

## اثر ارتفاع سازه در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فولادی با بادبندهای نوین

مهدی قاسمیه<sup>۱\*</sup> و امیر کاری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup>دانشجوی دکترای سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۰۴/۱۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۶/۰۸، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۶/۲۸)

### چکیده

آلیاژهای حافظه دار شکلی قادر به تحمل کرنش‌های بزرگ تا حدود هشت درصد بدون ایجاد کرنش پسماند هستند. لذا استفاده از این مواد در بادبندها به دلیل قابلیت برگرداندگی آنها موجب می‌شود که سازه تحت بار زلزله دچار تغییر شکل‌های ماندگار نشود. همچنین بادبندهای مقید شده در برابر کماتش به دلیل عدم کماتش، باعث شکل پذیری و پایداری بیشتر سازه می‌گردند. در این مقاله، رفتار لرزه‌ای سازه‌های مهاربندی از نوع آلیاژهای حافظه دار شکلی و مهاربندهای مقید شده در برابر کماتش بررسی شده است. نشان داده شده است که در سازه‌های نسبتاً کوتاه، ارجحیت استفاده از هر یک از این دو سیستم نسبت به دیگری، بستگی به شدت تحریکات زمین دارد. همچنین بر خلاف سازه‌های کوتاه، در سازه‌های متوسط استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی مزیتی ندارد و استفاده از بادبندهای مقید شده در برابر کماتش ارجحیت دارد.

**واژه‌های کلیدی:** بادبندهای مقید شده در برابر کماتش، آلیاژهای حافظه دار شکلی، قابلیت برگرداندگی

### مقدمه

در سال ۱۹۳۲ مشاهدات ثبت شده درباره پدیده حافظه دار شکلی توسط Otsuka و Wayman انجام شد [۱]. سپس وابستگی فاز مارتنزیت به دما در سال ۱۹۳۸ توسط Greniger و Mooridan [۲]؛ و رفتار ترمو الاستیک فاز مارتنزیت در سال ۱۹۵۱ کشف شد. در سال ۱۹۶۷، Buehler و Wang تحقیقات گسترده خود را بر روی نایتینول و کاربردهای تجاری آن در صنایع ارائه دادند [۳]. در سال ۱۹۸۰ میلادی Michael و Hart با انتشار مقاله ای از نتایج تحقیقات خودشان بر روی فلز برنج، آنرا به عنوان ماده جدید حافظه دار معرفی کردند [۴].

اولین تحقیق در زمینه کاربرد مواد حافظه دار شکلی در مهندسی عمران در سال ۱۹۹۱ توسط Graesser و Cozzarelli صورت پذیرفت [۵]. آنها استفاده از میراگرهای ساخته شده از مواد حافظه دار شکلی را مورد بررسی قرار دادند. پس از آن، تحقیقات وسیعتری انجام گرفت که از آن جمله می‌توان به مطالعات Inaudi و Kelly [۶]؛ Sweeney و Hayes [۷]؛ کلارک و همکاران [۸]؛ Adachi و Unjoh [۹]؛ Tamai و Kitagawa [۱۰]؛ Wilde و همکاران [۱۱]؛ Ohi [۱۲]؛ Dolce و Cardone [۱۳] و [۱۴]؛ DesRoches و Delemont [۱۵]؛ Bruno و Valente [۱۶]؛ DesRoches و همکاران [۱۷]؛ Ocel و

امروزه ثابت شده است که طراحی سازه‌ها بصورتی که برای مقابله با زلزله‌های شدید رفتار کاملاً الاستیک داشته باشند، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. در نتیجه در طراحی سازه‌ها از روش‌هایی مانند کنترل غیر فعال سازه‌ها در برابر زلزله استفاده می‌شود. در این روش، برخی اعضای سازه ای خسارت‌هایی را در هنگام زلزله‌های شدید متقبل می‌شوند تا بدین وسیله تلاش‌های وارد بر اعضای اصلی سازه مانند ستون‌ها کاهش یافته و از این طریق سازه از آسیب‌های عمده در امان بماند. تمام سیستم‌های مستهلک کننده انرژی که امروزه استفاده می‌شوند، مشکلاتی از قبیل عمر مفید کم، خستگی، سختی نصب، احتیاج به تعویض پس از زلزله و اعمال تغییر در هندسه سازه پس از وقوع زلزله را دارند. آلیاژهای حافظه دار شکلی<sup>۱</sup> معروف به SMA به عنوان موادی هوشمند که بسیاری از این مشکلات و محدودیت‌ها را ندارند، اخیراً در کنترل غیر فعال سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. مهاربندهای مقید شده در برابر کماتش<sup>۲</sup> معروف به BRB نیز به دلیل عدم کماتش، قادر به اتلاف زیاد انرژی بوده و در کنترل غیر فعال سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

دو صورت کریستالی آستنیت<sup>۴</sup> و مارتنزیت<sup>۵</sup> وجود دارند که رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. حالت آستنیت در دماهای بالا و تنش‌های پایین پایدار بوده و مسئول ایجاد رفتار سوپر الاستیک است؛ در حالیکه حالت مارتنزیت در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار بوده و مسئول ایجاد رفتار حافظه شکلی است. از آنجا که این مواد دارای طبیعت ترمومکانیکی هستند، رفتار آنها به دما و تنش‌های اعمال شده بر آنها بستگی داشته و می‌توانند با اعمال گرادیان حرارتی یا تنش، تغییر فاز دهند. حالت آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و حالت مارتنزیت حالت محصول و با تقارن کمتر می‌باشد. در حالت بدون تنش، یک آلیاژ حافظه دار شکلی دارای چهار دمای مشخصه می‌باشد:

$A_s$ : دمای آغاز حالت آستنیت

$A_f$ : دمای پایان حالت آستنیت

$M_s$ : دمای آغاز حالت مارتنزیت

$M_f$ : دمای پایان حالت مارتنزیت

اگر دمای محیط بالاتر از  $A_f$  باشد، ماده اصطلاحاً در حالت آستنیت قرار دارد و رفتار فوق الاستیک از خود بروز خواهد داد و اگر دمای محیط کمتر از  $M_f$  باشد، ماده اصطلاحاً در حالت مارتنزیت قرار دارد و رفتار حافظه شکلی از خود بروز خواهد داد. تا زمانی که ماده به دمای  $A_s$  نرسیده است، به صورت کاملاً مارتنزیت است. زمانی که به  $A_s$  می‌رسد، تبدیل از مارتنزیت به آستنیت آغاز شده تا به دمای  $A_f$  برسد. سرانجام زمانی که به دمای  $A_f$  می‌رسد، تبدیل فاز پایان پذیرفته و ماده به حالت کاملاً آستنیت در می‌آید. در تبدیل معکوس، زمانی که ماده تحت کاهش دما قرار می‌گیرد، تا زمانی که ماده به دمای  $M_s$  نرسیده است، در حالت کاملاً آستنیت قرار دارد. وقتی به دمای  $M_s$  می‌رسد، کریستال‌های آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت می‌کنند و زمانی که ماده به دمای  $M_f$  می‌رسد، تبدیل از آستنیت به مارتنزیت کامل شده است. در تبدیل معکوس، در دمای بین  $M_s$  و  $M_f$ ، ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت می‌باشد. حالت مارتنزیت می‌تواند هم توسط دما و هم توسط تنش ایجاد شود. اگر ماده در حالت آستنیت باشد، کرنش پسماند به جای نمی‌گذارد؛ اما اگر در حالت مارتنزیت باشد، کرنش پسماند به جای

همکاران [۱۸] و Ghassemieh و Iranmanesh [۱۹] اشاره کرد. همچنین Motahari و Ghassemieh با ارائه مدل یک بعدی برای آلیاژهای حافظه دار [۲۰] و توسعه یک برنامه کامپیوتری (AIMS) مختص تحلیل سازه‌های با مواد حافظه دار [۲۱]، رفتار سازه‌های از نوع آلیاژهای حافظه دار شکلی را بررسی نمودند.

