

## معرفی و ارزیابی سازه‌های مرکزگرای ترکیبی با رویکرد تاب‌آوری لرزه‌ای

امیر سینا شمس<sup>۱</sup>، محمد سهیل قبادی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

\* قزوین، صندوق پستی ۹۶۸۱۸-۳۴۱۴۸، [mshghobadi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:mshghobadi@eng.ikiu.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳)

### چکیده

در این پژوهش یک سیستم نوین مرکزگرای ترکیبی معرفی می‌شود. این سیستم متشکل از سیستم مرکزگرا و میراگر اصطکاکی پال می‌باشد. روش طراحی سیستم مرکزگرای ترکیبی توضیح و بسط داده می‌شود، همچنین مثال‌هایی از طراحی این سیستم ارائه می‌شود. سیستم مرکزگرای ترکیبی نه تنها دارای ظرفیت اتلاف انرژی خوبی است، بلکه می‌تواند تغییر مکان نسبی پسماند در سازه‌ها را کنترل و یا حتی حذف کند. در واقع سیستم‌های مرکزگرای ترکیبی توانایی تنظیم تغییر مکان نسبی پسماند هدف (صفر یا هر مقداری) در سازه تحت بار جانبی را مانند یک سیستم کاملاً مرکزگرا دارد، علاوه بر آن مزیت اتلاف انرژی بالای میراگرهای اصطکاکی پال را نیز داراست. این سیستم مرکزگرای ترکیبی به منظور تاب‌آوری لرزه‌ای از منظر اقتصادی (قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه بعد از زلزله) و عملیات ساخت توسعه داده شده است. به منظور ارزیابی روش طراحی پیشنهاد شده، از سازه‌های مختلف کوتاه تا بلند مرتبه (۳، ۶، ۹ و ۱۲ طبقه) که مجهز به سیستم مرکزگرا هستند و از ادبیات فنی انتخاب شده‌اند استفاده می‌شود و بر اساس روش معرفی شده طراحی مجدد می‌شوند. سپس این سازه‌ها تحت آنالیزهای چرخه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. تغییر مکان نسبی پسماند و ظرفیت اتلاف انرژی از جمله پارامترهایی از پاسخ سازه هستند که در این پژوهش بررسی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که معادلات طراحی پیشنهاد شده با دقت مناسب عملکرد هدف سازه (تغییر مکان نسبی پسماند هدف) با سیستم مرکزگرای ترکیبی را تأمین می‌کند و به وضوح برتری سیستم مرکزگرای ترکیبی به هر یک از سیستم‌های کاملاً مرکزگرا و پال مشخص می‌شود.

### واژگان کلیدی

تاب‌آوری لرزه‌ای، تغییر مکان نسبی پسماند، روش طراحی، سیستم مرکزگرا، میراگر اصطکاکی، منحنی هیستریزس

## Development and assessment of hybrid self-centering structures for seismic resilience

A.S. Shams, M.S. Ghobadi

### Abstract

In this study, a novel hybrid self-centering system is introduced. This system consists of self-centering systems and Pall friction dampers. The design methodology of hybrid self-centering systems is developed and some examples of the designed hybrid self-centering are presented. Hybrid self-centering systems not only have the capability of dissipating energy but can also remove or arrange residual drifts of structures. In fact, hybrid self-centering systems can maintain design target residual drifts (zero or any) during lateral loading similar to pure self-centering system and have the benefits of high capacity energy dissipation of Pall friction dampers. The hybrid self-centering system is developed for seismic resilience in terms of economic benefits, ready-to-use after the earthquake event, and practical fabrication. To evaluate the proposed design method, different low- to high-rise (3-, 6-, 9- and 12-story) buildings are selected from the literature, redesigned based on the proposed method, and then subjected to cyclic loading. Results are presented in terms of the cyclic response, residual drift and energy dissipation capacity of structures. Results indicate that the proposed design equations precisely meet the target structural performance (target residual drift) of the hybrid self-centering system and this system is obviously a superior system compared to the pure self-centering or Pall system.

### Keywords

Seismic resilience, Residual drift, Design methodology, Self-centering system, Friction damper, Hysteresis curve

بنابر مفاهیم پایداری در مهندسی سازه، سازه‌های تاب‌آور به سازه‌هایی اطلاق می‌شود که توانایی کنترل خسارت در حین و پس از تحمل زلزله‌ی شدید را داشته باشند. عملکرد ساختمان-های طراحی‌شده بر اساس آیین‌نامه‌های مرسوم مبتنی بر بروز خرابی در اجزاء اصلی سازه است. چنین سازه‌هایی حتی در صورتی که عملکرد لرزه‌ای مناسبی از خود نشان دهند، پس از تجربه‌ی زلزله شدید قابل استفاده نیستند [۱]. دو فاکتور مهم حداکثر تغییر مکان نسبی طبقه و تغییر مکان نسبی پسماند برای ارزیابی خرابی سازه استفاده می‌شود. حداکثر تغییر مکان نسبی طبقه نشان دهنده‌ی خرابی اجزاء سازه‌ای و تغییر مکان نسبی پسماند نمایانگر قابلیت استفاده از سازه پس از زلزله است [۲]. معیاری برای میزان خرابی بر اساس تغییر مکان نسبی پسماند و اتخاذ تصمیم در مورد سرنوشت سازه‌ها (تعمیر یا تخریب) بعد از تحمل بار جانبی توسط FEMA P-58 [۳] تعیین شده است: سازه‌هایی که تغییر مکان نسبی پسماند در آنها کمتر از ۰/۲٪ است، خرابی سازه‌ای کمی دارند و ممکن است نیاز به تعمیر اجزاء غیر سازه‌ای باشد. سازه‌هایی که تغییر مکان نسبی پسماند آنها محدود به ۰/۵٪ (آستانه‌ی تعمیرپذیری) است، هزینه‌های تعمیرات پس از زلزله نسبت به هزینه‌های تخریب و ساخت مجدد هنوز اقتصادی است. بنابراین سازه‌هایی که تغییر مکان نسبی پسماندشان از این حد بیشتر باشد احتمالاً دچار خرابی سازه‌ی شدید شده‌اند و تعمیر آنها توجیه اقتصادی ندارد.

در روند طراحی‌های مرسوم عموماً پارامترهایی نظیر حداکثر تغییر مکان نسبی طبقه و تغییر مکان نسبی پسماند به عنوان پاسخ سازه (خروجی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. ولی در طراحی تاب‌آور به منظور کنترل خسارات تلاش می‌شود که از این پارامترها به عنوان ورودی در روند طراحی استفاده شود. برخی از سیستم‌های باربر جانبی مانند BRB و میراگر ویسکوز ذاتاً دارای توانایی اتلاف انرژی بالایی هستند، از طرف دیگر سیستم‌های مرکزگرای نوین نیز توانایی بالایی در کنترل تغییر مکان نسبی پسماند سازه‌ها دارند. طراحی سازه‌ها به نحوی که از هر دوی این ویژگی‌ها (اتلاف انرژی و مرکزگرایی) بهره‌بردار می‌تواند تا حد زیاد موجب کنترل خسارات در حین زلزله و قابل استفاده بودن پس از زلزله شود. تحقیقات زیادی در زمینه‌ی ترکیب هوشمند سیستم‌های باربر جانبی به منظور دست‌یابی به عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تر از سازه‌های مرسوم انجام شده است.

Zhu و Zhang [۴] مهاربندی را معرفی کرده‌اند که

مرکزگرایی آن توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار تأمین می‌شود درحالی که اتلاف انرژی آن از طریق اصطکاک بهبود می‌یابد. آنها با انجام آزمایش‌های تجربی و محدودیت‌های پیکربندی مهاربند، سهم مشارکت نیروی اصطکاکی را ۳۸٪ مقاومت تسلیم آلیاژ حافظه‌دار در نظر گرفتند. میراگرهای دیگری نیز در تحقیقات گذشته [۵ و ۶] از همکاری آلیاژ حافظه‌دار و اصطکاک برای ایجاد یک سیستم نوین ترکیبی با میزان اتلاف انرژی مطلوب و توانایی مرکزگرایی بهره‌برده‌اند.

