بهبود عملکرد میراگرهای بیضی‌شکل در قاب فلزی مهاربند شورن به کمک ورق‌های سخت‌کننده جانبی

سیدمهدی زهرائی
هیئت علمی، دانشکده فنی تهران، تهران، ایران
mzahrai@ut.ac.ir

محمدحسین مرتضی‌قلی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی تهران، تهران، ایران
m.mortezagholi@ut.ac.ir

کلید واژه‌ها: *میراگر غیرفعال، میراگر بیضی شکل، مهاربند شورن، انرژی تلف‌شده*

چکیده

امروزه استفاده از میراگر غیرفعال به عنوان ابزار جذب کننده انرژی زلزله در سازه بسیار رایج می‌باشد. میراگرهای تسلیم‌شونده نیز از جمله میراگرهای غیرفعال بوده که عملکرد مناسبی در بارگذاری ارتعاشی از خود نشان می‌دهند. با ورود میراگر تسلیم شونده به ناحیه پلاستیک، انرژی ورودی به سازه را صرف تغییرشکل پلاستیک در آن خواهد شد.

میراگرهای تسلیم شونده بیضی شکل در مهاربند شورن علاوه بر آن که به دلیل ورود به ناحیه پلاستیک بخش عمده‌ای از انرژی ارتعاشی را جذب می‌کنند، همانند یک فیوز از کمانش مهاربندها نیز جلوگیری خواهند کرد. به دلیل آنکه سختی ناچیز میراگر عملکرد آن را مختل می‌کند و همچنین از طرف دیگر سختی بیش‌از حد میراگر نیز باعث کمانش مهاربندها خواهد شد، باید سختی جانبی میراگر در حالت بهینه طراحی شود.

بنابراین برای افزایش عملکرد میراگر تسلیمی باید شرایط هندسی میراگر به گونه‌ای تعریف شود که بیش‌ترین قسمت‌های آن قبل از کمانش موضعی به تسلیم برسد. میراگر بیضی‌شکل تحت نیروی برشی ناشی از حرکت جانبی قاب به‌راحتی کمانش کرده و توانایی اتلاف انرژی مناسبی را نخواهد داشت. در این حالت تنها نیروی ناچیزی در مهاربندها به وجود آمده و قاب عملا رفتاری خمشی خواهد داشت.

افزایش ضخامت میراگر بیضی‌شکل تاثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش راندمان آن نداشته و این روش نمی‌تواند گزینه مناسبی برای حل این مشکل باشد. استفاده از ورق‌های سخت‌کننده جانبی به‌طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد را بهبود بخشیده و از کمانش موضعی میراگرجلوگیری خواهد کرد.

مقدمه

همواره انتخاب بهترین مکانیزم برای مقابله با زلزله در سازه‌های فولادی مورد توجه بسیاری از طراحان بوده‌است. رغبت طراحان به شکل‌پذیری قاب‌ها به دلیل افزایش اتلاف انرژی، باعث توجه ویژه‌ای به قاب‌های خمشی شده است. از طرف دیگر ارضا شرایط سختی و پایداری نیز سبب شده است که قاب‌های مهاربندی شده همواره جایگاه خود را به عنوان سیستم مهارجانبی حفظ کنند. برقرای تعادل میان شرایط مذکور موجب سوق دادن ذهن طراحان به ترکیبی از این ویژگی‌ها در سازه شده است. در واقع همواره تلاش برآن بوده است که مکانیزم موردنظر علاوه بر شکل‌پذیری مناسب، سختی لازم برای کنترل ضوابط مربوط به تغییرمکان را داشته باشد. در این حالت سازه حتی در زلزله‌های شدید نیز کم‌ترین آسیب را خواهد دید.(Whittaker et al., 1989)

برای نیل به این هدف، ایده‌ها و تلاش‌های بسیار زیادی صورت گرفته است که هرکدام دارای محاسن و معایبی بوده است. به طور مثال استفاده از تیرپیوند افقی در سازه علاوه بر سختی مناسب، شکل‌پذیری لازم را نیز فراهم خواهد کرد. اما در مورد نقطه ضعف آن می توان به تعویض تیرپیوند پس از زلزله اشاره کرد که کاری دشوار و پرهزینه خواهد بود. بخش عمده‌ای از تلاش پژوهشگران معطوف به رفع مشکلات و یا بهبود عملکرد سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی بوده است. استفاده از تیر پیوند قائم به عنوان جایگزینی مناسب برای تیر پیوند افقی گواهی بر این ادعا می‌باشد. زهرایی و مصلحی‌تبار مطالعاتی پارامتریک روی تعدادی قاب مهاربندی شده با تیر پیوند قائم انجام دادند تا بدین وسیله رفتار تناوبی این سیستم را بررسی کنند. Zahrai and MoslehiTabar (2013)