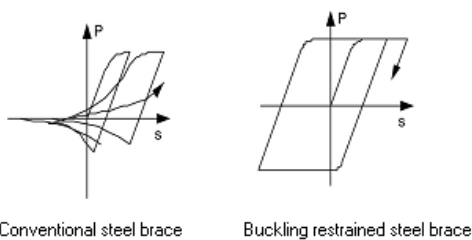
ایده بادبندهای BRB در اوایل دهه ۸۰ میلادی در ژاپن بوجود آمد و تکنولوژی این سیستم در سال ۱۹۸۸ به آمریکا منتقل شد و اولین بار Tremblay و همکاران در سال ۱۹۹۹ آزمایشات تئوری و عملی بر روی BRB ها بمنظور استفاده در یک سازه ۴ طبقه در شهر Quebec در کانادا انجام دادند [۲۲]. نخستین استفاده از این سیستم در آمریکا در ژانویه سال ۲۰۰۰ در یک ساختمان در محوطه دانشگاه کالیفرنیا توسط Clark و همکاران بود [۲۳]. سپس Sabelli و همکاران در سال ۲۰۰۱ جامعترین مطالعه عددی را بر روی BRB ها انجام دادند [۲۴]. پس از آن، مطالعات فراوانی بر روی BRB ها انجام شد که از آنجمله می‌توان به آزمایشات Lopez و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۲۵]؛ Tsai و Huang [۲۶] و Merritt و همکاران [۲۷] اشاره نمود.

در این مقاله، رفتار لرزه‌ای این سیستم‌های نوین که شامل قاب فولادی با بادبندهای SMA و BRB با یکدیگر مقایسه شده و مزایا و معایب هر یک از این دو سیستم در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

### آلیاژهای حافظه دار شکلی

آلیاژهای حافظه دار شکلی که به عنوان موادی هوشمند شناخته شده‌اند، نسبت به سیستم‌های متداول مستهلک کننده انرژی دارای مزایا و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که از آن جمله می‌توان به عدم نیاز به تعویض پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه بوسیله اعمال دما، قابلیت استهلاک انرژی زیاد و تحمل کرنش تا ۸ درصد بدون باقی گذاشتن کرنش پسماند اشاره کرد. معروفترین و پرکاربردترین آلیاژ حافظه دار شکلی، نیتینول است که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم می‌باشد. خصوصیت اصلی این مواد، رفتار سوپر الاستیک<sup>۳</sup> آنها می‌باشد؛ بدین معنی که قادر به تحمل کرنش‌های بزرگ تا حدود ۱۰ درصد، بدون ایجاد کرنش پسماند هستند. آلیاژهای حافظه دار شکلی به

کمانش کرده و در نتیجه نه تنها اتلاف انرژی صورت نمی‌پذیرد، بلکه گاهی اوقات پایداری سازه نیز به خاطر کمانش‌های ترد و ناپایدار به خطر می‌افتد. در بادبندهای مقید شده در برابر کمانش، به دلیل اینکه از کمانش بادبند فولادی جلوگیری می‌شود، سازه رفتار بسیار پایدارتری از خود نشان می‌دهد. استفاده دیگر این سیستم‌ها در قابهای همگرای ویژه‌ای است که در آنها بادبندهای هفتی یا هشتی (Chevron) وظیفه اتلاف انرژی زلزله را بر عهده دارند. در این سیستم‌ها، اتلاف انرژی از طریق جاری شدن مهاربند کششی و کمانش پایدار مهاربند فشاری صورت می‌پذیرد. از آنجاییکه مهاربند فشاری پس از کمانش به شدت سختی خود را از دست می‌دهد، اتلاف انرژی با مشکل مواجه شده و انرژی محدودی تلف می‌شود. علاوه بر آن، اختلاف نیروی عمودی بسیار بزرگی که در مهاربندهای ویژه Chevron ناشی از کمانش مهاربند فشاری در این سازه‌ها مشاهده می‌شود، با استفاده از این سیستم به حداقل رسیده و در نتیجه تیر دهانه مهاربندی شده دارای ابعاد بسیار کوچکتري خواهد بود. منحنی هیسترسیس بادبندهای مقید شده در برابر کمانش و بادبندهای متداول در شکل ۲ نشان داده شده است که بیانگر پایداری بیشتر سیستم‌های دارای بادبندهای مقید شده در برابر کمانش<sup>۷</sup> معروف به BRBS نسبت به سیستم‌های متداول است.

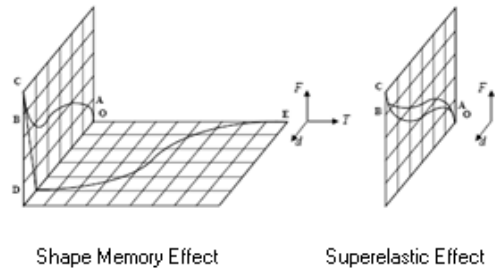


شکل ۲- مقایسه رفتار هیسترسیک بادبندهای معمولی و مقاوم شده در برابر کمانش [۳]

### تحلیل‌های عددی

به منظور مقایسه رفتار لرزه‌ای این دو سیستم، از برنامه AIMS [۲۱] برای مدل کردن این سیستم‌ها استفاده شده است. دو مدل سه طبقه ضربدری و شش طبقه هشتی (Chevron) تحت رکورد السنترو قرار گرفته و این معیارها برای مقایسه عملکرد این دو سیستم مورد استفاده قرار گرفته‌اند: حداکثر جابجایی‌های مطلق و نسبی (Drift) طبقه

می‌گذارد که می‌توان با اعمال دما، کرنش پسماند را به صفر رساند (شکل ۱).



شکل ۱- رفتار شوماتیک سه بعدی مواد حافظه دار شکلی [۱۶]

ظرفیت استهلاک انرژی مناسب و قابلیت بازگرداندگی<sup>۶</sup> مواد حافظه دار شکلی، دو خاصیت مهم این مواد برای استفاده در میراگرها می‌باشند. قابلیت استهلاک انرژی این مواد، تقاضا را بر روی اعضای اصلی سازه کاهش می‌دهد و از آنجایی که این مواد دارای مقاومت بسیار بالایی در مقابل خستگی هستند، می‌توانند پس از زلزله نیز مورد استفاده قرار گیرند و نیازی به تعویض آنها نمی‌باشد. همچنین قابلیت بازگرداندگی در این مواد موجب می‌شود که سازه در طول زلزله به دفعات به وضعیت اولیه خود بازگردد که این امر مانع از تجمع کرنش‌ها در سازه شده و در نتیجه سازه پس از زلزله بدون به جای گذاشتن تغییر شکل‌های ماندگار، به وضعیت اولیه خود باز می‌گردد. رفتار این مواد می‌تواند از حالت خالص آستنیت تا حالت خالص مارتنزیت تغییر کند. در محدوده بین دو حالت حدی، رفتاری بین این دو حالت بدست خواهد آمد. با حرکت از سمت رفتار آستنیت به سمت رفتار مارتنزیت، ظرفیت استهلاک انرژی افزایش خواهد یافت، ولی با افزایش درصد مارتنزیت از یک حد مشخص، قابلیت بازگرداندگی از بین خواهد رفت. لذا این دو حالت به گونه‌ای با یکدیگر ترکیب می‌شوند که رفتار بهینه که تضمین کننده اتلاف انرژی زیاد و قابلیت بازگرداندگی باشد، بدست آید.