Tian و Qiu [۷] سیستم مرکزگرای مجهز به آلیاژ حافظه‌دار را به صورت موازی با سیستم کماتش تاب استفاده کرده‌اند و با توجه به آنالیزهای تاریخچه زمانی، تغییر مکان نسبی پسماند را کاهش دادند. تلاش‌های مشابهی برای دستیابی به نحوه و میزان مطلوب مشارکت سیستم‌های کماتش تاب و آلیاژ حافظه‌دار انجام شده است [۸-۱۰].

در دهه‌ی اخیر، استفاده از مصالح آلیاژ حافظه‌دار به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردش در علوم گوناگون مرسوم شده است. آلیاژهای حافظه‌دار با توجه به توانایی بازیابی تغییر شکل‌های زیاد متحمل شده در مهندسی عمران برای فراهم کردن یک سیستم مرکزگرا استفاده می‌شود. آلیاژهای حافظه‌دار به سبب داشتن نمودار هیستریزس پرچمی شکل می‌توانند در سازه‌ها تغییر مکان نسبی پسماند را حذف و یا کاهش دهند. از این مصالح گران‌قیمت در تمام اجزای سازه شامل اتصالات [۱۱]، مهاربندها [۱۲]، میراگرها [۱۳] و تیر-ستون‌ها [۱۴] استفاده می‌شود. همکاری سیستم‌های مجهز به آلیاژ حافظه‌دار (به عنوان جزء مرکزگرا) و مفهوم اصطکاک (به عنوان جزء اتلاف‌کننده‌ی انرژی) مورد توجه محققین بوده است.

در این پژوهش تلاش می‌شود سیستم ترکیبی نوینی ارائه شود که با روش طراحی پیشنهاد شده بتواند معیارهای تاب‌آوری را ارضا کند. سازه‌های تاب‌آور پس از تحمل زلزله‌های شدید با صرف هزینه و زمان کم، قابل بهره‌برداری خواهند بود. از آنجایی که تغییر مکان نسبی پسماند معیاری برای تصمیم‌گیری یا تخریب سازه پس از زلزله است، از آن به عنوان ورودی الگوریتم طراحی استفاده می‌شود. سیستم مرکزگرای ترکیبی به طور قابل اعتمادی دارای توانایی مرکزگرایی و اتلاف‌کنندگی انرژی است که این ویژگی‌ها به ترتیب از میراگر معرفی شده توسط Qiu [۱۵] و میراگر اصطکاکی Pall [۱۶] نشئت می‌گیرد. میراگر مرکزگرای Qiu در تحقیقات گذشته عملکرد لرزه‌ای خوبی از خود نشان داده است [۱۷]. این میراگر مجهز به

شکل (۱) به تصویر کشیده شده است، عملکرد سیستم مرکزگرای ترکیبی وابسته به سهم مشارکت هیستریزس‌های اجزاء مرکزگرا و اتلاف‌کننده انرژی آن است که با توجه به پارامتر  $S$  تعیین می‌شود. مطابق با توصیه‌ی FEMA P-58 سازه‌هایی که تغییر مکان نسبی پسماند طبقات آن کمتر از  $0.5$  درصد باشد تعمیر آن‌ها پس از زلزله توجیه اقتصادی دارد، از طرف دیگر محل برخورد نمودار هیستریزس (برش-تغییر مکان نسبی طبقه) با محور افقی، حداکثر تغییر مکان نسبی پسماندی است که طبقه می‌تواند تحمل کند. بنابراین با فرمولیزه کردن نمودار هیستریزس سیستم مرکزگرای ترکیبی می‌توان رفتار آن را پیش‌بینی کرد. همانطور که در شکل (۱) مشخص است، وقوع تغییر مکان نسبی پسماند در دو حالت محتمل است، در مسیر باربرداری الاستیک یا پلاستیک رخ دهد (که به ترتیب با مسیر I و II نشان داده شده است). در نتیجه با بکارگیری اجزاء مرکزگرا و اتلاف‌کننده انرژی در موازات هم و محدود کردن حداکثر تغییر مکان نسبی پسماند قابل تصور به آستانه‌ی تعمیرپذیری، می‌توان تاب‌آور بودن لرزه‌ای سازه را تضمین کرد.

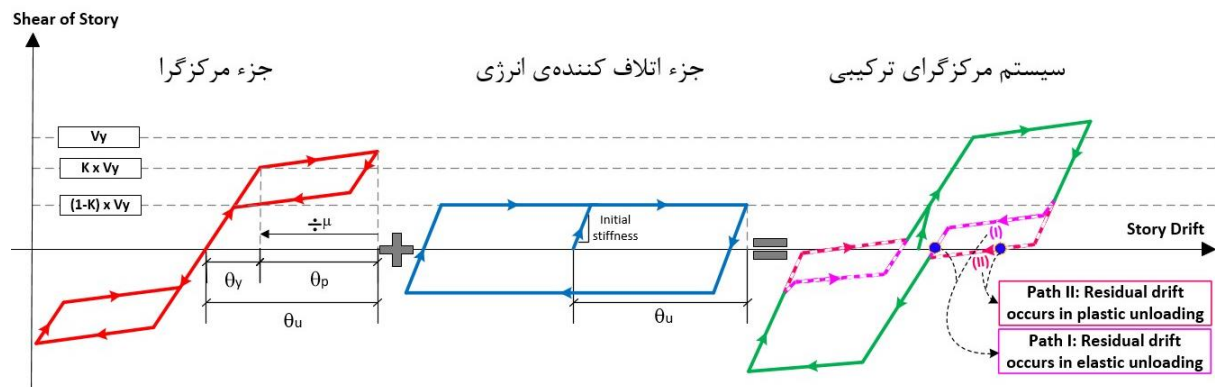
#### ۲-۱- معرفی جزء مرکزگرای سیستم ترکیبی

میراگر معرفی شده توسط Qiu [۱۵] مسئول ایجاد رفتار مرکزگرا در سیستم ترکیبی است. این میراگر مجهز به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار است که در دمای اتاق رفتار ابر کشسان نشان می‌دهند. شکل (۲) به صورت شماتیک این میراگر را نشان می‌دهد. بر اساس مکانیزم عملکرد میراگر، سیم‌ها همیشه در کشش هستند. نمودار هیستریزس کلی این میراگر در کشش و فشار متقارن است. قسمت سبز رنگ نشان‌دهنده شده در شکل (۲) وظیفه‌ی جانمایی مهاربند مرکزگرا در دهانه‌های مختلف را دارد.

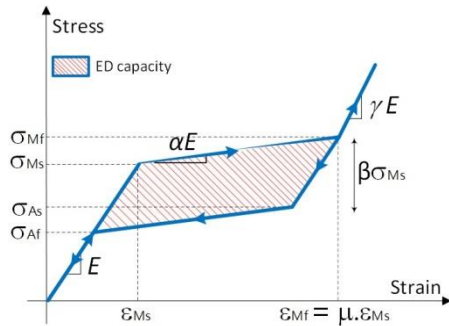
سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار است که سهم آن در سیستم مرکزگرای ترکیبی با کمک الگوریتم طراحی پیشنهاد شده به نحوی تعیین می‌شود که علاوه بر اقتصادی بودن طرح (حداقل حجم مصرفی آلیاژ حافظه‌دار)، معیارهای تاب‌آوری مورد نظر طراحی را ارضا کند. میراگر اصطکاکی پال با توجه به شکل نمودار هیستریزس‌شان (متوازی الاضلاع شکل) معمولاً دارای توانایی اتلاف انرژی بالا و تمایل به تحمیل تغییر مکان نسبی پسماند زیاد به سازه را دارد. سهم جزء اتلاف‌کننده انرژی در سیستم برابر جانی باید به نحوی تعیین شود که با توجه به ملاک‌های تغییر مکان نسبی پسماند تعمیر سازه نسبت به تخریب و ساخت مجدد منطقی و اقتصادی باشد. شایان ذکر است، استفاده از میراگرها (به عنوان یک سیستم غیرفعال) در سیستم برابر جانی به دلیل اجتناب از خرابی اجزاء اصلی سازه موجب سهولت و تسریع فرآیند تعمیر پس از زلزله می‌شود. از تحلیل‌های استاتیکی برای صحت سنجی سیستم پیشنهاد شده بهره گرفته می‌شود.