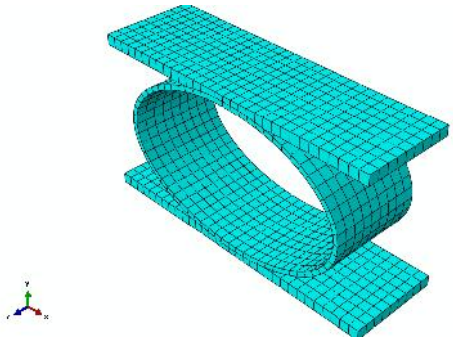
میراگرهای تسلیم‌شونده دسته‌ای از میراگرها می‌باشند که با رسیدن به ناحیه پلاستیک باعث اتلاف انرژی ورودی به سازه می‌شوند. هندسه میراگرهای تسلیم‌شونده باید به گونه‌ای باشد که بیش‌ترین نقاط آن به تسلیم رسیده و اتلاف انرژی ناشی از پلاستیک شدن در آن به حداکثر مقدار ممکن برسد. استفاده از میراگرهای تسلیمی به عنوان عضو D.C[1] باعث تمرکز خسارات در میراگر شده و حداقل آسیب به اعضای اصلی سازه نظیر ستون، تیر و مهاربند وارد خواهد شد.

استفاده از میراگرهای تسلیم شونده در مهاربندهای شورن، همواره می‌تواند راه‌حل مناسب برای اتلاف انرژی در قاب‌های فلزی باشد. یکی از بزرگ‌ترین مشکلات مهاربندی‌ها، رفتار نامناسب آن‌ها در فشار به دلیل انواع کمانش‌ها می‌باشد. میراگرهای تسلیم شونده همانند یک فیوز در مسیر مهاربندها قرار گرفته و به گونه‌ای طراحی می‌شود که با تسلیم خود علاوه بر اتلاف انرژی، از وارد شدن نیرویی که باعث کمانش مهاربندها می‌شود، جلوگیری به‌عمل آورد.

هندسه میراگرهای تسلیم شونده مرکزی باید به گونه‌ای باشد که اولا تجربه و تحمل تغییرشکل‌های فرارتجاعی قابل ملاحظه‌ای با حداقل کمانش را داشته باشد و ثانیا تسلیم یکنواختی در میراگر به وجود آید. در این حالت منحنی هیسترزیسی پایدار و پهن به‌وجود خواهد آمد که نتیجه آن اتلاف انرژی بیش‌تر توسط میراگر و خسارات ناچیز به اعضای اصلی سازه خواهد بود. در حقیقت می‌توان با طراحی مناسب، بیش‌تر تغییر شکل پلاستیک را در میراگر تسلیمی متمرکز کرده و اعضای اصلی سازه در محدوده خطی باقی بمانند. توجه به این نکته نیز لازم است که سختی بیش‌ازحد میراگر باعث به وجود آمدن نیروی بیش‌تری در مهاربندها شده که می‌تواند باعث تسلیم و یا کمانش آن شود. به همین دلیل میراگر باید با سختی بهینه طراحی شود.(NajariVarzaneh et al., 2012)

سیستم میراگر بیضوی شکل

همین طور که در شکل مشخص است این میراگر از مقطعی بیضی شکل که ضخامتی ثابت دارد به وجود آمده است. انتخاب مقطع بیضی شکل برای میراگر تسلیمی به دلیل آن می‌باشد که تحت نیروی برشی یکسان عملکرد مناسب‌تری نسبت به مقطع لوله‌ای شکل از خود نشان خواهد داد. این میراگر با اتصالات مناسب به مهاربند شورن و تیر متصل خواهد شد. مشخصات هندسی میراگر در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: میراگر بیضی‌شکل

