

## ارزیابی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دوبل با موج‌های مایل

سید محمدرضا مرتضوی<sup>۱\*</sup>، علی حیدرپور بیدگلی<sup>۲\*</sup>، محمد فراهانی<sup>۳</sup>

- ۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران  
۲- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران  
۳- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران  
\* تهران، صندوق پستی ۵۱۶۳-۱۶۷۸، [mortazavi@sru.ac.ir](mailto:mortazavi@sru.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله به بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی موج‌دار ذوزنقه‌ای و سینوسی در مقایسه با دیوارهای برشی فولادی تخت در شرایطی که مقدار مصالح مورد استفاده در دیوارها تغییر نکند پرداخته شده است. در ابتدا دیوارهای موج‌دار سینوسی یا ذوزنقه‌ای با هندسه مشخص ایجاد شده و سپس موج ایجاد شده به صورت قطری و در قالب دو دیوار با موج‌های عمود بر هم به صورت دوبل در قاب قرار داده می‌شود، به عبارت دیگر در این مدل هندسه دیوار تخت برای رسیدن به عملکرد بهینه تغییر می‌کند. برای دیوارهای برشی مورد نظر در این تحقیق، با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی یکنواخت و به روش اجزاء محدود منحنی بار افزون، منحنی چرخه‌ای و منحنی جذب انرژی پلاستیک تجمعی مدل‌های اجزا محدود محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند. در نهایت برای مدل‌های ساخته شده چنین نتیجه گرفته شد که دیوار برشی ذوزنقه‌ای و موج‌دار سینوسی در قالب دو دیوار با موج‌های عمود بر هم و به صورت دوبل عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به دیوار برشی تخت با مقدار فولاد هم حجم خود ایجاد می‌کنند و به طور کلی دیوار برشی ذوزنقه‌ای عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به دیوار موج‌دار سینوسی از خود نشان می‌دهد.

### واژگان کلیدی

دیوار برشی فولادی تخت، دیوار برشی فولادی موج‌دار ذوزنقه‌ای، دیوار برشی فولادی موج‌دار سینوسی، استاتیکی غیرخطی یکنواخت

## Seismic performance assessment of double corrugated steel shear walls with diagonal waves

S.M.R. Mortazavi, A. Heydarpour Bidgoli, M. Farahani

### Abstract

In this paper, the seismic performance of trapezoidal and sinusoidal corrugated steel plate shear walls has been investigated in comparison with the flat steel plate shear walls in conditions where the amount of steel materials used in the shear walls does not change and remains constant. First of all, the sinusoidal or trapezoidal shear walls are created with a specific and predefined geometry, and then the created wave is placed diagonally in the form of two steel plate shear walls with double perpendicular waves in the steel frame, in other words, the geometry of the flat steel plate shear walls changes to achieve optimal seismic performance. The studied steel plate shear walls in this research were compared using uniform nonlinear static analysis and obtaining their pushover diagram as well as hysteresis analysis and obtaining the hysteresis cycle and plastic energy absorption by finite element method. Finally, it was concluded from studied frames that trapezoidal and sinusoidal corrugated steel plate shear walls in the form of two shear walls with double perpendicular waves produce better seismic performance and energy absorbing than flat steel plate shear walls with the same volume of steel materials and trapezoidal steel plate shear walls produce better seismic performance comparing to the sinusoidal corrugated steel plate shear wall.

### Keywords

Flat steel plate shear wall, Trapezoidal corrugated steel plate shear wall, Sinusoidal corrugated steel plate shear wall, Uniform nonlinear static analysis

در این تحقیق، به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی تخت، یک سیستم نوین ارائه شده است. در این سیستم، موج‌های سینوسی یا دوزنقه‌ای در درون دیوار با هندسه مشخص ایجاد کرده، سپس موج ایجاد شده به صورت قطری و در قالب دو دیوار با موج‌های عمود بر هم در قالب قرار داده می‌شود. این فرایند به گونه‌ای طی می‌شود که حجم مصالح مورد استفاده در دیوار حاصله با حجم مصالح مصرفی در دیوار تخت یکسان باشد. به عبارتی فقط هندسه دیوار تخت برای رسیدن به عملکرد بهینه تغییر می‌کند.

بدین ترتیب عملکرد لرزه‌ای نمونه‌های پیشنهادی با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی یکنواخت و بدست آوردن نمودار بار افزون<sup>۱</sup> آن‌ها و همچنین تحلیل چرخه‌ای<sup>۲</sup> و بدست آوردن منحنی چرخه‌ای، جذب انرژی پلاستیک و توزیع تنش، با روش اجزاء محدود<sup>۳</sup> و با استفاده از نرم افزار ABAQUS با هم مقایسه شده و در انتها طرح بهینه انتخاب می‌شود [۱].