#### ۲- معرفی سیستم مرکزگرای ترکیبی

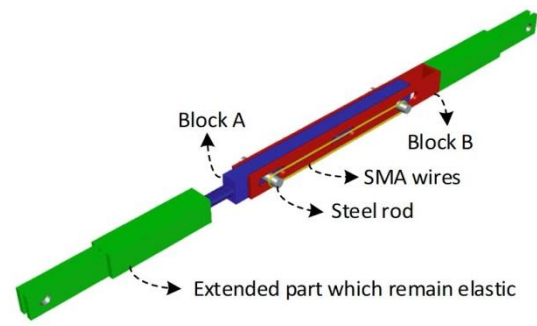
مفهوم اصلی الگوریتم طراحی سیستم مرکزگرای ترکیبی بر پایه‌ی نمودار هیستریزس اجزاء آن است. سازه‌هایی که فقط مجهز به سیستم برابر جانی مرکزگرا هستند توانایی حذف یا کاهش تغییر مکان نسبی پسماند را ندارند ولی توانایی اتلاف انرژی کمتری نسبت به سیستم‌های اتلاف‌کننده انرژی دارند. ایده‌ی اصلی الگوریتم طراحی سیستم مرکزگرای ترکیبی استفاده‌ی بهینه از میراگرهای بر پایه‌ی آلیاژ حافظه‌دار (حجم آلیاژ حافظه‌دار مصرفی کمتر) و بهره‌گرفتن از میراگر اصطکاکی پال به منظور بهبود ظرفیت اتلاف انرژی است. همانطور که در



شکل ۱- طرح ساده سازی شده‌ی مکانیزم ایجاد سیستم مرکزگرای ترکیبی در مختصات برش-دریفت طبقه



شکل ۳- نمودار هیستریزس آلیاژها حافظه‌دار در دمای بالاتر از دمای پایانی آستینیت



شکل ۲- پیکر بندی میراگر مرکزگرا و نحوه‌ی عملکرد آن در کشش و فشار [۱۵]

جدول ۱- مشخصات مصالح آلیاژ حافظه‌دار

$\beta$	$\alpha$	$\mu$	$E$ (MPa)	$\epsilon_{MS}$ (%)	$\sigma_{MS}$ (MPa)	Type of SMA
۰/۵۰	۰/۱۶	۵/۰	۵۰/۰	۱/۰	۵۰۰	NiTi

## ۲-۲- معرفی جزء (قطعه) اتلاف‌کننده‌ی سیستم ترکیبی

مفهوم اصطکاک به دلیل سهولت در عملکرد و هزینه‌ی نصب و نگهداری کم به عنوان یک سیستم قابل اعتماد کنترل‌کننده‌ی غیرفعال در صنعت ساختمان کاربرد دارد [۱۶]. میراگر اصطکاکی توسعه‌داده شده توسط پال یکی از مرسوم‌ترین روش‌های استفاده از مفهوم اصطکاک در سیستم باربر جانبی است. پیکربندی متنوع و نمودار پایدار هیستریزس امکان بهره‌گرفتن از این میراگر را در سیستم مرکزگرایی ترکیبی ایجاد می‌کند. روش مرسوم طراحی میراگرهای اصطکاکی بر مبنای بهینه‌سازی نیروی لغزندگی مابین صفحات اصطکاک است. در روش تاب‌آور طراحی سیستم مرکزگرایی ترکیبی نیروی لغزندگی به نحوی بهینه‌سازی می‌شود که سازه تحت زلزله علاوه بر کنترل خسارات جانی، توانایی کنترل خسارات مالی و محیط زیستی پس از زلزله را نیز داشته باشد. در شکل (۴) میراگر اصطکاکی پال به تصویر کشیده شده است.

$$\eta = \frac{\alpha(\mu - 2)^2 + 2(\mu - 1) + 1}{R^2} \quad (1)$$

$$V_y/W = \left( -\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4\gamma S_a^2} \right) / 2 \quad (2)$$

$$\lambda = \left[ 1 + \frac{\alpha(\mu - 1)}{2} \right] \left( \frac{8\pi^2}{T^2 g} \right) \left( \sum_{i=1}^n C_i h_i \right) \theta_p \quad (3)$$

آلیاژهای حافظه‌دار شامل آلیاژهای متفاوتی هستند که به شکل سیم در مرکزگرایی سیستم ترکیبی تجهیز می‌شوند. آلیاژهای حافظه‌دار که به عنوان مصالحی هوشمند شناخته می‌شوند به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند در زمینه‌ی تاب‌آوری لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های آلیاژهای حافظه‌دار وابسته به دما و سطح تنش وارده به هستند. دو ساختار کریستالی آستینیت و مارتنزیت رفتار این مصالح را شرح می‌دهد. فاز آستینیت با ساختاری با تقارن بالا تمایل به پایداری در دماهای بالا و تنش‌های کم دارد، در حالی که فاز مارتنزیت با ساختاری با تقارن پایین در دماهای پایین و تنش‌های زیاد پایدار است. در شرایطی که دمای محیط بیش از حد تبدیل آستینیت باشد مصالح آلیاژ حافظه‌دار از خود رفتار ابر کشسان نشان می‌دهند (که در دمای اتاق این فرض برای میراگر مرکزگرایی Qiu صادق است [۱۵]).

مشهورترین آلیاژ حافظه‌دار، آلیاژ نایتینول است که ترکیبی از فلزهای نیکل و تیتانیوم می‌باشد. در شکل (۳) نمودار تنش- کرنش آلیاژ حافظه‌دار به صورت شماتیک نشان داده شده است، که در آن  $\sigma_{Ms}$ ،  $\sigma_{Mf}$ ،  $\sigma_{As}$  و  $\sigma_{Af}$  به ترتیب تنش‌های شروع تبدیل آستینیت به مارتنزیت، پایان تبدیل آستینیت به مارتنزیت، شروع تبدیل مارتنزیت به آستینیت و پایان تبدیل مارتنزیت به آستینیت می‌باشد. همچنین  $E$  مدول الاستیسیته‌ی فاز مربوطه می‌باشد (در اینجا آستینیت)،  $\epsilon_{Ms}$  و  $\epsilon_{Mf}$  کرنش نظیر کرنش تسلیم و کرنش حداکثر می‌باشند. در مصالح آلیاژ حافظه‌دار مفهومی مطابق با تسلیم وجود ندارد و به منظور تغییر فاز است، از این رو پارامتر  $\sigma_{Ms}$  و  $\epsilon_{Ms}$  با عناوین  $\sigma_y$  و  $\epsilon_y$  معرفی می‌شوند.  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  پارامترهای معرفی آلیاژ حافظه‌دار هستند. فرضیاتی که برای مصالح آلیاژ حافظه‌دار در این پژوهش استفاده شده است در جدول (۱) آورده شده است.

رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید.  $w_j$  و  $h_j$  به ترتیب ارتفاع و وزن طبقه‌ی  $j$ ام است.  $\theta_p$  تغییر مکان نسبی پلاستیکی که تغییر مکان هدف را ایجاد می‌کند، است (تغییر مکان نسبی حداکثر،  $\theta_u$ ، منهای تغییر مکان نسبی متناظر با تسلیم،  $\theta_y$ )، برای اینکه تقاضای تغییر شکل یکسانی در ارتفاع به طبقات وارد شود فرض شده است  $\theta_p$  در هر یک از طبقات یکسان و ثابت است. در رابطه‌ی (۴) و (۵) تعداد طبقات و  $q$  ضریب توزیع نیروی جانبی در ارتفاع است. در این پژوهش  $q$  برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است.