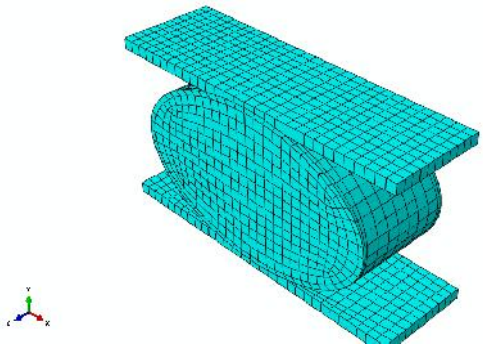
جدول ۱: مشخصات هندسی میراگر بیضی‌شکل

ضخامت	شعاع کوچک	شعاع بزرگ
۱	۱۵	۲۵

سیستم میراگر بیضوی شکل همراه با ورق سخت‌کننده

در این حالت ورق‌های سخت‌کننده به ضخامت ۱ سانتی‌متر در طرفین میراگر بیضی‌شکل نصب کرد. شکل ۲ میراگر بیضی شکل مجهز شده به ورق سخت‌کننده را نشان می‌دهد.

1-Displacement Control



شکل ۲: میراگر بیضوی شکل همراه با ورق سخت‌کننده

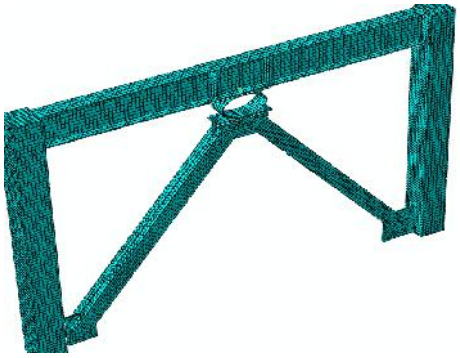
مشخصات هندسی قاب

مشخصات هندسی تیر، ستون و مهاربندها در جدول ۲ آمده است. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب سیستم قاب همراه با میراگر بیضی‌شکل و میراگر بیضی‌شکل مجهز شده به ورق‌های سخت‌کننده مشاهده می‌شود. از این پس میراگر بیضی‌شکل همراه با ورق سخت‌کننده را میراگر بیضی‌شکل اصلاح‌شده می‌نامیم.

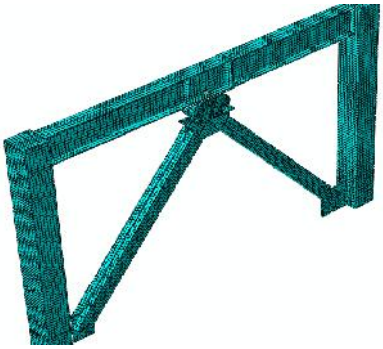
ارتفاع قاب برابر ۳/۵ متر و طول دهانه نیز۴/۵ متر می‌باشد. تیر انتخابی IPB400 و ستون‌ها و مهاربندها نیز از نوع BOX می‌باشند.

جدول ۲- مشخصات هندسی قاب

مقطع	مشخصات ورق بال		مشخصات ورق جان	
	عرض (سانتی‌متر)	ضخامت (سانتی‌متر)	ارتفاع (سانتی‌متر)	ضخامت (سانتی‌متر)
تیر	۱۸	۱/۳۵	۴۰	۰/۸۶
ستون	۳۰	۲/۰	۳۰	۱/۵
مهاربند	۱۵	۱/۰	۱۵	۱/۰



شکل ۳: قاب همراه میراگر بیضی‌شکل



شکل ۴: قاب همراه با میراگر اصلاح‌شده

مشخصات فولاد به‌کاررفته

فولاد مصرفی از نوع ST-37 بوده که جدول ۵ مشخصات فولاد را بیان می‌کند.

جدول ۳: مشخصات رفتاری فولاد

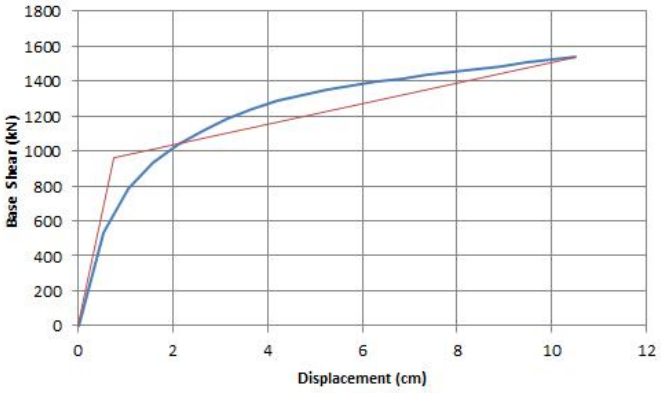
محدوده پلاستیک		محدوده الاستیک	
تنش	کرنش	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
۲۴۰	۰/۰۰۱۳۵	۲۱۰	۰.۳
۴۵۰	۰/۰۲		

