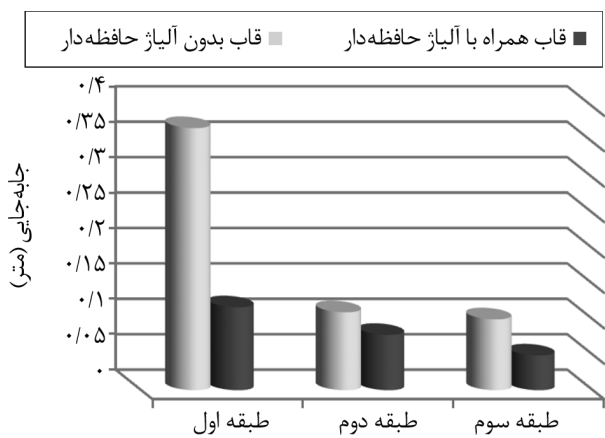
نسبی بام قاب‌ها نسبت به پایه تحت زلزله و شکل‌های (۶) تا (۸) نشان‌دهنده میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات و شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان‌دهنده برش پایه سازه است.



شکل (۵): مقایسه تغییرمکان نسبی بام قاب‌ها تحت زلزله ایمپریال‌ولی با $PGA=0.313g$.



شکل (۶): میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات تحت زلزله طبس با $PGA=0.836g$.



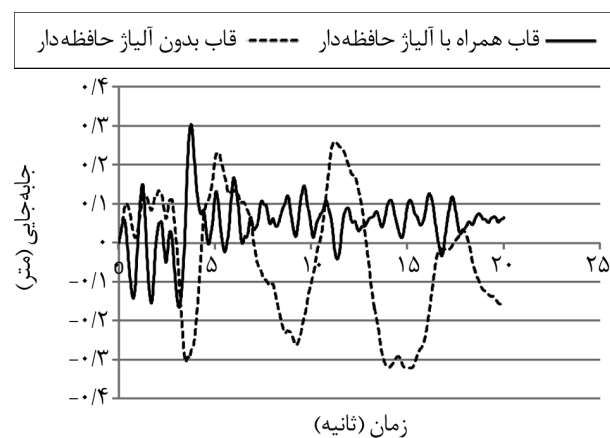
شکل (۷): میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات تحت زلزله منجیل با $PGA=0.5051g$.

به صورت قاب‌های خمشی می‌باشند که این قاب‌ها تحت دو مکانیسم مختلف مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است در این پروژه برای تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی، شتاب‌های مورد استفاده را به پایه قاب‌ها اعمال و پاسخ‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد (در این پروژه از سختی اعضای عمود بر قاب‌ها صرف‌نظر شده است).

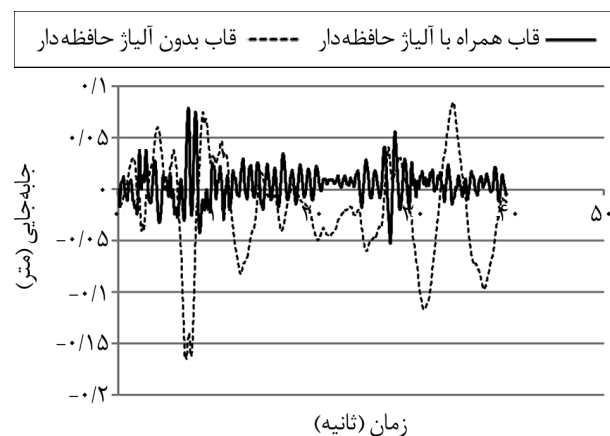
۶- نتایج تحلیل

پس از مدل کردن قاب‌ها در نرم‌افزار آباکوس و تحلیل تحت طول زمان قوی شتاب‌نگاشت‌های طبس، منجیل و ایمپریال‌ولی نتایج از نرم‌افزار استخراج و مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۸].

شکل‌های (۳) تا (۵) نشان می‌دهد که تغییرمکان

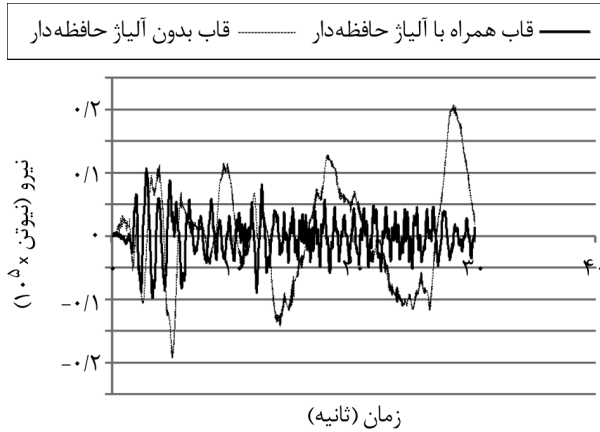


شکل (۳): مقایسه تغییرمکان نسبی بام قاب‌ها تحت زلزله طبس با $PGA=0.836g$.