پس از تعیین برش پایه به کمک رابطه‌ی (۲) و توزیع آن در طبقات با رابطه‌ی (۴)، نیروی طراحی هر طبقه مشخص می‌شود. در گام بعدی سهم مشارکت اجزاء اتلاف‌کننده‌ی انرژی و مرکزگرای سیستم ترکیبی باید تعیین شود، پارامتر  $S$  مسئولیت این امر را بر عهده دارد. به کمک قوانین ساده‌ی تحلیل سازه و استاتیک و هندسه‌ی مهاربند همگرا، مساحت آلیاژ حافظه‌دار مورد نیاز،  $A_i$ ، و طول المان آلیاژ حافظه‌دار،  $l_i$ ، در طبقه‌ی  $i$ ام از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$A_i = S \frac{\sum_{j=i}^n C_j V_y}{2 \cos \theta_i \cdot \sigma_y SMA} \quad (6)$$

$$l_i = \frac{E_{SMA} \theta_y (h_i - h_{i-1}) \cos \theta_i}{\sigma_y SMA}, \quad h_0 = 0 \quad (7)$$

که در این معادلات  $\theta_i$  زاویه مهاربند همگرا با افق در طبقه-ی  $i$ ام است.  $S$  ضریبی است که میزان مشارکت میراگر اصطکاکی پال و سیستم مرکزگرا را در سیستم باربر جانبی تعیین می‌کند. مطابق شکل (۱) و با توجه به موازی بودن اجزاء، سهم جزء مرکزگرا از برش پایه‌ی طراحی برابر با  $S \times V_y$  و به تبع آن سهم جزء اتلاف‌کننده‌ی انرژی برابر با  $(1-S) \times V_y$  است.  $S=1/0.0$  به معنای این است که تمام نیروی جانبی وارد بر سازه توسط سیستم مرکزگرا تحمل می‌شود و  $S=0/0.0$  دال بر یک سیستم پال یگانه است. در تحقیق گذشته [۱۸] طراحی سازه‌های مجهز به سیستم مرکزگرا ( $S=1/0.0$ ) انجام شده است. در این سازه‌ها مصالح آلیاژ حافظه‌دار علاوه بر ایجاد مرکزگرایی در سیستم، مسئولیت تمام اتلاف انرژی سیستم باربر جانبی را نیز برعهده دارند. در سیستم مرکزگرایی ترکیبی  $S=0/60$  به معنی ۴۰ درصد صرفه جویی در حجم مصرفی آلیاژ حافظه‌دار نسبت به سیستم کاملاً مرکزگرا است، از طرف دیگر به معنی استفاده از میراگر اصطکاکی پال با اتلاف انرژی بالا برای تحمل ۴۰ درصد از برش پایه‌ی طراحی است. مقدار  $S$  با توجه به ارضای هدف

$$C_i = (P_i - P_{i+1}) \left( \frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{qT^{-0.2}} \quad (4)$$

$$p_i = \left( \frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{w_n h_n} \right)^{qT^{-0.2}} \quad (5)$$



شکل ۴- میراگر اصطکاکی پال

پایه و اساس روش طراحی سیستم مرکزگرایی ترکیبی، رویکرد طراحی بر اساس عملکرد است. این روش توسط Qiu و همکارانش [۱۸] برای سیستم‌های مرکزگرا توسعه داده شده است. در این مقاله روند طراحی فوق‌الذکر با توجه به مفهوم تاب‌آوری لرزه‌ای برای سیستم مرکزگرایی ترکیبی بسط داده می‌شود. در اولین گام از روند طراحی، برای بدست آوردن ضریب اصلاح انرژی،  $\eta$ ، از روابط پیشنهاد شده‌ی  $\mu$ -R-T، کمک گرفته می‌شود.  $\eta$  در واقع فاکتوری در معادله‌ی برابری انرژی است که نشان‌دهنده‌ی این است که انرژی جذب شده توسط سیستم غیر الاستیک کسری از انرژی جذب شده توسط سیستم الاستیک است.  $\eta$  از رابطه‌ی (۱) تعیین می‌شود، در حالی که ضریب کاهش مقاومت،  $R$ ، با توجه به مشخصات میراگر ( $\alpha$  و  $\beta$ ) از رابطه‌ی  $\mu$ -R-T مناسب گرفته می‌شود.  $\mu$  و  $T$  به ترتیب شکل‌پذیری و پررود اصلی سازه‌ی یک درجه آزادی هستند. جزئیات بیشتر از معادلات و منحنی‌های روابط  $\mu$ -R-T را می‌توان در پژوهش Qiu و همکارانش یافت [۱۸].

برش پایه‌ی طراحی،  $V_y$ ، بر اساس تابعی از تغییر مکان هدف تعریف می‌شود و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۱۸]:

که در این معادلات  $W$ ، وزن کلی سازه،  $\lambda$ ، تخمینی از انرژی جذب شده توسط سیستم باربر جانبی در تغییر مکان هدف،  $S_d$ ، تقاضای سازه از طیف طرح شتاب برای سازه‌ی یک درجه آزادی با پررود  $T$  است؛  $C_i$  ضریب اصلاح نیرو است و از

است که تغییر مکان نسبی پسماند هدف کوچک‌تر از  $\theta_y$  باشد و رابطه (۱۱) از ردیابی مسیر II حاصل می‌شود و زمانی حاکم است که تغییر مکان نسبی پسماند هدف بزرگ‌تر از  $\theta_y$  باشد. بنابراین برای بدست آوردن S، نیاز به تعیین دقیق  $\theta_y$  است و از طرفی در این گام از طراحی که مشخصات تیرها، ستون‌ها و سیستم باربر جانبی هنوز نامشخص است، این امر ممکن نیست. به همین دلیل در جهت محافظه‌کاری مقدار S از حداکثر دو مقدار بدست آمده از رابطه‌ی (۱۰) و (۱۱) تعیین می‌شود. مقدار S با تغییر مکان نسبی پسماند هدف رابطه‌ی عکس دارد، با توجه به مفهوم پارامتر S، هر چقدر مقدار S بیشتر باشد به معنی مرکزگراتر بودن سیستم و در نتیجه تغییر مکان نسبی پسماند کم‌تر است. برای اینکه تعمیر سازه‌ای پس از زلزله منطقی باشد، لازم است که تمام طبقات تغییر مکان نسبی پسماندی کم‌تری نسبت به حدود مشخص شده در FEMA P-58 تحمل کنند. با توجه به روند طراحی بحث شده، اگر تغییر مکان نسبی پسماند هدف برای مثال ۰/۵٪ (یا هر مقدار دیگری) در نظر گرفته شود، الگوریتم ذکر شده تضمین می‌کند که تغییر مکان نسبی پسماند در تمام طبقات کمتر از این مقدار باشد.

پس از تعیین S، مشخصات سیستم مرکزگرا باید مطابق با برش  $S \times V_y$  به کمک معادلات (۶) و (۷) تعیین شود. همچنین میراگر اصطکاکی پال باید برای برش  $(1 - S) \times V_y$  طراحی شود. در گام آخر عملکرد لرزه‌ای سیستم طراحی شده نسبت به تخمین‌های اولیه و فرضیات هدف باید ارزیابی شود.

