

پیشنهاد قطعه جاذب انرژی با عملکرد محوری برای بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های مهاربندی شده با مهاربند قطری

حسین لبیبی^۱، محسن گرامی^{۲*}، محمود حسینی^۳

۱. دکترای مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

۲. استاد گروه زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

۳. استاد پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

m.gerami@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳

چکیده

تجربیات به دست آمده از عملکرد سازه‌های مهاربندی شده با مهاربندی همگرا طی سالیان گذشته محققان را بر آن داشت تا با ایجاد تغییراتی در اعضای مهاربندی به بهبود رفتار لرزه‌ای آن‌ها کمک نمایند؛ نصب و استفاده از اعضای جاذب انرژی یکی از این راهکارها بوده است که با توجه به تأثیر قابل توجیهی که در پاسخ لرزه‌ها ایجاد نموده همواره مورد توجه محققین گرفته است. اما با بررسی تاریخچه تحقیقات انجام شده و با توجه به انعطاف‌پذیری قابلیت طراحی میراگرها به نظر می‌رسد می‌توان به طرح‌های کارتری نیز در این زمینه دست یافت. در این مقاله سعی شده است تا ضمن انجام تحلیل‌های حساسیت بر روی پارامترهای مؤثر هندسی میراگرهای تسلیمی فولادی با ورق‌های موایی، نوعی میراگر تسلیمی جدید با عملکرد دو مرحله‌ای (چند سطوحی) سخت شونده طراحی و ارائه شود. در ادامه با مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی قاب در نظر گرفته شده، میزان تأثیر این میراگر در بهبود رفتار لرزه‌ای قاب سه‌طبقه بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد تغییر برخی پارامترهای هندسی تأثیر زیادی در شکل‌پذیری، تحمل نیرو و میزان جذب انرژی میراگر دارد؛ در عوض تغییر برخی پارامترهای دیگر تأثیر چندانی روی مؤلفه‌های ذکر شده نخواهد داشت؛ همچنین مقایسه پاسخ‌های لرزه‌ای نشان داد، استفاده از میراگر پیشنهادی ضمن جلوگیری از کمانش مهاربندها در محدوده‌ی تغییر شکلی تعریف شده برای میراگر، می‌تواند کاهش قابل توجیهی بر روی پاسخ‌های لرزه‌ای قاب موردنظر داشته باشد.

واژگان کلیدی: تحلیل حساسیت، میراگر تسلیمی، میراگر چند سطوحی، بهسازی لرزه‌ای، رفتار لرزه‌ای، زلزله..

قاب‌های خمشی، سهولت اجرا، سختی جانی زیاد و آسیب کمتر به اجزای غیر سازه‌ای همواره از محبوبیت خاصی برخوردار بوده است؛ لیکن معایب آن در برخی مقاطع زمانی، طراحان را به سمت قاب‌های خمشی و یا سامانه‌های نوین سوق داده است؛ از جمله معایب این سامانه می‌توان به کمانش مهاربندها در فشار و پرتاپ خارج از صفحه میان قاب، جذب انرژی اندک، برش پایه زیاد و

۱- مقدمه

در سال‌های گذشته استفاده از قاب ساختمانی مهاربندی شده به عنوان سامانه مقاوم لرزه‌ای در ساختمان‌های فولادی همواره یکی یکی از روش‌های مرسوم و مورد توجه طراحان در ایران و جهان بوده است. این سامانه مقاوم جانی به دلیل سبکی وزن نسبت به

تحقیقات خود را روی مهاربندهای کمانش ناپذیر^۱ شروع نمودند. اولین نمونه از این نوع مهاربندها توسط Wanatabe [3] در سال ۱۹۸۰ به جامعه جهانی معروض شد. در سال ۱۹۹۰ این نمونه از مهاربندها توسط Fujimoto [4] روی ساختمان‌های اداری ۱۰ تا ۱۵ طبقه نصب و تحت آزمایش‌های متعددی قرار گرفت. انجام تحقیقات روی این نمونه از مهاربندها تاکنون ادامه داشته است. همچنین تحقیقات متعددی روی میراگرهای ویسکوالاستیک Del gobbo در سال ۲۰۱۹ [5] اشاره نمود، او با نصب میراگرهای ویسکوالاستیک روی ساختمان‌های چهار، هشت و شانزده طبقه، رفتار لرزه‌ای آن‌ها را مورد مطالعه قرارداد. طیاری و همکاران [6] در سال ۲۰۱۹ تحقیقاتی را با نصب میراگرهای اصطکاکی روی ساختمان‌های چهار و ده طبقه واقعی انجام دادند. گرامی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [7] با در نظر گرفتن پاسخ‌های لرزه‌ای قاب، روی پیدا نمودن نقطه بهینه نصب میراگرهای تسلیمی در نقاط مختلف اعضای مهاربندی تحقیق نمودند. میراگرهای تسلیمی مانند انواع حلقه‌ها و ورق‌های منحنی شکل نیز در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران امر بوده‌اند که در این میان می‌توان به تحقیقات کافی و همکاران [8] در سال ۲۰۱۴ و زهرابی و چراغی [9] در سال ۲۰۱۶ اشاره نمود. استفاده از میراگرهای با ورق‌های موازی جاری شونده^۲ نیز از جمله ایده‌هایی بوده است که با توجه به سطح زیاد و قابل تنظیم جاری شوندگی در فولاد همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. T. T.Soong و همکاران [10] در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار از این نوع میراگرهای با صفحات موازی مثلثی شکل برای استفاده در بخش فوقانی مهاربندهای هشتی^۳ استفاده نمودند. Chan و همکاران [11] در سال ۲۰۰۹ از صفحات جاری شونده به شکل برشی در بخش فوقانی مهاربندهای هشتی استفاده نمودند؛ آن‌ها پس از انجام ۱۹ تست آزمایشگاهی به نتایج قابل قبولی دست یافتند. در سال ۲۰۱۱ Krawinkler و همکاران [12] از میراگرهای شانه‌ای^۴ برای

انتقال شتاب لرزه‌ای در سازه اشاره نمود. مفاصل کششی ایجاد شده در مهاربندها ناشی از کمانش اعضای فشاری ممکن است موجب توسعه مفاصل خمیری در سایر نقاط سازه و درنهایت ناپایداری آن شود. درواقع مشکل اصلی مهاربندها عدم امکان تحمل فشار است به‌گونه‌ای که عضو مهاری به‌محض رسیدن به بار کمانشی، دچار کمانش شده و قادر به تحمل نیروی بیشتر نیست، همین موضوع در زمان بازگشت قاب به حالت اول و جهت معکوس جریان نیرو به علت عدم مقاومت عضو کمانش کرده، موجب اعمال نیروی ضربه‌ای به قاب شده و احتمال گسیختگی اتصالات را به شدت افزایش می‌دهد؛ هرچند به نظر می‌رسد اعمال بار ثقلی به سازه در موارد اجرایی پس از نصب مهاربندها باعث ایجاد نیروی محوری و مشارکت اعضای مهاربندی در تحمل بارهای ثقلی است؛ پس درنهایت همان‌گونه که تجربیات زلزله‌های گذشته و آزمایش‌های انجام شده نیز می‌بین آن است، قاب مهاربندی شده با مهاربند همگرا منحنی چرخه‌ای پایدار و مناسبی را تحت بارهای لرزه‌ای نداشته و درمجموع اعضای مهاربندی زمانی عمل کرد لرزه‌ای بهتری خواهد داشت که ضمن متحمل شدن تغییر شکل‌های فرا ارتیجاعی درکشش و کمانش غیر ارتیجاعی پایدار در فشار، همزمان در جذب انرژی لرزه‌ای شرکت کرده و سایر سازوکارهای شکست مانند کمانش موضعی بر رفتار لرزه‌ای قاب حاکم نبوده و خللی در رفتار غیر ارتیجاعی آن ایجاد نکند. درواقع رسیدن به پاسخ شکل‌پذیر موردنیاز طرح، نیازمند شناخت کامل بر رفتار چرخه‌ای و غیر ارتیجاعی مهاربندها بوده که باوجود استفاده از میراگرهای در این سیستم سازه‌ای مشکلات آن را تا حدی برطرف می‌کند. از مزایای استفاده از میراگرهای می‌توان به هدایت آسیب به نقاطی تعویض‌پذیر و از قبل تعیین شده در سازه اشاره نمود؛ کاهش برش پایه و شتاب طبقات نیز از دیگر مزایای استفاده از میراگرهای است که در این مقاله به آن پرداخته شده است. تحقیق روی انواع میراگرهای حل مشکلات مهاربندها از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است و با توجه به مزایای آن تا به امروز دنبال می‌شود. در زیر به تاریخچه برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۸۰ Kimura [1] و Mochizuki [2] در