### بادبندهای مقید شده در برابر کمانش

در سازه‌های متداول که بوسیله بادبندهای فولادی در برابر زلزله مقاوم شده‌اند، عمده اتلاف انرژی تنها زمانی صورت می‌پذیرد که بادبندها درکش قرار گیرند و بوسیله تسلیم شدن، انرژی زیادی را تلف نمایند. اما زمانی که در فشار قرار می‌گیرند، قبل از اینکه به تنش تسلیم برسند،

جدول ۲- مشخصات مادی SMA در مدل [۲۹]

| Quantity                                      | MPa   |
|---|-------|
| Martensite-to-Austenite start stress          | 420   |
| Martensite-to-Austenite finish stress         | 500   |
| Austenite-to-Martensite start reverse-stress  | 300   |
| Austenite-to-Martensite finish reverse-stress | 200   |
| Phase transformation strain                   | 6.5 % |
| Martensite-to-Austenite Module of Elasticity  | 40000 |

### تحلیل مدل اول

تاریخچه زمانی زلزله ایمپریال ولی ضبط شده در ال سنتر و مقیاس شده به میزانهای  $g/0.3$ ،  $g/0.6$ ،  $g/0.9$ ،  $g/1.2$  با استفاده از برنامه AIMS به منظور بدست آوردن تغییر مکانهای باقیمانده طبقه سوم در پایان زلزله و همچنین حداکثر تغییر مکانهای نسبی طبقه سوم بر روی سازه در نظر گرفته شده است. جرم معادل هر گره، برابر با یک چهارم جرم کل طبقه، محاسبه شده و بصورت متمرکز بر روی گره ها اعمال شد. از المان خمشی برای مدل کردن تیرها و ستونها؛ و از المان محوری برای بادبندها استفاده شد. اتصال ستونها به پی و اتصال تیرها با ستونها بصورت مفصلی در نظر گرفته شدند. از تغییر شکل محوری تیرها صرفنظر شده و سقف طبقات صلب در نظر گرفته شده است.

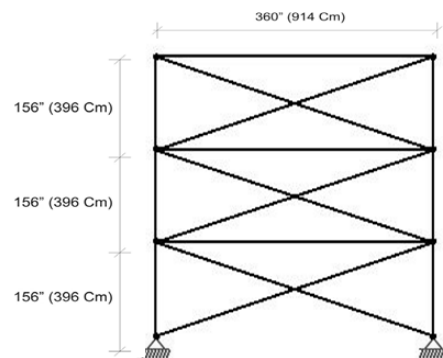
### نتایج تحلیل

با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی مدل‌های ساخته شده از بادبندهای SMA و BRB نمودارهای نیرو - تغییر مکان بادبندهای طبقه اول (شکل‌های ۴ الی ۱۱)؛ تاریخچه زمانی تغییر مکانهای طبقه سوم (شکل‌های ۱۲ الی ۱۷)؛ و تاریخچه زمانی تغییر مکانهای نسبی طبقه سوم نسبت به طبقه دوم (شکل‌های ۱۸ الی ۲۵) بدست آمد.

در طول زلزله؛ حداکثر تغییر مکان مانده طبقه پس از زلزله؛ حداکثر نیروهای محوری بادبندها؛ حداکثر لنگرهای خمشی ستونها؛ هزینه تمام شده سازه.

### مشخصات مدل اول

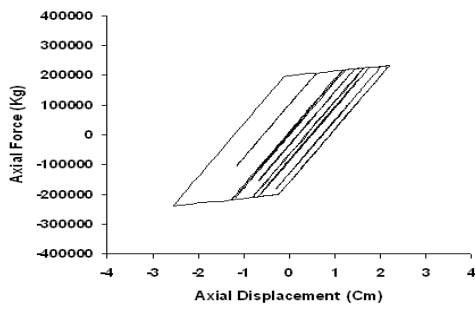
سازه سه طبقه پیشنهاد شده توسط Sabelli به عنوان سازه مینا برای بررسی و مقایسه عملکرد دو سیستم انتخاب گردید [۲۸]. با فرض تقارن در پلان می‌توان تنها یک قاب دو بعدی از سازه را مورد تحلیل و بررسی قرار داد (شکل ۳). از فولاد A572 Gr50 برای تیرها و ستونها و بادبندهای BRB استفاده شده است. ارتفاع هر طبقه  $3/96$  متر بوده و پلان سازه دارای ابعاد  $9/14$  در  $9/14$  متر می‌باشد. طبقات دارای سقف کامپوزیت با ارتفاع قسمت فولادی  $76$  میلی‌متر و  $5$  سانتیمتر پوشش بتنی می‌باشند. مشخصات هندسی مدل با بادبندهای BRB در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات مادی و هندسی تیرها و ستونها در هر دو مدل مهاربندی BRB و SMA یکسان است. بادبندهای SMA در هر طبقه به نحوی انتخاب شدند که سختی و ظرفیت محوری یکسانی با بادبندهای BRB داشته باشند. مشخصات مادی بادبندهای SMA بر حسب آزمایشات عملی انجام شده توسط DesRoches بر روی سیم‌های SMA مطابق جدول ۲ انتخاب شدند. سیم‌های SMA در آزمایش مذکور دارای سطح مقطع  $6/25$  سانتیمتر مربع بوده‌اند [۲۹].



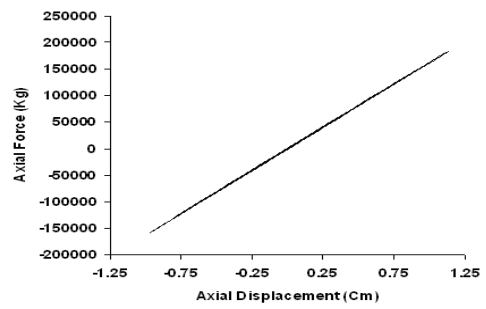
شکل ۳- مدل هندسی سازه [۲۸]

جدول ۱- مشخصات مقاطع مدل BRB [۲۸]

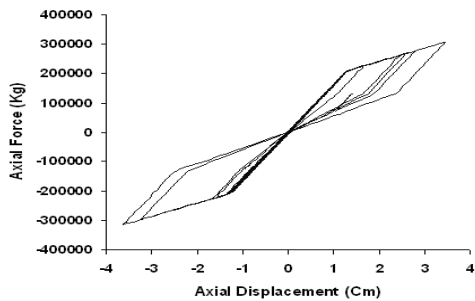
| Storey | Braces            | Beams     | Columns    |
|--------|-------------------|-----------|------------|
| 1      | HSS 8 * 8 * 0.5   | W 18 * 46 | W 12 * 106 |
| 2      | HSS 6 * 6 * 0.5   | W 18 * 46 | W 12 * 106 |
| 3      | HSS 5 * 5 * 0.375 | W 18 * 46 | W 12 * 106 |