تحقیق حاضر در ادامه تحقیق ارزیابی و بهینه‌سازی هندسه دیوارهای برشی فولادی سینوسی و دوزنقه‌ای می‌باشد که توسط Mortazavi و همکارانش صورت گرفته است [۲]. در تحقیق مذکور سعی بر بهینه‌سازی هندسه دیوارهای برشی موج‌دار بوده است ولی در انتها چنین نتیجه گرفته شد که دیوارهای موج‌دار سینوسی و دوزنقه‌ای با موج‌های قائم و افقی هیچ‌یک عملکرد لرزه‌ای مطلوب‌تری نسبت به دیوار تخت ندارند هرچند که در هر یک از این دو دیوار گام موج بهینه‌ای برای رسیدن به عملکرد لرزه‌ای مطلوب وجود دارد. بدین ترتیب در تحقیق حاضر نمونه‌هایی با راستای موج قطری و با همان گام موج بهینه پیشنهاد شده در تحقیق پیشین، ساخته شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در انتها عملکرد لرزه‌ای سه دیوار برشی تخت، سینوسی موج‌دار مایل و دوزنقه‌ای موج‌دار مایل با هم مقایسه شده و طرح بهینه انتخاب می‌شود.

## ۲- تحقیق‌های انجام شده پیرامون موضوع

Mortazavi و همکارانش در سال ۲۰۲۱ با بهینه‌سازی هندسه دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای و سینوسی با ثابت نگه داشتن حجم مصالح مورد استفاده در دیوارها، بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با تغییر پارامترهای مختلف هندسی دیوارها و انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی یکنواخت به این نتیجه رسیدند که در هر دو نوع دیوار با موج‌های سینوسی و دوزنقه‌ای، رفتار دیوارهای با

موج قائم بهتر از رفتار دیوارهای با موج افقی است و در یک قاب با ابعاد معمول و با موج قائم، بهترین تعداد موج در دیوارهای دوزنقه‌ای ۱۵ موج و در دیوارهای سینوسی ۱۹ موج است. همچنین آنها نشان دادند که مناسب‌ترین زاویه برای قسمت مایل موج‌ها در دیوارهای دوزنقه‌ای ۲۲/۵ درجه است. در مدل‌های سینوسی زاویه برای قسمت مایل موج‌ها به دلیل مسائل اجرایی همواره ۴۵ درجه است. در مجموع دیوارهای دوزنقه‌ای عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به دیوارهای سینوسی دارد [۲].

Gergely و همکارانش در تحقیق خود در سال ۲۰۱۴ به کالیبره کردن رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی موج‌دار سرد نورد شده پرداختند. محققان در این تحقیق، برای مدل‌سازی دیوار برشی از المان پوسته‌ای استفاده کرده‌اند. هدف این مقاله کالیبره کردن مدل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی است. در انتها چنین نتیجه گرفته شده است که منحنی یکنواخت بدست آمده از مدل نرم افزاری بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی به خوبی رفتار آزمایشگاهی نمونه را تخمین می‌زند. علاوه بر این، رویکرد مدل‌سازی مقیاس شده به روش اجزاء محدود، قادر است نتایجی را که در آزمایش استخراج نشده است، استخراج کند [۳].

Stojadinovic و Tipping در تحقیق خود در سال ۲۰۰۸ به بررسی آزمایشگاهی سیستم سازه‌ای دیوار برشی موج‌دار پرداختند. موضوع این تحقیق توسعه یک سیستم مهار جانبی شامل دیوارهای برشی موج‌دار با استفاده از فولاد سبک سرد نورد شده ساختمانی است. به منظور ایجاد یک مبنای طراحی، چهل و چهار آزمایش چرخه‌ای برای پی‌بردن به ارتباط بین پارامترهای طراحی دیوار برشی موج‌دار انجام شده است. این پارامترها شامل اندازه صفحات فولاد، اندازه ابعاد قاب فولادی سبک سرد نورد شده، اندازه و فاصله تا محل‌های بست‌ها و مقاومت برشی دیوار است. پس از انجام آزمایش‌ها، محققان توصیه می‌کنند که سیستم پیشنهادی این تحقیق یعنی دیوار برشی فولادی موج‌دار وارد آئین‌نامه ASCE 7-05 شده و به‌عنوان مهار جانبی با قاب فولادی سبک سرد نورد شده همراه با دیوار برشی موج‌دار طبقه‌بندی شود. همچنین محققین مقادیر زیر را برای پارامترهای طراحی این دیوار پیشنهاد داده‌اند: ضریب رفتار برابر ۵.۵، ضریب اضافه مقاومت برابر ۲/۵ و ضریب بزرگ‌نمایی تغییرمکان برابر ۳/۲۵ [۴].

