

چکیده

هدف از این مقاله ارزیابی مشخصات میراگر ADAS اصلاح شده و عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی کوتاه و میان‌مرتبه مجهز به این نوع میراگر می‌باشد. ورق‌های X شکل مورد استفاده در میراگر ADAS اصلاح شده (MADAS) به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که علی‌رغم مقید نمودن درجات آزادی چرخشی در دو انتها، تغییر مکان آنها در امتداد قائم کاملاً آزاد است و در نتیجه هیچ گونه نیروی محوری در میراگر ایجاد نمی‌شود. بدین ترتیب، رفتار ورق‌ها تحت نیروهای جانبی کاملاً خمشی بوده و از سوی دیگر بارهای ثقلی طبقات یا مؤلفه قائم در تیرها و بادبندها نیز کوچک‌ترین تأثیری در رفتار میراگر جدید ندارند. در این مقاله مدل عددی میراگر به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی ایجاد شده است. در ادامه عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر MADAS به‌وسیله مدل‌سازی عددی بررسی و پارامترهای لرزه‌ای از قبیل ضریب رفتار، میرایی معادل و جابه‌جایی نسبی طبقات برآورد شده است. نتایج حاصل بیانگر رفتار برتر سازه‌های مجهز به میراگر MADAS در مقایسه با سازه‌های خمشی متوسط بوده است. همچنین مطالعات رفتار چرخه‌ای میراگر یاد شده در مقایسه با میراگرهای رقیب (مانند ADAS و TADAS) رفتار مناسب‌تری را نشان داده است.

واژگان کلیدی: میراگر فلزی تسلیم‌شونده، قاب خمشی، ضریب رفتار، میرایی معادل، تغییر مکان نسبی طبقات.

ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی مجهز به میراگر MADAS در مقایسه با سیستم قاب خمشی

محمد قاسم وتر (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، vetr@iiees.ac.ir

عباس شفیق‌زاده

کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

ابوالفضل ریاحی نوری

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده هنر و معماری، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۱- مقدمه

قرار گرفت. هدف این تست بررسی رفتار سیستم‌های مهار لوله‌ای در جذب انرژی بود و نتیجه به‌دست آمده نشان داد که استفاده از جذب‌کننده‌های انرژی فولادی X شکل، پاسخ سیستم‌های لوله‌ای و تنش در آنها را کاهش می‌دهد [۲]. نتایج آزمایش‌های دیگر المان‌های فولادی X شکل ADAS نشان داد که این المان‌ها، دستگاه‌های قابل‌اعتمادی برای استفاده در ساختمان‌های واقع در مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالا هستند، همچنین المان‌های ADAS برای تعداد زیادی سیکل در محدوده غیرخطی رفتار هیستریزس پایداری دارند، این ویژگی در یک ساختمان از بالاترین اهمیت برخوردار است [۳]. در سال ۱۹۸۷ میلادی، یک المان ADAS مثلثی و X شکل در دانشگاه میشیگان تحت آزمایش قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از آن مطالعه، رفتار

یکی از روش‌های کنترل ارتعاشات سازه‌ها تحت تأثیر بارهای دینامیکی، استفاده از وسایل اتلاف انرژی یا میراگرهاست. کاربرد این وسایل به‌منظور طراحی و ساخت ساختمان‌های جدید و یا مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود به‌سادگی امکان‌پذیر است. مطالعات و تحقیقات گذشته نشان داده است که به‌منظور بررسی عملکرد واقعی یک میراگر بخصوص میراگر تسلیمی، وجود مطالعات آزمایشگاهی ضروری است [۱]. در سال‌های اخیر تحقیقات تئوریک و آزمایشگاهی کاملی در رابطه با میراگرهای تسلیمی به‌خصوص میراگر ADAS انجام و مقالات متعددی نیز ارائه شده است. در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۱ میلادی، یک ساختمان ۳ طبقه مجهز به اتلاف‌کننده انرژی X شکل، روی میز لرزه در دانشگاه برکلی کالیفرنیا تحت آزمایش

اصطکاک و جاری شونده فلزی برای عملکرد بهینه لرزه‌ای سازه مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. دلیل مطالعه توأم این دو میراگر، مشابهت مشخصه طراحی آنهاست. در مطالعه مذکور پارامترهای طراحی سیستم میراگر فلزی نصب شده به همراه بادبند، شامل جابه‌جایی تسلیم میراگر، سختی میراگر و سختی بادبند و همچنین پارامترهای طراحی سیستم میراگر اصطکاک‌ناهی نصب شده به همراه بادبند، شامل نیروی لغزش میراگر و سختی بادبند است. در اینجا نیز از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی استفاده و توابع هدف متعدد بر اساس پاسخ‌های مختلف سازه در نظر گرفته شده است.

محققان دیگری نیز در سال ۲۰۱۰ میلادی، طراحی لرزه‌ای بهینه قاب‌های خمشی فولادی با میراگر فلزی یا اصطکاک‌ناهی را به همراه سیستم بادبندی مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. متغیرهای بهینه‌سازی شامل توزیع ارتفاعی میراگر، نوع میراگر، نیروی تسلیم (در مورد میراگر فلزی) و یا نیروی لغزش (در مورد میراگر اصطکاک‌ناهی) و سختی بادبند بوده است. آنها برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک و برای ارزیابی پاسخ سازه بهینه شده با میراگر، از جذر مجموع مربعات جابه‌جایی نسبی طبقات یا شتاب طبقات استفاده کردند. نتایج حاصل از مقایسه سه نمونه مدل قاب خمشی در حالت قبل و بعد از بهسازی با افزودن بهینه میراگر نشان داده است که بعد از طراحی بهینه، پارامترهای پاسخ اشاره شده در بالا کاهش می‌یابند و توزیع شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات یکنواخت‌تر شده و در نتیجه نیاز شکل‌پذیری طبقات نیز یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین نتیجه‌گیری شده است که توزیع میراگرها در ارتفاع سازه باید بر اساس نیاز شکل‌پذیری طبقات صورت پذیرد. در سال ۲۰۱۶ میلادی نیز یک روش طراحی مستقیم استاتیکی بدون نیاز به تکرار محاسبات برای سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز ارائه شد [۱۲]، اما این روش برای میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده قابل به کارگیری نبود. در سال ۲۰۱۸ میلادی، نوعی روش طراحی استاتیکی مستقیم بدون نیاز به تکرار طراحی و انجام تحلیل‌های غیرخطی برای سازه‌های مجهز به میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده به نام SCRI ارائه شد [۱۳].

در این مقاله ضمن معرفی یک نوع میراگر تسلیمی جدید به

هیستریزس کاملاً پایدار تا نقطه گسیختگی و همچنین مقاومت خستگی کافی برای تحمل تعداد زیادی سیکل در محدوده غیرخطی برای المان‌های ADAS بوده است [۴]. در سال ۱۹۹۲ میلادی، در پژوهشی به بررسی نحوه تأثیر مشخصات المان‌های ADAS بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها پرداخته و نحوه انتخاب مناسب‌ترین مقدار برای این پارامترها ارائه شده است [۵].

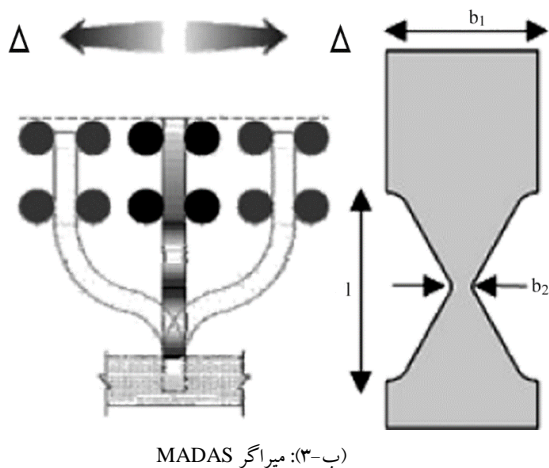
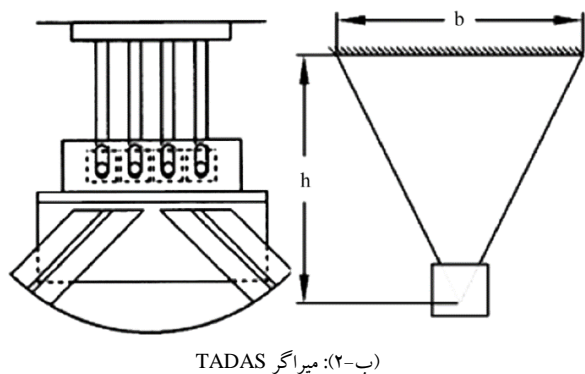
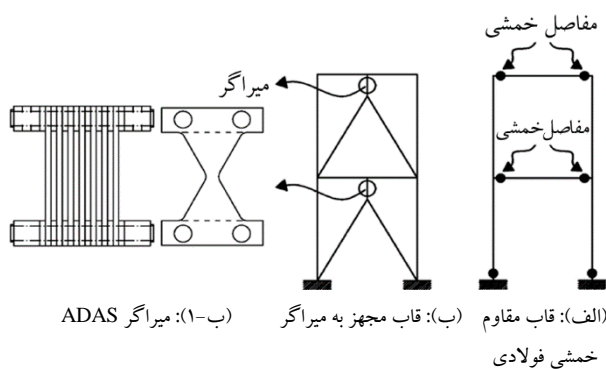
نوع شرایط تکیه‌گاهی میراگر ADAS عامل اصلی تولید نیروی محوری در ورق‌های X شکل و احتمال کماتش آنها پس از بارگذاری جانبی است. افزایش تغییر مکان جانبی باعث تولید نیروی محوری در ورق‌ها و افزایش سختی آنها و سپس کاهش شکل‌پذیری این وسیله تسلیمی است. در نهایت با افزایش نیروی محوری، ورق‌های X شکل کماتش کرده و مستهلک‌کننده انرژی تخریب می‌شود [۶]. به منظور اصلاح عیوب و افزایش پایداری میراگر ADAS، مطالعات جدیدی در رابطه با نوع دیگری از میراگر تسلیمی ارائه شد. در این مطالعات، ورق‌های X شکل به ورق‌های مثلثی تبدیل شده و با استفاده از سوراخ‌های لویایی شکل، آزادی ورق‌ها در جهت قائم تأمین شده است [۷]. مطالعات تکمیلی دیگری نیز در رابطه با بررسی ضریب رفتار سازه‌های مجهز به میراگر TADAS و ارزیابی عملکرد سازه‌های بهسازی شده به وسیله این میراگر ارائه شده است [۸-۹].

