



Evaluation of Cyclic Behavior of 3-D Steel Frame with infill Plate and Eccentric Brace

Reza Khalili Sarbangoli

PhD Student, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Ahmad Maleki*

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Ramin K. Badri

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Azarshahr Branch, Islamic Azad University, Azarshahr, Iran

A.maleki@iau-maragheh.ac.ir

Keywords:

Steel plate shear wall,
Eccentric brace,
Finite element,
Cyclic loading,
Damping,
Energy.

Abstract

Steel plate shear walls (SPSWs) are lateral resisting systems in steel structures. Creating an opening in the steel plate can affect the overall performance of the system. In this study, the performance of SPSW with openings, without stiffeners and eccentric braces at the edges of the openings has been investigated. Eccentric braces are used in the leading models to control the buckling of the steel plate at the opening edge. For the design of the models, the Iran Steel and 2800 Code were used, and for the numerical modeling, the ABAQUS finite element software and cyclic loading were used, and the investigated parameters included the response (base shear-drift), stiffness, damping, and dissipation energy. The results of numerical models showed that the use of eccentric braces in the opening edge leads to a 15% reduction in the base shear compared to the traditional SPSW model, and in purposed model, the stiffness reduction is almost the same as in the traditional SPSW model. The damping and energy parameters in the designed model have increased compared to the SPSW model, which indicates the increase in the capacity of the structure in energy consumption.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

ارزیابی رفتار چرخه‌ای قاب سه بعدی فولادی دارای ورق پرکننده و مهاربندهای واگرا

رضا خلیلی ساربانقلی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

احمد ملکی*

استاد یار گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

رامین کتابفروش بدری

استاد یار گروه مهندسی عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

Ad.maleki@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: 27 مرداد 1403

تاریخ دریافت: 12 خرداد 1403

چکیده

دیوارهای برشی فولادی SPSW از سیستم‌های باربر جانبی در سازه‌های فولادی می‌باشد. ایجاد بازشو در ورق فولادی می‌تواند عملکرد کلی سیستم را تحت تاثیر قرار دهد. در این مطالعه به بررسی عملکرد دیوارهای برشی فولادی با بازشو، بدون سخت‌کننده و مهاربندهای واگرا در لبه بازشوها پرداخته شده است. در مدل‌های پیشنهادی جهت کنترل کماتش ورق فولادی در لبه بازشو از مهاربندهای واگرا استفاده شده است. جهت طراحی مدل‌ها، از آیین‌نامه فولاد ایران و 2800 استفاده شده و جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و بارگذاری به صورت چرخه‌ای و پارامترهای مورد بررسی شامل؛ پاسخ (برش پایه-دریفت)، سختی، میرایی و انرژی اتلافی می‌باشد. نتایج مدل‌های عددی نشان دادند استفاده از مهاربندهای واگرا در لبه بازشو منجر به کاهش 15 درصدی برش پایه نسبت به مدل دیوار برشی فولادی رایج می‌شود و همچنین در مدل پیشنهادی علاوه بر وجود بازشو روند کاهش سختی با مدل دیوار برشی رایج تقریباً یکسان می‌باشد. پارامتر میرایی و انرژی در مدل پیشنهادی نسبت به مدل دیوار برشی فولادی افزایش یافته، که نشان‌دهنده افزایش ظرفیت سازه در استهلاک انرژی می‌باشد.

کلید واژگان: دیوار برشی فولادی، مهاربند واگرا، المان محدود، بارگذاری چرخه‌ای، میرایی، انرژی

1- مقدمه

در حالت کلی، استفاده از دیوارهای برشی فولادی¹ SPSWs به عنوان سیستم باربر جانبی باعث کاهش وزن سازه می‌گردد، از این رو استفاده از این سیستم در مناطق با نواحی لرزه‌خیزی بالا مورد توجه قرار گرفته است [1-3]. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داده است که این سیستم‌ها در برابر نیروهای جانبی دارای مقاومت بالا، اتلاف انرژی و سختی مناسب است و به علت سادگی در اجرا، کاربرد آن به سرعت در حال گسترش می‌باشد. از همین رو در چند دهه اخیر در ساخت، تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌ها در کشورها با زلزله‌خیزی بالا SPSW مورد استفاده قرار گرفته است [4,5].

وگ و همکاران [6] به بررسی عددی و آزمایشگاهی دیوارهای برشی، با فولاد نقطه تسلیم پایین پرداختند. مدل‌های مورد بررسی شامل یک دیوار برشی بدون سخت‌کننده با نقطه تسلیم پایین² (LSPSW) و یک نمونه دیوار برشی بدون سخت‌کننده با فولاد معمولی (SPSW) و یک مدل (LSPSW) با سخت‌کننده افقی روی صفحه فولادی از پروفیل³ HSS، جهت مهار و کنترل تغییر شکل خارج از صفحه پانل فولادی استفاده شده است. نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان دادند؛ استفاده از فولاد با نقطه تسلیم پایین به صورت قابل توجهی شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی را بهبود می‌بخشد، و پارگی پانل‌های پرکننده را به تاخیر و تغییر شکل باقیمانده پانل فولادی را با توانایی بالاتر کاهش می‌دهد. استفاده از سخت‌کننده افقی، ظرفیت اتلاف انرژی را به طور موثر افزایش و تغییر شکل خارج از صفحه پانل‌های پرکننده را مهار می‌کند و تاثیر نوارهای کششی را بر روی صفحه کاهش می‌دهد. مطابق نتایج، اندرکنش قاب- صفحه فولادی نشان دادند؛ سهم قاب‌های مرزی در مقاومت برشی با استفاده از ورق با نقطه تسلیم پایین افزایش می‌یابد.

در دیوارهای برشی فولادی تمرکز تنش در دو انتهای دیوار برشی فولادی رخ می‌دهد. در مقابل ناحیه میانی ورق پرکننده قادر به ورود به ناحیه پلاستیک نمی‌باشد. در نتیجه از مقاومت و شکل‌پذیری این اعضا به

صورت کامل استفاده نمی‌شود. برای حل این مشکل بازشوه‌های به صورت الماسی در ورق فولادی⁴ (SPSW-DO) پیشنهاد گردید. در روش پیشنهادی انرژی لرزه‌ای از طریق تغییر شکل‌های خمشی و برشی تلف می‌شود. در محل اتصال‌های پروانه‌ای، مودهای گسیختگی وابسته به نسبت بازشو می‌تواند بصورت خمشی، برشی- خمشی و برشی رخ دهد. نتایج آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای SPSW-DOs پیشنهادی نشان می‌دهد که این گسیختگی‌ها ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری بالاتری دارند. مقاومت نمونه با نسبت ارتفاع به عرض بیشتر، حتی با رسیدن به حداکثر دررفت زاویه‌ای (سخت‌شدگی مجدد در مرحله پلاستیک) تخریب نمی‌شوند [7].