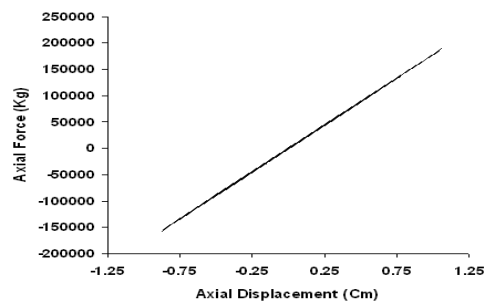
شکل ۸- نمودار نیرو- تغییر مکان محوری بادبندهای طبقه اول در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $0.9g$



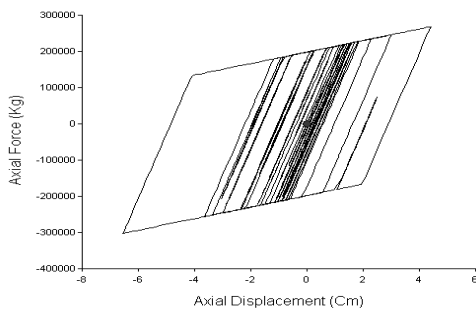
شکل ۴- نمودار نیرو- تغییر مکان محوری بادبندهای طبقه اول در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $0.3g$



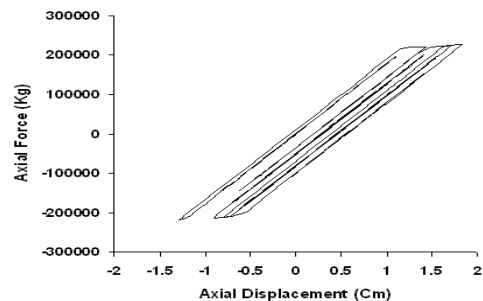
شکل ۹- نمودار نیرو- تغییر مکان محوری بادبندهای طبقه اول در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $0.9g$



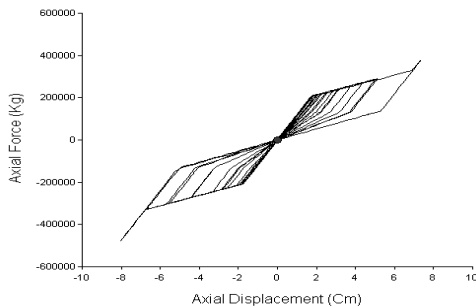
شکل ۵- نمودار نیرو- تغییر مکان محوری بادبندهای طبقه اول در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $0.3g$



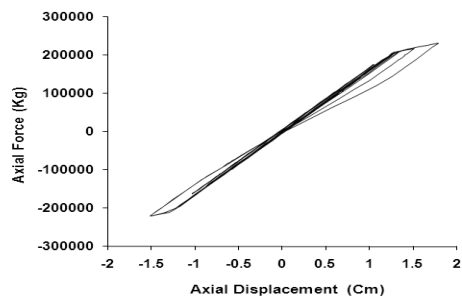
شکل ۱۰- نمودار نیرو- تغییر مکان محوری بادبندهای طبقه اول در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $1.2g$



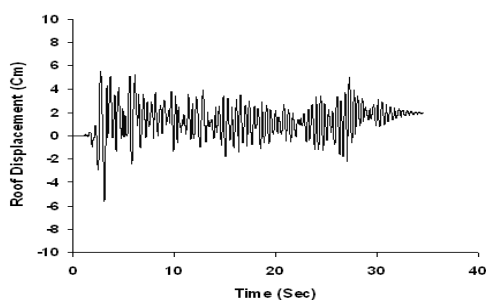
شکل ۶- نمودار نیرو- تغییر مکان محوری بادبندهای طبقه اول در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $0.6g$



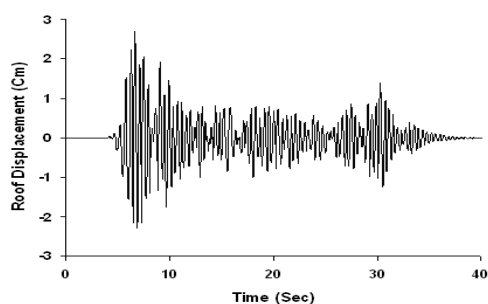
شکل ۱۱- نمودار نیرو- تغییر مکان محوری بادبندهای طبقه اول در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $1.2g$



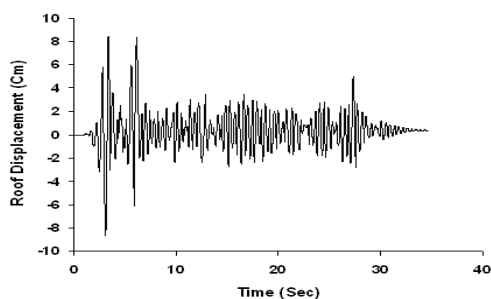
شکل ۷- نمودار نیرو- تغییر مکان محوری بادبندهای طبقه اول در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $0.6g$



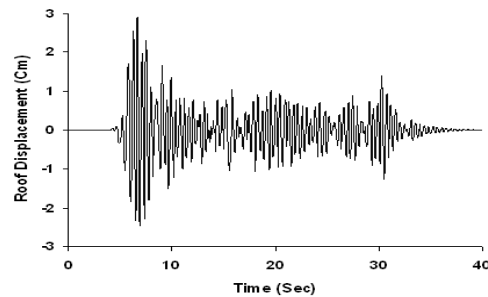
شکل ۱۶- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه سوم در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $0.9g$



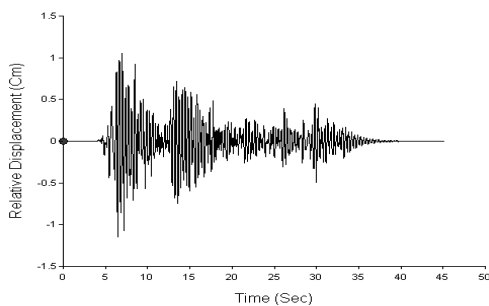
شکل ۱۲- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه سوم در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $0.3g$



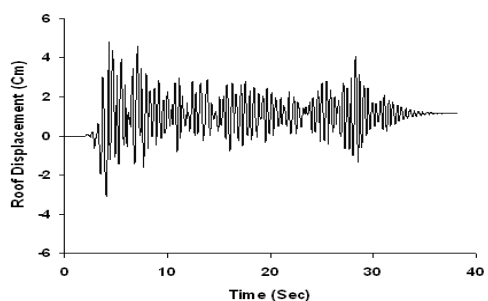
شکل ۱۷- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه سوم در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $0.9g$



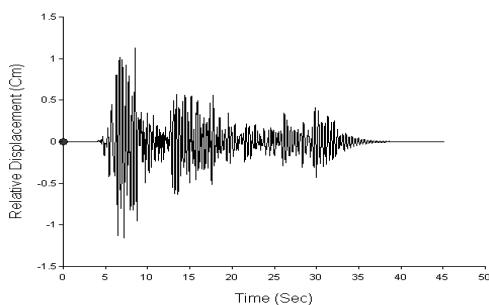
شکل ۱۳- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه سوم در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $0.3g$