بارگذاری

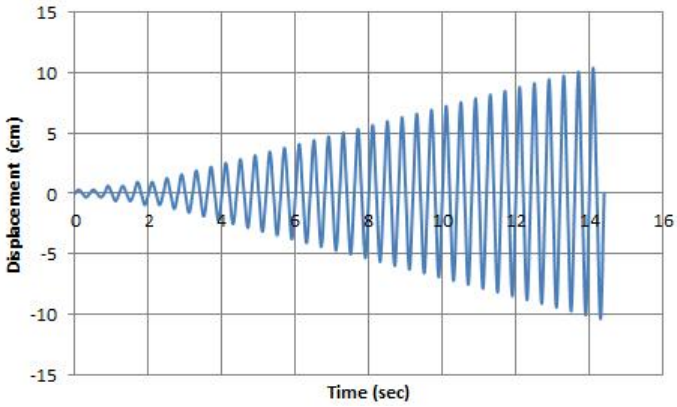
نحوه اعمال بارگذاری به صورت تک آهنگ و چرخه‌ای می‌باشد.در بارگذاری تک‌آهنگ باتوجه به ارتفاع ۳۵۰ سانتی‌متری قاب، تغییرمکان نسبی معادل با ۱۰/۵ سانتی‌متر بر روی بال فوقانی تیر اعمال می‌شود.

برای تعیین تغییرمکان معادل تسلیم قاب از روش ATC 24[۲] در این زمینه استفاده می‌شود. در این حالت به کمک منحنی push over تغییر مکان تسلیم را تقریب زده و نحوه‌ی اعمال بارگذاری چرخه‌ای را براساس آن تعریف می‌شود. بنابر این روش نمودار نیرو _ تغییرمکان قاب به وسیله دو خط تقریبی، به گونه‌ای تعیین می‌شود که سطح زیر نمودار نیرو _ تغییرمکان با سطح زیر نمودار دوخطی به صورت تقریبی یکسان شود. محل تلاقی دو نمودار به عنوان نیروی تسلیم درنظر گرفته می‌شود. تغییرمکان معادل با ۰/۷۵ نیروی تسلیم را به‌عنوان تغییرمکان تسلیم برآورد می‌شود. درشکل ۸ نحوه تعیین تغییرمکان تسلیم نشان داده شده است که با توجه به آن تغییرمکان تسلیم برابر ۰/۶ سانتی‌متر می‌باشد.

نحوه اعمال بارگذاری چرخه‌ای نیز بر مبنای روش پیشنهادی ATC 24به صورت بارگذاری چرخه‌ای با دامنه تغییرمکان افزاینده می‌باشد. همچنین شکل ۹ نحوه بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهد.(Applied Technology Council, (1992



شکل ۵ : نمودار نیرو – تغییر مکان میراگر بیضی‌شکل اصلاح شده



شکل ۶ : تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای

نرم افزار آباکوس

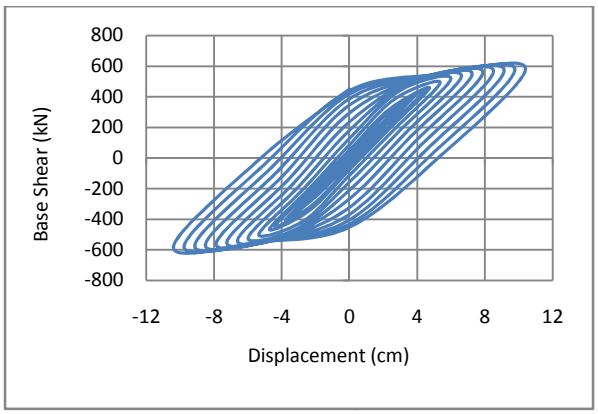
بیان تمام جزئیات لحاظ شده در نرم‌افزار خارج از حوصله بحث می‌باشد، لذا تنها به برخی ازمسائل اصلی اشاره می‌شود. در این نرم‌افزار از المان‌های Solid در فضای 3D استفاده شده است. نوع فولاد به گونه‌ای تعریف شده است که از ناحیه الاستیک وارد ناحیه پلاستیک شده، ولی هیچ‌گاه گسیختگی در آن رخ نخواهد داد. به دلیل آنکه نحوه اعمال بار به کندی صورت می‌گیرد، بارگذاری به صورت شبه استاتیکی بوده و اثرات سرعت و شتاب ناچیز می‌باشد. لذا از تحلیل Static, General در نرم افزار استفاده شده است که در این نوع از تحلیل بارگذاری در مدت زمان ۱۴/۴ ثانیه به مدل اعمال خواهد شد. برای رسم منحنی چرخه‌ای یک set با نام Displacement در نقاطی از بال فوقانی تیر و set دیگری با نام Reaction در محل تکیه‌گاه‌ها تعریف شده‌است.پای ستون‌ها به صورت کاملا گیردار درنظرگرفته شده است و از طرفی باتوجه به آن‌که در مدل واقعی قاب در