دیوار برشی ورق فولادی با کماتش جزئی⁵ (PBRSPSW) عمدتاً شامل یک صفحه فولادی، که تا حدودی توسط اعضای برون صفحه‌ای محدود شده است. توانایی اتلاف انرژی PBRSPSW را می‌توان با تغییر تعداد اعضای مهار کننده تنظیم کرد. اندرکنش برون صفحه‌ای، متأثر از نیروی اعضا با کماتش محدود که منتج به اثر کشش در ورق فولادی می‌گردد. نتایج آزمایش نشان داد که نیروی برهمکنش خارج از صفحه PBRSPSW با کاهش نسبت ارتفاع به ضخامت ناحیه بدون سخت‌کننده، افزایش می‌یابد. توزیع نیروی برهمکنش خارج از صفحه روی نمونه‌ها PBRSPSW غیریکنواخت هستند و حداکثر نیروی برهمکنش در گوشه ورق فولادی 1/68 برابر میانگین نیروی اندرکنش است [8].

تحقیقات صورت گرفته در زمینه دیوارهای برشی فولادی با دهانه بزرگ در صفحات پرکننده، نیازمند استفاده از سخت‌کننده‌های سنگین یا اقدامات ویژه برای اطمینان از پایداری سیستم دارند. در مطالعه صورت گرفته توسط درویش و مفید [9] به بررسی اثرات بازشوه‌های بزرگ بدون سخت‌کننده در دیوارهای برشی فولادی پرداختند. مدل‌های مورد بررسی شامل؛ یک سازه یک طبقه یک دهانه با ورق پرکننده دارای بازشو و بدون سخت‌کننده می‌باشد. نتایج نشان دادند مدل‌ها حتی در دررفت نهایی دارای رفتار قابل قبولی می‌باشند. ضریب اضافه مقاومت و ضریب رفتار نمونه‌های عددی در محدوده مختلفی از مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه

¹ Steel Plate Shear Walls² Low-Yield Point Steel Plate Shear Wall³ Hollow Structural Section⁴ Steel Plate Shear Wall- With Diamond Opening⁵ Partially Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall

سیستم P-SPSW کاهش و نسبت جابجایی بین طبقات در مقایسه با SPSW افزایش می‌یابد.

دیوار برشی ورق فولادی مقاوم در برابر کماتش⁹ (BRSPSW)، یکی از بهترین اعضای ائتلاف انرژی است. ورق فولادی داخلی در BRSPSW معمولاً با حالت‌های کماتش درجه بالا کار می‌کند تا در برابر نیروی جانبی تحت اثر مقاومت کماتشی صفحات بیرونی، مقاومت کند. معمولاً طراحی صفحات مقاوم در برابر کماتش بر اساس صفحات با بارگذاری یکنواخت ساده شده بدون در نظر گرفتن اثر کماتش مرتبه بالا؛ حالت‌هایی که ممکن است منجر به طراحی‌های ناامن شوند، صورت می‌پذیرد.

در مطالعه تونگ و همکاران [11]، طراحی پانل‌های مهار کننده و اثر مهار کماتش پانل‌های بیرونی، در حالت‌های کماتش مرتبه بالا در BRSPSW و تأثیر آن‌ها بر طراحی خمشی پانل‌های مهارکننده مورد مطالعه قرار گرفت. مدل‌های المان محدودی¹⁰ (FE) می‌توانند به طور دقیق رفتار اندرکنش خارج از صفحه BRSPSW را شبیه‌سازی و با نتایج آزمون‌های موجود مورد بررسی و تایید قرار گیرند. نتایج عددی نشان می‌دهد، کماتش مرتبه بالای صفحه فولادی منجر به مجموعه‌ای از مناطق تنش نواری شکل شیب‌دار، بر روی پانل‌های مقاوم می‌شود. هنگامی که پارامترهای BRSPSW در محدوده مشترک متفاوت است، گشتاورهای خمشی مثبت و منفی پانل مقاوم در زیر نیرو نواری شکل به ترتیب 9/6 و 2/8 برابر نیروی یکنواخت است. اختلاف بین گشتاور خمشی پانل‌های مقاوم تحت نیروی نواری شکل و نیروی یکنواخت، با افزایش فواصل مناطق تنش نواری شکل بزرگ‌تر می‌شود. علاوه بر این، فواصل نواری شکل مناطق تنش با کاهش نسبت ارتفاع به ضخامت ورق فولادی و افزایش فاصله مابین ورق فولادی و صفحات مقاوم، افزایش می‌یابد.

مو و یانگ [12] به بررسی تأثیر اتصالات قاب به صفحه و سخت‌کننده‌های قوطی شکل بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی پرداختند. بارگذاری آزمایش‌ها بصورت شبه استاتیکی چرخه‌ای بر روی 2 مدل یک دهانه- دو طبقه انجام شد. در یکی از نمونه‌ها ورق فولادی

ASCE-07-10 می‌باشد. همچنین مقاومت برشی نهایی نمونه مرجع، بزرگ‌تر از دو نمونه دیگر بود و مقادیر نسبت شکل‌پذیری و انرژی تلف شده در نمونه با دو دهانه بیضی شکل پیشنهادی، 41/5 و 25/5 برابر بزرگ‌تر در حداکثر جابجایی نمونه مرجع است. مقاومت نهایی، نسبت شکل‌پذیری و سختی اولیه نمونه با بیشترین عرض دهانه به ترتیب 24٪، 33٪ و 47٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. با این حال، انرژی پسماند تجمعی نرمال شده⁶ (CHE)، آخرین انرژی هیستریزس چرخه⁷ (LHE) و نسبت میرایی ویسکوز معادل تقریباً به ترتیب 15٪، 18٪ و 14٪ بهبود یافته است. دیوار برشی فولادی با سوراخ‌های فواصل منظم⁸ (P-SPSW) اخیراً توسعه داده شده‌اند. در ویرایش‌های اخیر برای آیین‌نامه‌های AISC 341-16 و CSA S16-14 روش طراحی P-SPSW ارائه شده ولی هیچ مدل عددی ساده برای تحلیل این سیستم در دسترس نیست. در مطالعه فرح بخش طلوعی و همکاران [10]، مدل ماکرو براساس نتایج آزمایشگاهی برای ورق فولادی با سوراخ‌های دایره‌ای با فاصله منظم توسعه داده شده است. عملکرد سه SPSWs سوراخ شده چند طبقه (4 و 7 و 10 طبقه) طراحی شده براساس CSA S16-14 و NBCC 2015 بیشتر از طریق انجام یک سری از تحلیل‌های تاریخچه زمانی با استفاده از 44 زمین لرزه برای غرب کانادا مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه نتایج تحلیل لرزه‌ای مشاهده می‌شود؛ پوشش برش میانه برای P-SPSW کمی کم‌تر از پوشش برش برای SPSW است. همچنین سهم باربری ستون‌های مرزی در برابر برش طبقات برای مدل SPSW در اغلب طبقات بیشتر از P-SPSW می‌باشد. در نهایت، یک ارزیابی حساسیت برای بررسی اثر قطر سوراخ شدگی بر پاسخ‌های مختلف P-SPSW، مانند حداکثر نیروهای محوری ستون، حداکثر ممان‌های خمشی ستون و حداکثر جابجایی بین طبقه‌ای انجام گردید. براساس مطالعه فرح بخش طلوعی و همکاران [10] مشخص گردید؛ با افزایش قطر سوراخ تقاضای نیروی محوری ستون کاهش می‌یابد، در حالی که ممان خمشی تقریباً یکسان باقی می‌ماند. با اضافه کردن سوراخ به صفحه پر کننده سختی و مقاومت