### ۳- سازه‌های نمونه

برای صحت سنجی و مقایسه‌ی بهتر سیستم مرکزگرای ترکیبی از سازه‌هایی با ارتفاع‌های متنوع به عنوان نمونه استفاده شده است. در نامگذاری نمونه‌ها، پیشوند ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی سازه‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ طبقه است که مجهز به نایتینول معرفی شده در جدول (۱) هستند. نمونه‌هایی که سیستم باربرجانبی آن‌ها تنها مجهز به سیستم مرکزگرا است (به عبارت دیگر  $S=1/0.0$ )، با حرف S نشان داده می‌شود. نمونه‌های ۱S، ۲S، ۳S و ۴S در تحقیق گذشته طراحی شده است [۱۹]. نمونه‌های ذکر شده در جهت مقایسه و ارزیابی عملکرد سیستم نوین مرکزگرای ترکیبی از ادبیات فنی انتخاب شده است. در این پژوهش نمونه‌های متناسب به سیستم مرکزگرای ترکیبی در دو گروه ارائه می‌شوند. با توجه به توصیه‌های FEMA-P58 با محدود کردن تغییر مکان نسبی پسماند طبقات به ۰/۵٪ می‌توان

تاب‌آوری (تغییر مکان نسبی پسماند) سیستم مرکزگرای ترکیبی تعیین می‌شود.

همانطور که در شکل (۱) مشخص است، با توجه به موازی بودن سیستم‌های مرکزگرا و میراگر اصطکاکی پال، منحنی هیستریزس سیستم ترکیبی از جمع برداری اجزانش حاصل می‌شود. برای این منظور باید نقاط مهم شکل هیستریزس (نمودار برش-تغییر مکان نسبی) با پارامترها نامگذاری شود. برش طبقه و تغییر مکان نسبی طبقه‌ی جزء مرکزگرای سیستم ترکیبی که مطابق با نقطه‌ی تسلیم هستند از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید (این پارامترها در شکل (۱) به تصویر کشیده شده‌اند):

$$SV_y = 2A_i \sigma_y SMA \cos \theta_i \quad (۸)$$

$$\theta_y = \frac{L_i \sigma_y SMA}{E_{SMA} h_i \cos \theta_i} = \frac{L_i \varepsilon_y SMA}{h_i \cos \theta_i} \quad (۹)$$

تغییر مکان نسبی پسماند در نمودار برش-تغییر مکان نسبی، محل برخورد هیستریزس با محور افقی است. به عبارت دیگر نقطه‌ای با مختصات  $(V=0)$ ، تغییر مکان نسبی پسماند هدف) با قرار گرفتن در معادله‌ی خط نمودار هیستریزس سیستم مرکزگرای ترکیبی تغییر مکان نسبی پسماند هدف را مشخص می‌کند. تغییر مکان نسبی پسماند هدف پارامتر تاب‌آوری سیستم است که به عنوان یکی از ورودی‌های روند طراحی به دلخواه تعیین می‌شود. این پارامتر بر اساس پیشنهادات FEMA P-58 به نحوی انتخاب می‌شود که ترمیم و تعمیر سازه پس از تحمل زلزله نسبت به تخریب و ساخت مجدد آن منطقی باشد. مطابق شکل (۱)، دو سناریوی محتمل برای نمودار هیستریزس سیستم مرکزگرای ترکیبی وجود دارد:

- مسیر I: تغییر مکان نسبی پسماند در مرحله‌ی باربرداری الاستیک از نمودار هیستریزس رخ می‌دهد.
  - مسیر II: تغییر مکان نسبی پسماند در مرحله‌ی باربرداری پلاستیک از نمودار هیستریزس رخ می‌دهد.
- با توجه به دو سناریوی موجود، به ترتیب از رابطه‌ی (۱۰) و (۱۱) برای تعیین S در مسیرهای I و II استفاده می‌شود:

$$\frac{1}{S} - 1 = \frac{\theta_{res} h_i \cos \theta_i}{L_i \varepsilon_y SMA} \quad (۱۰)$$

$$\frac{1}{S} - 1 = \frac{\alpha \theta_{res} h_i \cos \theta_i}{L_i \varepsilon_y SMA} + (1 - \alpha)(1 - \beta) \quad (۱۱)$$

رابطه (۱۰) از ردیابی مسیر I حاصل می‌شود و زمانی حاکم



رفته در این نمونه‌ها به سادگی مشخص می‌شود، به عنوان مثال مشخصات نمونه‌های H5 در جدول (۳) آورده شده است. طول المان آلیاژ حافظه‌دار در نمونه‌ها یکسان است.

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های S

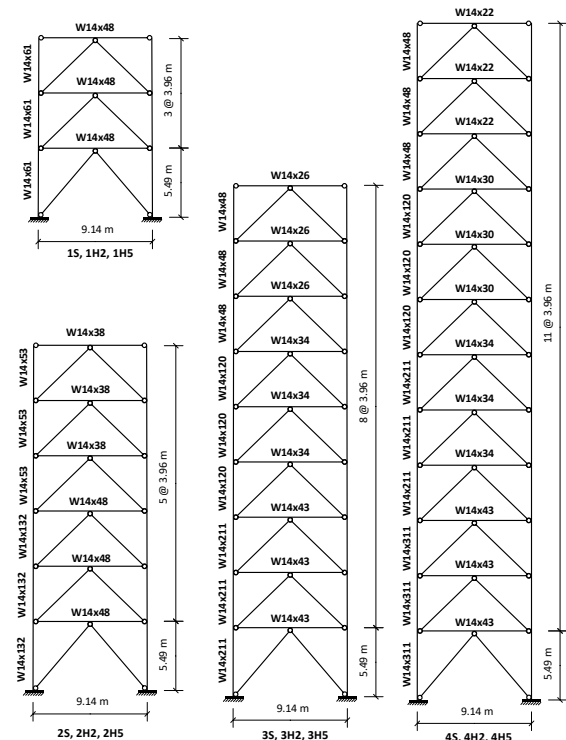
نام نمونه	۱S	۲S	۳S	۴S	مساحت سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار مصرفی (mm <sup>2</sup> )	طول سیم آلیاژ حافظه‌دار (m)
برش پایه نرمال $V_y/W$	۰/۳۸	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۰۷		
پریود سازه (s)	۰/۶۰	۱/۲۱	۱/۸۴	۲/۵۱		
طبقه ۱	۲۲۳۵/۶	۲۱۴۹/۶	۲۰۷۱/۶	۱۹۶۰/۴		
طبقه ۲	۱۸۵۰/۲	۱۷۴۰/۸	۱۷۲۱/۰	۱۶۴۳/۰		
طبقه ۳	۱۱۵۷/۰	۱۱۶۰/۶	۱۱۶۱/۸	۱۱۶۲/۲		
طبقه ۴	-	۱۳۹۳/۲	۱۵۷۶/۰	۱۵۶۸/۰		
طبقه ۵	-	۱۱۰۵/۸	۱۴۶۱/۴	۱۵۰۹/۴		
طبقه ۶	-	۷۰۸/۰	۱۳۱۴/۴	۱۴۳۵/۸		
طبقه ۷	-	-	۱۱۲۸/۸	۱۳۴۵/۶		
طبقه ۸	-	-	۸۹۳/۴	۱۲۳۶/۶		
طبقه ۹	-	-	۵۸۱/۴	۱۱۰۵/۸		
طبقه ۱۰	-	-	-	۹۴۷/۸		
طبقه ۱۱	-	-	-	۷۵۳/۰		
طبقه ۱۲	-	-	-	۴۹۷/۸		
طبقه اول	۱/۰۵۴	۱/۰۵۴	۱/۰۵۴	۱/۰۵۴		
سایر طبقات	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰		

#### ۴- جزئیات مدل‌سازی

تمام مدل‌سازی‌ها در نرم افزار کد باز OpenSees انجام شده است [۲۱]. مطابق شکل (۶)، به دلیل تقارن و ساده سازی تنها یک دهانه از قاب‌های مرکزگرا و اتلاف‌کننده‌ی انرژی در موازات تیرها هم مدل شده‌اند. بر اساس فرضیات طراحی اولیه، اتصالات تیرها و مهاربندها به ستون مفصلی مدل‌سازی شده است. تیر و ستون‌ها توسط المان‌های تیر-ستون الاستیک مدل شده‌اند. تیرها به صورت اتصال مفصلی ساده در نظر گرفته شده‌اند (که در شکل (۶) مشخص است) و طوری طراحی شده‌اند که در معرض بار ثقیلی، الاستیک باقی بمانند.