1. Buckling Restrained Brace (BRB)
2. Added Damping and Stiffness (ADAS)
1.Chevron Brace
2. Slit Dampers

۲- تحلیل حساسیت

شکل (۱) جز مؤثر در نظر گرفته شده برای انجام تحلیل های حساسیت، شامل دو ورق موازی و یک ورق ذوزنقه ای شکل به عنوان ورق جاری شونده را نشان می دهد. هندسه ذوزنقه ای شکل بودن قطعات با توجه به حاکم بودن ممان حداقل در انتهای گیردار قطعه و همچنین ترکیب برش و ممان در بخش گیردار غلتکی، برای توزیع سطح وسیع تری از جاری شدگی در سطح ورق جاری شونده در نظر گرفته شده است. عملکرد جزء قطعه به گونه ای است که با تغییر مکان دو ورق موازی تکیه گاهی نسبت به یکدیگر، ورق ذوزنقه ای شکل به صورت برشی و خمشی تغییر شکل داده و با ورود به محدوده غیر ارجاعی ماده فرایند جذب انرژی آغاز می شود. شرایط تکیه گاهی ورق جاری شونده به گونه ای است که ورق ذوزنقه ای از سوی بزرگ تر به طور کامل از شکاف تعییش داده در ورق تکیه گاهی عبور نموده و برای جلوگیری از تغییر ساختار مولکولی بخش جاری شونده، از وجه بیرونی توسط فرایند جوشکاری به ورق تکیه گاهی متصل می شود؛ از سوی کوچک تر نیز به طور آزادانه درون شکاف تعییش داده در ورق تکیه گاهی حرکت می نماید که برای سهولت حرکت و دوران آن، درون شکاف ورق تکیه گاهی مربوطه به شکل نیم دایره ای در نظر گرفته شده است. عرض شکاف های تعییش داده در ورق های تکیه گاهی به گونه ای است که ضمن سهولت عبور ورق جاری شونده، تأثیری منفی زیادی روی منحنی های چرخه ای جزء قطعه نداشته باشد. پارامترهای مؤثر بر رفتار جزء قطعه شامل سه گروه پارامترهای هندسی، پارامترهای مصالح و پارامترهای تحلیلی می شود که پارامترهای هندسی شامل فاصله دو ورق موازی، ضخامت ورق جاری شونده، نسبت ضخامت ورق جاری شونده به قطعات موازی، زاویه ورق جاری شونده، طول لازم گیرداری ورق جاری شونده و همچنین میزان فاصله بین شیار و ورق جاری شونده برای ساخت قطعه است؛ پارامترهای مؤثر مصالح شامل حد ارجاعی، حد جاری شدگی، حد نهایی، روند کرنش جاری شدگی فولاد و ضریب اصطکاک بین دو ورق است؛ همچنین از پارامترهای مؤثر تحلیلی می توان به نوع المان مش بندی، اندازه مشها، نوع و سرعت بارگذاری و روش تحلیل اشاره نمود.

جذب انرژی لرزه ای استفاده نمودند. حسینی و نوروزی نژاد [13] و حسینی و علوی [14] در سال ۲۰۱۴ روی استفاده از میراگرهای جاری شونده با ورق موازی در حین حرکت گهواره ای سازه تحقیق نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که با توجه به نقش کم رنگ ستون های پیramونی در باربری ثقلی و نقش مهم آنها در باربری جانبی در صورتی که از این گونه میراگرهای در پایه ستون های جانبی استفاده شود، می توان ضمن تضمین حرکت گهواره ای در سازه، انرژی قابل توجهی را نیز جذب نمود. آقا کوچک و همکاران [15] در سال ۲۰۱۶ طرحی نواز میراگرهای تسلیمی به نام میراگر دندانه شانه ای ارائه نموده و با استفاده از انجام تست های آزمایشگاهی و مدل های عددی رفتار مناسب آن را ثابت نمودند. Gray و همکاران [16-19] در سال های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ طرحی نواز میراگرهای با ورق های موازی با استفاده از روش ریخته گری قطعات ارائه نمودند. آنها با انجام آزمایش های متعدد و ساخت مدل های عددی به بهبود قابل توجه رفتار لرزه ای قاب های فولادی با استفاده از میراگر ساخته شده پی بردن. زیبا سخن و همکاران [20] در سال ۲۰۱۹ با ارائه طرحی نواز میراگرهای تسلیمی با ورق های موازی جاری شونده و انجام تست های آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که استفاده از این نوع میراگرهای در بهبود رفتار لرزه ای قاب های مهاربندی شده تأثیر به سزاگی خواهد داشت. با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه میراگرهای تسلیمی، به نظر می رسد هنوز تحقیقات کاملی در این زمینه صورت نگرفته است و می توان با انجام تحلیل های حساسیت روی پارامترهای مؤثر بر رفتار میراگرها و ارائه طرح های نوین، به بهبود عملکرد میراگر و به دنبال آن عملکرد لرزه ای قاب کمک نمود. در این مقاله سعی شد تا با انجام تحلیل های حساسیت روی پارامترهای مؤثر هندسی با استفاده از نرم افزار ABAQUS، به یک طرح بهینه برای جزء مؤثر میراگرهای تسلیمی با ورق های موازی رسید. پس از آن طرح و جزئیات یک میراگر دو مرحله ای ساخت شونده ارائه شد. در ادامه عملکرد میراگر پیشنهادی توسط مقایسه پاسخ های برش پایه و شتاب بام به دست آمده از تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی OpenSees، عملکرد شده بر قاب سه طبقه مهاربندی شده در نرم افزار موردمطالعه و بررسی قرار گرفت.

نهایی، حد ارجاعی و شکل پذیری فولاد قرار گرفت. با توجه به اینکه در ساخت بیشتر میراگرهای فولادی جاری شونده از فولاد ساختمانی St37 استفاده می شود، پارامترهای مربوط به دسته اول از نتایج حاصل از آزمایش صورت گرفته روی نمونه ساخته شده بر اساس استاندارد مربوطه [۲۱] محاسبه شد. شکل (۳) نمودار به دست آمده از آزمایش کشش و تصویر نمونه را نشان می دهد.

شکل ۳. نمونه های آزمایش شده و نمودار به دست آمده در آزمایش کشش

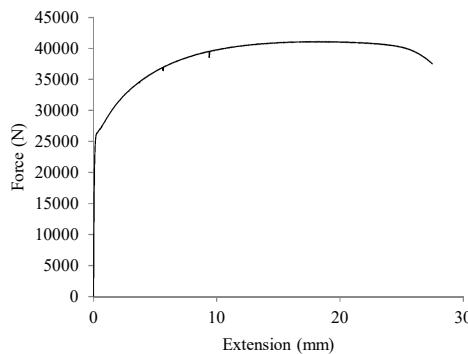


Fig. 3. Universal testing specimens and the diagram

دسته دوم از پارامترهای مؤثر بر رفتار جزء قطعه مربوط به تنظیمات مدل سازی و تحلیل سازه در نرم افزار است. این دسته شامل سرعت و اندازه گامهای بارگذاری، روش تحلیل غیرخطی و نوع و اندازه مش بنده است. کلیه پارامترهای مربوط به این دسته حین انجام درستی آزمایش با نمونه آزمایشگاهی بررسی و دقت شد. برای انجام تحلیل از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی

شکل ۱. جزء قطعه مورد مطالعه تحلیل های حساسیت

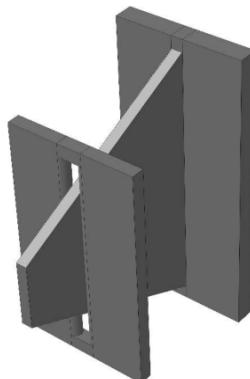


Fig. 1. Effective component of the damper

۳- درستی آزمایی مدل سازی

برای حصول اطمینان از نتایج به دست آمده از نرم افزار اجزای محدود، نتایج به دست آمده از مدل آزمایش شده حسینی و علوی [۱۴] در سال ۲۰۱۴ با نتایج مدل سازی همان نمونه در نرم افزار ABAQUS مقایسه شد. شکل (۲) میزان اختلاف نمودارهای چرخه ای به دست آمده را در دو حالت مذکور نشان می دهد.