⁹ Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall
¹⁰ Finite Element

⁶ Cumulative Hysteresis Energy
⁷ Last Cycle Hysteresis Energy
⁸ Perforated Steel Plate Shear Wall

بتنی سبک وزن اتوکلاو¹¹ (ALC) برای مقاومت در برابر بار جانبی می-باشد. لوله‌های فولادی پر شده با بتن¹² (CFTs) و تیرهای مقطع H برای ساخت عناصر قاب عمودی و افقی اتخاذ شدند. سه نمونه یک دهانه- دو طبقه تحت بار چرخه‌ای جانبی قرار گرفتند. در مطالعه امیر و همکاران، یک برنامه کاربردی سازگار با محیط زیست و پایدار برای بتن با سنگدانه بازیافتی¹³ (RAC) به عنوان بتن پرکننده می‌باشد. پاسخ چرخه-ای بار-جابجایی مرتبط با الگوهای شکست گزارش و تحلیل شد. سه نمونه آزمایش بر روی ظرفیت‌های مشخصه نتایج تجربی نشان داد که همه نمونه‌ها دارای عملکرد چرخه‌ای مناسبی هستند. عملکرد و کمانش صفحات فولادی با استفاده از اتصال پیچ و مهره به طور قابل توجهی کاهش یافت. هر چند بازده ظرفیت و سختی با اتصال جوش نسبتاً بالاتر از اتصال پیچ بود و ظرفیت باربری در پیچ یا جوش تقریباً یکسان می‌باشد. علاوه بر این، شکل‌پذیری، مصرف انرژی و ویژگی‌های جابجایی با استفاده از پیچ و مهره در مقایسه با جوش بهبود یافته است. مدل‌های FE برای تجزیه و تحلیل کرنش پلاستیک خارج از جابجایی و معادل آن تولید و تأیید شد [14].

از مزایای بادبندها افزایش سختی سیستم و کنترل تغییر مکان جانبی سازه می‌باشد، که با افزایش سختی سازه شکل‌پذیری و قابلیت جذب و دفع زلزله کاهش یافته و ارتعاش سازه افزایش می‌یابد. دیوارهای برشی فولادی علاوه بر سختی بالای از قابلیت شکل‌پذیری و توان اتلاف انرژی مناسبی برخوردار می‌باشند و در سیستم دیوار برشی پایداری سازه به صورت قابل توجهی در مقایسه با بادبند برون محور افزایش می‌یابد. از این‌رو در این مطالعه جهت دستیابی به هر دو پارامتر یعنی تامین شکل-پذیری، مقاومت و همچنین حذف محدودیت معماری، از صفحات پرکننده مابین تیر، ستون و بادبند استفاده شده و مابین دو بادبند جهت دسترسی به فضای دو طرف دیوار بصورت باز شو در نظر گرفته شده است.

در وسط دهانه که دارای سخت‌کننده قطری ضربدری می‌باشد و در دو سمت دیوار تا ستون، بازشوهای سراسری در ارتفاع دهانه تعبیه شده، و در نمونه دوم از سخت‌کننده‌های قطری مورب روی ورق فولادی استفاده شده، که در این مدل بازشو فقط در یک سمت دیوار قرار گرفته است. نتایج تجربی نشان دادند؛ سخت‌کننده‌های قوطی شکل، از ظرفیت سختی خمشی و پیچشی استفاده کامل می‌کنند و ظرفیت باربری، سختی و بار کمانش الاستیک سازه‌ها را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، سخت‌کننده‌های مهاربندی مایل، اثر بخشی بیشتری دارند. بنابراین تیر میانی در محل بازشو، در معرض تسلیم برشی قرار می‌گیرد که مشابه تیر پیوند در قاب مهاربندی شده می‌باشد. مکانیسم غیر ارتجاعی از صفحه فولادی به تیر پیوند منتقل می‌شود. در مرحله پلاستیک سازه، صفحه سخت شده اساساً الاستیک است و انرژی لرزه-ای عمدتاً توسط تیر پیوند مستهلک می‌شود. بنابراین، این نوع دیوار برشی فولادی نیاز به در نظر گرفتن اثر اضافی سخت‌کننده‌ها روی عناصر مرزی دارد. طراحی معقول بخش تیر پیوند باعث می‌شود، قاب از مقاومت کافی برای حمایت از صفحه سخت شده و همچنین جلوگیری از تسلیم زودرس در تیر پیوند را داشته باشد.

ستاریان کرج آباد و ملکی [13] به بررسی قاب‌های فولادی دارای مهاربند واگرا و ورق‌های پرکننده پرداختند. نتایج مدل‌های عددی نشان دادند؛ شکل‌پذیری و توانایی سازه در استهلاک انرژی در مقایسه با مدل قاب مهاربندی شده با بادبندهای واگرا افزایش یافته است. در نمودار پاسخ (نیرو-جابجایی) مدل‌های عددی تحت بارگذاری بار افزون و چرخه‌ای مشاهده می‌شود، بزرگی برش پایه در نمودار بار افزون نسبت به مدل چرخه‌ای مشابه کوچک‌تر می‌باشد. همچنین در پاسخ چرخه‌ای مدل‌های عددی، در چرخه‌های انتهایی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی، کاهش ملاحظه نمی‌گردد. همچنین ناحیه کشش و فشار، کاملاً متقارن بوده و هیچ گونه افزایش و یا کاهش که نشان‌دهنده کمانش موضعی و یا کلی ورق باشد، مشاهده نمی‌شود.