شکل (۴): مقایسه تغییرمکان نسبی بام قاب‌ها تحت زلزله منجیل با $PGA=0.5051g$.

شان می‌دهند میانگین بیشینه تغییرمکان طبقات نسبت به پایه در زلزله طبس ۳۰/۸۸ درصد و میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات ۵۲/۲۱ درصد کاهش داشته است. همچنین در زلزله‌های منجیل و ایمپریال ولی نیز به ترتیب میانگین بیشینه تغییرمکان طبقات نسبت به پایه ۶۲/۴۳ درصد و ۲۳/۹۷ درصد و میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان ۳۸/۳۴ درصد و ۷۶/۹۱ درصد کاهش داشته است.



شکل (۱۰): مقایسه برش پایه تحت زلزله منجیل با $PGA=0.5051g$.

جدول (۴): طبس $PGA=0.836g$.

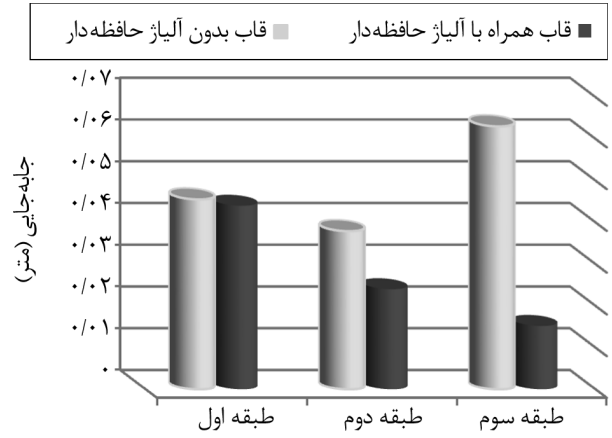
| طبقات | بیشینه تغییرمکان طبقات نسبت به پایه (درصد) | میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات (درصد) |
|----------|--|---|
| طبقه اول | ۵۸/۹۷ | ۷۰/۲۸ |
| طبقه دوم | ۲۷/۲۸ | ۳۶/۳۷ |
| طبقه سوم | ۶/۲۵ | ۵۰ |

جدول (۵): منجیل $PGA=0.5051g$.

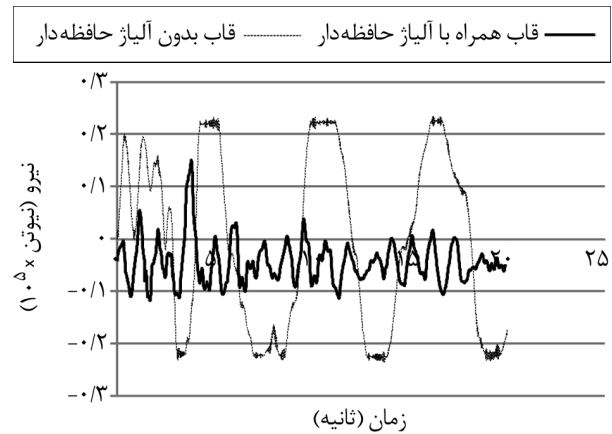
| طبقات | بیشینه تغییرمکان طبقات نسبت به پایه (درصد) | میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات (درصد) |
|----------|--|---|
| طبقه اول | ۷۲/۹۵ | ۸۰ |
| طبقه دوم | ۶۲/۲۳ | ۷۱/۴۳ |
| طبقه سوم | ۵۲/۱۳ | ۷۹/۳ |

جدول (۶): ایمپریال ولی $PGA=0.313g$.

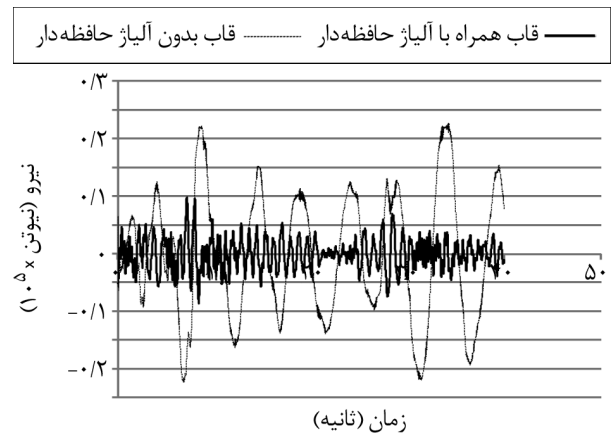
| طبقات | بیشینه تغییرمکان طبقات نسبت به پایه (درصد) | میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات (درصد) |
|----------|--|---|
| طبقه اول | ۴۷/۷۸ | ۲/۳ |
| طبقه دوم | ۱۷/۱ | ۳۶/۸۵ |
| طبقه سوم | ۷/۰۵ | ۷۵/۸۸ |



شکل (۸): میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات تحت زلزله ایمپریال ولی با $PGA=0.313g$.



شکل (۹): مقایسه برش پایه تحت زلزله طبس با $PGA=0.836g$.