پژوهشگران در موارد ذکر شده‌ی اخیر در تلاش بودند روش ساده‌ای برای طراحی سازه‌های مجهز به میراگر ارائه دهند که فقط نیازمند تحلیل‌های کشسان متداول در فرآیند طراحی معمول باشد، درحالی‌که با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی و پیچیدگی‌های موجود در سازه‌ی مجهز به میراگر تحت تحریک زمین‌لرزه، نیاز به الگوریتم‌های طراحی بهینه در این زمینه احساس می‌شد. بر این اساس در سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی جهت طراحی بهینه‌ی سازه‌های مجهز به میراگرهای الحاقی صورت گرفته است. اغلب، این روش‌های بهینه‌سازی به نتایج و توصیه‌های کلی و جامع طراحی منجر نمی‌شوند، بلکه الگوریتم‌های پیشنهادی هستند که بسته به خصوصیات سازه، میراگر و تحریک وارد منجر به جواب بهینه می‌شوند. ابتدا در سال ۲۰۰۳ میلادی، طراحی میراگرهای

است. میزان اتلاف انرژی این نوع میراگر، به عملکرد ورق‌های X شکل در هنگام اعمال بار بستگی دارد. به‌منظور به دست آوردن مشخصات میراگر MADAS، مطالعاتی توسط محققین قبلی [۱۴] انجام شد که بر مبنای آن مقادیر مقاومت تسلیم، جابه‌جایی تسلیم و سختی ارتجاعی از روابط (۱) تا (۳) به دست می‌آیند.

$$P_y^m = \frac{F_y n b_1 t^2}{3l} \quad (1)$$

در رابطه فوق F_y تنش تسلیم ورق، b_1 ماکزیمم عرض، l و



شکل (۱): نحوه استهلاک انرژی لرزه‌ای در سازه خمشی و سازه مجهز به میراگر.

نام افزایشده میرایی و سختی اصلاح شده (MADAS)، به‌عنوان میراگر رقیبی برای TADAS و به‌منظور رفع نواقص ADAS که در آن تغییر مکان قائم ورق‌های X شکل آزاد در نظر گرفته شده است، به بررسی مزیت میراگر اصلاح شده نسبت به میراگر معمول ADAS پرداخته شده است. همچنین یک مدل عددی از میراگر MADAS ساخته و با نتایج مدل آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده و پس از حصول اطمینان از دقت مدل‌سازی، این مدل عددی با مدل عددی میراگر TADAS مقایسه گردیده است. همچنین در فاز دوم، سازه‌های میان‌مرتب‌ی مجهز به این میراگر که بر اساس روش نوینی طراحی شده‌اند مورد ارزیابی قرار گرفته و با انجام تحلیل‌های بار افزون و تاریخچه زمانی، پارامترهای متعددی از قبیل ضریب رفتار، دریفت و میرایی معادل برای آنها به دست آمده و با سازه‌های خمشی بدون میراگر مقایسه شده است.

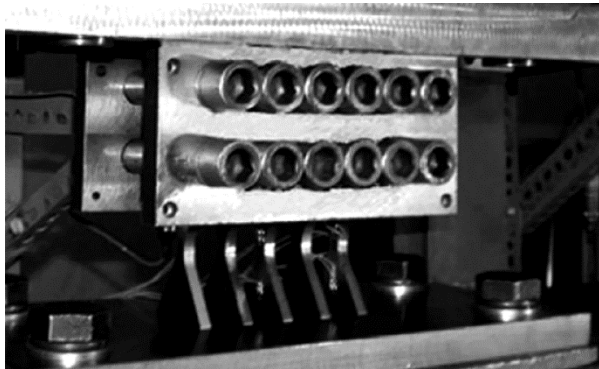
۲- بیان مسئله

۲-۱- سیستم سازه‌ای و تعریف مسئله

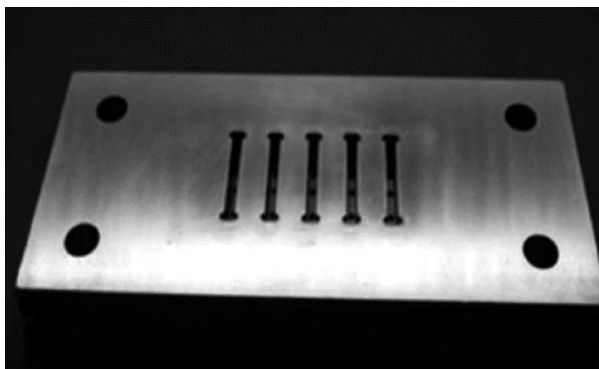
همان‌گونه که در قسمت (الف) از شکل (۱) نشان داده شده است، در سیستم سازه‌ای قاب خمشی متداول، استهلاک انرژی به وسیله ایجاد مفاصل پلاستیک در دو انتهای تیرها و ستون‌ها صورت می‌گیرد که این موضوع باعث آسیب به اجزای سازه‌ای که وظیفه تحمل بارهای ثقلی را در سازه دارند و در نتیجه خرابی سازه می‌گردد. به‌منظور جلوگیری از این آسیب می‌توان از یک عضو الحاقی مانند قسمت (ب) از شکل (۱) در سازه استفاده نمود تا تمامی استهلاک انرژی و رفتار غیرخطی سازه در آن انجام گیرد و با تمرکز رفتار غیرخطی در این عضو، اجزای اصلی سازه در محدوده خطی باقی مانده و دچار آسیب نگردند.

در این پژوهش به بررسی میراگر MADAS و سازه‌های مجهز به آن پرداخته شده است. به همین دلیل در ادامه توضیحاتی در خصوص این میراگر جدید ارائه می‌گردد. میراگر تسلیمی جدید ترکیبی از چندین ورق X شکل است. مشخصات فرض شده برای این وسیله استهلاکی در قسمت (ب-۳) از شکل (۱) ارائه شده

اساس یکسان بودن این مشخصات برای میراگر TADAS با میراگر MADAS، ابعاد میراگر TADAS انتخاب شده است. سپس مدل عددی از میراگر TADAS، دقیقاً با مصالح فولادی مشابه با میراگر MADAS و با ابعاد انتخاب شده بر اساس معیارهای گفته شده و اعمال بارگذاری یکسان با مدل MADAS ساخته شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲): (الف) نمونه آزمایشگاهی ساخته شده میراگر MADAS [۱۴]، (ب) تکیه گاه پایینی میراگر.

۲-۲- ملزومات طراحی

به منظور طراحی سازه‌های مجهز به میراگر از الزامات آیین نامه بین‌المللی ASCE/SEI 7-10 [۱۵] مبنی بر استفاده از یک قاب خمشی پایه مقاوم برای ۷۵ درصد نیروی زلزله استفاده شده است. پس از طراحی یک سازه خمشی با ۷۵ درصد نیروی زلزله به روش استاتیکی معادل و به دست آوردن مقاطع سازه، میراگرها و اعضای نگه‌دارنده آنها (مهاربندها) طراحی شده است. برای طراحی میراگرها همان‌طور که مشخص است، سختی طبقات در یک سازه باید به صورت بهینه انتخاب گردد تا از ایجاد طبقه

نیز به ترتیب ضخامت و ارتفاع مؤثر ورق است.

$$\Delta_y^m = \gamma \frac{3F_y l^2}{4Et} \quad (۲)$$

در این رابطه E مدول الاستیسیته ورق و γ ضریبی بدون بعد است که تأثیرات عرض b_2 را در روابط نیرو و تغییر مکان اعمال می‌کند که جزئیات بیشتر در مورد نحوه تعیین مقدار γ توسط پژوهشگران قبلی ارائه شده است [۱۴].

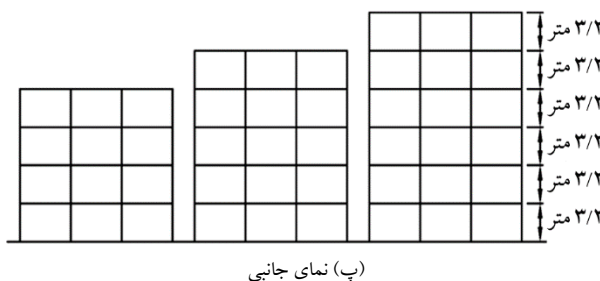
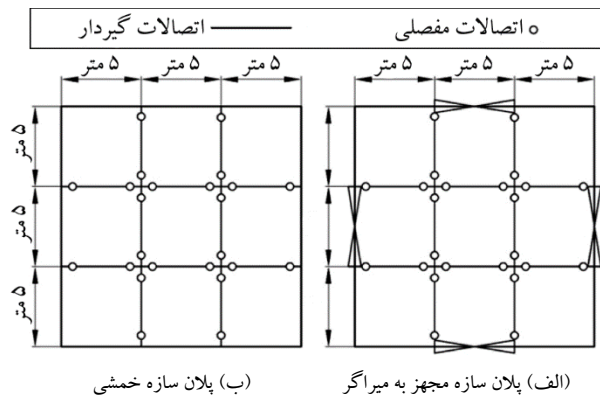
$$K_e^m = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{2nEb_1}{3} \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (۳)$$

Δ_y^m و K_e^m به ترتیب تغییر مکان تسلیم و سختی اولیه این میراگر فلزی است. مشاهده می‌شود سختی K_e^m در رابطه (۳) با تعداد ورق‌ها (n) نسبت مستقیم دارد. بنابراین با افزایش تعداد ورق‌ها می‌توان سختی و میرایی مورد نظر در میراگر را تغییر داد. این موضوع یکی از ویژگی‌های این گونه میراگرهای تسلیمی است. به منظور تأمین عملکرد مطلوب در این میراگر جدید و ایجاد شرایط گیردار در دو سر ورق‌ها، از دو سیستم تکیه‌گاهی متفاوت استفاده شده است. این سیستم‌ها در بالا و دیگری در پایین ورق‌ها استفاده می‌شوند. در قسمت (الف) از شکل (۲) تصویری از نمونه آزمایشگاهی ساخته شده برای میراگر MADAS نمایش داده شده است.

همان‌گونه که در قسمت (ب) از شکل (۲) نشان داده شده است، تکیه‌گاه پایینی میراگر، یک ورق مستطیل شکل ضخیم است. این قطعه دارای چندین شیار به تعداد ورق‌های X شکل است. تکیه‌گاه بالایی این میراگر تسلیمی، دارای پیچیدگی‌های خاصی است. این تکیه‌گاه علاوه بر ایجاد شرایط گیردار در اتصال ورق‌های X شکل باید امکان تغییر مکان در جهت قائم را نیز برای تک‌تک آنها فراهم کند.

در این پژوهش به منظور امکان مقایسه میراگرهای MADAS و TADAS فرض شده است که دو میراگر برای یک قاب و نیاز لرزه‌ای مشخص طراحی شده‌اند تا بتوان در مورد عملکرد آنها قضاوت نمود. بدین منظور برای این مقایسه، جابه‌جایی تسلیم و سختی الاستیک یکسانی برای هر دو میراگر در نظر گرفته شده است و بر

پاسخ‌های ایده‌آل سازه‌ها استخراج گردیده و بر اساس آنها محاسبات ضریب رفتار صورت گرفته است.



شکل (۳): مشخصات سازه‌های مورد بررسی.

با ایده‌آل‌سازی منحنی رفتار کلی سازه به منحنی ارتجاعی-خمیری کامل، ضریب شکل‌پذیری کلی سازه به صورت خارج قسمت تغییر مکان جانبی نسبی حداکثر (Δ_{max}) به تغییر مکان جانبی نسبی تسلیم (Δ_y) تعریف می‌شود.