2-Applied Technology Council

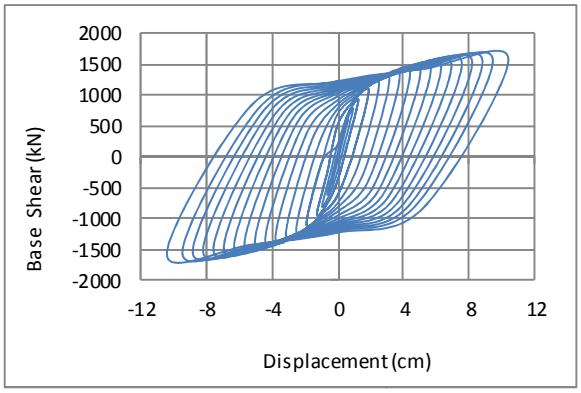
جهت خارج از صفحه مهار شده بود، تکیه‌گاه‌هایی برای مقید کردن در قسمت فوقانی ستون‌ها درنظرگرفته شده است. بارگذاری‌ها به‌صورت Displacement و در دو حالت تک آهنگ و چرخه‌ای به مدل اعمال شده است. ABAQUS Inc (2004)

شرح ونتایج مدل‌ها

در مدل‌های معرفی شده منحنی چرخه‌ای[3] قاب‌ها نمایش داده شده است. محور قائم این منحنی بیانگر برش پایه[4] و محور افقی آن نیز بیانگر جابه‌جایی[5] قسمت فوقانی بال تیر می‌باشد. در شکل ۷ نمودار چرخه‌ای قاب همراه با میراگر بیضی‌شکل و در شکل ۸ نمودار چرخه‌ای قاب مجهز شده به میراگر بیضی‌شکل اصلاح شده نشان داده شده است.

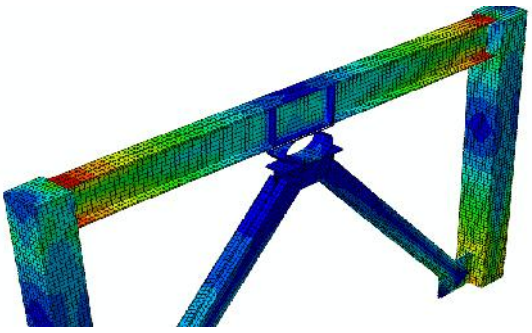


شکل ۷: منحنی چرخه‌ای قاب همراه با میراگر بیضی‌شکل

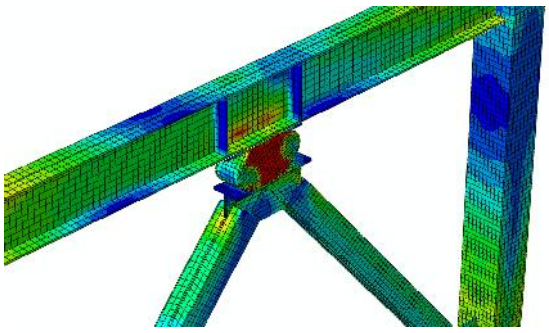


شکل ۸: منحنی چرخه‌ای قاب مجهز شده به میراگر اصلاح

با مقایسه منحنی‌های چرخه‌ای می‌توان گفت سطح زیر منحنی در میراگر بیضی‌شکل اصلاح‌شده افزایش یافته و این به معنای افزایش انرژی تلف شده درمدل اصلاح شده نسبت به مدل اولیه می‌باشد. در حالت اول میراگر بیضی شکل تاثیر کمی داشته و عملا به‌کار نخواهد افتاد و اتلاف انرژی ناشی از عملکرد خمشی قاب می‌باشد. اما در مدل اصلاح‌شده، در میراگر تنش‌های قابل ملاحظه‌ای به وجود آمده و بخش زیادی از اتلاف انرژی ناشی از وارد شدن میراگر به ناحیه پلاستیک می‌باشد. شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز گویای این مطلب می‌باشند.