یک سیستم BRSPSW، متشکل از یک صفحه فولادی متصل به عناصر قاب با استفاده از پیچ و مهره اتصال دو طرفه / جوش شده و پانل‌های

¹¹ Autoclaved Lightweight Concrete

¹² Concrete-Filled Steel Tubes

¹³ Recycled Aggregate Concrete



2- معادلات حاکم بر طراحی دیوارهای برشی

طراحی دیوارهای برشی در آیین‌نامه فولاد آمریکا (AISC2005) [15] به تفصیل ارائه شده است. در این آیین‌نامه براساس بارهای وارده با یک حدس اولیه، ابعاد تیر و ستون مشخص می‌گردد. سپس ورق فولادی مشابه یک عضو خرابایی تحت بار کششی طراحی می‌گردد، پس از تعیین مقطع اولیه هر بادبند، ضخامت ورق فولادی مشخص می‌گردد:

$$t = \frac{2A_b \Omega \sin \theta}{L \sin 2a} \quad (1)$$

A_b سطح مقطع بادبند معادل، Ω ضریب اضافه مقاومت که برای سازه دیوار برشی فولادی $1/2$ ، θ زاویه مهاربند و ستون، L عرض دهانه قاب و a زاویه تشکیل میدان کشش قطری می‌باشد. همچنین جهت تعیین زاویه تشکیل میدان کشش قطری در ورق فولادی از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$\tan^4 a = \frac{1 + \frac{t \cdot L}{2A_c}}{1 + \operatorname{th}\left(\frac{1}{A_g} + \frac{h^3}{360I_c L}\right)} \quad (2)$$

همچنین در رابطه (2) A_c سطح مقطع ستون‌ها و I_c ممان اینرسی ستون‌های متصل به دیوار برشی فولادی می‌باشد. h و A_g به ترتیب ارتفاع طبقه و سطح مقطع تیر می‌باشد. برای تعیین ضخامت ورق ابتدا سطح مقطع معادل مهاربند تعیین می‌شود و سپس ضخامت ورق براساس مجموع سطح مقطع مهاربند مشخص می‌گردد. در این روش ورق به تعدادی نوار مورب تبدیل می‌شود که سطح مقطع هر نوار از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$A_s = \frac{L \cos a + h \sin a}{n} t \quad (3)$$

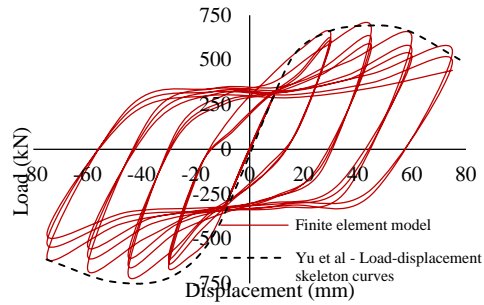
همچنین جهت جلوگیری از کمانش اجزای مرزی قائم به علت اینکه تحت تاثیر میدان کششی قطری قرار نگیرد، حداقل ممان اینرسی اجزای مرزی قائم بایستی از رابطه زیر تبعیت نماید:

$$I_c \geq \frac{0.00307th^4}{L} \quad (4)$$

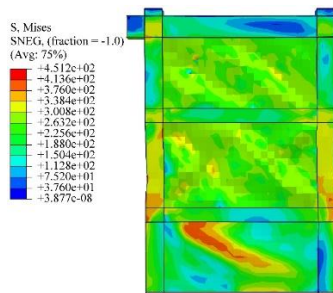
3- صحت سنجی

در این طرح پیشنهادی قبل از شروع به مدل‌سازی مدل‌های عددی، ابتدا بایستی چند مدل آزمایشگاهی مرتبط با موضوع پیشنهادی در نرم‌افزار المان محدود بررسی گردد تا از صحت روش‌های مدل‌سازی اطمینان حاصل شود. همچنین به علت نبود مدل جامع آزمایشگاهی نمونه‌های همسان‌سازی مختلفی برای پوشش دادن مدل مذکور استفاده شده است. از این‌رو جهت مدل‌سازی و آشنایی با رفتار بادبندهای برون محور از مدل برمن و برونو^[6] مطابق شکل (1) استفاده شده است. مطابق شکل 2 مشاهده می‌گردد در نقطه عطف نمودار، حداکثر پاسخ برای مدل آزمایشگاهی برابر 561kN و برای مدل عددی برابر 580kN که در این نقطه حداکثر اختلاف برابر 3/4% می‌باشد. در ناحیه الاستیک و پلاستیک بعد از نقطه عطف تقریباً مطابقت خوبی بین دو مدل آزمایشگاهی و عددی ملاحظه می‌شود. یو و همکاران [17] به مطالعه‌ای عملکرد دیوار برشی فولادی با بارگذاری محوری در المان‌های مرزی پرداختند. این نمونه آزمایشگاهی شامل قاب فولادی یک دهانه 2 طبقه با اتصالات خمشی و ورق‌های پرکننده فولادی می‌باشد و کانتور تنش برای این نمونه حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود در شکل 3 نشان داده شده است. در شکل 4 نمودار چرخه‌ای مدل عددی با پوش مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد؛ هر دو نمودار از مطابقت خوبی برخوردار هستند و اختلاف نمودار در چرخه نهایی مدل عددی با پوش نمودار مدل آزمایشگاهی برابر 9/2% و اختلاف مساحت زیر نمودار و پوش مدل آزمایشگاهی و عددی تقریباً برابر 12% می‌باشد. همچنین جهت صحت سنجی دیوارهای برشی فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای از مدل یک دهانه سه طبقه ونگ و همکاران [18] استفاده شده است. جهت لحاظ کردن خطای ساخت یک جایجایی بیرون صفحه‌ای در میان ورق پرکننده که در طبقه یک برابر 6/7 میلی‌متر، طبقه دوم 8/8 میلی‌متر و در طبقه سوم 26 میلی‌متر به سازه اعمال و در شکل 5 کانتور تنش برای مدل عددی فوق نشان داده شده است. مطابق شکل 6، حداکثر برش پایه در مدل عددی برابر 1571 kN و در مدل آزمایشگاهی

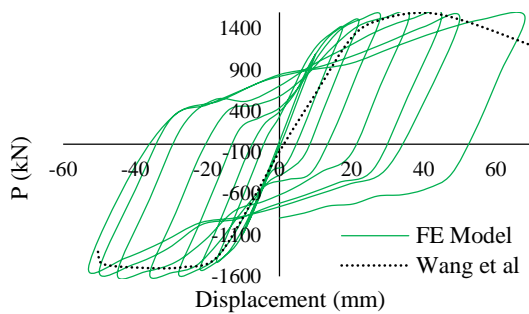




شکل 4- نمودار صحت سنجی مدل عددی Yu و همکاران

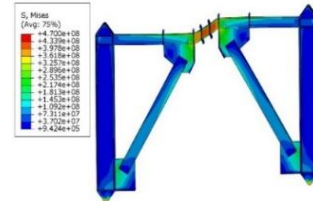


شکل 5- کانتور تنش دیوار برشی Wang و همکاران

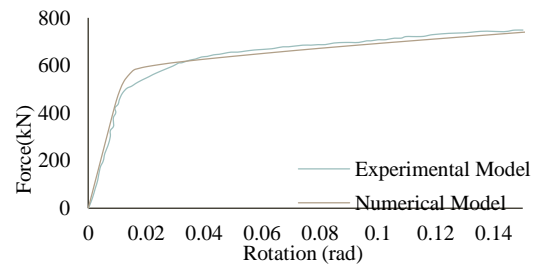


شکل 6- نمودار صحت سنجی دیوار برشی Wang و همکاران

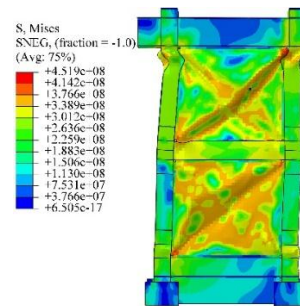
برابر 1493 kN می باشد که اختلاف دو نمودار برابر 4/96٪ و اختلاف مساحت زیر نمودار پوش مدل آزمایشگاهی و عددی تقریباً برابر 9/5٪ می باشد.