Emami و همکارانش در سال ۲۰۱۳ برای به دست آوردن رفتار سیکلی دیوارهای برشی موج‌دار دوزنقه‌ای، روی ۳ نمونه



دیوار برشی تخت، دیوار برشی موج‌دار دوزنقه‌ای با موج‌های قائم و دیوار برشی موج‌دار دوزنقه‌ای با موج‌های افقی آزمایش کردند. هر ۳ دیوار دارای ضخامت یکسانی هستند و در قاب‌های یک طبقه و یک دهانه با المان‌های مرزی ثابت و روی فونداسیونی با سختی نسبی زیاد قرار گرفته و پای آن‌ها گیردار شده است. برای بارگذاری نیز از بارگذاری چرخه‌ای تغییر مکان کنترل در بالای نمونه‌ها استفاده شده است. در انتها و پس از مقایسه منحنی چرخه‌ای هر کدام از نمونه‌ها چنین نتیجه گرفته شده است که دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای دارای سختی خارج از صفحه و مقاومت برشی الاستیک بالایی هستند. همچنین دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای قادرند انرژی لرزه‌ای را در طول تغییر شکل‌های پلاستیک بدون هیچ‌گونه جمع‌شدگی در چرخه‌ها تلف کند. به‌علاوه نسبت شکل‌پذیری در دیوارهای برشی موج‌دار دوزنقه‌ای بسیار بالاست. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقدار کل اتلاف انرژی دیوارهای موج‌دار دوزنقه‌ای ۱/۵۲ برابر دیوار برشی فولادی تخت سخت نشده است. همچنین مشاهده شده است که دیوار برشی دوزنقه‌ای با موج‌های قائم عملکرد بهتری نسبت دیوار برشی دوزنقه‌ای با موج‌های افقی دارد [۵].

Dou و همکارانش پی در تحقیق خود در سال ۲۰۱۶ به بررسی کمانش برشی الاستیک دیواره برشی فولادی موج‌دار سینوسی پرداختند. ابتدا با استفاده از تحلیل اجزاء محدود، فرمول قبلی خمش صفحات موج‌دار سینوسی اصلاح شده و سپس مدل برشی خالص به‌منظور مطالعه اثرات پارامترهای کلیدی در کمانش برشی الاستیک پانل‌های موج‌دار سینوسی مانند نسبت ابعاد، نسبت موج‌ها، نسبت عمق موج به ضخامت صفحه و تعداد تکرار موج‌ها برآورد شده است. بر اساس نتایج عددی مدل اجزاء محدود معادلات برآورد بار کمانش برشی الاستیک مدل موج‌دار سینوسی با دقت خوبی ارائه شده است. در انتهای تحقیق و پس از ارائه معادلات چنین نتیجه گرفته شده است که برخلاف مدل‌های موج‌دار دوزنقه‌ای، برای مدل‌های موج‌دار سینوسی، کمانش کلی و کمانش موضعی فقط در پایین‌ترین مود کمانشی به‌دست‌آمده از تحلیل کمانش قابل مشاهده است و این در حالی است که رفتار اندرکنش کمانش مشخص نیست و همچنین در مدل‌های موج‌دار، پارامتر تعداد تکرار موج یا نسبت عرض پانل به طول موج، تأثیر قابل‌توجهی در بار کمانش الاستیک برشی دارد [۶].

Yadollahi و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به ارزیابی و مقایسه رفتار دیوارهای برشی فولادی موج‌دار پرداختند. در این مقاله،

رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار تحت شرایط بارگذاری جانبی بارافزون در تراز بالای مدل‌ها توسط روش اجزاء محدود به‌صورت تحلیلی بررسی شد. پس از کالیبره کردن مدل‌های تحلیلی، پارامترهای بیشتری از دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار، مثل ضخامت ورق موج‌دار، سختی المان‌های مرزی، عمق موج در ورق‌های موج‌دار و طول موج در میان‌قاب ورق‌های موج‌دار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که در دیواری با ابعاد ثابت، ورق‌های دوزنقه‌ای استهلاک انرژی، شکل‌پذیری و باربری نهایی بیشتری نسبت ورق‌های با موج سینوسی دارند و همچنین مصالح مصرفی را نیز کاهش می‌دهند [۷].