شکل ۲. صحبت سنجی دقت مدل سازی اجزای محدود

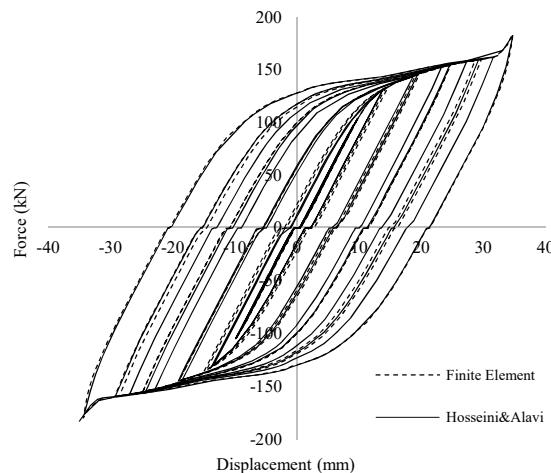


Fig. 2. Finite element modelling verification

۴- تحلیل اجزای محدود

Riftar جزء قطعه توسط تحلیل های استاتیکی غیرخطی در نرم افزار اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار پارامترهای مؤثر بر Riftar چرخه ای قطعه به سه دسته تقسیم بنده شد. ویژگی های مصالح در دسته اول و شامل مقاومت جاری شدگی، مقاومت

تا ۴) می‌توان به ترتیب میزان نیروی جاری شدگی، سختی مؤثر، نیروی نهایی و تغییر شکل جاری شدگی ورق مثلثی شکل را محاسبه نمود [10].

$$P_y = \frac{bt^2}{6L} F_y \quad (1)$$

$$K_{eff} = \frac{bt^3}{6L^3} E \quad (2)$$

$$P_p = \frac{bt^2}{4L} F_y \quad (3)$$

$$\Delta_y = \frac{L^2}{Et} F_y \quad (4)$$

که در آن b ضلع بزرگتر ورق جاری شونده، t ضخامتش و L طول آن (ارتفاع ذوزنقه) است. جدول (۱) مقایسه مقادیر بدست آمده از روابط فوق و مدل‌سازی اجزای محدود را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه نتایج تحلیل روابط توری و مدل‌سازی در نرم‌افزار

Analyses	K (N/mm)	P _y (N)	P _p (N)	Δ_y (mm)
Theoretical	313	2509	3764	8
Finite Element	302	2500	3735	8.32

Tab. 1. Theoretical and finite element comparative results table

۴-۱- فاصله دو ورق تکیه‌گاهی

یکی از مؤثرترین پارامترها بر رفتار قطعه، فاصله دو ورق تکیه‌گاهی است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، هرچه فاصله دو ورق تکیه‌گاهی بیشتر شود، قابلیت تغییر شکل میراگر نیز افزایش خواهد یافت؛ درنتیجه انرژی وارد شده توسط سطح بیشتری از فولاد جذب خواهد شد. از سوی دیگر کم بودن این فاصله موجب سختی و مقاومت بیشتر و شکل‌پذیری کمتری در قطعه می‌شود. درواقع با کم شدن فاصله، تغییر شکل حاکم بر رفتار قطعه جاری شونده به صورت برشی خواهد بود. انرژی جذب شده در این حالت و خمس مخصوص ناچیز خواهد بود. در سازوکار خمس مخصوص، با زیاد شدن فاصله و کم شدن اثر تغییر شکل‌های برشی، حالت خمس بر رفتار ورق حاکم شده و در انتهای ثابت آن، در محل لنگر حداقل، مفصل خمیری ایجاد شده و درنهایت منجر به گسیختگی قطعه می‌شود. درنتیجه با تنظیم میزان فاصله به صورت بهینه می‌توان تغییر شکل توأم خمی و برشی را در ورق ایجاد

استفاده شد. بدین منظور بار جایه‌جایی برابر با ۴۵ میلی‌متر در زمان ۱/۸ ثانیه بر اساس نمودار نشان داده شده در شکل (۴) بر مدل اعمال شد. گام زمانی تعریف شده در گام نخست تحلیل سازه برابر با 5×10^{-5} ثانیه و بیشترین آن برابر با 10^{-4} ثانیه تنظیم شد. با توجه به وقوع تغییر شکل‌های بیش از حد عضو جاری شونده، برای این عضو از المان C3D10 و برای دو عضو تکیه‌گاهی از المان C3D8R با روش انتگرال کاوش یافته استفاده شد. شکل (۵) چگونگی مش بندی جزء قطعه و المان‌های انتخاب شده برای انجام تحلیل را نشان می‌دهد.

شکل ۴. نمودار بارگذاری در نظر گرفته شده

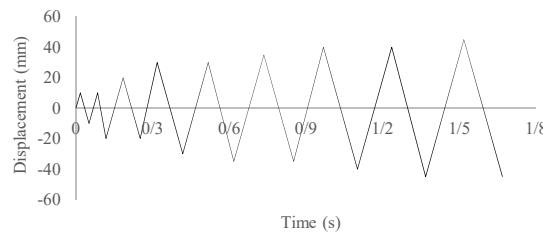


Fig. 4. Loading protocol diagram

شکل ۵. مدل مش بندی شده و پیکربندی المان‌های انتخاب شده

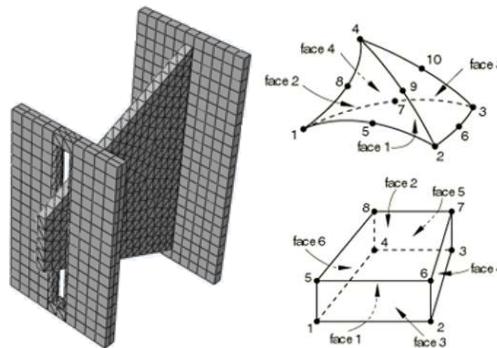


Fig. 5. Effective component meshing and selected elements configuration

دسته سوم از پارامترهای مؤثر بر رفتار جزء قطعه مربوط به اندازه-ها و نسبت‌های هندسی در نظر گرفته شده برای طراحی آن است. فاصله دو ورق موازی تکیه‌گاهی، ضخامت ورق جاری شونده و نسبت ضخامت آن به ضخامت ورق‌های تکیه‌گاهی، زاویه در نظر گرفته شده برای ورق جاری شونده و فاصله مونتاژ بین دیواره شکاف‌های در نظر گرفته شده در ورق‌های تکیه‌گاهی و ورق جاری شونده در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند که در ادامه به میزان تأثیر هر کدام رفتار قطعه پرداخته شده است. با استفاده از روابط (۱)

No.	t_1 (mm)	t_2 (mm)
1	24	10
2	12	10
3	8	10
4	6	10
5	4.8	10
6	4	10
7	15	24
8	15	12
9	15	8
10	15	6
11	15	4.8
12	15	4

شایان ذکر است اگرچه در نسبت‌های زیاد میزان جذب انرژی قطعه زیاد می‌شود اما با کم شدن ضخامت ورق تکیه‌گاهی، جوش موجود از حساسیت بیشتر و قابلیت اطمینان کمتری در چرخه‌های بارگذاری برخوردار خواهد شد. از سوی دیگر، ورق‌های باضخامت زیاد باعث زیادشدن وزن قطعه، تحملی هزینه بیشتر و دشواری تعویض آن پس از وقوع زلزله می‌شوند. نتایج تحلیل‌های مرحله‌ی دوم نشان داد با کاهش نسبت ضخامت، دامنه تغییر شکل قطعه زیاد خواهد شد؛ اما میزان جذب انرژی قطعه تغییر چندانی نخواهد داشت. به نظر می‌رسد با توجه به شرایط نیم دایره‌ای تکیه‌گاه متحرک که موجب اتصال اندک مابین ورق جاری شونده و ورق متتحرک می‌شود، تغییر در ضخامت ورق متتحرک، تأثیر چندانی بر منحنی‌های چرخه‌ای به‌دست‌آمده نخواهد داشت. شکل (۸) منحنی‌های چرخه‌ای به‌دست‌آمده از تحلیل‌های مربوطه را نشان می‌دهد. شایان ذکر است دو تحلیل انتهایی شماره ۱۱ و ۱۲ به دلیل وقوع تغییر شکل‌های زیاد و گسیختگی ورق مربوطه تکمیل نشده است.