همچنین بر اثر شکل‌پذیری، ساختمان ظرفیتی برای استهلاک انرژی هیسترتیک خواهد داشت. به دلیل این ظرفیت استهلاک انرژی، نیروی طراحی ارتجاعی (V_e) را می‌توان به تراز مقاومت تسلیم (V_y) کاهش داد. از این‌رو، ضریب کاهش بر اثر شکل‌پذیری، به صورت خارج قسمت نیروی نهایی وارد بر سازه در صورتی که رفتار ارتجاعی باقی بماند، به نیروی متناظر با حد تسلیم عمومی سازه هنگام تشکیل مکانیسم خرابی (V_y) تعریف شده است. تاکنون پژوهشگران بسیاری روی ضریب R_{μ} و ارتباط آن با ضریب μ تحقیق کرده‌اند. با توجه به مقایسه رابطه‌های ارائه شده توسط پژوهشگران و استدلال‌های ارائه شده، در پژوهش حاضر برای ارتباط دادن ضریب شکل‌پذیری کلی سازه‌ها (μ) به

ضعیف که در تمامی آیین‌نامه‌های بین‌المللی و استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۶] بر کنترل عدم تشکیل آن توصیه شده است، جلوگیری شود. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از مبانی دینامیک سازه‌ها و در نظر گرفتن جابه‌جایی بهینه و مناسب با حداکثر جابه‌جایی آیین‌نامه برای طبقات ساختمان، سختی مناسب برای طبقات را تعیین کرد. سپس با داشتن سختی سازه طراحی شده بدون میراگر و سختی هدف و کم کردن این دو مقدار از هم، می‌توان سختی که ترکیب سری میراگر و مهاربند نگه‌دارنده آن باید تأمین کنند را به دست آورد.

در انتخاب مهاربند باید دقت شود که مهاربند به هیچ وجه نباید قبل از تسلیم میراگر، در کشش تسلیم شود و یا در فشار کمانش کند [۵]، بدین منظور با توجه به وضعیت بحرانی مهاربندها در فشار، باید مهاربندی انتخاب شود که با نیرویی معادل با ۱/۵ برابر نیروی تسلیم میراگر، دچار کمانش نشود [۷]. با توجه به انتخاب مهاربندها بر اساس معیار بیان شده و به دست آمدن سختی آنها، می‌توان سختی میراگر که به صورت سری با مهاربند می‌باشد را بر اساس روابط فنرهای سری به دست آورد [۷]. در این مقاله سه سازه با تعداد طبقات ۴، ۵ و ۶ در محدوده سازه‌های میان‌مرتبه مجهز به میراگر MADAS طراحی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. پلان این سه سازه برای حذف تأثیر دیگر عوامل در نتایج تحلیل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. پلان و نمای جانبی سازه‌ها به همراه محل جانمایی میراگرها در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳-۲- محوره‌های مطالعاتی پژوهش حاضر

در این پژوهش، به منظور محاسبه عوامل مؤثر بر ضریب رفتار (عوامل شکل‌پذیری و مقاومت افزون)، پس از تحلیل سازه‌ها به صورت استاتیکی غیرخطی با بارگذاری جانبی فزاینده، نتایج تحلیل‌ها استخراج شده است. سپس با استفاده از روش ایده‌آل‌سازی منحنی پاسخ کلی سازه‌ها که پیش‌تر ذکر شد، پارامترهای لازم برای محاسبه عوامل مؤثر بر ضریب رفتار، از

پایه به دست آمده در حالت تحلیل دینامیکی غیرخطی برای قاب مورد نظر دست پیدا کرد. در نهایت، درصد میرایی که به ازای آن، برش پایه یک قاب مجهز به میراگر را در حالت تحلیل دینامیکی غیرخطی، معادل برش پایه متناظر آن قاب در حالت تحلیل دینامیکی خطی می کند، به عنوان میرایی معادل میراگرهای الحاقی در نظر گرفته شده است [۱۸-۱۹].

۳- مدل سازی عددی

در این پژوهش مدل سازی عددی یک بار برای خود میراگر و بررسی خواص آن به تنهایی به وسیله نرم افزار اجزای محدود^۵ ANSYS و یک بار برای سازه های مجهز به میراگر مورد نظر و بررسی خواص لرزه ای آنها به کمک نرم افزار SAP2000 صورت گرفته است. در مرحله اول به منظور مدل سازی ورق میراگر MADAS، از المان سه بعدی^۶ ۲۰ گره ای استفاده شده است. با توجه به این موضوع، فقط دو المان و در حقیقت پنج گره جهت بررسی تنش و کرنش در ضخامت نمونه به کار گرفته شده است. تعداد المان بیشتر در ضخامت ورق، تأثیر قابل ملاحظه ای در نتایج تحلیل غیرخطی آن ندارد زیرا المان سه بعدی، نوعی المان از درجه دوم بوده و از دقت بالایی در مدل سازی اجسام نامنظم برخوردار است. علت استفاده از این المان به جای المان های پوسته ای^۷، توانایی آن در مدل سازی و بررسی تمرکز تنش در گوشه ها و اجسام نامنظم و همچنین تنش های خارج از صفحه است.

نحوه المان بندی ورق های X شکل از میراگر MADAS در شکل (۴- الف) ارائه شده است. اندازه مش ها در مدل عددی به وسیله تحلیل حساسیت مش انتخاب شده است.

به منظور مدل سازی شرایط تکیه گاهی، پایین ورق به صورت کاملاً گیردار و بالای آن در جهت قائم به صورت آزاد و تحت بارگذاری افقی قرار گرفته است. به منظور صحت سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، مدل عددی دقیقاً تحت همان بارگذاری مدل آزمایشگاهی قرار گرفته است. مطابق شکل (۴- ب) بارگذاری بر اساس استاندارد ATC-24 [۲۰] و به صورت سینوسی افزایشی به نمونه اعمال شده است. با توجه به شکل و

ضریب کاهش بر اثر شکل پذیری (R_{μ})، از رابطه ارائه شده توسط میراندا و برترو [۱۷] در سال ۱۹۹۴ استفاده شده است. همچنین ضریب مقاومت افزون^۴ از روابط زیر قابل محاسبه است:

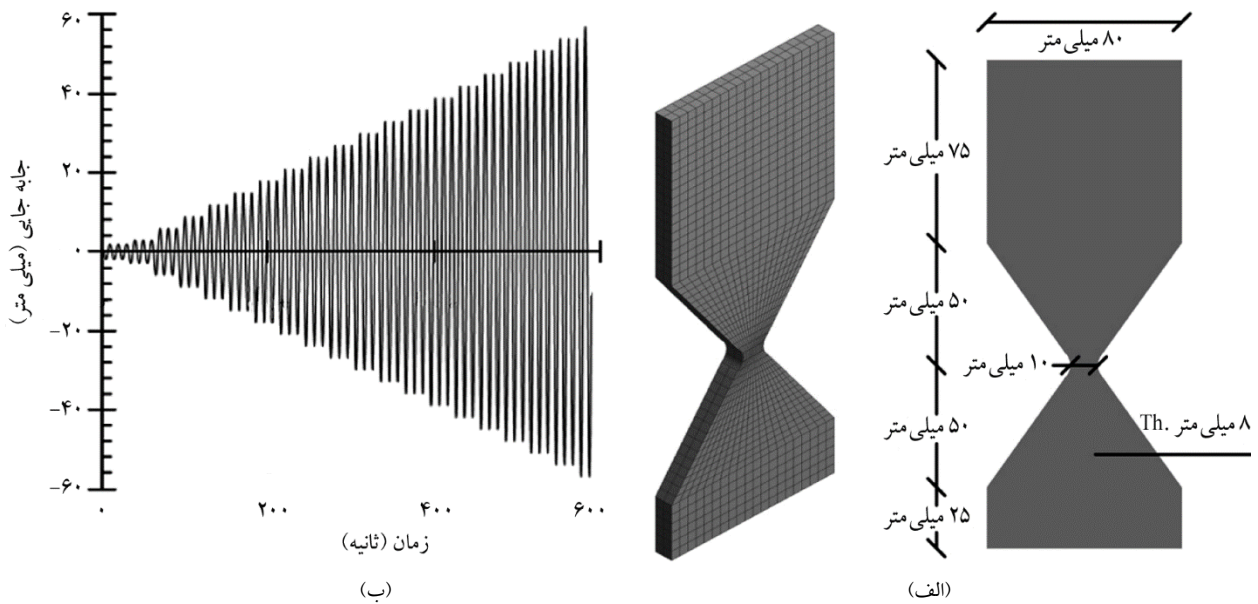
$$R_s = \Omega \times R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$$

$$\Omega = \frac{V_y}{V_d}$$

که در آن، V_d برش پایه مورد استفاده در طراحی و V_y برش پایه هنگام تسلیم کلی سازه است که از منحنی ایده آل پاسخ کلی سازه به دست می آید. از مجموع ضرایب R_1 تا R_n نیز تنها دو ضریب R_1 و R_n که حاصل ضربشان برابر ۱/۱۵۵ می باشد در نظر گرفته می شوند.

به منظور محاسبه میرایی معادل، روش های مختلفی وجود دارد که با توجه به اینکه در روش ارائه شده توسط برخی محققان [۱۸] این مزیت وجود دارد که این میرایی با ارزیابی کل سازه به دست می آید نه با ارزیابی مستهلک کننده انرژی در سازه و تعمیم آن به کل سازه، هریک از قاب های خمشی مجهز به میراگرهای MADAS، به وسیله این روش که در ادامه شرح داده شده است، مورد بررسی قرار گرفته اند. همواره در تحلیل های خطی، میزان برش پایه به دست آمده برای یک قاب مشخص، بیشتر از برش پایه ای است که در حالت تحلیل غیرخطی برای قاب مورد نظر به دست می آید. از این موضوع، در محاسبه میرایی معادل میراگرهای MADAS استفاده شده است. روش مورد استفاده در محاسبه میرایی معادل میراگرهای MADAS، به شرح زیر است:

ابتدا هریک از سازه های مجهز به میراگر را در حالتی که رفتار مصالح به صورت غیرخطی تعریف شده باشد، تحت تأثیر دو شتاب نگاشت الاستترو و طیس قرار داده و برش پایه ایجاد شده برای هریک از سازه ها تعیین شده است. در مرحله بعد، هریک از سازه های مذکور در حالتی که رفتار مصالح به صورت خطی تعریف شده باشد، در چندین گام متوالی مورد تحلیل دینامیکی با استفاده از شتاب نگاشت های یاد شده قرار گرفته اند. بدین صورت که در هر گام، میرایی قاب افزایش داده شده است تا پس از تحلیل در مرحله ای با میرایی مشخص، بتوان به برش



شکل (۴): (الف) مدل اجزای محدود، (ب) پروتکل جابه‌جایی- زمان اعمال شده به مدل.