شکل (۱۰): مقایسه برش پایه تحت زلزله منجیل با $PGA=0.5051g$.

با توجه به نمودارهای به دست آمده می‌توان تأثیر استفاده از کابل‌های پیش‌تنیده از جنس ناتینول را به صورت عددی نمایش داد، جداول (۴) تا (۶). این جداول

۷- نتیجه‌گیری

استفاده از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی با توجه به خواص آن‌ها، خصوصاً در نظر گرفتن خاصیت بازگشت‌پذیر بودن و تحمل کرنش‌ها تا حدود ۱۰ درصد بدون برجا گذاشتن کرنش پسماند می‌تواند بسیاری از مشکلات سازه‌ای را بهبود بخشد. استفاده و به کار بردن این آلیاژ در بخش‌هایی از اعضا سازه می‌تواند بسیاری از محدودیت‌های مربوط به تعویض و ترمیم اعضا را پس از زلزله برطرف سازد. همچنین در بحث آسیب‌ها و خرابی‌های ناشی از پس‌لرزه‌ها با به کار بردن این مواد می‌توان از وارد آمدن بسیاری از آسیب‌ها جلوگیری کرد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها در این پروژه نشان می‌دهد که قاب مورد نظر همراه با آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت رکورد طبعی، به صورت میانگین، بیشینه تغییرمکان نسبی طبقات آن ۳۰/۸۳ درصد و میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات آن ۵۲/۲۱ درصد کاهش یافته است. همچنین به ترتیب تحت رکورد منجیل و ایمپریال ولی به صورت میانگین، بیشینه تغییرمکان نسبی طبقات ۴۳/۹۷ درصد و میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات ۷۶/۹۱ درصد؛ بیشینه تغییرمکان نسبی طبقات ۲۲/۷ درصد و میانگین ماکزیمم نسبت تغییرمکان طبقات ۳۸/۳۴ درصد کاهش یافته که همه نتایج به‌نوعی نشان‌دهنده عملکرد مثبت کابل‌های پیش‌تنیده از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سازه است.

مراجع

- The SMARTeR-ESF project: a mesoscopic and macroscopic experimental analysis with numerical simulations. *Engineering Structures*, **49**, 43-57.
- Duerig, T.W., Melton, K.N., and Proft, J.L. (1990) *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. Butterworth-Heinemann, Guildford, UK, 130p.
- Otsuka, K. and Wayman, C.M. (1998) *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.
- Greniger, A.B. and Mooridan, V.G. (1938) Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-tin alloys. *AIME*, **128**, 337-368.
- Buehler, W.J. and Wang, F.E. (1967) A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering. *Journal of Ocean Engineering*, **1**, 105-120
- Graesser, E.J. and Cozzarelli, F.A. (1991) Shape memory alloys as new materials for seismic isolation. *Journal of Engineering Mechanics*, **117**(11), 2590-2608.
- Dolce, M. and Cardone, D. (2001) Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, **43**(11), 2657-2677.
- DesRoches, R. and Delemont, M. (2002) Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. *Engineering Structures*, **24**(3), 325-332.
- Abolmaali, A., Treadway, J., Aswath, P., Lu, F.K. and McCarthy, E. (2006) Hysteresis behavior of t-stub connections with superelastic shape memory fasteners. *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(8), 831-838.
- Bruno, S. and Valente, C. (2002) Comparative response analysis of conventional and innovative seismic protection strategies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**(5), 1067-1092.
- Brinson, L.C. (1993) One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**, 229-242.
- Mohd Jani, J., Leary, M, Subic, A., and Gibson, M.A. (2014) A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, **56**, 1078-1113.
- Bhuiyan, A.R. and Alam, M.S. (2013) Seismic performance assessment of highway bridges equipped with superelastic shape memory alloy-based laminated rubber isolation bearing. *Engineering Structures*, **49**, 396-407.
- Torra, V., Auguet, C., Isalgue, A., Carreras, G., Terriault, P., and Lovey, F.C. (2013) Built in dampers for stayed cables in bridges via SMA.

14. Boyd, J.G. and Lagoudas, D.C. (1996) A thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part I. The monolithic shape-memory alloy. *International Journal of Plasticity*, **12**(6), 805-842.
15. Abaqus, Inc, *ABAQUS User Manual*, V6.11 (2011).
16. Intel Fortran Compiler, V11.1.048 (2011).
17. Visual Studio 2008 service Pack1 (2008).
18. <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>. (PEER Dtabase of Strong Ground Motion)

۱۹. فرزین، محمود، دیباجیان، حسین، مهدیان، اصغر و محمدحسینی، فرید (۱۳۹۱) آشنایی و طرز کار نرم افزار آباکوس. جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان - مرکز انتشارات.

۲۰. شهبازی، رضا و یکرنگنیا، محمد (۱۳۹۲) راهنمای کاربردی آباکوس. تهران، علم عمران. ۱۹۶-۲۰۰.