۴-۳-زاویه ورق جاری شونده

یکی دیگر از پارامترهای هندسی مؤثر بر رفتار قطعه زاویه‌ی ورق جاذب انرژی است شکل (۹). شرایط نیرویی ورق جاری شونده به‌گونه‌ای است که در انتهای گیردار به‌طور هم‌زمان نیروی برشی و لکر خمی را تحمل نموده و در انتهای آزاد لغزان، تنها نیروی برشی بر آن وارد می‌شود.

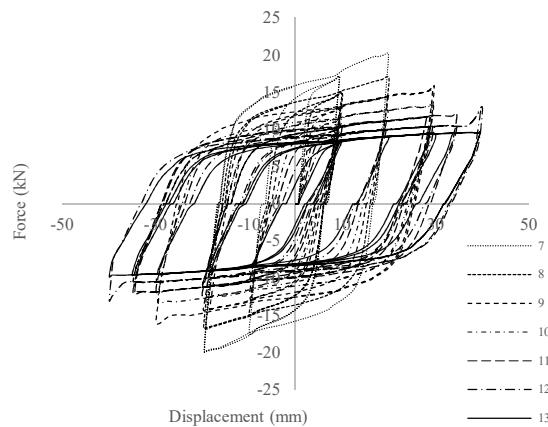
شکل ۷. نمودارهای چرخه‌ای به‌دست‌آمده از تحلیل‌های مرحله اول

نمود و به حداقل انرژی جذب شده دست یافت. شکل (۶) نمودارهای چرخه‌ای به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت فاصله از ۷ الی ۱۳ سانتی‌متر را نشان می‌دهد.

۴-۴-نسبت ضخامت ورق‌ها

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر رفتار قطعه نسبت ضخامت ورق جاری شونده (t_0) به ورق‌های تکیه‌گاهی است. برای بررسی این پارامتر با تغییر ضخامت ورق تکیه‌گاهی جوشکاری شده (t_1) و ثابت نگاهداشتن دیگر پارامترهای هندسی تعداد ۶ تحلیل استاتیکی غیرخطی و در مرحله دوم نیز همین کار برای

شکل ۶. نمودارهای چرخه‌ای حاصل از تغییر فاصله دو ورق تکیه‌گاهی



شکل ۶. Two support plates distance sensitivity analyses

ضخامت ورق تکیه‌گاهی متتحرک (t_2) و با تغییر نسبت ضخامت ورق‌ها مابین اعداد صفر تا ۲ برای ۶ حالت در نظر گرفته شده بر اساس اطلاعات داده شده در جدول (۲) صورت گرفت. شایان ذکر است در تمامی تحلیل‌های فوق ضخامت ورق جاری شونده برابر ۸ میلی‌متر، فاصله دو ورق تکیه‌گاهی ۱۳۰ میلی‌متر، فاصله مونتاژ ۵/۵ میلی‌متر در هر طرف و زاویه ورق جاری شونده ۶۵ درجه در نظر گرفته شد. شکل (۷) نمودارهای چرخه‌ای به‌دست‌آمده از تحلیل‌های مرحله اول را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با کم شدن نسبت ضخامت، میزان جذب انرژی و دامنه تغییر شکلی قطعه و سختی آن افزایش می‌یابد؛ اما تغییری در مقاومت نهایی قطعه مشاهده نمی‌شود و به نظر می‌رسد شکل کلی چرخه‌ها پایدار و قابل قبول است.

جدول ۲. حالات تحلیل جهت حساسیت سنجی نسبت ضخامت ورق‌ها

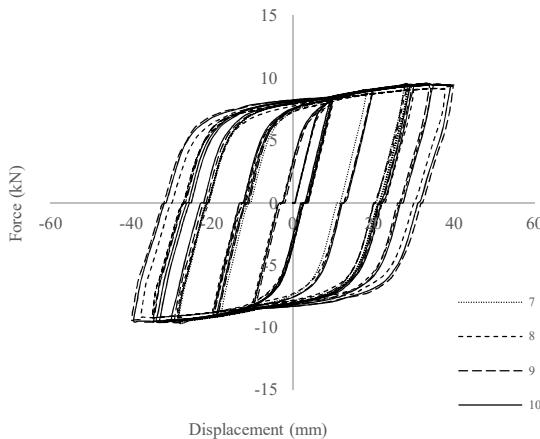


Fig. 8. Second stage analyses hysteresis loops

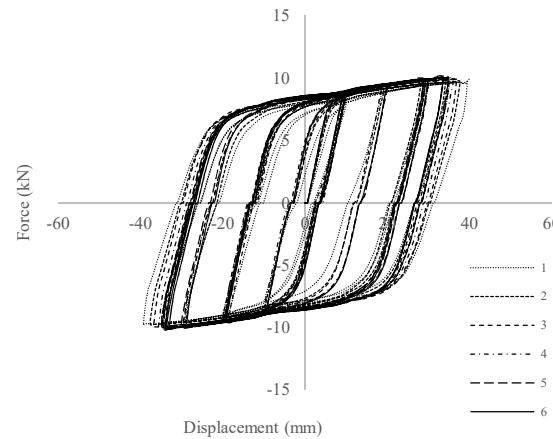


Fig. 7. First stage analyses hysteresis loops

میزان مقاومت نهایی در زوایای کوچکتر افزایش قابل توجهی را نشان نمی‌دهد که به دلیل حداکثر مشارکت سطح ورق در امر تحمل نیرو بوده و به نظر می‌رسد در زوایای کوچکتر، قطعه قابلیت تحمل تعداد چرخه‌های بیشتری را قبل از گسیختگی داشته باشد.

جدول ۳. حالات تحلیل برای حساسیت سنجی زاویه ورق جاری شونده

No.	α (deg)	t_0 (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)
1	60	8	15	10
2	65	8	15	10
3	70	8	15	10
4	75	8	15	10

Tab. 3. Trapezoidal Plate angle situations for sensitivity analyses

شکل ۹. شمای ورق جاری شونده و زاویه آن

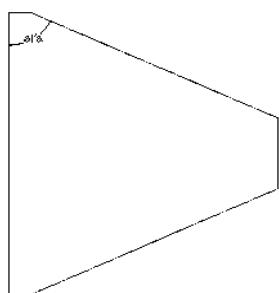


Fig. 9. Yielding plate angle

شکل ۱۰. نمودارهای چرخه‌ای پاسخ تحلیل‌های حساسیت زاویه

برای جذب بیشترین انرژی واردشده، هندسه ورق باید به گونه‌ای باشد که بتوان به بیشترین سطح جاری شدگی مصالح در هنگام تغیر شکل قطعه دست یافت. درنتیجه میزان گستردگی سطح جاری شدگی آن به زاویه ورق بستگی خواهد داشت. کاهش زاویه ورق، باعث جاری شدگی یکنواختی در سطح آن می‌شود لکن باعث محدودیت در فاصله دو ورق تکیه‌گاهی و تغیر شکل کلی قطعه می‌شود. بالعکس با افزایش زاویه قابلیت تغیر شکل بیشتر و نیز سطح بزرگتری از جاری شدگی و جذب انرژی در قطعه انتظار می‌رود. جدول (۳) تحلیل‌های در نظر گرفته شده برای چهار حالت زوایای ۶۰ تا ۷۵ درجه انتخاب شده بر اساس مطالعات قبلی را نشان می‌دهد. در کلیه تحلیل‌ها میزان فاصله دو ورق تکیه‌گاهی برابر ۸۰ میلی‌متر و فاصله مونتاژ ۰/۵ میلی‌متر در هر طرف شکاف در نظر گرفته شده است. شکل (۱۰)، نمودارهای چرخه‌ای به دست آمده از تحلیل‌های فوق را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص شده است، با افزایش زاویه، میزان سختی قطعه نیز افزایش می‌یابد اما قابلیت تغیر شکل آن با توجه به ایجاد مفصل خمیری در انتهای گیردار و حاکم شدن سازوکار خمیشی کاهش یافته است.