شکل 1- مدل عددی برمن و برونو



شکل 2- نمودار صحت سنجی برمن و برونو



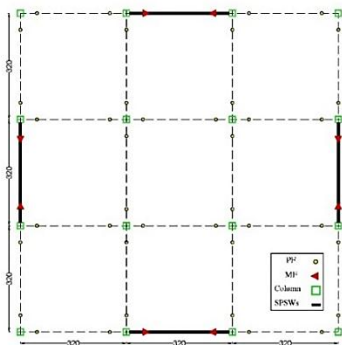
شکل 3- مدل عددی دیوار برشی Yu و همکاران



کفایت لازم برای پاسخ‌گویی جهت کنترل رابطه مطابق فرمول (6) را نداشته و تیر با مقطع $1250 \times 100 \times 15 \times 10$ جایگزین می‌گردد. در دیوارهای برشی فولادی المان‌های عمودی¹⁵ بایستی به گونه‌ای طراحی شوند، که نیروهایی را که مطابق با مقاومت تسلیم یا فراتر از آن که قابل انتظار دیوار می‌باشند، تحمل نمایند. بر همین اساس نیروهای اعضای ناشی از تحلیل، بایستی تا حدی مطابق با حداکثر مقاومت صفحه جان در دیوار برشی فولادی افزایش داده شود. در VBEها علاوه بر کنترل ظرفیت خمشی و برشی ستون به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک در تیر، بایستی مقدار نیروی کششی تسلیم حاصل از تشکیل میدان کششی در ورق کوچک‌تر از نیروی کششی جهت تسلیم ستون باشد، تا تسلیم ورق باعث ایجاد کشش در ستون نگردد و بارهای اعمالی بصورت فشاری باشند. در شکل‌های 8 و 9 مدل سه بعدی برای مدل‌های M1 و M2 نشان داده شده، و در جدول شماره 1 مشخصات هندسی مدل‌های فوق ارائه شده است.

$$\frac{\phi V_n}{0.9 (0.42 f_y L_{cf} \sin 2\alpha)} \quad (5)$$

$$I_b \geq 0.003 \frac{\Delta t_w \cdot L^4}{h} \quad (6)$$



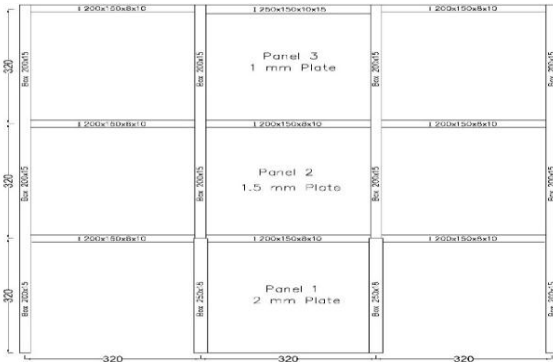
شکل 7- پلان هندسی مدل‌های پیشنهادی

3-1- مدل‌سازی عددی

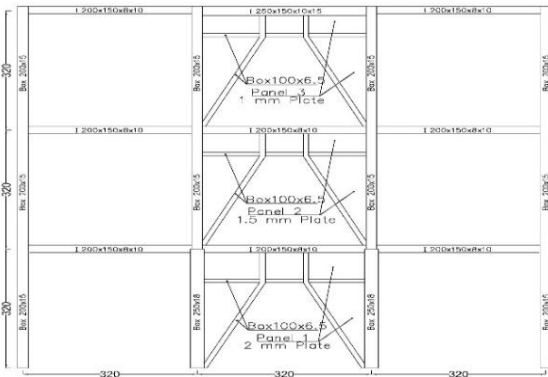
در این قسمت به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب فولادی 3 طبقه تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته شده است. سازه مورد نظر شامل 2 سازه فولادی سه دهانه سه طبقه می‌باشد. اتصالات دیوار برشی فولادی از نوع خمشی و سایر اتصالات تیر به ستون به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است. ساختگاه خاک از نوع III و نسبت شتاب مینای طرح در مناطق با لرزه‌خیزی خیلی زیاد در نظر گرفته شده است. در سازه مورد اشاره فاصله ستون‌ها و ارتفاع طبقات برابر $3/2$ متر و در هر دو جهت سازه به صورت 3 طبقه 3 دهانه می‌باشد. سقف طبقات بصورت دال بتنی مسلح دو طرفه به ضخامت 250 میلی‌متر و مطابق مبحث 6 مقررات ملی ساختمان، بار مرده برابر 150 kg/m^2 و بار زنده برابر 270 kg/m^2 و بار برف در طبقه بام برابر 210 kg/m^2 و بار خطی روی تیرهای کناری ناشی از دیوارهای پیرامونی برابر 280 kg/m می‌باشد. جهت طراحی از آیین‌نامه AISC 2016 و از نرم‌افزار ETABS استفاده شده و بعد از مشخص شدن ابعاد هندسی تیرها، ستون‌ها و ضخامت دیوار برشی فولادی، فقط قاب دارای دیوار برشی فولادی جهت انجام تحلیل‌های غیرخطی، مطابق مشخصات هندسی تعیین شده، به نرم‌افزار المان محدود Abaqus انتقال می‌یابد. همچنین جهت کاهش زمان تحلیل در نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی تیر و ستون به صورت wire و ورق فولادی نیز به صورت پوسته¹⁴ در نظر گرفته شده است. ضریب نامعینی ρ برابر $1/2$ و ضریب تشدید یافته Ω برابر 3 جهت طراحی دیوار برشی فولادی انتخاب شده است. ابتدا قاب خمشی تحت بارهای فوق طراحی می‌گردد، سپس در قاب‌هایی که دیوار برشی فولادی قرار خواهند گرفت بار وارد بر هر قاب از نتایج تحلیل عددی استخراج و فرض می‌گردد تمامی این بار توسط ورق فولادی تحمل خواهد شد. جهت تعیین ابعاد اولیه ورق از فرمول (5) پیشنهادی آیین‌نامه استفاده می‌شود. باید توجه داشت، تیر طبقه آخر به علت اینکه تحت نیروی میدان کششی به صورت یک طرفه قرار می‌گیرد، ابعاد هندسی تیر طراحی شده که برابر $1200 \times 100 \times 10 \times 8$ در نرم‌افزار می‌باشد،

¹⁵ Vertical Boundary Elements

¹⁴ Shell



(a)- M1



(b)- M2



شکل 8- مدل سه بعدی M1



شکل 9- مدل سه بعدی M2

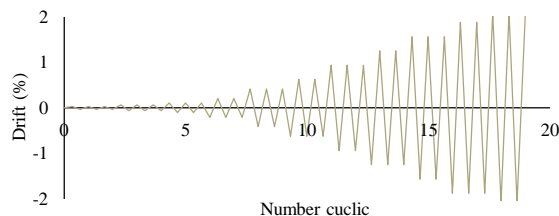
شکل 10- مشخصات پیشنهادی جهت انجام تحلیل‌های چرخه‌ای