MADAS ارائه شده است. به منظور مدل‌سازی سازه‌های مجهز به میراگر ابتدا هندسه مدل‌ها ایجاد گردیده که در قسمت‌های (الف) و (ب) شکل (۵)، سازه چهار طبقه به عنوان نمونه ارائه شده است. پس از آن مشخصات میراگرهای طراحی شده، بر اساس ضوابط بیان شده در بخش (۲-۲)، برای سازه‌ها به صورت المان پلاستیک ون و مطابق شکل (۵-پ) به صورت نمودار دو خطی همراه با سخت‌شوندگی کرنشی به نرم‌افزار معرفی شد. در همه سازه‌ها تأثیر بار محوری در عناصر قائم، سبب افزایش تغییر مکان‌های جانبی آنها، برش‌ها و لنگرهای خمشی موجود در اعضا و نیز تغییر مکان‌های جانبی طبقات می‌گردد. این افزایش، به اثر ثانویه و یا $P-\Delta$ معروف است. در نرم‌افزار استفاده شده اثر $P-\Delta$ در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، فرض بر این است که ظرفیت تمام اتصالات صلب از ظرفیت تیرها بیشتر است. همچنین جزئیات اتصالات الزامات استاندارد ۲۸۰۰ ایران را نیز تأمین می‌نمایند. لذا بر اساس مفاد دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای [۲۴]، می‌توان از مدل‌سازی المان اتصال صرف نظر نمود. در مرحله تحلیل استاتیکی غیرخطی، از توزیع بار پیشنهاد شده در پیوست شماره دو استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۶] استفاده شده است.

خصوصیات نمونه‌ها، تمامی مراحل بارگذاری بر اساس روش کنترل تغییر مکان، با سرعت بارگذاری آرام و فرکانس ۰/۱ هرتز انجام شده است.

در انتها مهم‌ترین مشخصات ورق‌های تسلیم‌شونده یعنی نوع رفتار آنها اختصاص داده شده است. برای اختصاص رفتار مصالح از مدل پیشرفته و دقیق CMISO استفاده شده است. به منظور افزایش دقت، مدل CMISO با ترکیب دو مدل شابوش [۲۱] و سخت‌شوندگی چندخطی ایزوتروپیک^۸ توسعه یافته است [۲۲]. در این مدل، یک مدل شابوش با پنج فرمول فردریک آرسترانگ [۲۳] در ترکیب با سخت‌شوندگی چندخطی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است.

پارامترهای کالیبره شده برای این مدل، با استفاده از مطالعات فوق و روش ارائه شده، در جدول (۱) آورده شده است. برای به کارگیری پارامترها باید توجه شود که منحنی حاصل از تست کشش، همان منحنی تنش-کرنش مهندسی می‌باشد که می‌بایست به منحنی تنش-کرنش واقعی تبدیل و سپس استفاده و پارامترهای به دست آمده از آن به نرم‌افزار معرفی گردد.

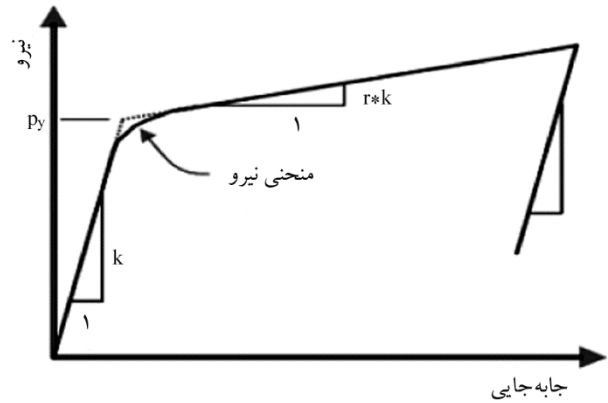
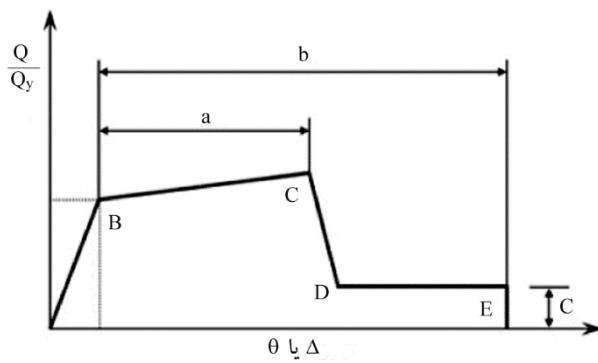
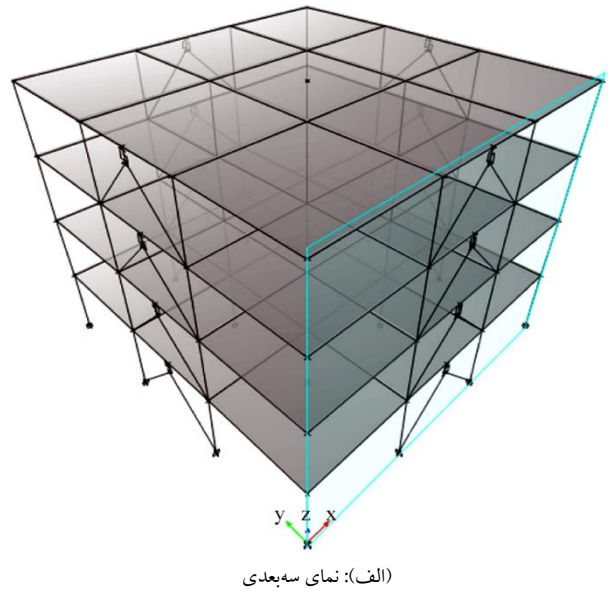
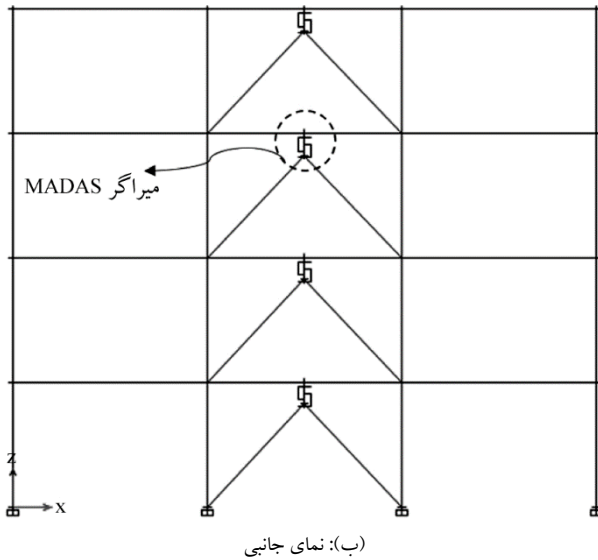
در مرحله دوم، مدل‌سازی عددی سازه‌های مجهز به میراگر

جدول (۱): پارامترهای مدل CMISO.

۲۸۸	مگاپاسکال	-	$f_{y,real}$	پارامترهای پایه
۴۱۶	مگاپاسکال	-	$f_{u,mon}$	
۵۲۹	مگاپاسکال	-	$f_{u,cyc}$	
۲۰۶۴۰۰	مگاپاسکال	-	E	
۱/۴۸۶	-	$f_{u,mon}/f_{y,real}$	$h_{PL,mon}$	پارامترهای محاسبه شده
۱/۸۵	-	$f_{u,cyc}/f_{y,real}$	$h_{PL,cyc}$	
۰/۳۶۴	-	-	q_{hard}	
۲۸۸	مگاپاسکال	$f_{y,real} - f_{y,num}$	$\Delta\sigma_{fy}$	
۲۴۱	مگاپاسکال	$f_{u,cyc} - f_{y,real}$	$\Delta\sigma_{PL}$	
۱۴۹/۴۲	مگاپاسکال	$0.62 \times \Delta\sigma_{PL}$	$\Delta\sigma_{PL,ISO}$	
۹۱/۵۸	مگاپاسکال	$0.38 \times \Delta\sigma_{PL}$	$\Delta\sigma_{PL,KIN}$	
۳	-	3	β	
۱۵۰۰	-	β/ε_{s1} ($\varepsilon_{s1} = 0.2\%$)	γ_1	
۲۱۶۰۰۰	مگاپاسکال	$(0.5\Delta\sigma_{fy})\gamma_1$	C_1	
۵۰۰	-	β/ε_{s2} ($\varepsilon_{s2} = 0.6\%$)	γ_2	
۵۸۳۱۰/۷	مگاپاسکال	$(0.3\Delta\sigma_{fy} + 0.33\Delta\sigma_{PL,KIN})\gamma_2$	C_2	
۱۲۰	-	β/ε_{s3} ($\varepsilon_{s3} = 2.5\%$)	γ_3	
۱۰۵۳۸/۵۶۸	مگاپاسکال	$(0.2\Delta\sigma_{fy} + 0.33\Delta\sigma_{PL,KIN})\gamma_3$	C_3	
۲۵	-	β/ε_{s4} ($\varepsilon_{s4} = 12\%$)	γ_4	
۷۵۵/۵۳۵	مگاپاسکال	$(0.33\Delta\sigma_{PL,KIN})\gamma_4$	C_4	
۰	-	-	γ_5	
۵۰۰	مگاپاسکال	-	C_5	
$\sigma_i = f_{y,num} + R_0\varepsilon_i + R_\infty(1 - e^{-b\varepsilon_i})$				فرمول‌های سخت‌شوندگی ایزوتروپیک
$R_0 = 1$				
$R_\infty = \Delta\sigma_{PL,ISO}$				
$b=1$				

مفاصل پلاستیک تعریف شده برای اعضای مختلف سازه در مدل‌های عددی در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در تمامی تحلیل‌های دینامیکی پژوهش حاضر، نسبت میرایی $\zeta = 5\%$ در نظر گرفته شده و میرایی رایلی $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ مورد استفاده قرار گرفته است.

پارامترهای منحنی نیرو- تغییر شکل اعضا که عبارتند از پارامترهای مدل‌سازی (a, b و c) و فرضیات مربوطه از جمله فرینه بودن نسبت به مبدأ برای مصالح فولادی و نیز شیب قسمت BC منحنی که بر اساس مفاد دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ایران [۲۴] مقادیر عددی آنها برای اعضا و مقاطع مختلف قابل محاسبه است، در شکل (۵-ت) نشان داده شده است. نوع



شکل (۵): تعریف مشخصات مدل عددی.

جدول (۲): نوع مفاصل پلاستیک تعریف شده برای اعضای سازه.