شکل ۸ نمودارهای چرخه‌ای به دست آمده از تحلیل‌های مرحله دوم

افزایش سختی و مقاومت نهایی قطعه می‌شود. جدول (۴) مشخصات تحلیل‌های در نظر گرفته شده برای بررسی حساسیت این پارامتر را نشان می‌دهد. در تمامی تحلیل‌های در نظر گرفته شده فاصله مونتاژ در هر طرف شکاف $0/5$ میلی‌متر، زاویه ورق ذوزنقه‌ای شکل ۶۵ درجه و فاصله دو ورق تکیه‌گاهی ۱۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۱. نمودارهای چرخه‌ای پاسخ تحلیل‌های حساسیت فاصله مونتاژ

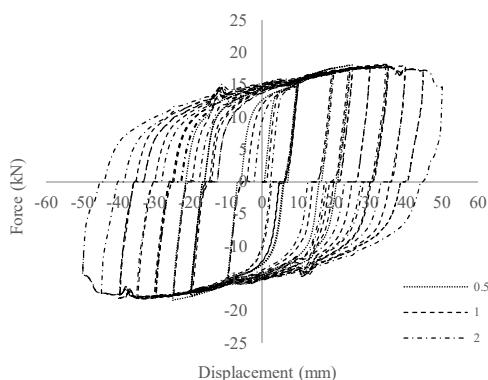


Fig. 11. Gap distance sensitivity analyses results

جدول ۴. حالات تحلیل جهت حساسیت سنجی فاصله مونتاژ

No.	t_0 (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)
1	5	15	10
2	10	15	10
3	15	15	10
4	20	15	10

Tab. 4. Gap distance sensitivity analyses situations

بر اساس نمودارهای پاسخ نشان داده شده در شکل (۱۲)، افزایش ضخامت ورق موجب افزایش لنگر انتهایی آن و به دنبال آن زیادشدن احتمال گسیختگی شده و میزان سختی و مقاومت نهایی قطعه نیز افزایش می‌یابد؛ اما در مقابل دامنه تغییر شکلی آن دچار محدودیت می‌شود. از سوی دیگر، کاهش ضخامت ورق موجب کاهش نقش برش در فرایند جذب انرژی و سطح جاری شدگی می‌شود.

شکل ۱۲. نمودارهای پاسخ تحلیل‌های ضخامت ورق جاری شونده

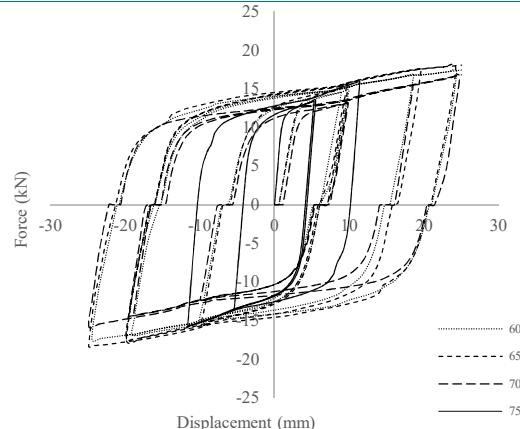


Fig. 10. Yielding plate angle sensitivity hysteresis loops

۴-۴-۴- فاصله مونتاژ

دیگر پارامتر مؤثر بر رفتار مقطع فاصله مونتاژ است. از نظر اجرایی در کمترین حالت فاصله مونتاژ در هر طرف ورق نباید کمتر از $0/5$ میلی‌متر در نظر گرفته شود. از سوی دیگر زیادشدن این فاصله روی میزان گیرداری تکیه‌گاه و جذب انرژی قطعه اثر منفی خواهد گذاشت و در ابتدای تغییر شکل قطعه، مقداری آزادی حرکت تا زمان رسیدن به فرایند تحمل نیرو در آن به وجود می‌آورد. این لقی به وجود آمده ممکن است در حالات واقعی باعث ایجاد نوعی بی‌نظمی و نیروی ناگهانی در طبقات شود. درنتیجه کاهش فاصله مونتاژ تا حد ممکن موجب افزایش سختی و گیرداری و بهبود رفتار ورق جاری شونده می‌شود. شکل (۱۱) منحنی‌های چرخه‌ای پاسخ به دست‌آمده از تحلیل‌های در نظر گرفته شده برای فواصل $0/5$ ، $1/0$ و $2/0$ میلی‌متر را نشان می‌دهد. وجود لقی در گام‌های اولیه بارگذاری در نمودار مشهود است و به نظر می‌رسد با افزایش فاصله مونتاژ میزان انرژی جذب شده و مقاومت نهایی با کاهش روبرو شده است اما در مقابل با اضافه شدن این پارامتر دامنه تغییر شکل قطعه افزایش یافته است. لکن در شکل کلی نمودارها و پایداری چرخه‌ها تغییر قابل توجهی دیده نمی‌شود.

۴-۵- ضخامت ورق جاری شونده

از دیگر پارامترهای مؤثر هندسی می‌توان به ضخامت ورق جاری شونده اشاره نمود. افزایش ضخامت ورق جاری شونده موجب افزایش نقش تغییر شکل برشی در فرایند جذب انرژی و همچنین

عملکردی میراگر را تعیین می‌نماید. شکل (۱۴) نمودارهای چرخه‌ای پاسخ به دست آمده از تحلیل انجام شده روی میراگر را نشان می‌دهد. محور عمودی نمودار نسبت نیروی میراگر بر اساس ظرفیت نیرویی آن و محور افقی آن نیز میزان تغییر شکل میراگر بر اساس میزان تغییر شکل قابل تحمل آن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است. عملکرد میراگر به صورت دو مرحله‌ای بوده و دارای چرخه‌های پایدار است. ظرفیت تحمل تغییر شکل میراگر به میزان 60 میلی‌متر و ظرفیت تحمل نیروی آن در یک جهت به میزان 550 کیلو نیوتون و در جهت دیگر نیز 80 کیلو نیوتون است که این عدم تقارن در تحمل نیرو به علت عدم تقارن بخش هرمی شکل داخلی بوده و در موارد اجرایی که از تعداد زوج مهاربند در یک طبقه استفاده شود تأثیر قابل توجهی در عملکرد آن ندارد.

شکل ۱۳. طرح و جزئیات قطعه میراگر پیشنهادی

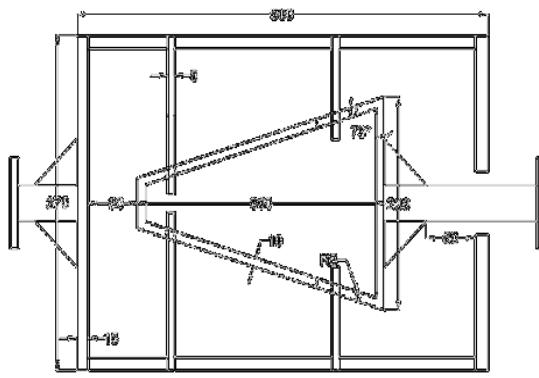


Fig. 13. Damper configuration and dimensions

به طورکلی با زیاد شدن تعداد ورقهای جاری شونده زاویه بخش هرمی شکل داخلی به علت افزایش طول آن کاهش می‌یابد؛ که در نهایت موجب کاهش عدم تقارن نمودارهای چرخه‌ای مربوطه می‌شود. جدول (۵) پارامترهای محاسبه شده در هر چرخه از عملکرد میراگر پیشنهادی شامل نسبت تغییر شکل میراگر به ظرفیت آن (λ)، نسبت نیروی وارد شده به ظرفیت نیرویی میراگر (ω)، سختی مؤثر (K_{eff})، میرایی مؤثر (β) و مساحت زیر منحنی (A) را نشان می‌دهد.