مدول الاستیسیته در تمام مدل‌سازی‌ها بر اساس مشخصات فولاد A992 برابر با ۲۰۰ GPa فرض شده است. ستون‌ها به صورت یکپارچه در ارتفاع مدل‌سازی شده‌اند. پای ستون‌ها مطابق شکل (۶) به دلیل افزایش نامعینی سازه‌های مرکزگرا به صورت گیردار فرض شده است. دیافراگم کف در تمام طبقات

به اصطلاح یک سیستم تاب‌آور لرزه‌ای ایجاد کرد، همچنین با محدود کردن تغییر مکان نسبی پسماند به ۰/۲٪ می‌توان خسارات وارد بر سازه را به طرز چشم‌گیری کاهش داد. در این پژوهش، سازهایی که مجهز به سیستم باربری جانبی مرکزگرای ترکیبی هستند و طراحی آن‌ها بر اساس محدود کردن تغییر مکان نسبی پسماند طبقات با مقدار ۰/۵٪ و ۰/۲٪ انجام شده است، به ترتیب با H5 و H2 ارائه می‌شوند. شکل (۵) مشخصات و نمای قاب‌های نمونه‌ها را به تصویر کشیده است.



شکل ۵- نمای نمونه‌ها

پارامتر طراحی لرزه‌ای تمام سازه‌ها مطابق با منطقه‌ی لرزه‌ای Los Angeles در نظر گرفته شده است. جرم لرزه‌ای و جایگیری دهانه‌های مهاربندی در نمونه‌های ۳ و ۶ طبقه مطابق با سازه‌های معرفی شده توسط Sabelli [۲۰] و نمونه‌های ۹ و ۱۲ طبقه براساس نمونه‌های تنظیم شده توسط Qiu، تطبیق داده شده است. جزئیات طراحی مقاطع تیر و ستون‌های نمونه‌های S که از تحقیقات قبلی مستخرج شده است در جدول (۲) آورده شده است. برای مقایسه‌ی بهتر میان دو سیستم مرکزگرا و ترکیبی سطح مقاومت یکسانی برای آن‌ها در نظر گرفته شده است. پس از تعیین ضریب S و طراحی نمونه‌های مرکزگرای ترکیبی، مشخصات میراگر آلیاژ حافظه‌دار و میراگر اصطکاکی پال به کار

صلب در نظر گرفته شده است.

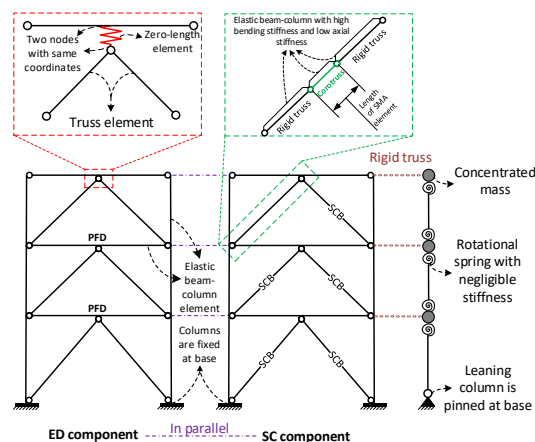
برای در نظر گرفتن اثرات  $P - \Delta$  از مفهوم ستون تکیه‌گاهی بهره گرفته شده است. این ستون ثقلی صرفاً برای در نظر گرفتن اثرات مرتبه دوم در سازه‌ها مدل شده است و هیچ اضافه مقاومت و یا سختی به سازه اعمال نمی‌کند. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، مدل سازی مهاربند مجهز به میراگر مرکزگرا به صورت سه بخشی انجام شده است. بخش اساسی که بخش میانی مهاربند می‌باشد ویژگی و مشخصات سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار را با طول حقیقی آن‌ها مدل سازی می‌کند. دو بخش دیگر که در انتها و ابتدای مهاربند تعبیه شده‌اند وظیفه‌ی الاستیک باقی ماندن و تنظیم طول میراگر در دهانه‌های مختلف را بر عهده دارد. این دو بخش با اعضای خرابایی صلب مدل سازی شده‌اند. برای جلوگیری از ناپایداری خمشی مهاربند (از آنجایی که هر سه بخش با المان‌های خرابایی که در اصل دو سر مفصل هستند مدل سازی شده‌اند)، سه المان تیر-ستون الاستیک با سختی خمشی بالا (ممان اینرسی بالا) و سختی محوری ناچیز (مساحت ناچیز) در موازات المان‌های اصلی مدل شده‌اند. اما قسمت اصلی (قسمت میانی) که وظیفه‌ی غیر خطی شدن را دارد با مصالح Self-Centering در نرم افزار OpenSees تعریف شده است. با توجه به تغییر شکل‌های بزرگ غیرخطی برای این المان، بخش میانی با المان خرابایی همگرد مدل شده است. از المان بدون طول همراه با مصالح elastic perfectly plastic برای مدل سازی میراگر اصطکاکی پال استفاده شده است. این المان مطابق شکل (۶) ما بین نقاط انتهایی مهاربند شون و میانه‌ی تیر طبقه قرار می‌گیرد. مهاربندهای متصل به میراگر اصطکاکی پال با المان تیر-ستون الاستیک مدل سازی شده‌اند و ابعاد آن‌ها به نحوی تعیین شده است که پیش کمانش میراگر اصطکاکی فعال شود.

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های H5

نام نمونه	۱H5	۲H5	۳H5	۴H5
پربود سازه (s)	۰/۶۳	۰/۹۵	۱/۴۶	۲/۰۳
مساحت سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار مصرفی (mm <sup>2</sup> )	طبقه ۱	۱۳۲۴/۶	۱۲۷۳/۶	۱۲۲۷/۵
	طبقه ۲	۱۰۹۷/۳	۱۰۳۲/۴	۱۰۲۰/۷
	طبقه ۳	۶۸۶/۲	۹۴۹/۴	۹۸۵/۶
	طبقه ۴	-	۸۲۶/۳	۹۳۴/۷
	طبقه ۵	-	۶۵۵/۹	۸۶۶/۸
	طبقه ۶	-	۴۱۹/۹	۷۷۹/۶
	طبقه ۷	-	-	۶۶۹/۵
	طبقه ۸	-	-	۵۲۹/۸
	طبقه ۹	-	-	۳۴۴/۸
	طبقه ۱۰	-	-	-
	طبقه ۱۱	-	-	-
	طبقه ۱۲	-	-	-
سطح مقاومت میراگر اصطکاکی پال (kN)	طبقه ۱	۵۸۳۱/۸	۵۶۰۷/۵	۵۴۰۴/۰
	طبقه ۲	۵۶۸۹/۲	۵۳۵۲/۸	۵۲۹۱/۹
	طبقه ۳	۳۵۵۷/۷	۴۹۲۱/۷	۵۱۰۹/۹
	طبقه ۴	-	۴۲۸۴/۰	۴۸۴۶/۱
	طبقه ۵	-	۳۴۰۰/۲	۴۴۹۳/۷
	طبقه ۶	-	۲۱۷۷/۰	۴۰۴۱/۷
	طبقه ۷	-	-	۳۴۷۱/۰
	طبقه ۸	-	-	۲۷۴۷/۱
	طبقه ۹	-	-	۱۷۸۷/۸
	طبقه ۱۰	-	-	-
	طبقه ۱۱	-	-	-
	طبقه ۱۲	-	-	-

### ۵- آنالیز چرخه‌ای

آنالیز چرخه‌ای تمام نمونه‌ها بر اساس الگوی بارگذاری شکل مد اول انجام شده است. نقطه‌ی کنترل‌کننده در این آنالیز گره‌ی گوشه‌ای در تراز بام است. چرخه‌ها متناظر با تغییر مکان نسبی بام ۲۵٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ است. تغییر مکان نسبی بام تغییر مکان تجمعی جانبی گره‌ی گوشه‌ای بام تقسیم بر ارتفاع کلی سازه است. شکل (۷)-الف و ب به ترتیب نمودار هیستریزس جزء اتلاف‌کننده‌ی انرژی، جزء مرکزگرا و عملکرد سیستم ترکیبی در طبقه‌ی سوم نمونه‌ی ۲H5 و ۲H2 را در مقایسه با طبقه‌ی متناظر در نمونه‌ی ۲S نشان می‌دهد. پارامتر S برای طبقه‌ی اول و سایر طبقات نمونه‌ی ۲H5 با توجه به