جدول 1. مشخصات هندسی مدل‌های عددی مورد بررسی

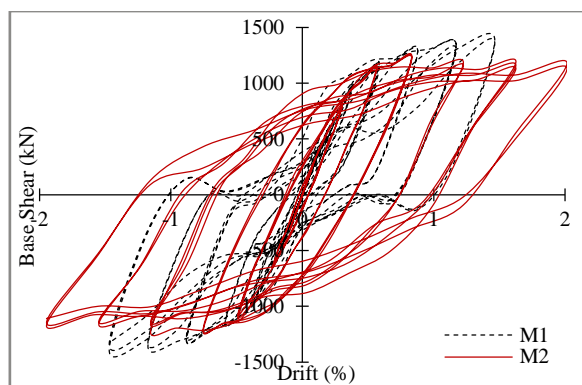
Model	Column			Beam			Brace & Mid Beam			Side & Mid Infill plate		
	Floor 1	Floor 2	Floor 3	Floor 1	Floor 2	Floor 3	Floor 1	Floor 2	Floor 3	Floor 1	Floor 2	Floor 3
M1	Box 250x18	Box 200x15	Box 200x15	1200x150 10x8x	1200x150 10x8x	1250x150 x10x8	-	-	-	2	1.5	1
M2	Box 250x18	Box 200x15	Box 200x15	1200x150 10x8x	1200x150 10x8x	1250x150 x10x8	Box 100x6.5	Box 100x6.5	Box 100x6.5	2	1.5	1



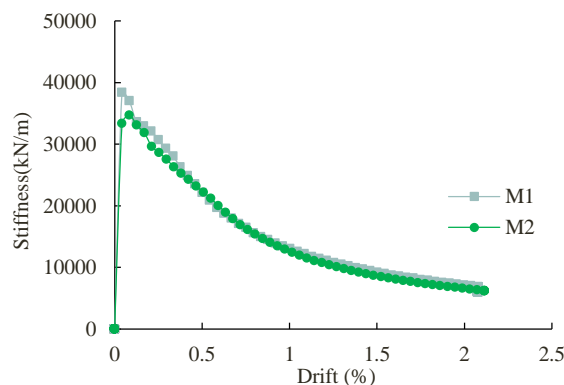
4- نتایج مدل‌های عددی



شکل 10- پرتکول بارگذاری چرخه‌ای



شکل 11- پاسخ چرخه‌ای (برش پایه- دررفت) مدل‌های M1 و M2



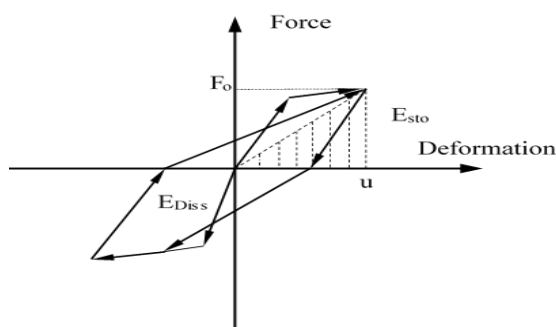
شکل 12- زوال سختی مدل‌های M1 و M2

مطابق شکل 10(a) در مدل M1، یک قاب سه بعدی که در دهانه میانی از دیوارهای برشی فولادی به عنوان سیستم باربر جانبی استفاده شده، که ضخامت ورق‌های فولادی در طبقات اول الی سوم به ترتیب برابر 2، 1/5 و 1 میلی‌متر می‌باشد. در شکل 10(b) نیز در قاب میانی از مهاربندهای واگرا و یک تیر میانی جهت کنترل برون محوری مهاربندها استفاده شده است. همچنین فضای مابین مهاربند، تیر میانی و اعضای اصلی (تیر و ستون) ورق‌های پرکننده قرار گرفته است. در سازه‌های پیشنهادی سیستم از سه بخش در هر طبقه تشکیل شده است. سازه شامل قاب فولادی به همراه ورق پرکننده در طرفین، که به واسطه یک تیر پیوند میانی دارای ورق پرکننده در زیر تیر پیوند به یکدیگر متصل شده‌اند. عملکرد کلی سیستم توسط تیر میانی و ورق زیر تیر پیوند کنترل می‌شود و دارای رفتاری مشابه تیر پیوند در مهاربندهای واگرا می‌باشد. براساس روابط ارائه شده در آیین نامه، برای تیرهای پیوند با نسبت $\rho = \frac{M_p}{V_p} \leq 1.6$

رفتار سیستم به صورت برشی در نظر گرفته می‌شود. با بررسی این رابطه، مقدار ρ در مدل‌های M2 (b) برابر 0/53 محاسبه می‌گردد، از این رو رفتار سیستم در قسمت میانی به صورت برشی می‌باشد. سپس با مشخص شدن برش و لنگر پلاستیک در مقطع میانی قاب، ضخامت ورق فولادی در قاب‌های کناری به نحوی تعیین می‌گردد، که این ورق‌ها نیز در مرحله آخر بارگذاری حداقل به مرحله تسلیم خود برسند. جهت بارگذاری چرخه‌ای بعد از طراحی سیستم ابتدا مدل‌ها در نرم افزار المان محدود مدل‌سازی می‌شوند، سپس بارگذاری بصورت چرخه‌ای مطابق شکل (11) تا دررفت 2% ادامه می‌یابد. در انتهای بارگذاری و رسیدن به دررفت 2% در مدل M2 مقدار تنش در ورق میانی تقریباً به مقدار 370 مگاپاسکال می‌رسد. همچنین علاوه بر ورق میانی، در قسمت‌های بالایی ورق کناری و در محل اتصال ورق کناری به ستون و در محل اتصال بادبند به تیر میانی به نقطه تسلیم رسیده‌اند و در تیر پیوند در طبقه دوم کاملاً به نقطه گسیختگی رسیده است و در طبقات اول و سوم به نقطه تسلیم رسیده است.