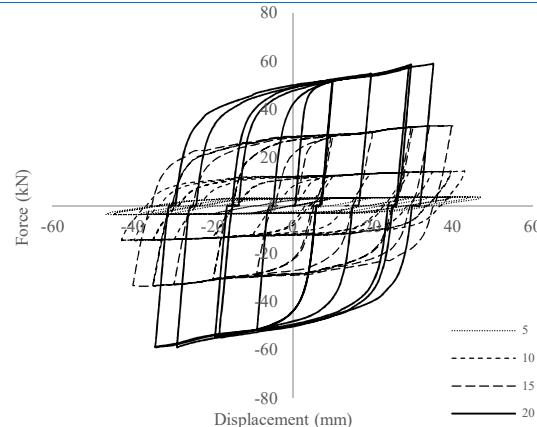


Fig. 12. Yielding plate thickness analyses results

۵- طراحی میراگر دوسطحی

برای استفاده و ارزیابی مطالعات انجام شده سعی شد قطعه‌ای جاذب انرژی با لحاظ نمودن اصول معماری، قابلیت تعویض پس از وقوع زلزله و همچنین عملکرد مناسب و مطلوب به هنگام وقوع زلزله طراحی و ارائه شود؛ ورقهای موازی جاری شونده در این میراگر دارای طولهای متفاوت بوده و ضمن حرکت کشوبی آن به صورت خمی در دو سطح جاری شده و سختی‌های متفاوتی را در تغییر مکان‌های مختلف ارائه می‌نمایند؛ بدین صورت که ورقهای با طول و قابلیت شکل‌پذیری بیشتر در ابتدا جاری شده و ورقهای با طول کمتر در تغییر مکان‌های بزرگ‌تر قاب به کمک ورقهای بلندتر آمده و موجب افزایش سختی وسیله می‌شوند، این فرایند در ادامه و با تغییر شکل‌های بزرگ‌تر به همراه سخت شدگی مجدد در ذات فولاد موجب سخت شدگی بیشتر میراگر در زمین‌لرزه‌های شدیدتر شده و قابلیت اطمینان وسیله را افزایش می‌دهد؛ در دو طرف این میراگر صفحات اتصالی تعییه شده است در صورت لزوم پس از وقوع زلزله، تعویض پذیری آن را آسان می‌کند. همچنین عرض قطعه برای عدم تداخل و مزاحمت با معماری ساختمان 25 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. جعبه بیرونی ضمن انتقال نیرو، از تغییر شکل بیش از حد تعیین شده به قطعه جلوگیری می‌کند. شکل (۱۳) طرح و جزئیات اندازه‌گذاری میراگر پیشنهادی را نشان می‌دهد. ظرفیت وسیله بر اساس تعداد ورقهای استفاده شده در آن و بسته به میزان نیروی اعمالی از طرف سازه قابل تغییر است. عرض شکاف‌های تعییه شده در درون هسته ذوزنقه‌ای شکل درونی، درواقع فاصله سطوح

شکل ۱۵. پیکربندی قاب مورد مطالعه

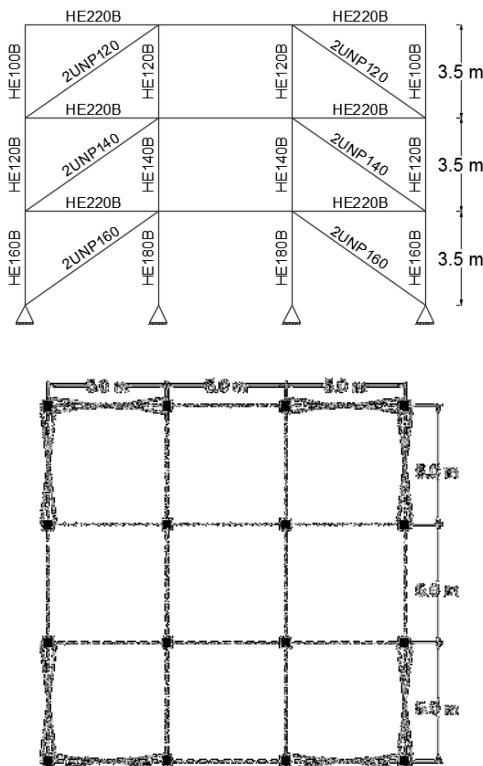


Fig. 15. Frame configuration

دوره تناوب اصلی قاب در حالت بدون میراگر 0.31 s ثانیه محاسبه شد؛ پس از نصب میراگر این میزان به عدد $2/8$ ثانیه افزایش یافت که موجب کاهش 64% از شتاب طیفی اعمال شده به قاب شد. به منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی از هفت شتاب‌نگاشت انتخاب شده بر اساس شتاب‌نگاشتهای پیشنهادی نشریه فيما [24] استفاده شد. جدول (۶) مشخصات شتاب‌نگاشتهای انتخاب شده و ضرایب مقیاس آنها را که بر اساس ضابطه ۵-۲-۳ استاندارد ۲۸۰۰ به دست آمده را نمایش می‌دهد. برای جلوگیری از کمانش اعضای مهاربندی در دامنه مجاز تغییر شکل نسبی طبقات، ظرفیت نیرویی میراگرها به گونه‌ای انتخاب شد که حداقل 90% ظرفیت اعضای مهاربندی و حداقل 25% جابه‌جایی نسبی مجاز طبقات را بر اساس ضابطه ۵-۳-۲ استاندارد ۲۸۰۰ ایران تأمین نماید.

شکل ۱۴. رفتار چرخه‌ای بدست آمده از تحلیل میراگر پیشنهادی

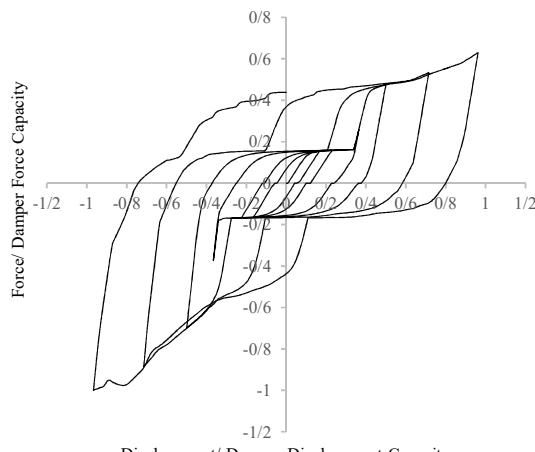


Fig. 14. The new damper hysteresis response

جدول ۵. پارامترهای استخراج شده از هر چرخه بارگذاری میراگر

Cycles	A	β	K_{eff}	ω	λ
1,2	154	0.182	1.4	0.16, 0.15	0.17, 0.17
3,4	346	0.288	1.04	0.17, 0.16	0.24, 0.24
5,6	780	0.206	1.26	0.37, 0.26	0.38, 0.38
7,8	1663	0.173	1.71	0.7, 0.47	0.52, 0.52
9,10	3800	0.228	1.45	0.89, 0.53	0.74, 0.74
11,12	7162	0.278	1.23	1.0, 0.63	1.0, 1.0

Tab. 5. Damper extracted cyclic parameters

۶-تحلیل تاریخچه زمانی

برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی از نرم‌افزار OpenSees استفاده شد. بدین منظور قاب سه‌طبقه مهاربندی شده بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران [22] و آینه نامه فولاد آمریکا [23] با فرض قرارگیری سازه در ناحیه با خطر نسبی بسیار زیاد و خاک نوع سوم طراحی شد. بار مرده در نظر گرفته شده برای طبقات ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع، بار زنده طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شد. شکل (۱۵)، پیکربندی و ابعاد قاب در نظر گرفته شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۶. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل‌های تاریخچه زمانی