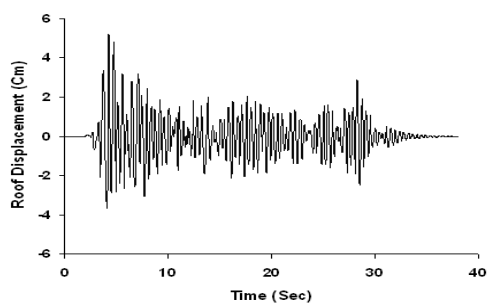
شکل ۱۸- تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی افقی طبقه سوم در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $0.3g$



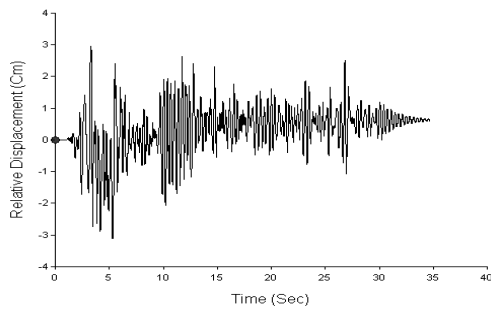
شکل ۱۴- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه سوم در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $0.6g$



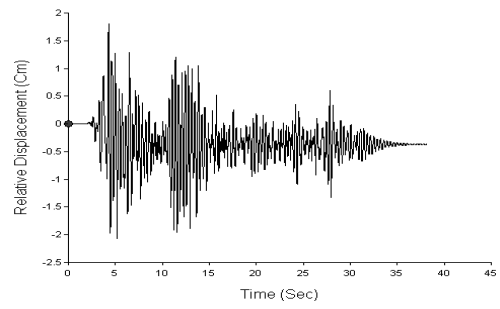
شکل ۱۹- تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی افقی طبقه سوم در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $0.3g$



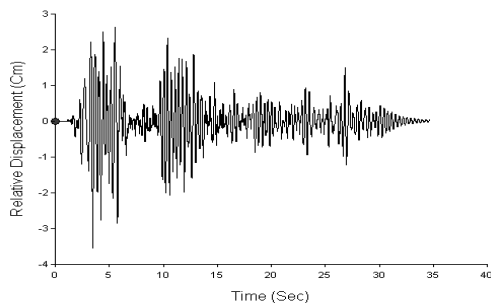
شکل ۱۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه سوم در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $0.6g$



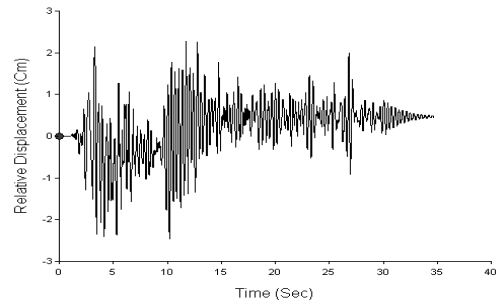
شکل ۲۴- تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی افقی طبقه سوم در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $1/2 g$



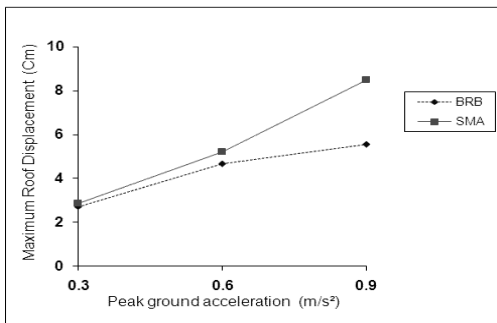
شکل ۲۰- تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی افقی طبقه سوم در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $1/6 g$



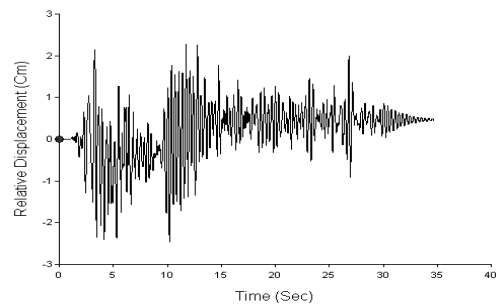
شکل ۲۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی افقی طبقه سوم در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی فرضی  $1/2 g$



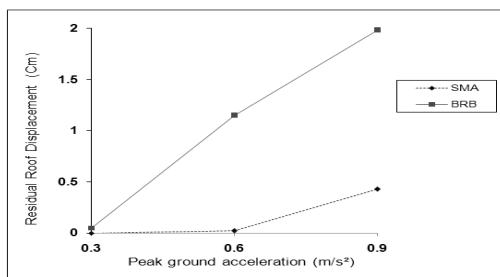
شکل ۲۱- تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی افقی طبقه سوم در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $1/6 g$



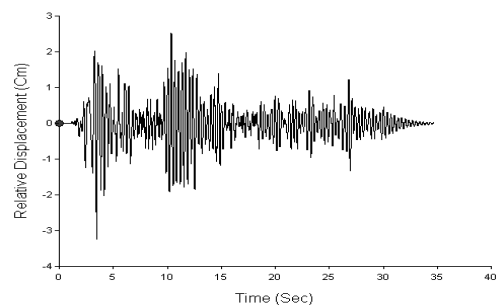
شکل ۲۶- تغییرات حداکثر تغییر مکان طبقه سوم نسبت به حداکثر شتاب زمین



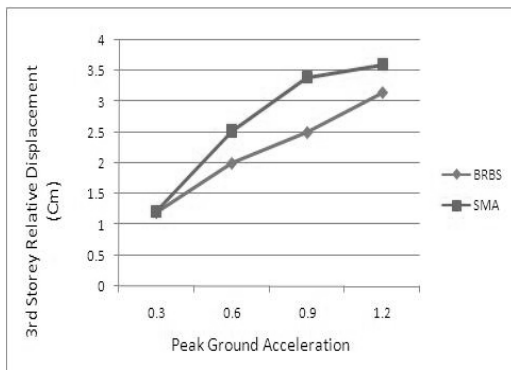
شکل ۲۲- تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی افقی طبقه سوم در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $1/9 g$



شکل ۲۷- تغییرات تغییر مکان مانده طبقه سوم پس از زلزله نسبت به حداکثر شتاب زمین

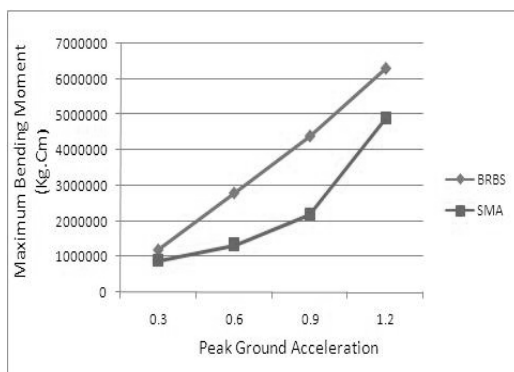


شکل ۲۳- تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی افقی طبقه سوم در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $1/9 g$