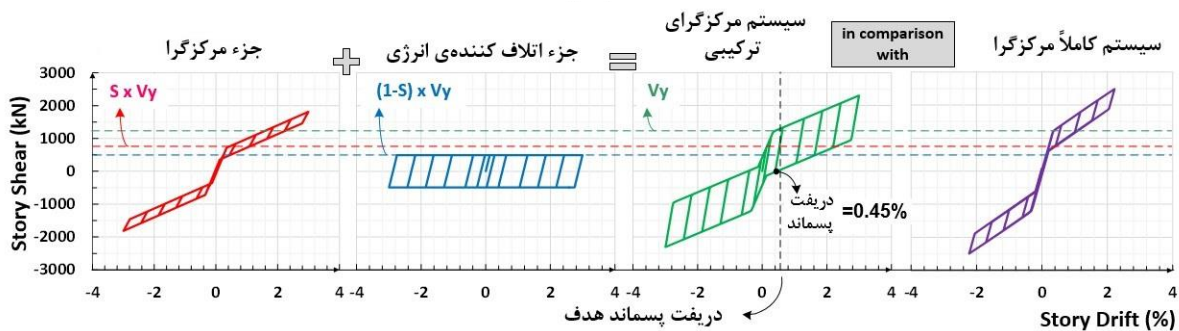


شکل ۶- جزئیات مدل سازی

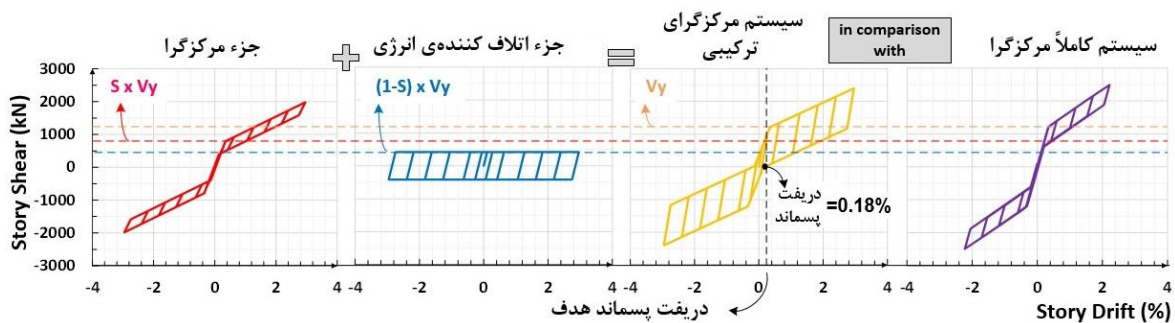


کرده است (به دلیل اینکه مقدار پارامتر  $S$  برای طبقات اول و سایر طبقات تفاوت معنا داری ندارد، تنها مقدار بدست آمده برای طبقات معمول گزارش شده است). نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های  $H2$  و  $H5$  با معیارهای پیشنهاد شده توسط FEMA-P58 تاب‌آور محسوب می‌شوند. بدین معنی که تغییر مکان نسبی پسماند در تمام طبقات آن‌ها به صورت محافظه‌کارانه (و نه غیر اقتصادی) کمتر از تغییر مکان نسبی پسماند هدفشان است. بنابراین روابط پیشنهاد شده با دقت مناسبی تغییر مکان نسبی پسماند طبقات را می‌تواند تنظیم کند.

معادلات بیان شده به ترتیب  $0/5925$  و  $0/5931$  محاسبه شده است. همچنین پارامتر  $S$  برای طبقه اول و سایر طبقات نمونه‌ی  $2H2$  به ترتیب  $0/6550$  و  $0/6551$  محاسبه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌ی  $2H5$  در حدود  $40\%$  درصد و نمونه‌ی  $2H2$  تقریباً  $35\%$  درصد مصالح آلیاژ حافظه‌دار کمتری نسبت به نمونه‌ی کاملاً مرکزگرای متناظرشان نیاز دارند. در حالی که حداکثر تغییر مکان نسبی پسماند قابل وقوع در این طبقه برای نمونه‌ی  $2H5$  و  $2H2$  به ترتیب  $0/45\%$  و  $0/18\%$  است. جدول (۴) مقادیر  $S$  و تغییر مکان نسبی پسماند بدست آمده از نتایج تحلیل چرخه‌ای در تمام طبقات نمونه‌ها را خلاصه



(الف)



(ب)

شکل ۶- نمودار هیستریزس طبقه‌ی سوم نمونه‌ی الف)  $2H5$  ب)  $2H5$  که به دررفت پسماند  $0/5\%$  محدود شده‌اند، به تفکیک اجزاء اتلاف‌کننده‌ی انرژی و مرکزگرا

آورده شده است. بدیهی است که سیستم‌های کاملاً مرکزگرا معرفی شده توسط Qiu دارای عملکرد قابل قبولی هستند، ولی سیستم مرکزگرای ترکیبی معرفی شده در این پژوهش برای رسیدن به عملکرد قابل قبول علاوه بر بهبود رفتار سازه از مصالح گران قیمت آلیاژ حافظه‌دار کمتری استفاده می‌کند که همین موضوع این سیستم را به یک انتخاب اقتصادی و تاب‌آور به عنوان سیستم باربر جانبی تبدیل می‌کند. با دقت در نتایج جدول (۴) دریافت می‌شود که طبقات

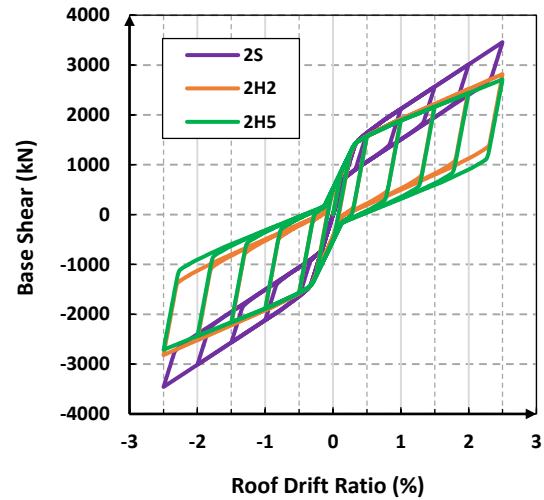
با هدف مقایسه‌ی جامع، هیستریزس کلی (برش پایه-تغییر مکان نسبی بام) نمونه‌های  $2S$ ،  $2H2$  و  $2H5$  در شکل (۸) ترسیم شده است. مساحت محصور در نمودار هیستریزس نشان‌دهنده‌ی توانایی اتلاف انرژی سیستم است. نمونه‌های  $2H5$  و  $2H2$  در مقایسه با نمونه‌ی  $2S$  به ترتیب  $195\%$  و  $167\%$  توانایی اتلاف انرژی بالاتری دارند، در حالی که حجم آلیاژ حافظه‌دار مصرفی در آن‌ها کمتر است. میزان بهبود اتلاف انرژی نمونه‌های  $H$  نسبت به نمونه‌های  $S$  متناظرشان در جدول (۴)

## ۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک سیستم مرکزگرایی ترکیبی معرفی شد و الگوریتم طراحی منحصر به فرد آن توسعه داده شد. الگوریتم طراحی سیستم مرکزگرایی ترکیبی با بهینه کردن مصالح مصرفی گران قیمت آلیاژ حافظه‌دار توانایی تنظیم تغییر مکان نسبی پسماند طبقات سازه و توانایی اتلاف انرژی مناسبی دارد. اگرچه مقدار تغییر مکان نسبی پسماند هدف می‌تواند هر مقدار دلخواهی باشد ولی معیارهای انتخاب تغییر مکان نسبی پسماند هدف در این پژوهش توصیه‌های FEMA P-58 است. این سیستم متشکل از دو جزء مرکزگرا و اتلاف‌کننده انرژی است که به ترتیب مسئولیت آن‌ها با سیستم مرکزگرا و میراگر اصطکاکی پال است. در ادامه طراحی چند نمونه متنوع در تعداد طبقات با معادلات پیشنهاد شده انجام شد و سپس عملکرد نمونه‌های مدل شده با استفاده از نرم‌افزار OpenSees تحت آنالیزهای چرخه‌ای ارزیابی شد. نتایج زیر با توجه به فرضیات انجام شده و محدودیت‌های مطرح شده از تحلیل‌های شبه-استاتیکی انجام شده بر روی نمونه‌ها بدست آمده است:

■ با توجه به نتایج تحلیل‌های چرخه‌ای، دقت روابط تحلیلی ارائه شده برای کنترل تغییر مکان نسبی پسماند هدف در نمونه‌های ترکیبی هوشمند، در جهت محافظه کارانه و قابل اعتماد است.