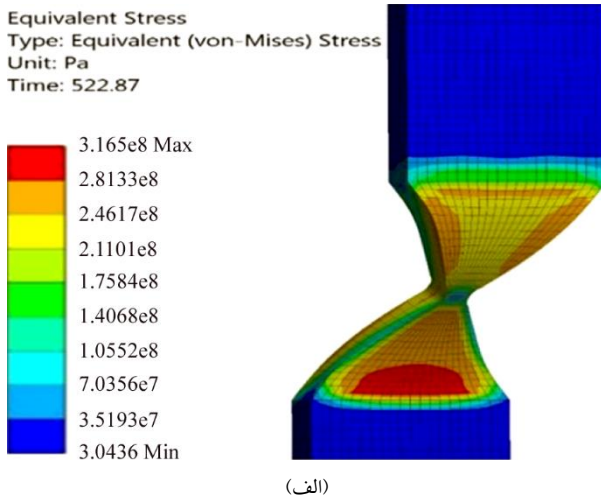
رفتار در خمش	رفتار در برش	رفتار در فشار	رفتار در کشش		
-----	-----	نیرو کنترل	نیرو کنترل	مهاربند	سیستم باربر جانبی (قاب خمشی)
تغییر شکل کنترل	تغییر شکل کنترل	نیرو کنترل	تغییر شکل کنترل	تیر	
تغییر شکل کنترل	-----	نیرو کنترل	تغییر شکل کنترل	ستون $\frac{P}{P_{cl}} < 0.5$	
نیرو کنترل	-----	نیرو کنترل	تغییر شکل کنترل	ستون $\frac{P}{P_{cl}} \geq 0.5$	سیستم ثقلی
نیرو کنترل	نیرو کنترل	نیرو کنترل	نیرو کنترل	تیر	
نیرو کنترل	نیرو کنترل	نیرو کنترل	نیرو کنترل	ستون	

مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته توسط پژوهشگران قبلی [۷، ۱۴] نتایج حاصل با نتایج منتشر شده مقایسه گردد. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی میراگر MADAS، مدل عددی میراگر آزمایش شده توسط خالقیان و تهرانی‌زاده [۱۴] ایجاد شده است. نحوه

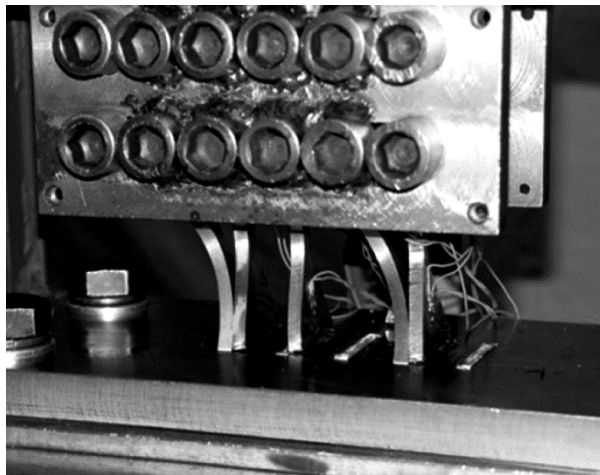
۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی

به منظور ارزیابی دقت مدل‌های عددی مورد استفاده در پژوهش حاضر، در ابتدا تلاش شد با اعمال مدل‌های عددی فوق‌الذکر بر



(الف)



(ب)

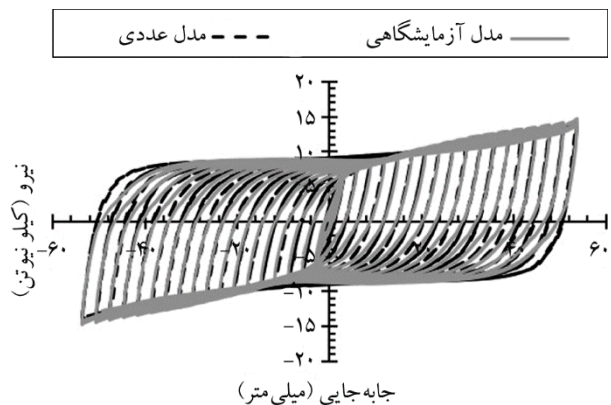
شکل (۷): (الف) کانتور تنش ون میسز در مدل عددی، (ب) نوع گسیختگی در مدل تحت آزمایش [۱۴].

جدول (۳): مشخصات میراگر TADAS به کار رفته در مدل آزمایشگاهی تسای و همکاران [۷].

میراگر	t (mm)	h (mm)	b (mm)	N	Δ_y (mm)	P_y (KN)	P_p (KN)
TADAS1	۳۶	۳۲۵	۱۷۷	۸	۳/۶	۲۶۰	۳۹۰
TADAS2	۳۶	۳۲۵	۱۷۸	۵	۳/۶	۱۶۳	۲۴۵

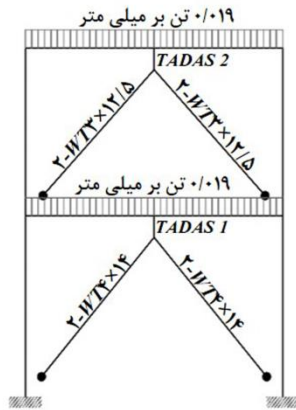
در ادامه مدل عددی قاب تحت آزمایش، مطابق شکل (۸) ایجاد شده است. سپس مدل عددی مذکور همانند مدل آزمایشگاهی تحت زلزله مقیاس شده قرار گرفته و نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی به روش انتگرال گیری مستقیم به دست آمده است.

بارگذاری و مشخصات مدل به طور کامل در بخش مدل سازی تشریح گردید. با مقایسه منحنی هیستریزس آزمایشگاهی و مدل عددی همان گونه که در شکل (۶) آورده شده است، دقت مناسب مدل سازی مشخص می شود. هر دو نمونه پس از تقریباً ۵۹ سیکل بارگذاری مقاومت خود را از دست داده و گسیخته شده اند که این امر دقت بالای مدل سازی را می رساند.

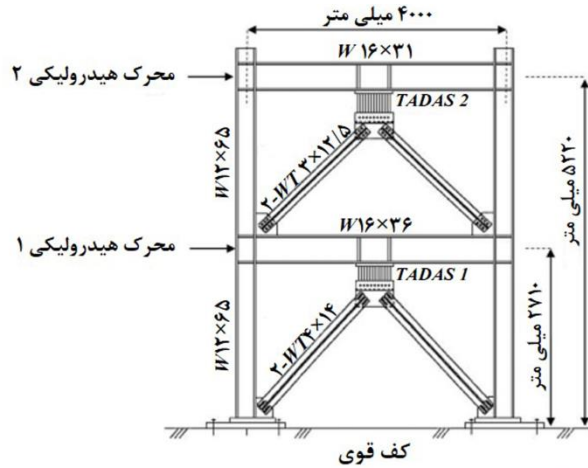


شکل (۶): مقایسه نمودار چرخه ای میراگر MADAS.

همچنین همان طور که در شکل (۷-الف) ارائه شده، با توجه به کانتور تنش در مدل عددی، حداکثر تنش در قسمت پایینی ورق X شکل ایجاد شده و گسیختگی نیز در همین قسمت رخ داده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی و همان طور که در شکل (۷-ب) ارائه شده، در مدل آزمایشگاهی نیز شکست در همین قسمت رخ داده است و این انطباق در محل شکست مبین دقت مناسب در مدل سازی می باشد. همچنین به منظور صحت سنجی نتایج تحلیل قاب های مجهز به میراگر، قبل از انجام مدل سازی و تحلیل های مورد نظر این پژوهش، یک مدل عددی با نتایج معتبر موجود مقایسه و نتایج حاصل صحت سنجی گردیده است. بدین منظور قاب آزمایش شده توسط تسای و همکاران [۷] انتخاب شده است. آنها یک قاب دو بعدی مجهز به میراگر صفحه مثلثی TADAS را تحت مؤلفه شمال- جنوب زلزله سال ۱۹۴۰ میلادی ال سنترو با PGA^9 مقیاس شده به مقدار ۳۱۲ سانتی متر بر مجذور ثانیه قرار دادند. بار ثقلی این قاب معادل ۰/۱۹ تن بر میلی متر در هر طبقه و همچنین فولاد مصرفی از نوع ASTM-A36 بوده است. مشخصات میراگرهای مثلثی مورد استفاده نیز در جدول (۳) آورده شده است.



ب) مدل عددی پیشنهادی برای ارزیابی نتایج آزمایشگاهی

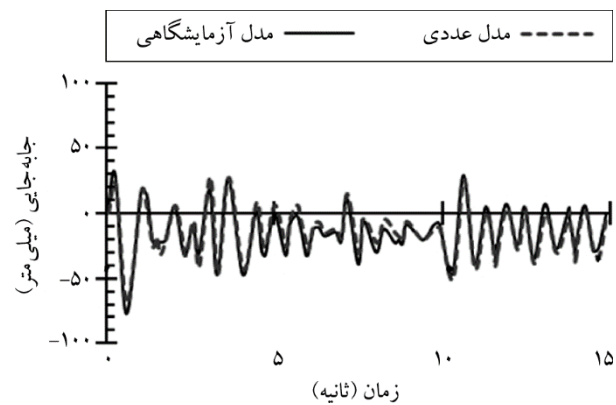
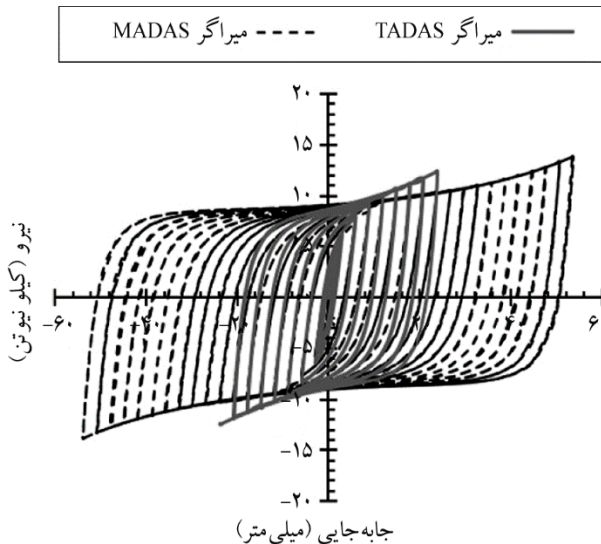


الف) قاب دو بعدی آزمایش شده توسط تسای و همکاران [7]

شکل (۸): معرفی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی پیشنهادی به منظور صحت‌سنجی.

میراگر MADAS، قادر به تحمل ۵۹ چرخه از بارگذاری می‌باشد و تا جابه‌جایی تقریباً ۵۸ میلی‌متر بدون گسیختگی و تغییر در سختی، تغییر شکل داده است. در واقع جابه‌جایی حداکثر میراگر TADAS، تقریباً ۴۰ درصد میراگر MADAS می‌باشد که این امر نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر میراگر MADAS می‌باشد.

نتایج حاصل از تحلیل مدل با نتیجه به دست آمده از آزمایش تسای و همکاران [۷] یکسان می‌باشد که این امر نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب در مدل‌سازی سازه به همراه میراگر است. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص شده است، نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی دارای انطباق قابل قبولی می‌باشند.



شکل (۹): مقایسه نتایج تغییر مکان بام نسبت به زمان برای مدل عددی و آزمایشگاهی [۷].

شکل (۱۰): مقایسه نمودار چرخه‌ای مدل عددی میراگر MADAS و TADAS.