شکل ۲۸- نمودار حداکثر تغییر مکان نسبی طبقه سوم بر حسب حداکثر شتاب زمین

همانطور که در شکل ۲۹ نشان داده شده است، تا زمانی که بادبندهای SMA وارد فاز سخت شدگی نهایی نگردیده‌اند ( شکل‌های ۵، ۷ و ۹ )، لنگر خمشی وارده بر ستون‌ها در سیستم SMA بسیار کمتر از لنگر خمشی وارده بر ستون‌ها در سیستم BRB است که این بدلیل شکل پذیری بالای مهاربندهای SMA است که باعث می‌شود تقاضا بر روی اعضای اصلی سازه ( کنترل شونده توسط نیرو ) مانند ستون‌ها کاهش یابد. از طرف دیگر زمانی که بادبندهای SMA وارد مرحله سخت شدگی نهایی می‌گردند (شکل ۱۱)، بدلیل اینکه بار بیشتری را تحمل می‌کنند، این بار را به اتصالات و از آنجا به تیرها و ستون‌ها منتقل می‌کنند که این امر موجب می‌شود تقاضا بر روی اعضای اصلی سازه به نحو چشمگیری افزایش یابد. این موضوع در شکل ۲۹ برای شتاب فرضی  $g/1.2$  قابل مشاهده است.



شکل ۲۹- نمودار حداکثر لنگر خمشی ستون‌های طبقه اول بر حسب حداکثر شتاب زمین

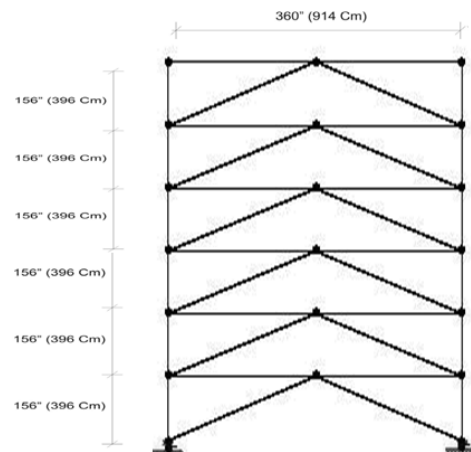
همانگونه که در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ نمایش داده شده است، زمانی که سازه تحت اثر شتاب افقی  $0.3g$  قرار می‌گیرد، تفاوت محسوسی در رفتار سازه ای که از بادبندهای BRB ساخته شده است، با رفتار سازه ساخته شده از بادبندهای SMA ندارد و هر دو سازه دارای تغییر مکان ماندگار و حداکثر تغییر مکان‌های مطلق و نسبی تقریباً برابری در تراز طبقه سوم هستند. زیرا بدلیل شدت کم زلزله، هر دو بادبند BRB و SMA در حالت الاستیک باقی مانده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵) و از آنجاییکه وارد محدوده غیر خطی نشده و هر دو دارای سختی محوری و ظرفیت باربری یکسان می‌باشند، رفتار دو سازه تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد. زمانی که سازه شتاب‌های بزرگتری را تجربه می‌کند، از آنجایی که بادبندهای سازه وارد محدوده غیر خطی می‌شوند (شکل‌های ۶ الی ۱۱)، رفتار دو سازه نسبت به یکدیگر دستخوش تغییرات اساسی می‌گردد. بدین صورت که سیستم دارای بادبندهای از نوع SMA بدلیل رفتار سوپر الاستیک خود، تغییر مکان‌های ماندگار بسیار کمتری را نسبت به سیستم دارای بادبندهای BRB به جای می‌گذارد. لیکن سیستم دارای بادبندهای از جنس SMA دارای پاسخ فرکانسی بیشتری بوده و حداکثر تغییر مکان‌های مطلق و نسبی بزرگتری را در طول زلزله نسبت به سازه دارای بادبندهای BRB تجربه می‌کند که این امر بدلیل تغییرات متعدد سختی و مقاومت مهاربندها و رفتار چند خطی این مواد تحت بار رفت و برگشتی می‌باشد.

از طرف دیگر، همانطور که در شکل ۲۸ نمایش داده شده است، در فاصله بین شتاب‌های  $0.9g$  و  $1.2g$ ، شیب افزایش تغییر مکان نسبی طبقه در سازه دارای بادبندهای SMA به طور محسوسی کاهش می‌یابد که این امر به دلیل وارد شدن بادبند SMA به فاز سخت شدگی نهایی است (شکل ۱۱) که سبب می‌شود سختی سازه افزایش یافته و در نتیجه تغییر مکانها کنترل شوند.



## مشخصات مدل دوم

سازه شش طبقه Chevron پیشنهاد شده توسط Sabelli و همکاران [۳۰] به عنوان سازه مبنا برای بررسی و مقایسه عملکرد دو سیستم انتخاب گردید. با فرض تقارن در پلان می‌توان تنها یک قاب دو بعدی از سازه را مورد تحلیل و بررسی قرار داد (شکل ۳۰). از فولاد A572 Gr50 برای تیرها و ستون‌ها و بادبندهای BRB استفاده شده است. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر بوده و پلان سازه دارای ابعاد ۹/۱۴ در ۹/۱۴ متر می‌باشد. طبقات دارای سقف کامپوزیت با ارتفاع قسمت فولادی ۷۶ میلیمتر و ۵ سانتیمتر پوشش بتنی می‌باشند. مشخصات هندسی مدل با بادبندهای BRB در جدول ۳ ارائه شده است. مشخصات مادی و هندسی تیرها و ستون‌ها در هر دو مدل مهاربندی BRB و SMA یکسان است. بادبندهای SMA در هر طبقه به نحوی انتخاب شدند که سختی و ظرفیت محوری یکسانی با بادبندهای BRB داشته باشند.



شکل ۳۰- مدل هندسی سازه [۳۰]

جدول ۳- مشخصات هندسی مدل BRB [۳۰]

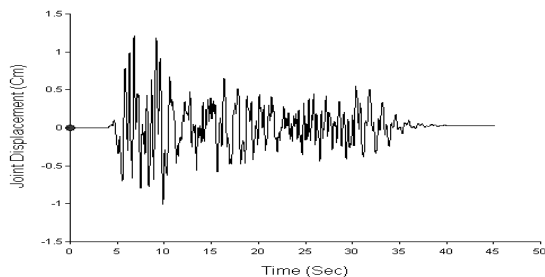
| Storey | Braces              | Beams     | Columns    |
|--------|---------------------|-----------|------------|
| 1      | HSS 10 * 10 * 0.625 | W 14 * 48 | W 14 * 121 |
| 2      | HSS 10 * 10 * 0.625 | W 14 * 48 | W 14 * 121 |
| 3      | HSS 8 * 8 * 0.625   | W 14 * 48 | W 14 * 121 |
| 4      | HSS 8 * 8 * 0.625   | W 14 * 48 | W 14 * 132 |
| 5      | HSS 8 * 8 * 0.5     | W 14 * 48 | W 14 * 132 |
| 6      | HSS 8 * 8 * 0.5     | W 14 * 48 | W 14 * 132 |