نمونه‌های 1H5، 2H5، 3H5 و 4H5 تغییر مکان نسبی پسماند کمتر از تغییر مکان نسبی پسماند هدفشان (0/5٪) دارند و در مقایسه با نمونه‌های S متناظرشان بیش از 40٪ مصالح کمتر نیاز دارند در حالی که به ترتیب 158٪، 195٪، 194٪ و 188٪ ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری دارند. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که الگوریتم طراحی معرفی شده مستقل از ارتفاع سازه، برای سازه‌های کوتاه، میان و بلند مرتبه قابل اعتماد است. نتایج مشابه برای نمونه‌های H2 متناظر نیز صحنه بر این ادعا می‌گذارد.



شکل ۸- نمودار هیستریزس نمونه‌های 2S، 2H2 و 2H5

جدول ۴- مقدار محاسبه شده‌ی S، دریفت پسماند بدست آمده و میزان افزایش ظرفیت انرژی نمونه‌ها

نمونه	پارامتر S برای طبقات	میزان بهبود ظرفیت اتلاف انرژی (%)	دریفت پسماند بدست آمده در طبقه (%)											
			طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	طبقه چهارم	طبقه پنجم	طبقه ششم	طبقه هفتم	طبقه هشتم	طبقه نهم	طبقه دهم	طبقه یازدهم	طبقه دوازدهم
1H5	0/5931	158	0/40	0/48	0/45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2H5	0/5931	195	0/32	0/46	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45
3H5	0/5931	194	0/27	0/43	0/44	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45
4H5	0/5931	188	0/22	0/39	0/43	0/44	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45
1H2	0/6551	134	0/16	0/19	0/18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2H2	0/6551	167	0/15	0/19	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18
3H2	0/6551	166	0/14	0/19	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18
4H2	0/6551	161	0/13	0/19	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18	0/18

نمونه‌های H1-H4 با تغییر مکان نسبی پسماند هدف 0/5٪ در حدود 40٪ صرفه جویی در نایتینول داریم، در حالی که به طور میانگین در این نمونه‌ها 183٪، افزایش

■ سیستم مرکزگرایی ترکیبی نسبت به سیستم کاملاً مرکزگرا، مصالح گران قیمت آلیاژ حافظه‌دار کمتری استفاده می‌کند و علاوه بر آن اتلاف انرژی بهتری نیز دارد. برای مثال در

- [14] Wang, B., Zhu, S., Qiu, C.X. and Jin, H. (2019), "High-performance self-centering steel columns with shape memory alloy bolts: Design procedure and experimental evaluation", *Engineering Structures*, Vol. 182, pp.446-458.
- [15] Qiu, C. and Zhu, S. (2017), "Shake table test and numerical study of self-centering steel frame with SMA braces", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 46, pp.117-137.
- [16] Pall, A.S. and Marsh, C. (1982), "Response of friction damped braced frames", *Journal of the Structural Division*, Vol. 108, pp.1313-1323.
- [17] Qiu, C., Zhang, Y., Li, H., Qu, B., Hou, H. and Tian, L. (2018), "Seismic performance of concentrically braced frames with non-buckling braces: a comparative study", *Engineering Structures*, Vol. 154, pp.93-102.
- [18] Qiu, C.X. and Zhu, S. (2017), "Performance-based seismic design of self-centering steel frames with SMA-based braces", *Engineering Structures*, Vol. 130, pp.67-82.
- [19] Qiu, C., Li, H., Ji, K., Hou, H. and Tian, L. (2017), "Performance-based plastic design approach for multi-story self-centering concentrically braced frames using SMA braces", *Engineering Structures*, Vol. 153, pp.628-638.
- [20] Sabelli, R., Mahin, S. and Chang, C. (2003), "Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces", *Engineering Structures*, Vol. 25, pp.655-666.
- [21] McKenna, F., Fenves, G.L. and Scott, M.H. (2000), "Open system for earthquake engineering simulation", University of California, Berkeley, CA.
- ظرفیت اتلاف انرژی داریم. در همین نمونه‌ها با محدود کردن تغییر مکان نسبی پسماند به  $0.2\%$ ، مصالح آلیاژ حافظه‌دار در حدود  $35\%$  کاهش می‌یابد و به طور میانگین  $15\%$  درصد اتلاف انرژی بهبود داده می‌شود.
- با انتخاب مناسب نمونه‌های ۳ تا ۱۲ طبقه، دقت و عملکرد روابط ارائه شده در ارتفاعات مختلف سازه‌ها تایید می‌شود.
- ۷- مراجع
- [1] Grigorian, M. and Grigorian, C.E. (2018), "Sustainable earthquake-resisting system", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 144, pp.04017199.
- [2] Ruiz-García, J. and Aguilar, J.D. (2015), "Aftershock seismic assessment taking into account postmainshock residual drifts", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 44, pp.1391-1407.
- [3] FEMA-P58-1 FEMA, (2012), *Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1-Methodology*. Rep No FEMA P-58-1.
- [4] Zhu, S. and Zhang, Y. (2008), "Seismic analysis of concentrically braced frame systems with self-centering friction damping braces", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, pp.121-131.
- [5] Qian, H., Li, H. and Song, G. (2016), "Experimental investigations of building structure with a superelastic shape memory alloy friction damper subject to seismic loads", *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, pp.125026.
- [6] Ozbulut, O.E. and Hurlebaus, S. (2012), "Application of an SMA-based hybrid control device to 20-story nonlinear benchmark building", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 41, pp.1831-1843.
- [7] Tian, L. and Qiu, C. (2018), "Controlling residual drift in BRBFs by combining SCCBFs in parallel", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 32, pp.04018047.
- [8] Kari, A., Ghassemieh, M. and Abolmaali, S.A. (2011), "A new dual bracing system for improving the seismic behavior of steel structures", *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, pp.125020.
- [9] Chen, R., Qiu, C. and Hao, D. (2020), "Seismic response analysis of multi-story steel frames using BRB and SCB hybrid bracing system", *Applied Sciences*, Vol. 10, pp.284.
- [10] Kari, A., Ghassemieh, M. and Badarloo, B. (2019), "Development and design of a new self-centering energy-dissipative brace for steel structures", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 30, pp.924-938.
- [11] Fang, C., Yam, M.C., Chan, T.M., Wang, W., Yang, X. and Lin, X. (2018), "A study of hybrid self-centring connections equipped with shape memory alloy washers and bolts", *Engineering Structures*, Vol. 164, pp.155-168.
- [12] Issa, A.S. and Alam, M.S. (2019), "Experimental and numerical study on the seismic performance of a self-centering bracing system using closed-loop dynamic (CLD) testing", *Engineering Structures*, Vol. 195, pp.144-158.
- [13] Li, H., Mao, C.X. and Ou, J.P. (2008), "Experimental and theoretical study on two types of shape memory alloy devices", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 37, pp.407-426.