۴-۲- مقایسه مدل عددی میراگر MADAS و TADAS

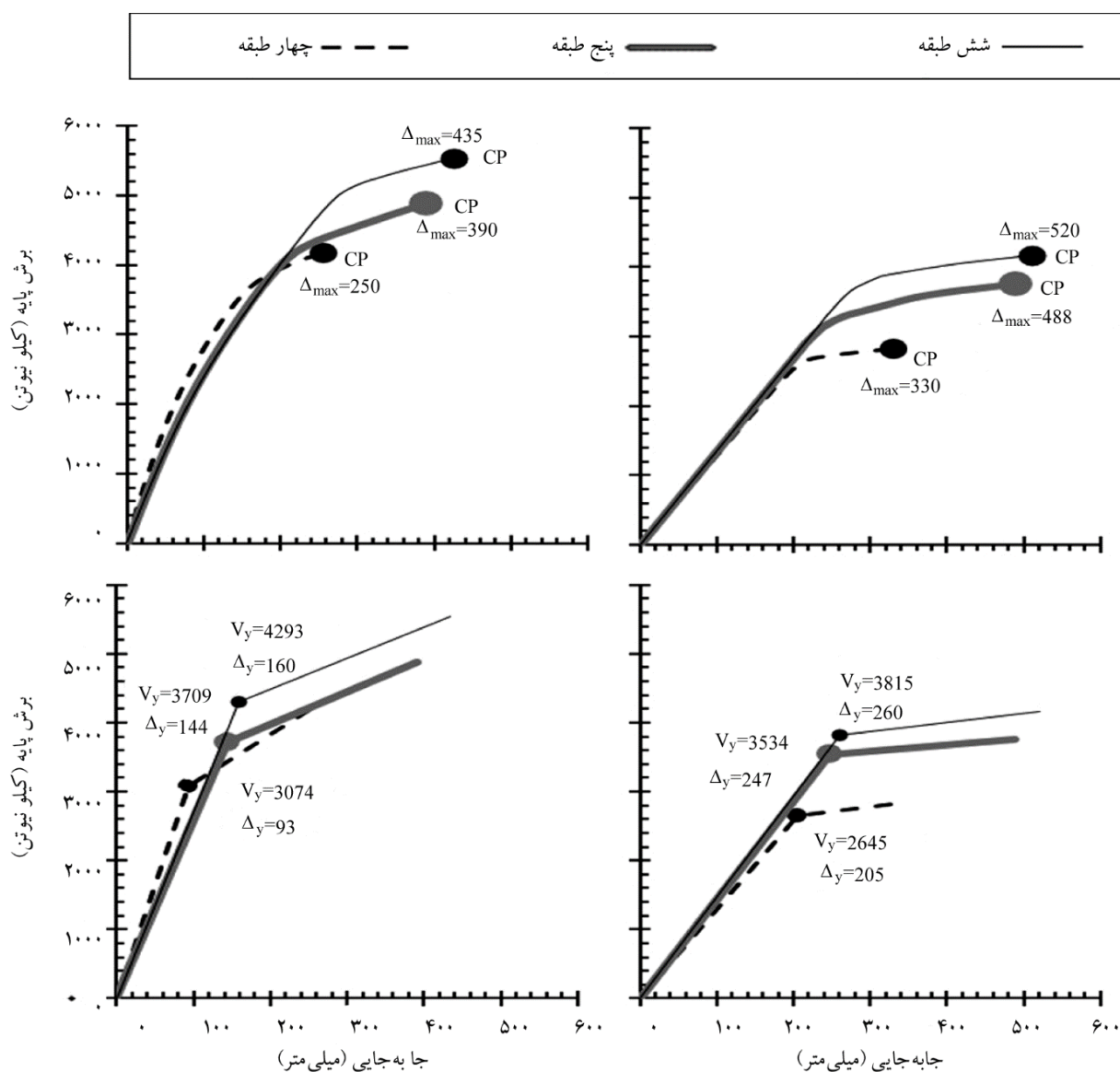
میراگر TADAS تنها ۲۶ چرخه از بارگذاری را تحمل نموده و همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، تا جابه‌جایی حداکثر ۲۳ میلی‌متر تغییر مکان داده است. درحالی‌که

۴-۳- ارزیابی سازه‌های مجهز به میراگر

پس از طراحی، سازه‌های مورد نظر تحت تحلیل استاتیکی

شکل پذیری و مقاومت افزون)، پس از تحلیل سازه‌ها به صورت استاتیکی غیرخطی با بارگذاری جانبی فزاینده، نتایج تحلیل‌ها استخراج شده است. سپس با استفاده از روش ایده‌آل‌سازی منحنی پاسخ کلی سازه‌ها، پارامترهای لازم برای محاسبه عوامل مؤثر بر ضریب رفتار، از پاسخ‌های ایده‌آل سازه‌ها استخراج گردیده و بر اساس آنها، محاسبات ضریب رفتار صورت گرفته است. در ادامه ضرایب شکل پذیری کلی سازه‌ها (μ)، ضرایب کاهش بر اثر شکل پذیری (R_{μ})، ضرایب مقاومت افزون (R_s) و ضرایب رفتار سازه‌های مورد بررسی، محاسبه و نتایج در قالب جدول (۴) ارائه شده است.

غیرخطی (پوش اور) قرار گرفته‌اند. ابتدا ضوابط کنترلی پیوست شماره دو استاندارد ۲۸۰۰ ایران بر سازه‌ها اعمال گردیده و پس از اقناع این ضوابط، منحنی دو خطی و ضریب رفتار سازه‌ها به دست آمده است [۲۵]. منحنی برش پایه - تغییر مکان بام سازه‌های خمشی بدون میراگر و مجهز به میراگر و همچنین منحنی دو خطی ایده‌آل شده حاصل در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مقادیر $\frac{V_y}{W}$ برای سیستم‌های قاب خمشی در حدود ۰/۳۵ و برای سازه مجهز به میراگر در حدود ۰/۴ به دست آمده است. به منظور محاسبه عوامل مؤثر بر ضریب رفتار (عوامل



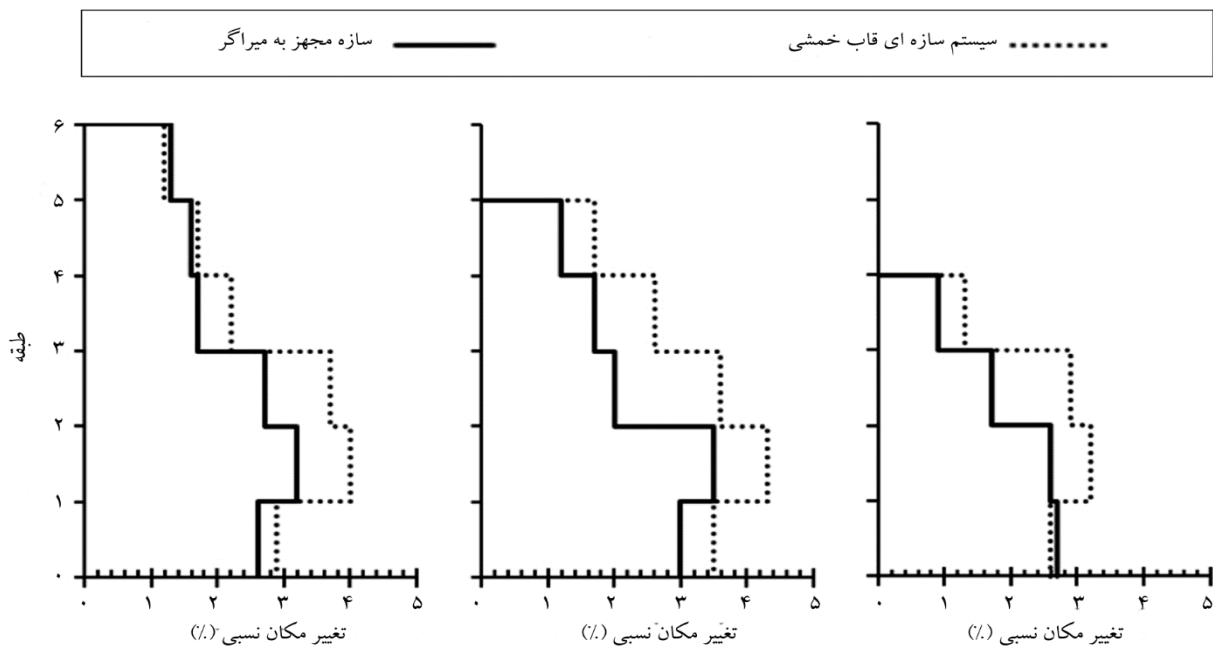
شکل (۱۱): نمودار برش پایه - تغییر مکان بام در سازه‌های مورد بررسی: منحنی‌های پایه (بالا)، منحنی‌های دو خطی (پایین).

جدول (۴): محاسبه ضرایب رفتار و مقاومت افزون برای سازه‌های مورد بررسی.

سازه مجهز به میراگر						سازه خمشی						تعداد طبقه
R	R_{μ}	R_s	Ω	V_d (KN)	T(s)	R	R_{μ}	R_s	Ω	V_d (KN)	T(s)	
۵/۹۵	۳/۰۶	۱/۹۵	۱/۶۹	۱۸۱۲	۰/۸۲۵	۳/۱۹	۱/۹۸	۱/۶۱	۱/۳۹	۲۰۵۰	۱/۳۴۸	۴
۵/۷۲	۳/۲۹	۱/۷۴	۱/۵	۲۴۸۰	۱/۰۱۸	۳/۷	۲/۳۷	۱/۵۶	۱/۳۵	۲۸۲۷	۱/۴۷۴	۵
۵/۵	۳/۳۱	۱/۶۶	۱/۴۳	۳۰۰۲	۱/۱۴۱	۳/۶۵	۲/۳۵	۱/۵۴	۱/۳۳	۳۱۱۸	۱/۶۲۳	۶

می‌شود که تغییر مکان نسبی طبقات در سازه‌های مجهز به میراگر برای حالت‌های مورد بررسی در محدوده (۳/۵-۲/۶ درصد) بوده‌اند در حالی که این مقادیر برای سیستم‌های سازه‌ای قاب خمشی مورد بررسی در محدوده (۴/۳-۳/۲ درصد) بوده‌اند که ۱۹ درصد کاهش را نشان داده است. همچنین کم‌تر بودن جابه‌جایی نسبی طبقه اول نسبت به طبقه دوم، به دلیل گیردار بودن پای ستون‌ها بوده است. به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای حالت‌های تحلیل مورد بررسی، تحلیل‌های تاریخچه زمانی مختلف برای سازه‌های ۴، ۵ و ۶ طبقه مورد نظر تحت اثر رکوردهای زلزله ال‌سنترو، طیس و نورث‌ریج که به سطوح خطر DBE و MCE مقیاس شده‌اند، انجام پذیرفته است. در جدول (۵) مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده ارائه شده است.

مطابق جدول (۴)، ضریب کاهش بر اثر شکل‌پذیری در سازه‌های مجهز به میراگر نسبت به سازه‌های بدون میراگر دارای مقدار بیشتری می‌باشد که دلیل این امر، افزایش شکل‌پذیری ناشی از اضافه شدن میراگر و همچنین ایجاد سختی بهینه می‌باشد. از آنجایی که اکثراً برای سهولت در اجرا از ستون‌های تیپ استفاده می‌شود و این امر باعث دور شدن از هدف سختی بهینه در طبقات می‌شود، می‌توان با افزودن میراگر به روش ارائه شده، به سختی بهینه مورد نظر دست یافت. ضریب مقاومت افزون با افزایش تعداد طبقه و افزایش دوره تناوب، کاهش می‌یابد که این امر به وضوح در نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود. پس از به دست آمدن تغییر مکان نسبی طبقات سازه‌های مورد بررسی در سطح عملکرد آستانه فروریزش بر اساس نتایج تحلیل بار افزون، همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، مشاهده



شکل (۱۲): دریفت سازه‌های مورد بررسی در سطح عملکرد آستانه فروریزش (CP) بر اساس تحلیل بار افزون.