## تحلیل مدل دوم

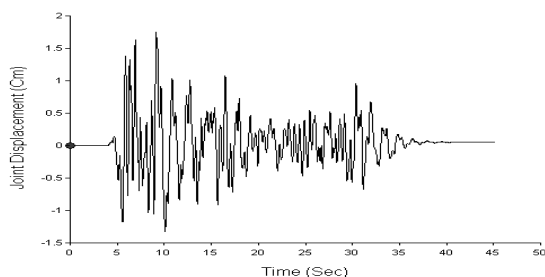
تاریخچه زمانی زلزله ایمپریال ولی ضبط شده در آل سنترو و مقیاس شده به میزانهای  $g/0.3$ ،  $g/0.6$  و  $g/0.9$  با استفاده از برنامه AIMS [۲۱] به منظور بدست آوردن تغییر مکان‌های باقیمانده طبقه اول در پایان زلزله و همچنین حداکثر تغییر مکان‌های طبقه اول در زمان زلزله، بر روی سازه در نظر گرفته شده است. جرم معادل هر گره، برابر با یک چهارم جرم کل طبقه، محاسبه شده و بصورت متمرکز بر روی گره‌ها اعمال شد. از المان خمشی برای مدل کردن تیرها و ستون‌ها؛ و از المان محوری برای بادبندها استفاده شده است. اتصال ستون‌ها به پی به صورت گیردار؛ و اتصال تیرها به ستون‌ها بصورت مفصلی در نظر گرفته شدند. از تغییر شکل محوری تیرها صرفنظر شده و سقف طبقات صلب در نظر گرفته شده است.

## نتایج تحلیل مدل دوم

با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی مدل‌های ساخته شده از بادبندهای SMA و BRB، تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های طبقه اول (شکل‌های ۳۱ الی ۳۶) بدست آمد.

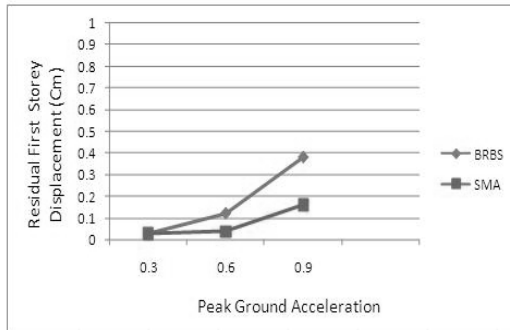


شکل ۳۱- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه اول در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی  $g/0.3$

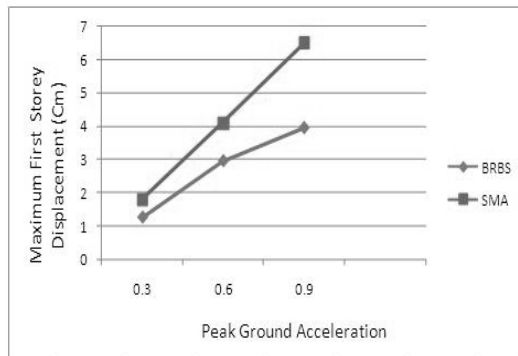


شکل ۳۲- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه اول در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی  $g/0.3$

همچنین تغییر مکان‌های ماندگار طبقه اول (شکل ۳۷) و حداکثر تغییر مکان‌های مطلق طبقه اول (شکل ۳۸) بدست آمد.

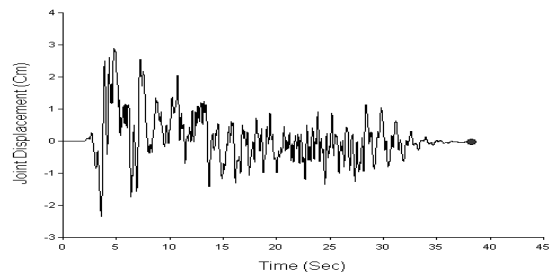


شکل ۳۷- تغییر مکان ماندگار طبقه اول بر حسب حداکثر شتاب زمین

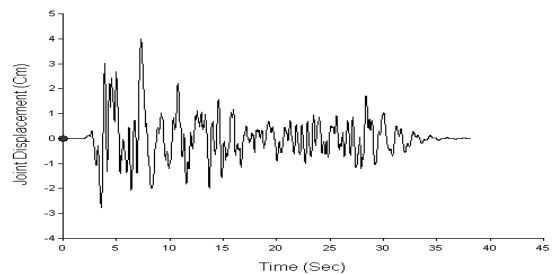


شکل ۳۸- حداکثر تغییر مکان طبقه اول بر حسب حداکثر شتاب زمین

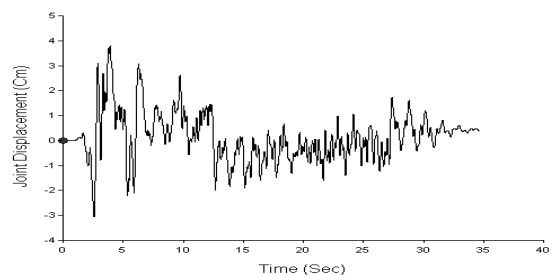
همانطور که در شکل ۳۷ نشان داده شده است، اگر چه با افزایش شتاب زمین، سیستم دارای بادبندهای SMA تغییر مکان‌های مانده نسبتاً کمتری را تجربه می‌کند، اما این مقادیر، تفاوت محسوسی با تغییر مکان‌های مانده سیستم BRB ندارند. به عبارت دیگر، بر خلاف سازه سه طبقه که در آن تفاوت محسوسی بین دو سیستم بادبندی SMA و BRB از لحاظ تغییر مکان مانده طبقه بود، در سازه ۶ طبقه مذکور، تفاوت چندانی بین سیستم بادبندی SMA و BRB وجود ندارد. عدم تفاوت محسوس بین تغییر مکان‌های ماندگار سیستم BRB و SMA می‌تواند به علت اثر مدهای بالاتر باشد. از طرف دیگر، همانطور که در شکل ۳۸ نشان داده شده است، در سیستم شش طبقه مذکور، همانند سیستم سه طبقه، حداکثر تغییر مکان‌های



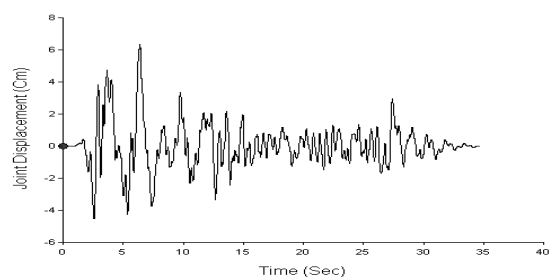
شکل ۳۳- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه اول در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی ۰/۶ g



شکل ۳۴- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه اول در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی ۰/۶ g



شکل ۳۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه اول در سیستم BRB تحت حداکثر شتاب افقی ۰/۹ g



شکل ۳۶- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی طبقه اول در سیستم SMA تحت حداکثر شتاب افقی ۰/۹ g

در سازه‌های کوتاه، اگرچه سازه‌های دارای مهاربندهای از جنس SMA عملکرد مناسبتری از سازه های BRB دارند، اما بدلیل بیشتر بودن حداکثر تغییر مکان‌های مطلق و نسبی (Drift) طبقه در سیستم‌های دارای بادبندهای SMA نسبت به سیستم‌های دارای بادبندهای مقید شده در برابر کمانش، باید احتیاط بیشتری در استفاده از این سیستم نمود. به دلیل شکل پذیری زیاد این مواد، باید توجه داشت که Drift سازه از Drift مجاز تجاوز نکند. در صورت استفاده از بادبندهای دارای آلیاژهای حافظه دار شکلی باید دقت شود که خصوصیات مادی و هندسی این مواد به نحوی انتخاب شود که در هنگام زلزله وارد فاز سخت شدگی نهایی نگردند زیرا در غیر این صورت، اگر چه سخت شدگی نهایی موجب کنترل تغییر مکانها می‌شود؛ ولی نیروی منتقل شده به ستون‌های سازه ر افزایش داده که باعث آسیب رساندن به سازه شده و حتی تخریب سازه را به دنبال خواهد داشت.