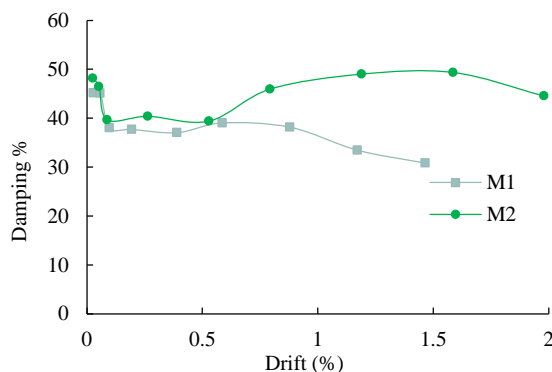
نسبت 38389kN/m و در مدل M2 برابر 34731kN/m می‌باشد. نسبت میرایی یکی از پارامترهای مهم برای اندازه‌گیری ظرفیت اتلاف انرژی در اعضای سازه‌ای می‌باشد. مفهوم میرایی ویسکوز معمولاً به توانایی سازه جهت اتلاف انرژی در محدوده الاستیک بکار برده می‌شود. اتلاف انرژی به علت مکانیزم‌های مختلفی از قبیل: ترک خوردگی، غیر خطی شدگی پاسخ، اندرکنش المان‌های غیر سازه‌ای و اندرکنش سازه و خاک ایجاد می‌شود. میرایی هیستریزس نسبت مساحت چرخه‌های بسته هیستریزس (E_{Diss}) به انرژی کرنشی الاستیک (E_{sto}) مطابق فرمول 7 می‌باشد. نسبت میرایی مدل‌های پیشنهادی مطابق شکل 16 نشان داده شده است [19].

$$\xi_{hyst} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_{Diss}}{E_{sto}} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{hyst}}{F_o u_o} \quad (7)$$

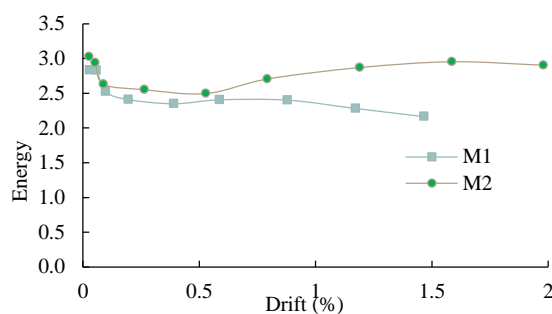


شکل 16- نمودار نیرو- جابجایی جهت محاسبه نسبت میرایی

در مدل M1 با شروع بارگذاری و رسیدن به دررفت $0/088\%$ به علت تشکیل میدان‌های کششی اولیه در ورق فولادی و رسیدن ورق به تنش 1300 kg/cm^2 شاخص میرایی کاهش و از مقدار 38% به 31% کاهش می‌یابد. با ادامه بارگذاری و رسیدن به دررفت $0/68\%$ تسلیم در ورق‌های پرکننده در طبقات دوم و سوم به صورت کامل و در ورق فولادی طبقه اول تسلیم به صورت قطری اتفاق می‌افتد. همچنین میدان‌های کششی به صورت کامل در ورق‌های طبقات دوم و سوم نیز قابل مشاهده می‌باشد. با ورود سازه به مرحله پلاستیک، شاخص میرایی شروع به کاهش می‌کند که در دررفت $0/87\%$ ورق فولادی وارد مرحله پلاستیک شده، و در دررفت $1/17\%$ ورق فولادی طبقه سوم به تنش kg/cm^2 3000 رسیده و در طبقات اول و دوم تنش ورق فولادی برابر kg/cm^2



شکل 14- نسبت میرایی برای مدل‌های M1 و M2

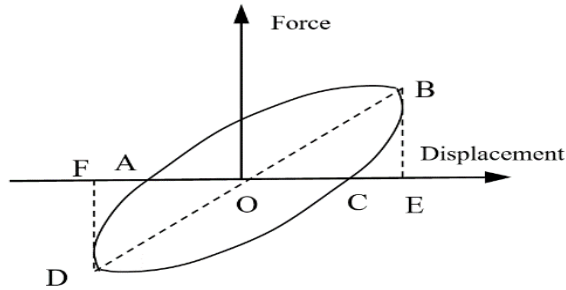


شکل 15- تغییرات پارامتر انرژی برای مدل‌های M1 و M2

در شکل 12 پاسخ چرخه‌ای مدل‌های M1 و M2 نشان داده شده است. در مدل M1 حداکثر برش پایه برابر 1387kN در دررفت متناظر $1/47\%$ و در مدل M2 حداکثر برش پایه برابر 1172kN در دررفت متناظر $1/94\%$ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار برش پایه در مدل M2 در حدود 15% نسبت به مدل M1 کاهش یافته، ولی دررفت در حدود 25% افزایش یافته است. همچنین در مدل M1، با رسیدن به دررفت $0/58\%$ میدان‌های کششی در ورق فولادی طبقه سوم مشاهده می‌گردد و همچنین در کنج ورق فولادی پرکننده، به مرحله تسلیم رسیده که به همین علت باعث افت مقاومت در قسمت میانی نمودار مدل M1 شده است.

در شکل 13 نیز، زوال سختی نمونه‌ها ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد؛ که در مدل M1 حداکثر مقدار سختی برابر





شکل 17- نمودار بار- تغییر مکان برای محاسبه پارامتر E

5- نتیجه گیری

1- مطابق پاسخ چرخه‌ای، در مدل M1 در دررفت 1/47٪، مقدار برش پایه نسبت به مدل M2 در دررفت 2٪ در حدود 15٪ کاهش یافته، ولی قسمت‌های میانی نمودار در مدل M2 نسبت به مدل M1 کاهشی ملاحظه نمی‌شود، که نشان دهنده توانایی بالای سازه در استهلاک انرژی می‌باشد.

2- در هر دو مدل مورد بررسی، در قسمت اولیه، سختی مدل M1 نسبت به M2 در حدود 10٪ بزرگ‌تر می‌باشد و در مدل پیشنهادی M2 علاوه بر وجود بازشو روند کاهش سختی با مدل دیوار برشی رایج تقریباً یکسان می‌باشد.

3- در مدل M1 با ورود ورق‌های فولادی به مرحله پلاستیک در دررفت 87٪/0 شاخص میرایی دارای شیب نزولی می‌باشد، ولی در مدل M2 بعد از دررفت 97٪/0 ورق‌های فولادی وارد مرحله پلاستیک شده‌اند ولی به علت وجود مهاربندها شاخص میرایی دارای شیب صعودی می‌باشد که در نهایت در دررفت 58٪/1 بعد از پلاستیک شدن مهاربند در طبقه سوم شیب شاخص میرایی بعد از این نقطه بصورت نزولی می‌شود. در مرحله آخر بارگذاری شاخص میرایی مدل M2 نسبت به مدل M1 در حدود 45٪ افزایش یافته است.

4- پارامتر اتلاف انرژی مدل M2 نسبت به مدل M1 در حدود 34٪ افزایش یافته است، که نشان‌دهنده افزایش ظرفیت سازه در استهلاک انرژی می‌باشد.