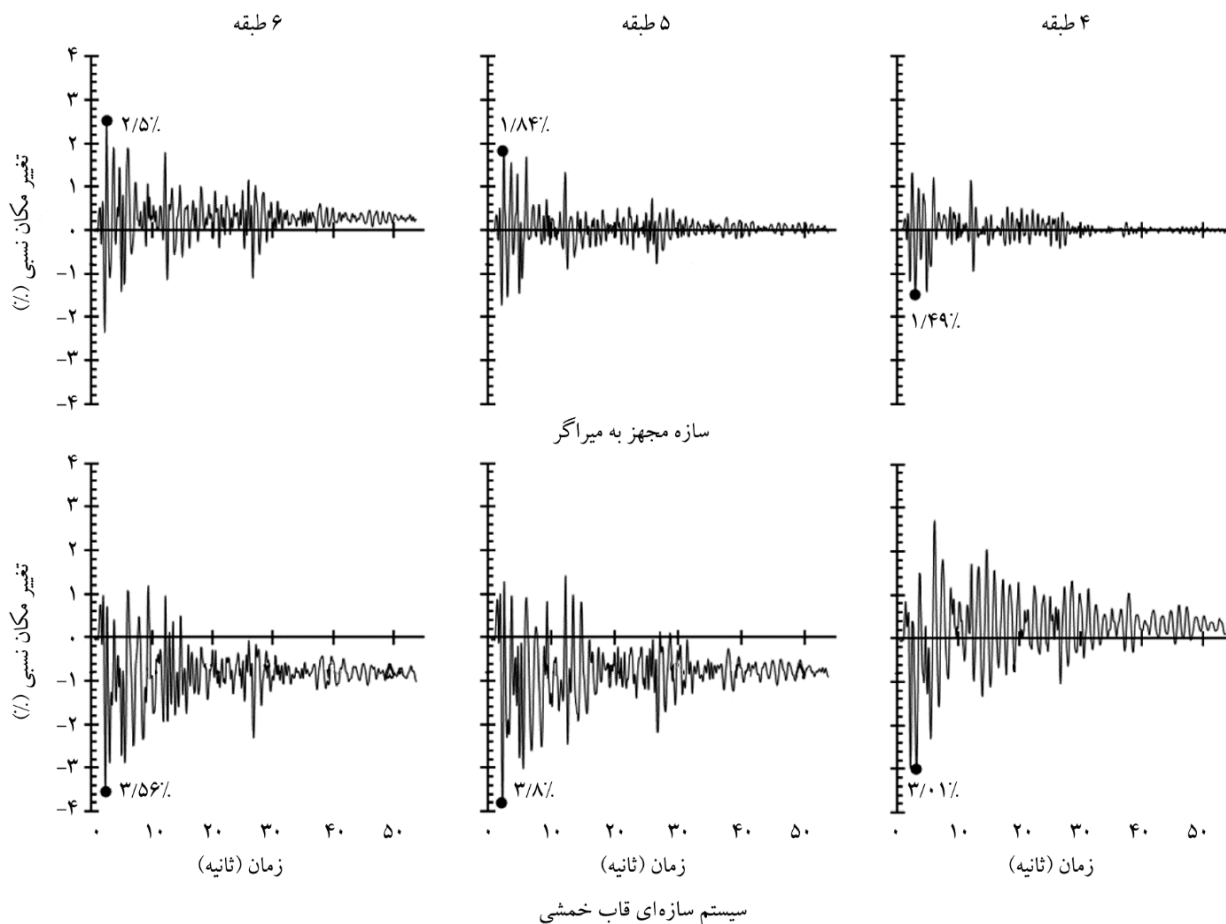
محدوده (۲/۳ - ۰/۹ درصد) و در زلزله سطح MCE در محدوده (۳/۸ - ۱ درصد) به دست آمده است که ۵۰ درصد افزایش را نشان داده است. در سازه‌های مجهز به میراگر، دریافت بیشینه در زلزله سطح DBE در محدوده (۱/۸ - ۰/۶ درصد) و در زلزله سطح MCE در محدوده (۲/۶ - ۰/۸ درصد) به دست آمده است که افزایش ۴۱ درصدی را نشان می‌دهد، این امر نشان‌دهنده‌ی کم‌تر شدن اختلاف دریافت در زلزله‌های قوی‌تر برای سازه‌های مجهز به میراگر نسبت به سیستم سازه‌های قاب خمشی می‌باشد. افزودن میراگر به سازه‌های خمشی میزان دریافت بیشینه طبقات را در زلزله سطح DBE به میزان حدود ۴۱ درصد و در زلزله‌های سطح MCE به میزان حدود ۴۷ درصد کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اثر میراگر بر دریافت طبقات در زلزله سطح MCE بیشتر می‌باشد و باعث بهبود رفتار سازه می‌گردد.

در شکل (۱۳) بخشی از نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی فوق‌الذکر برای طبقه بحرانی، تحت اثر زلزله ال‌سترو مقیاس شده به سطح خطر MCE به‌عنوان نمونه ارائه شده است.

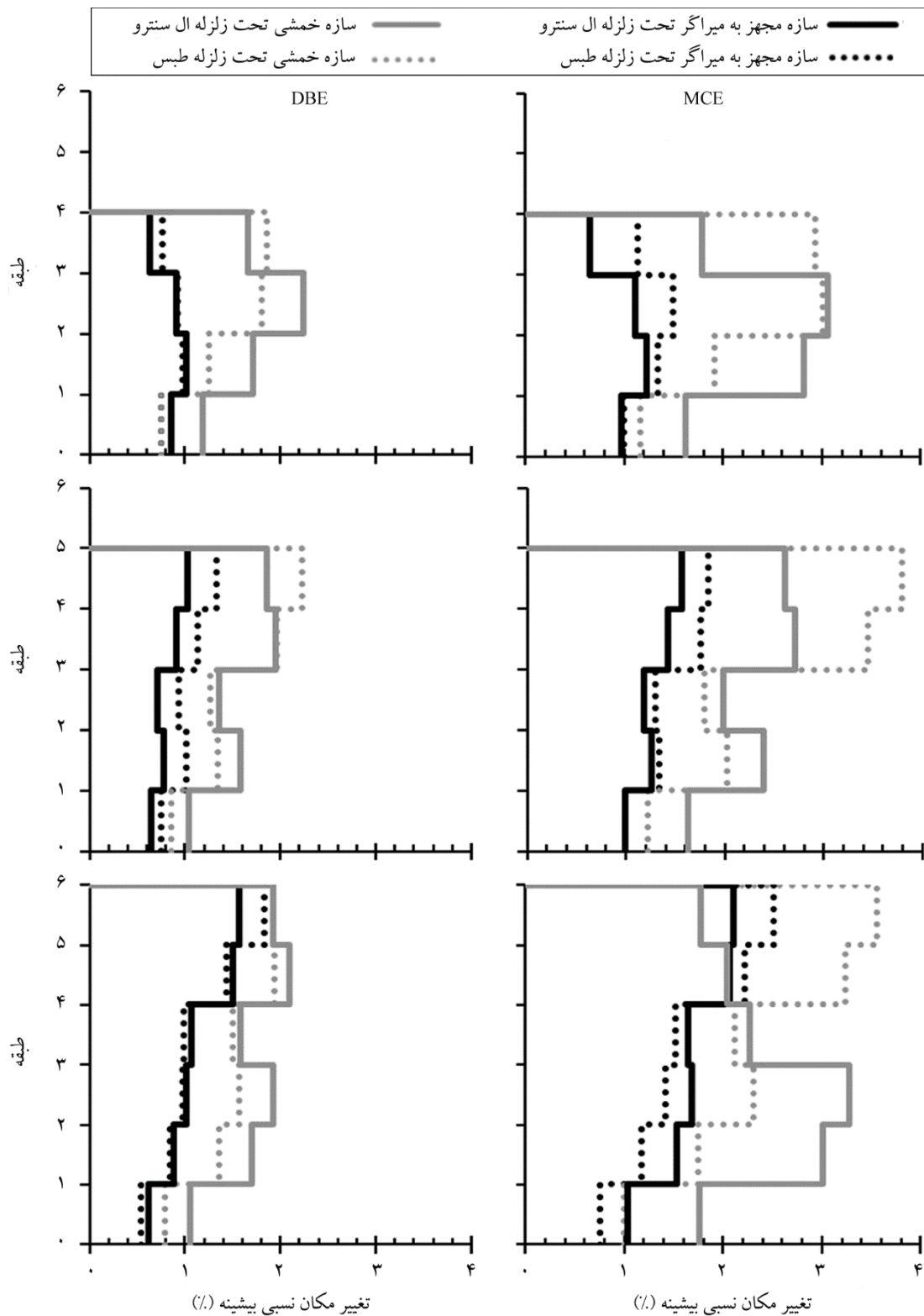
جدول (۵): مشخصات شتاب‌تکاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های تاریخچه زمانی.

نام تکاشت	محل وقوع	سال وقوع	PGA (g)
ال‌سترو	آمریکا	۱۹۴۰	۰/۳۴۸
طیس	ایران	۱۹۷۸	۰/۹۳۳
نورث‌ریچ	آمریکا	۱۹۹۴	۰/۵۶۸

همچنین جابه‌جایی نسبی بیشینه هر طبقه از سازه‌های مورد بررسی تحت زلزله‌های ال‌سترو و طیس مقیاس شده به سطح خطر DBE و MCE در شکل (۱۴) نشان داده شده است. دریافت بیشینه سازه‌های خمشی در زلزله سطح DBE در



شکل (۱۳): تغییر مکان نسبی سازه‌های مورد بررسی تحت زلزله ال‌سترو مقیاس شده به سطح خطر MCE.



شکل (۱۴): مقادیر پیشینه تغییر مکان نسبی طبقات سازه‌های مورد بررسی.

شده است. لازم به ذکر است، میرایی معادل تعیین شده مازاد بر ۵ درصد میرایی در نظر گرفته شده برای سازه‌ها در تحلیل‌های عمومی می‌باشد.