محسوس بیشتری در سیستم دارای بادبندهای SMA پدید می‌آید.

### نتیجه گیری

استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی به عنوان بادبندهای در محلهایی که شدت زلزله پایین تخمین زده می‌شود، بدلیل گران بودن این مواد و اینکه رفتار آنها در زلزله‌های ضعیف با رفتار سازه‌های دارای بادبندهای BRB تقریباً یکسان است، توصیه نمی‌شود و استفاده از بادبندهای BRB ارجحیت دارد.

در محلهایی که شدت زلزله زیاد تخمین زده می‌شود، استفاده از مهاربندهای از جنس SMA نسبت به مهاربندهای BRB در اولویت است؛ مشروط بر اینکه ارتفاع سازه از ۳ الی ۴ طبقه تجاوز نکرده و تقریباً تمام انرژی سازه در مود اول تلف شود. در صورتیکه مدهای بالاتر تاثیر زیادی در رفتار سازه داشته باشند، استفاده از بادبندهای SMA توصیه نمی‌شود.

### مراجع

- Otsuka, K. and Wayman, CM. (1998). "Shape memory materials." Cambridge University Press.
- Greniger, AB. and Mooridan, VG. (1938). "Strain transformation in metastable beta copper -zinc and beta copper-tin alloys." AIME Vol. 128, PP. 337-368.
- Buehler, WJ. and Wang, FE. (1967). "A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering." *Journal of Ocean Eng.*, Vol. 1, PP. 105-120.
- Michael, A.D. and Hart, W.B. (1980). "SME Brass—A new engineering material." *Metall. Material. Technol.*, Vol. 12, PP. 434-440.
- Graesser E. J. and Cozzarelli F.A. (1991). "Shape Memory Alloys as new materials for seismic isolation." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 11, PP. 2590-2608.
- Inaudi J. and Kelly J. (1994). "Experiments on tuned mass dampers using viscoelastic, frictional and shape memory alloy materials." *1<sup>st</sup> World Conference on Structural Control*, Aug 3-5, PP. 127-136.
- Sweeney, S.C. and Hayes, J.R. (May 1995). "Shape memory alloy dampers for seismic rehabilitation of existing buildings." *Proc., 27th Joint Meeting. Wind and Seismic Effects*.
- Clark, P.W., Aiken I. D., Kelly J. M., Higashino M., Krumme R. (1996). "Experimental and analytical studies of shape memory alloy dampers for structural contro." *SPIE Proc., Smart Materials Conference*.
- Adachi, Y. and Unjoh, S. (1999). "Development of shape memory alloy damper for intelligent bridge systems." *Proc., SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3671, PP. 31-42.
- Tamai, H. and Kitagawa, Y. (Aug 2000). "Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building." *IWCMM 10n Galway, Ireland*
- Wilde, K., Gardoni, P., Fujin, o Y. (2000). "Base isolation system with shape memory alloy devices for elevated highway bridges." *Eng. Struct. I*, Vol. 22, No. 3, PP. 222-229.
- Ohi, K. (2001). "Pseudo-dynamic earthquake response tests and cyclic loading tests on steel frames including pseudo-elastic elements." *NSF-JSPS, US-Japan Seminar on Advanced Stability and Seismicity Concepts for Performance Based Design of Steel and Composite Structures*, Kyoto, Japan
- Dolce, M. and Cardone, D. (2001). "Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications- I. Martensite and Austenite NiTi bars subjected to torsion." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, PP. 2631-2656.

14. 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*, Vol. 43, PP. 2657-2677.
15. DesRoches, R. and Delemont, M. (2002). "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys." *Engineering Structures*, Vol. 24, PP. 325-332.
16. Bruno, S. and Valente, C. (2002). "Comparative response analysis of conventional and innovative seismic protection strategies." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, PP. 1067-1092.
17. DesRoches, R., McCormick J., Delemont M. (2004). "Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars." *Journal of Structural Engineering*, Vol 130, No. 1, PP. 38-46.
18. Ocel, J., Desroches, R., Leon, R., Hess, W.G , Krumme, R. , Hayes, J.R., Sweeney, S. (2004). "Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory alloys." *ASCE Journal of Structural engineering*
19. Ghassemieh, M. and Iranmanesh, A.H. (2005). "Finite element analysis of framed structures using shape memeory alloy braces subjected to seismic loadings." *Proc., Joint ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics and Materials*, Baton Rouge, LA, USA.
20. Motahari, S.A, and Ghassemieh, M. (2007). "Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications." *Engineering Structures* Vol. 29, PP. 904-913.
21. Motahari, S.A, AIMS (Analysis of Intelligent Materials and Structures). (2006). Visual nonlinear dynamic multi degree of freedom finite element program, University of Tehran.
22. Tremblay, R., Degrange, G., Blouin, J. (June 1999). "Seismic rehabilitation of a four-storey building with a stiffened bracing system." *Proc., 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C. Canadian Association of Earthquake Engineering, Vancouver, B.C. PP. 549-554.
23. Clark, P. W., Aiken, I. D., Kasai, K., and Kimura, I. (2000). "Large-scale testing of steel unbonded braces for energy dissipation." *Proc., structures congress on advanced technology in structural engineering*, ASCE, Reston, Va.
24. Sabelli, R., et al. (2001). "Investigation of the Nonlinear Seismic Response of Special Concentric and Buckling Restrained Braced Frames and Implications for Design." Report to EERI, FEMA/EERI Professional Fellowship Report.
25. Lopez, W., Gwie, D., Saunders, M., and Lauck, T. (2002), "Lessons Learned from Large-Scale Tests of Unbonded Braced Frame Subassemblage." *Proc., SEAOC 71st Annual Convention*.
26. Tsai, K.C. and Huang, Y.C. (2002). "Experimental responses of large scale buckling restrained braced frames." Center for Earthquake Engineering Research (CEER), National Taiwan University, Taipei, Taiwan. Report R 01-03
27. Merritt, S., Uang, C.-M., Benzoni, G. (2003). "Subassemblage testing of core brace buckling-restrained braces." Report TR-2003/01, Structural Systems Research Projects, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, Calif.
- 28- Sabelli, R., "Research on Improving the Design and Analysis of Earthquake-Resistant Steel-Braced Frames." (2001). Professional Fellowship Report. No. PF2000-9, NEHRP, USA.
- 29- DesRoches R., McCormick J., Delemont MA. (2004). "Cyclical properties of superelastic shape memory Alloys." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 1, PP. 38-46.
- 30- Sabelli, R., Mahin, S., Chang, C., (2003). "Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling- restrained braces." *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 5, PP. 655-666.

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 – Shape Memory Alloy
- 2 – Buckling Restrained Brace
- 3 – Superelastic
- 4 – Austenite
- 5 – Martensite
- 6 – Recentering
- 7 – Buckling Restrained Bracing Systems