No.	Rec. Seq. No.	Name	Year	M	R (km)	V _s (m/s)	PGA (g)	PGV (m/s)	S. F
1	1116	Kobe	1995	6.9	28.5	256	0.24	38	9.7
2	174	Imperial Valley	1979	6.5	13.5	196	0.38	42	5.64
3	721	Superstition Hills	1987	6.5	18.5	192	0.36	46	5.3
4	725	Superstition Hills	1987	6.5	11.7	208	0.45	36	3.97
5	752	Loma Prieta	1989	6.9	35.5	289	0.53	35	4.14
6	767	Loma Prieta	1989	6.9	12.8	350	0.56	45	3.5
7	848	Landers	1992	7.3	20	271	0.42	42	6.1

Tab. 6. Characteristics of seismic accelerograms used in the time history analysis

بر اساس نتایج به دست آمده همان‌گونه که انتظار می‌رود، استفاده از میراگر در راستای عضو مهاربندی شده موجب افزایش تعییر مکان نسبی و کاهش سرعت در اکثر طبقات شده است. نتایج به دست آمده و ارائه شده در جدول (۸) نیز میین همین موضوع است؛ لیکن مقایسه نتایج به دست آمده از پارامتر تغییر مکان نسبی طبقات و مقدار مجاز آین نامه‌ای آن (۰/۸۷۵)

نشان می‌دهد گرچه استفاده از میراگر موجب زیاد شدن تغییر مکان نسبی طبقات شده است اما میزان آن از مقدار مجاز آین نامه‌ای تجاوز ننموده است.

جدول ۷. میزان تأثیر میراگر بر پاسخ‌های لرزه‌ای برش پایه و شتاب بام

No.	Roof Acceleration (g)			Base Shear (ton)		
	Usual	W. Damper	Diff (%)	Usual	W. Damper	Diff (%)
1	2.23	0.7	68%	366	146	60%
2	1.79	0.41	76%	237	180	24%
3	2.11	0.41	80%	258	105	59%
4	2.17	0.53	75%	214	131	38%
5	2.15	0.26	87%	262	115	56%
6	1.24	0.27	77%	152	113	26%
7	2.6	0.37	85%	266	141	47%

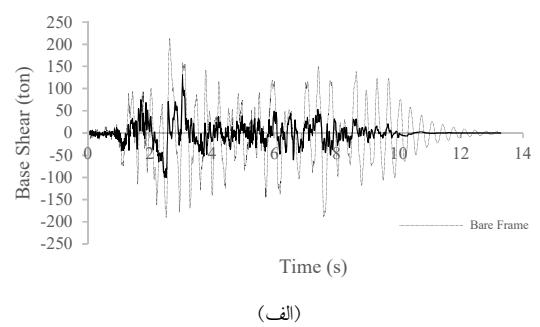
Tab. 7. The base shear and roof acceleration comparative results table using the damper

جدول ۸. میزان تأثیر میراگر بر پاسخ‌های حداکثر لرزه‌ای سرعت (متر بر ثانیه) و تغییر مکان نسبی طبقات (سانتی‌متر)

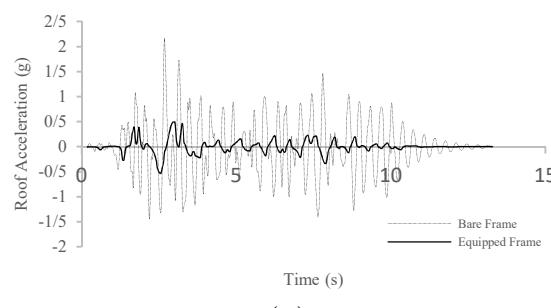
E. Q	Structure	Usual			W. Damper		
		Story	1	2	3	1	2
1	Velocity	0.45	0.85	1.24	0.63	0.77	0.92
	Drift	3.69	6.02	6.50	7.34	7.3	8.7
2	Velocity	0.41	0.71	0.92	0.6	0.63	0.83
	Drift	1.33	2.16	2.50	5.72	4.29	3.80
3	Velocity	0.31	0.77	1.41	0.58	0.64	0.64
	Drift	1.40	3.09	3.67	3.66	3.65	3.67

برای بررسی میزان تأثیر میراگر بر رفتار لرزه‌ای سازه، پاسخ‌های برش پایه، شتاب بام جابه‌جایی نسبی و سرعت طبقات قاب موردمطالعه قرار گرفتند. شکل (۱۶) نمودارهای مقایسه‌ای پاسخ تاریخچه زمانی برش پایه و شتاب بام را برای شتاب‌نگاشت چهارم به عنوان نمونه نشان می‌دهد. همچنین میزان کمترین تأثیر استفاده از میراگر بر روی پارامترهای مربوطه در جدول (۷) آورده شده است. جدول (۸) میزان تأثیر استفاده از میراگر بر بیشترین پاسخ‌های سرعت و نیز تغییر مکان نسبی طبقات را نشان می‌دهد.

شکل ۱۶. نمودارهای پاسخ تاریخچه زمانی برش پایه (الف) و شتاب بام (ب)
قاب در دو حالت با میراگر و بدون میراگر



(الف)



(ب)

Fig. 16. The base shear (a) & roof acceleration comparative response diagrams

مکان، سرعت بارگذاری و ضریب α ، ارائه شده است. میراگرهای ویسکوز توانایی جذب انرژی در سیکل‌ها و زمین‌لرزه‌های متعدد را دارند و از این بابت توانایی بسیار بیشتری نسبت به این میراگر و درمجموع نسبت به تمامی میراگرهای تسلیم شونده دارند.

۶- بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل قاب سه‌طبقه، استفاده از میراگر دوستخی طراحی شده نه تنها مشکل کمانش اعضای مهاربندی را در محدوده تغییر شکل مجاز طبقه (محدوده عملکردی میراگر) حل می‌کند، بلکه تأثیر قابل توجهی روی کاهش پاسخ‌های برش پایه، سرعت طبقات و شتاب بام خواهد داشت. لکن موجب افزایش تغییر مکان نسبی بین طبقات می‌شود که با انجام کنترل‌های تحلیل و در نظر گرفتن ملاحظات طراحی می‌توان از عبور آن از محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای جلوگیری نمود.

۷- مراجع

- [1] Kimura, Kazuhiro, K. Yoshioka, T. Takeda, Z. Fukuya, and K. Takemoto. 1976 Tests on braces encased by mortar in-filled steel tubes. In *Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan*, vol. 1041, pp.1-42.
- [2] Mochizuki, N. Y. Murata, N. Andou, and S. Takahashi. 1988 An experimental study on buckling of unbonded braces under centrally applied loads. In *Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan (in Japanese)*.
- [3] Watanabe, Atsushi, Yasuyoshi Hitomi, Eiichiro Saeki, Akira Wada, and Morihisa Fujimoto. 1988 Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube. In *Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering*, vol.4, pp.719-724.
- [4] Fujimoto, Morihisa, Akira Wada, Eiichiro Saeki, Toru Takeuchi, and Atsushi Watanabe. 1990 Development of unbonded brace. *Quarterly Column* 115, page no. 191-96.
- [5] Del Gobbo, Giuseppe Marcantonio. 2019 Placement of fluid viscous dampers to improve total-building seismic performance. In *Proceedings of the CSCE Annual Conference, Laval, Montreal, QC, Canada*, pp. 12-15.

	Velocity	0.3	0.77	1.32	0.48	0.72	1.01
4	Drift	1.22	3.14	3.56	6.69	5.01	5.88
5	Velocity	0.43	0.81	1.14	0.38	0.5	0.37
6	Drift	1.28	2.44	2.89	2.23	1.92	1.99
7	Velocity	0.32	0.46	0.5	0.30	0.35	0.34
	Drift	0.55	0.54	1.17	1.76	2.02	2.31
	Velocity	0.48	0.9	1.29	0.68	0.67	0.69
	Drift	0.95	1.44	3.00	3.18	3.37	3.06

Tab. 8. Story drift and velocity comparative results table using the damper

۷- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه صورت گرفته روی رفتار جزء قطعه و نتایج تحلیل‌های انجام شده موارد زیر نتیجه گیری می‌شود.

۱- رفتار چرخه‌ای ورق‌های ذوزنقه‌ای به عنوان جزء قطعه جاذب انرژی رفتاری پایدار بوده و در صورت تحلیل و طراحی مناسب ضمن جذب انرژی حداکثری در سطح مصالح، می‌تواند در چرخه‌های متناوب قاب اطمینان باشد.