2800 می‌باشد. در دررفت 1/46٪ تنش در ورق فولادی طبقه سوم برابر 3380 kg/cm^2 و در طبقات اول و دوم نیز مقدار متوسط تنش به مقدار 2650 kg/cm^2 رسیده است. در مدل M2 نیز تا دررفت 52٪/0 شاخص میرایی تقریباً مشابه شاخص میرایی در مدل M1 می‌باشد، که با ادامه بارگذاری مطابق شکل 14 مشاهده می‌شود، شاخص میرایی از 39٪ به 49٪ افزایش می‌یابد. با رسیدن به دررفت 79٪/0 ورق پرکننده میانی زیر تیر پیوند، به 3300 kg/cm^2 و مهاربندها و تیر میانی به تنش 2400 kg/cm^2 رسیده است. با ادامه بارگذاری و رسیدن به دررفت 58٪/1 علاوه بر پلاستیک شدن ورق فولادی زیر تیر اصلی، مهاربند طبقه سوم از قسمت میانی کماتش کرده و به تنش 3700 kg/cm^2 رسیده، که به علت همین کماتش، شاخص میرایی در این قسمت شروع به کاهش کرده و در دررفت 2٪ به مقدار 45٪ کاهش می‌یابد. بنابراین در لحظه نهایی بارگذاری براساس مدل M1 در لحظه مشابه در دررفت 1/46٪، شاخص میرایی برای مدل M1 برابر 30/8٪ و در مدل M2 در دررفت مشابه برابر 49٪ می‌باشد.

انرژی اتلافی یکی از مولفه‌های مهم جهت بررسی ظرفیت استهلاک انرژی در سیستم می‌باشد. روش محاسبه ضریب اتلاف انرژی مطابق شکل 17 براساس روش پیشنهادی در (JGJ101-96) ارائه شده است [20]. در شکل 15 تغییرات پارامتر انرژی برای مدل‌های M1 و M2 نشان داده شده است. پارامتر اتلاف انرژی با افزایش دررفت افزایش و با گسیختگی موضعی و یا کلی در سازه کاهش پیدا می‌کند. از این رو جهت محاسبه ضریب اتلاف انرژی مطابق فرمول 8، محاسبات صورت می‌پذیرد. در مدل M1 و M2 ضریب اتلاف انرژی به ترتیب برابر 2/16 و 2/90 می‌باشد. که این پارامتر در مدل M2 نسبت به مدل M1 در حدود 34٪ افزایش یافته است. همچنین با اعمال تغییرات در مدل پیشنهادی (M2) از لحاظ ایجاد بازشو و اضافه نمودن مهاربند در لبه ورق فولادی از لحاظ وزنی در مدل M2 نسبت به مدل M1 وزن سازه در حدود 9٪ افزایش یافته در نتیجه با لحاظ نمودن این تغییرات، وزن سازه بصورت قابل توجهی افزایش نیافته است.

$$\bar{E} = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (8)$$

- [11] Tong, Jing-Zhong, et al. "Flexural Design of Restraining Panels in Buckling-Restrained Steel Plate Shear Walls Considering High-Order Buckling Modes." *Thin-Walled Structures*, vol. 184, 2023, p. 110488.
- [12] Mu, Zaigen, and Yuqing Yang. "Experimental and Numerical Study on Seismic Behavior of Obliquely Stiffened Steel Plate Shear Walls with Openings." *Thin-Walled Structures*, vol. 146, 2020, p. 106457.
13. ستاریان کرج آبادی، ح.، ملکی، ا. تحلیل عددی قاب‌های مهاربندهای واگرایی مجهز به ورق فولادی در ناحیه تحتانی تیر پیوند و تیر خارج از پیوند. فصلنامه آنالیز سازه- زلزله، (15)، (4)، 1397، 13-23.
- [14] Mohammed, Amer, et al. "Seismic Behavior of Concrete-Filled Steel Tubes Column Frame-Buckling Restrained Steel Plate Shear Walls Connected with Bolt/Weld." *Thin-Walled Structures*, vol. 189, 2023, p. 110911.
- [15] AISC 341-10 - American Institute of Steel Construction. "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings." *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, no. 1, 2010, p. 402.
- [16] Berman, J. W., and M. Bruneau. "Proof-of-Concept Testing and Finite Element Modelling of Selfstabilizing Hybrid Rectangular Links for Eccentrically Braced Frames." 8th US National Conference on Earthquake Engineering 2006, vol. 9, no. 239, 2006, pp. 5092-101.
- [17] Yu, jin Guang, et al. "Performance of Steel Plate Shear Walls with Axially Loaded Vertical Boundary Elements." *Thin-Walled Structures*, vol. 125, no. December 2017, 2018, pp. 125-63, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.021>
- [18] Wang, Meng, Yongjiu Shi, et al. "Experimental and Numerical Study of Unstiffened Steel Plate Shear Wall Structures." *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 112, 2015, pp. 373-86, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.05.002>.
- [19] Blandon, C. A. and Priestley, M. J. N. (2005), "Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design", *Journal of Earthquake Engineering*, 9(SPEC. ISS. 2), 257-278. <https://doi.org/10.1142/S1363246905002390>.
- [20] Zhongming, Z., Wei, L. and others (2009), "Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.

6- مراجع

- [1] Wang, Meng, Weiguo Yang, Yongjiu Shi, and Jian Xu, "Seismic Behaviors of Steel Plate Shear Wall Structures with Construction Details and Materials." *Journal of Constructional Steel Research* 107 (2015): 194210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.007>.
- [2] Dastfan, Mehdi, and Robert Driver. "Test of a Steel Plate Shear Wall with Partially Encased Composite Columns and RBS Frame Connections." *Journal of Structural Engineering* 144, no. 2 (2018): 4017187. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001954](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001954).
- [3] Ashrafi, Hamid Reza, Peyman Beiranvand, Majid Pouraminian, and Marziye Sadat Moayeri. "Examining the Impact of Sheet Placement and Changes in Waves Characteristics on Behavior of Wavy Steel Shear Wall." *Case Studies in Construction Materials* 9 (2018): e00180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00180>.
- [4] Jin, Shuangshuang, Shengchao Yang, and Jiulin Bai. "Numerical and Experimental Investigation of the Full-Scale Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall with Inclined Slots." *Thin-Walled Structures* 144 (2019): 106362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106362>.
- [5] Farzampour, Alireza, Jeffrey A Laman, and Massod Mofid. "Behavior Prediction of Corrugated Steel Plate Shear Walls with Openings." *Journal of Constructional Steel Research* 114 (2015): 258-68. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.018>
- [6] Wang, Meng, Haixin Duan, et al. "Experimental Study on Seismic Performance of Low-Yield Point Steel Plate Shear Walls." *Thin-Walled Structures*, vol. 191, 2023, p. 111093.
- [7] Zhao, Xiaofeng, et al. "Theoretical and Experimental Investigations of Steel Plate Shear Walls with Diamond Openings." *Thin-Walled Structures*, vol. 189, 2023, p. 110838.
- [8] Hou, Jian, et al. "Out-Plane Interaction Behavior of Partially Buckling-Restrained Steel Plate Shear Walls." *Thin-Walled Structures*, vol. 183, 2023, p. 110352.
- [9] Darvishi, Hadi, and Massood Mofid. "Structural Performance Assessment of Large Unstiffened Openings in Steel Plate Shear Walls." *Engineering Structures*, vol. 247, 2021, p. 112966.
- [10] Farahbakhshtooli, A., and Anjan K. Bhowmick. "Nonlinear Seismic Analysis of Perforated Steel Plate Shear Walls Using a Macro-Model." *Thin-Walled Structures*, vol. 166, no. May, 2021, p. 108022, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108022>.