شکل ۹: عملکرد میراگر بیضی‌شکل



شکل ۱۰: عملکرد میراگر اصلاح‌شده

همان‌طور که از نمودارها مشخص است به دلیل به‌کار افتادن مهاربندها و به‌دنبال آن سخت شدن قاب در مدل اصلاح‌شده، میزان برش پایه به میزان ۳ برابر حالت اولیه افزایش یافته است. میرایی هیسترزیس، یا انرژی مستهلک‌شده به وسیله رابطه زیر بدست می‌آید:

در رابطه فوق V_m میانگین نیروهای ماکزیمم در کشش و فشار، Δ_m میانگین تغییرمکان‌های ماکزیمم در کشش و فشارو A_h مساحت انرژی مستهلک‌شده در هر سیکل می‌باشد.

3-Hysteresis
4-Base Shear
5-Displacement

جدول ۴: پارامترهای هندسی سیکل آخر منحنی هیسترزیس

قاب با میراگر بیضی شکل	395884	10.5	600
قاب با میراگر اصلاح شده	115454	10.5	1750

با توجه به رابطه فوق ضریب میرایی معادل برای میراگر اصلاح شده در سیکل آخربارگذاری به ۳۴/۸ درصد و برای میراگر اولیه این درصد عبارت است از ۲۴/۸ درصد می‌باشد که عمده آن نیز مربوط به تسلیم اعضای اصلی سازه نظیر ستون و تیر می‌باشد.Zahrai (2014)

نتیجه‌گیری

استفاده از ورق‌های سخت کننده در میراگرهای بیضی‌شکل، کمانش موضعی در آن را تا زمان تسلیم به تاخیر خواهد انداخت و انرژی ورودی صرف تسلیم میراگر بیضی‌شکل و ورق‌های سخت‌کننده خواهد شد. در حقیقت میراگر تسلیمی نه تنها باید بخش عمده‌ای از انرژی ورودی به قاب را تلف کند، بلکه باید همانند یک فیوز از وارد شدن نیروی بیش‌ازحد که باعث کمانش مهاربندها خواهد شد، جلوگیری کند. به همین دلیل ضخامت میراگر و همچنین ضخامت و تعداد ورق‌های سخت کننده نیز باید در حالت بهینه طراحی شوند. سختی بیش‌ازحد میراگر سبب شده که مهاربندها کمانش کرده و یا تسلیم شوند که امری نامطلوب به‌شمار خواهد رفت، زیرا هدف از طراحی این سبک میراگرها تمرکز آسیب در میراگر می‌باشد تا اعضای اصلی سازه نظیر ستون، تیر و مهاربندها کم‌ترین خسارت را ببینند.

ضخامت میراگر، ضخامت و تعداد ورق‌ها سخت کننده از مهم‌ترین عوامل در دستیابی به نتیجه مطلوب‌تر می‌باشد به طوری که می توان با انتخابی مناسب‌تر نسبت به مدل‌های بیان شده، به نتایج بهتری دست یافت.

مراجع

ABAQUS Inc, (2004), ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.8.1, Pawtucket, Rhode Island

Applied Technology Council (1992) Guidelines for seismic Testing of Components of Steel Structures.Report ATC-24

NajariVarzaneh M et al.,(2012) Study on the Performance of Oval-shaped Steel Dampers in Seismic Retrofitting of Steel Frames, *3th national conference steel And structure*,950-957

Whittaker A et al.,(1989) Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements, Report No. UCB/EERC – 89/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley

Zahrai SM (2014) Cyclic Testing of Chevron Braced Steel Frames with IPE shear panels, EngineeringStructures,Steel and composite structures,*An International Journal, Accepted for publication*

ZahraiSM ,MoslehiTabar A (2013) Analytical study on cyclic behavior of chevron braced frames with shear panel system considering post-yield deformation, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(7), 633-643