۲- در میان پارامترهای هندسی مطالعه شده، پارامترهای فاصله دو ورق تکیه‌گاهی و ضخامت ورق ذوزنقه‌ای بیشترین میزان تأثیر را بر رفتار چرخه‌ای میراگر دارند. همچنین در صورت استفاده از طرح فوق باید طول آزاد کافی برای انتهای ورق ذوزنقه‌ای در نظر گرفته شود تا در تغییر شکل‌های بزرگ میراگر، از بخش تکیه‌گاه لغزان خارج نشود.

۳- افزایش ضخامت ورق جاری شونده موجب حاکم شدن سازوکار برشی شده و حرکت ورق در درون تکیه‌گاه لغزان را با مشکل مواجه می‌کند.

۴- اگرچه با کم شدن زاویه ورق ذوزنقه‌ای توزیع یکنواخت‌تری از جاری شدگی در سطح ورق اتفاق می‌افتد لیکن طول انتهای ورق با محدودیت مواجه خواهد شد که با توجه به محدودیت‌های عرض قطعه برای عدم تداخل با معماری سازه، طراحی آن با مشکل مواجه خواهد شد.

۵- بر اساس مطالعات انجام شده ضریب میرانی به دست آمده برای میراگر معرفی شده در این مقاله، بین اعداد ۰/۱۷ و ۰/۲۸ و درنهایت پس از اعمال چرخه‌های بارگذاری متعدد دچار خرابی و گسیختگی ورق‌های جاری شونده خواهد شد نسبت میرانی در میراگرهای ویسکوز میزان صفر تا ۰/۸ بسته به دامنه تغییر

- national and 10th Canadian conference on earthquake engineering*, vol. 9.
- [17] Gray, M. G. C. Christopoulos, J. A. Packer, and D. G. Lignos. 2012. Development, validation, and modeling of the new cast steel yielding brace system. In *20th analysis and computation specialty conference*, pp. 71-82.
- [18] Gray, Michael G. Constantin Christopoulos, and Jeffrey A. Packer. 2014 Cast steel yielding brace system for concentrically braced frames: concept development and experimental validations. *Journal of Structural Engineering*, 140, no. 4, 04013095.
- [19] Gray, Michael G. Constantin Christopoulos, and Jeffrey A. Packer. 2017 Design and full-scale testing of a cast steel yielding brace system in a braced frame. *Journal of Structural Engineering*, 143, no. 4, 04016210.
- [20] Zibasokhan, Hassan, Farhad Behnamfar, and Mojtaba Azhari. 2019 Experimental study of a new pure bending yielding dissipater. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, no. 7, 4389-4410.
- [21] ASTM Standard E8/E8M-13a, 2013 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, *ASTM International, West Conshohocken, PA* 19428-2959.
- [22] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800. 2014, *Building and Housing Research Center (BHRC)*, 4rd edition, Tehran, Iran.
- [23] American Institute of Steel Construction. ANSI/AISC 360-10. Specification for structural steel building, 2010 AISC.
- [24] Federal Emergency Management Agency (FEMA) P695 2009 Recommended Methodology for Quantification of Building System Performance and Response Parameters. Project ATC-63, *Prepared by the Applied Technology Council, Redwood City*
- [6] Taiyari, Farshad, Federico M. Mazzolani, and Saman Bagheri. 2019 Damage-based optimal design of friction dampers in multistory chevron braced steel frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11-20.
- [7] Kachooee, Ali, Mohammad Ali Kafi, and Mohsen Gerami. 2018 The effect of local fuse on behavior of concentrically braced frame by a numerical study. *Civil Eng J* 4, no. 3, 655-67.
- [8] Andalib, Zahra, Mohammad Ali Kafi, Ali Kheyroddin, and Mohammad Bazzaz. 2014 Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 77-88.
- [9] Cheraghi, Abdullah, and Seyed Mehdi Zahrai. 2016 Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 127, 120-135.
- [10] Dargush, G. F. and T. T. Soong. 1995 Behavior of metallic plate dampers in seismic passive energy dissipation systems. *Earthquake Spectra*, 11, no. 4, 545-568.
- [11] Chan, Ricky WK, Faris Albermani, and Martin S. Williams. 2009 Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, no. 2, 260-268.
- [12] Ma, X. H. Krawinkler, and G. G. Deierlein. 2011 Seismic design and behavior of self-centering braced frame with controlled rocking and energy dissipating fuses, *blume earthquake Eng (Vol. 174)*.
- [13] Hosseini, Mahmood, and Ehsan Noroozinejad Farsangi. 2012 Telescopic columns as a new base isolation system for vibration control of high-rise buildings. *Earthquakes and Structures*, 3, no. 6, 853-867.
- [14] Hosseini, Mahmood, and S. Alavi. 2014 A kind of repairable steel buildings for seismic regions based on buildings' rocking motion and energy dissipation at base level. *International Journal of Civil and Structural Engineering-IJCSE*, 1, no. 3.
- [15] Garivani, S. A. A. Aghakouchak, and S. Shahbeyk. 2016 Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers. *International Journal of Steel Structures*, 16, no. 1, 177-196.
- [16] Gray, M. G. C. Christopoulos, and J. A. Packer. 2010 Cast steel yielding fuse for concentrically braced frames. In *Proceedings of the 9th US*

Proposing an energy absorbing device with axial performance to improve the seismic behavior of diaqgonal braced structures

Hossein Labibi , Mohsen Gerami* , Mahmood Hosseini

1. PhD, Department of earthquake engineering, Civil engineering faculty, Semnan University, Semnan, Iran
2. PhD Professor, Department of earthquake engineering, Civil engineering faculty, Semnan University, Semnan, Iran
3. PhD Professor, Department of structural engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Abstract

Convergent bracing system has long been considered by structural designers. However, the performance of this system during an earthquake has disadvantages such as high base shear, high roof acceleration and low energy absorption due to buckling of the braces. Thus, researchers have tried to improve the behavior of the structure by proposing the use of different dampers in the lateral bearing section like friction, yielding and viscos dampers and buckling restrained braces. Meanwhile, yielding dampers as low-cost dampers with easy manufacturing technology compared to visco-elastic and non-buckling dampers and flexible designing have always attracted the attention of researchers. However, the proposed designs have generally a one-level behavior and the yielding members cause instability of the frame in the case of the failure. In this research, a new type of steel yielding damper with two-level performance has been introduced using sensitivity analyses, in which the flexural yield of the parallel trapezoidal plates has been used for the energy absorption process. Also, to ensure the stability of the braced frame in severe earthquakes, a simple support system has been included in its design. The geometrical dimensions of the damper are designed so as it doesn't have any confliction with the architectural limitations. The damper has two plates at the ends to make its installation as easy as possible. It also has a pyramidal core that can be adjusted for stiffness and functional levels based on the seismic requirements of the frame. To perform this research, while performing finite element modeling by the ABAQUS finite element software, a comparative nonlinear time history analyses on a three 3 story frame has been done by coding the OpenSees. The frames were subjected to scaled accelerometers from FEMA P-695 and the story drifts, story velocity, base shear and roof acceleration parameters were compared. The results indicated the appropriate and stable cyclic behavior of the multi-level pyramidal damper, also showed that some geometrical parameters like the distance of two support plates and the thickness of the trapezoidal plate have more effects on cyclic performance and ductility of the device while the others has less. Also increasing the thickness of the trapezoidal plate causes the activation of the shearing yielding mood in it and movement limitations. Although the angle of the fuse plate decreases, a more uniform distribution of flow occurs on the surface of it, but the length of the end of the plate will be limited, which due to the limitations of the width of the fuse to avoid interfering with the architecture of the structure, its design will face problems. According to the results, the damping factor of the device has been obtained in range of 0.17 to 0.28 in cyclic behavior. The comparison of the results of the time history analyses showed that using the damper can cause a significant reduction on the base shear and roof acceleration seismic response of the frame. Although the story drift and velocity responses of the frame increases, but the story drift values remain in the permissible range of regulations.

Keywords: Sensitivity Analyses, Yielding Damper, Multi-level Damper, Seismic Rehabilitation, Seismic Behavior, Earthquake