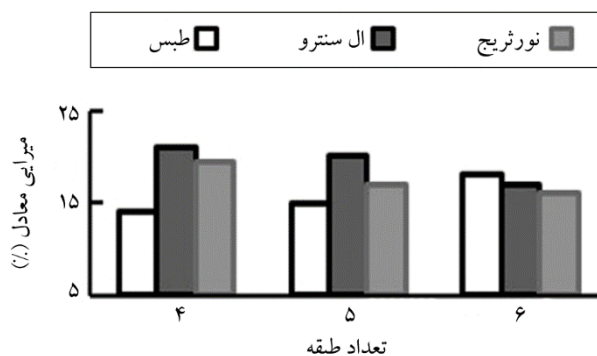
در شکل (۱۵)، نمودار تغییرات میرایی معادل قاب‌ها نسبت به افزایش تعداد طبقات و بر مبنای شتاب‌نگاشت‌های ال سنترو و طبس نشان داده

۵- طبق نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی، تغییر مکان نسبی طبقات در سازه‌های مجهز به میراگر نسبت به سیستم سازه‌های قاب خمشی ۴۴ درصد کاهش یافته است.

۶- افزودن میراگر به سازه‌ها باعث افزایش میرایی معادل سازه‌ها و دستیابی به میرایی معادل ۲۲/۵ درصد شده است.

مراجع

1. Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. Wiley.
2. Stiemer, S. and Godden, W.G. (1980) *Shaking Table Tests of Piping Systems with Energy Absorbing Restrainers*. Vol. 4. University of California Earthquake Engineering Research Center.
3. Scholl, R.E. (1988) Added damping and stiffness elements for earthquake damage and loss control. *Proceedings of Conference XLI: A Review of Earthquake Research Applications in the National Earthquake Hazards Reduction Program, 1877-1987*.
4. Bergman, D.M. and Goel, S.C. (1987) *Evaluation of Cyclic Testing of Steel-Plate Devices for Added Damping and Stiffness*. Department of Civil Engineering, University of Michigan.
5. Xia, C. and Hanson, R.D. (1992) Influence of ADAS element parameters on building seismic response. *Journal of Structural Engineering*, **118**(7), 1903-1918.
6. Whittaker, A. (1989) Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements. *Earthquake Engineering*.
7. Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., and Su, Y.-F. (1993) Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction. *Earthquake Spectra*, **9**(3), 505-528.
8. Mahmoudi, M. and Abdi, M.G. (2012) Evaluating response modification factors of TADAS frames. *Journal of Constructional Steel Research*, **71**, 162-170.
9. Moghaddasi, M. and Namazi, A. (2016)



شکل (۱۵): نمودار تغییرات درصد میرایی معادل در سازه‌های مجهز به میراگر MADAS.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج مطالعات عددی پژوهش حاضر، عملکرد بهتر سازه‌های فولادی مجهز به میراگر در محدوده سازه‌های بررسی شده مشاهده می‌شود که موارد زیر به‌عنوان جمع‌بندی یافته‌های مقاله حاضر خاطر نشان می‌گردد.

- ۱- با بررسی نتایج مدل‌های عددی میراگرهای MADAS و TADAS مشاهده شده است که میراگر MADAS در مقایسه با میراگر صفحه مثلثی TADAS در سیکل‌های بزرگ پایداری بالاتری از خود نشان داده، به طوری که جابه‌جایی حداکثر میراگر TADAS در حدود ۴۰ درصد میراگر MADAS بوده و همچنین میراگر MADAS، ۳۳ سیکل بیشتر از میراگر TADAS بار وارد شده را تحمل نموده است.
- ۲- میزان افزایش برش پایه در سازه مجهز به میراگر در مقایسه با سیستم قاب خمشی در حدود ۳۰ درصد بوده است. در عین حال به دلیل تمرکز رفتار غیر ارتجاعی در میراگرها، برش ستون‌ها ۲۰ درصد کاهش یافته است.
- ۳- بر اساس نتایج حاصل از روش بار افزون، برای سازه خمشی مجهز به میراگر، ضریب کاهش بر اثر شکل‌پذیری (R_{μ}) برابر ۳/۳، ضریب مقاومت افزون (R_S) برابر ۱/۸ و ضریب رفتار (R) برابر ۵/۹ پیشنهاد می‌شود.
- ۴- طبق نتایج حاصل از تحلیل بار افزون، تغییر مکان نسبی طبقات در سازه‌های مجهز به میراگر نسبت به سازه‌های خمشی ۱۹ درصد کاهش یافته است.

- response modification factors of frames equipped by pall friction dampers. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **1**(1), 78-92.
20. Krawinkler, H. (1992) *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*. Applied Technology Council, Redwood City, Calif.
 21. Lemaitre, J. and Chaboche, J.-L. (1994) *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge university press.
 22. Budaházy, V. (2015) *Uniaxial Cyclic Steel Behavior and Model for Dissipative Structures*. Ph.D. Thesis, Structural Engineering, Budapest University of Technology and Economics,
 23. Armstrong, P.J. (1966) A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. *CEBG Report RD/B/N, 731*.
 24. *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, No 360*. Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization (in Persian).
 25. Tasnimi, A. and Masoumi, A. (2005) *Calculation Response Modification Factor of Concrete Moment Resistant Frames*. Building and Housing Research Center (in Persian).
10. Moreschi, L.M. and Singh, M.P. (2003) Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**(8), 1291-1311.
 11. Apostolakis, G. and Dargush, G.F. (2010) Optimal seismic design of moment-resisting steel frames with hysteretic passive devices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**(4), 355-376.
 12. Hao, L. and Zhang, R. (2016) Structural safety redundancy-based design method for structure with viscous dampers. *Struct. Eng. Mech.*, **59**(5), 821-840.
 13. Hao, L., Zhang, R., and Jin, K. (2018) Direct design method based on seismic capacity redundancy for structures with metal yielding dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **47**(2), 515-534.
 14. Khaleghian, F. and Tehranizadeh, M. (2007) Laboratory study of new metal dampers applying X-shape plate. *5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran (in Persian).
 15. ASCE (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI. American Society of Civil Engineers.
 16. BHRC (2007) *Standard No. 2800 Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*. 4th ed. Building and Housing Research Center (in Persian).
 17. Miranda, E. and Bertero, V.V. (1994) Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design. *Earthquake Spectra*, **10**(2), 357-379.
 18. Abdi, M.G. (2011) *Evaluating Function of ADAS Yielding Damper in Controlling Seismic Behavior of Structures*. Master Thesis, Shahid Rajae University, Tehran (in Persian).
 19. Mahmoudi, M., Mirzaei, A., and Vosough, S. (2013) Evaluating equivalent damping and

واژه‌نامه

Added Damping and Stiffness (ADAS)	۱- افزایشده میرایی و سختی
Modified Added Damping and Stiffness (MADAS)	۲- افزایشده میرایی و سختی اصلاح شده
Triangular-Plate Added Damping and Stiffness (TADAS)	۳- افزایشده میرایی و سختی دارای ورق‌های مثلثی شکل
Over Strength Factor	۴- ضریب مقاومت افزون
Finite Element	۵- اجزا محدود
Solid element	۶- المان سه‌بعدی
Shell element	۷- المان پوسته‌ای
Multi-Linear Isotrope	۸- سخت‌شوندگی چندخطی ایزوتروپیک
Peak Ground Acceleration (PGA)	۹- بیشینه شتاب زمین

نشانه‌گذاری

F_y تنش تسلیم

E مدول الاستیسیته

Δy^m تغییر مکان تسلیم

K_e^m سختی اولیه

R_μ ضریب کاهش بر اثر شکل‌پذیری

R_s ضرایب مقاومت افزون

μ ضریب شکل‌پذیری کلی سازه

γ ضریبی بدون بعد که تأثیرات عرض b_2 را در روابط نیروی تغییر مکان اعمال می‌کند.

V_y برش پایه هنگام تسلیم کلی سازه

V_d برش پایه مورد استفاده در طراحی

Evaluating Seismic Performance of Steel Structures Equipped with MADAS Dampers in Comparison with Moment-Resisting Frames

Mohammad Ghasem Vetr^{1*}, Abbas Shafizadeh², and Abolfazl Riahi Nouri³

1. Assistant Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: vetr@iiees.ac.ir
2. M.Sc. Graduate in Earthquake Engineering, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Department of Arts and Architecture, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

One of the effective methods to improve dynamic response of steel structures is using adjunct elements among which metal yielding dampers are the most common. The working mechanism of these dampers in the lateral load-resisting structural system is related to the fact that development of inelastic strains in metallic dampers as the fuse elements results in dissipating the earthquake input energy imparted to the structure in a major seismic event. On the other hand, the aim of implementation of such damping devices is to substantially reduce the seismic demand in main structural systems, such as beams and columns, and hence, these members remains essentially elastic. One of the types of metallic yielding dampers is Added Damping and Stiffness (ADAS) metal damper that is a series of X-shaped steel sheets, which can be efficient in dissipating seismic energy but have shown apparent weakness due to the buckling resulted from development of axial forces in the dampers.

The objective of the present paper is to investigate the characteristics of a Modified Added Damping and Stiffness (MADAS) damper to be used as a supplementary device to improve seismic performance of low- and mid-rise steel structures. In MADAS damper, X-shape plates are configured in a way that their displacement along vertical axis is quite free, and hence, no axial force is developed in such metallic dampers. In this paper, a numerical Finite Element (FE) model of MADAS damper was simulated in ABAQUS and used to compare the predicted numerical results to those of experimental results of the MADAS damper subjected to cyclic displacements. It should be noted that, the experimental cyclic tests have been conducted by previous researchers for MADAS dampers, and, have shown superior cyclic performance compared to conventional metallic dampers such as Triangular Added Damping and Stiffness (TADAS) dampers.

In addition, three 4-, 5-, and 6-story buildings with steel moment-resisting frames have been studied, as the representative of the low- and mid-rise structures. For each building, two design alternatives, one for the case of conventional Steel Moment-Resisting Frame (MRF) and the other alternative is the one equipped with MADAS dampers, have been designed to be studied using numerical models. The structural members of the adopted buildings equipped with metallic MADAS dampers are designed according to ASCE/SEI 7-10 design code. The behavior of the numerical models has been investigated regarding seismic parameters including the Response Modification Factor, R , and Overstrength Factor, (Ω) . The application of metallic dampers have shown to provide an increase of about (50%-80%) in the Response Modification Factor, R , and about (10%-20%) in the Overstrength Factor, (Ω) . Pushover analyses for the numerical models have been conducted to obtain Base shear-Displacement curves. Based on the obtained pushover results, a maximum decrease of about 20% was noticed in the inter-story drifts of the numerical models in the Collapse Prevention (CP) performance level.

In addition, to investigate the seismic performance of analysis cases, time-history analyses of the numerical models subjected to 1940 El-Centro, 1994 Northridge, and 1978 Tabas earthquakes have been conducted. The earthquake records have been scaled to Maximum Credible Earthquake (MCE) and Design Based Earthquake (DBE) intensity levels.

Based on the obtained time-history results, a decrease of about (40%-50%) has been observed in the peak inter-story drift values due to the application of metallic MADAS dampers compared to that of moment-resisting steel frames. In addition, regarding the results of time-history analyses, the values of equivalent damping has been observed to be in the range of about (15%-20%) for the analysis cases. The obtained results indicate significant improvement in the seismic response of the structures equipped with MADAS dampers compared to the same buildings utilizing Steel Moment-Resisting Frames (MRFs) as their lateral-resistant structural system.

Keywords: Metallic yielding damper, Moment-resisting steel frames, Response modification factor, Equivalent damping ratio, Inter-story drift.