Hosseinpour و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به ارزیابی رفتار دیوار برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار سینوسی و دوزنقه‌ای پرداختند. دیوار برشی فولادی به ۲ گروه تقسیم می‌شود: سخت شده و سخت نشده. در دیوارهای سخت نشده مجموعه‌ای از ورق‌ها (موج‌دار سینوسی یا دوزنقه‌ای) با ضخامت کم استفاده می‌شود که دارای مشخصات میدانی پس از کمانش تحت کمانش کلی است. در دیوار سخت شده مجموعه‌های کمربندی فولادی به‌عنوان سخت‌کننده با آرایش‌های مختلف استفاده می‌شود: افقی، عمودی یا قطری در یک یا هر دو جهت دیوار. در دیوارهای سخت‌نشده افزایش ضخامت باعث افزایش ظرفیت دیوار تحت نیروهای بزرگ در سازه‌های بلند می‌شود. در دیوارهای سخت شده، نصب سخت‌کننده‌ها به دیوار مستلزم زمان و هزینه است. نتایج حاصله نشان داد که در دیوارهای با ابعاد برابر، ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای، شکل‌پذیری و باربری نهایی بیشتری نسبت به ورق‌های موج‌دار سینوسی دارند [۸].

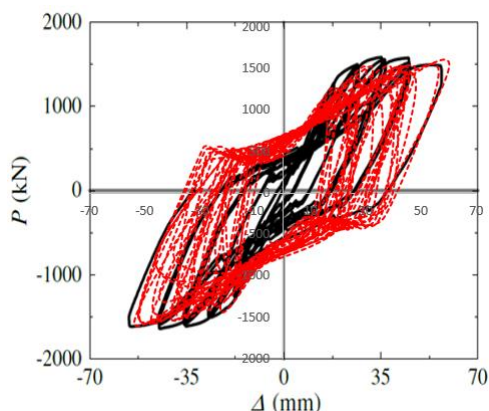
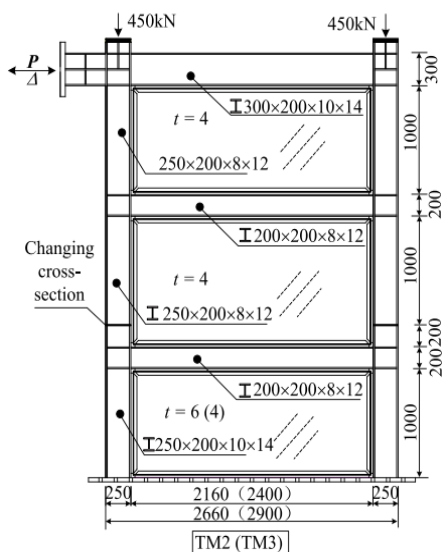
### ۳- اعتبار سنجی نتایج تحلیل مدل‌های المان محدود ساخته شده در نرم افزار

برای آنکه صحت تحلیل انجام شده در نرم‌افزار مورد استفاده (ABAQUS ۶.۱۱.۳) مورد تأیید قرار گیرد، در این بخش به کمک یک مدل آزمایشگاهی که در ادامه شرح داده خواهد شد، و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار انجام می‌شود. مدل موردنظر برای انجام صحت‌سنجی بر اساس آزمایش‌های انجام شده توسط Wang و همکارانش در سال ۲۰۱۵ بر روی قاب‌های ۳ طبقه و یک دهانه دارای دیوار برشی فولادی تخت انتخاب شده است [۹]. بدین منظور مدل آزمایشگاهی TM3 برای صحت‌سنجی نرم‌افزار انتخاب شده



است که در شکل (۱) نمایش داده شده است.

چشم‌پوشی است. به طور کلی با توجه به شکل (۲) می‌توان به اعتبار مدل‌سازی با نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS و صحت نتایج حاصل از آن پی برد.



شکل ۲- منحنی چرخه‌ای نمونه آزمایشگاهی (نمودار مشکی) در کنار منحنی چرخه‌ای حاصل از تحلیل اجزاء محدود (نمودار قرمز)

شکل ۱- مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی Wang و همکارانش [۹]

### ۳-۳- مدل اجزاء محدود

اجزا مختلف مدل شامل بال، جان تیرها و ستون‌ها، دیوارهای برشی داخلی و اجزا سخت‌کننده بر اساس ابعاد ذکر شده در شکل (۱)، هر یک به صورت جداگانه و به صورت المان‌های پوسته‌ای ۳ بعدی<sup>۴</sup> در نرم‌افزار ترسیم می‌شوند. پس از ترسیم تمام اجزا مدل به صورت جداگانه، اجزای مختلف در محل موردنظر قرار داده می‌شوند و در آخر مدل ساخته شده مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت بار چرخه‌ای قرار می‌گیرد.

### ۳-۳- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با مدل اجزا محدود

شکل (۲) مقایسه منحنی چرخه‌ای نمونه آزمایشگاهی Wang و همکارانش و منحنی چرخه‌ای حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل المان محدود ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS را نشان می‌دهد.

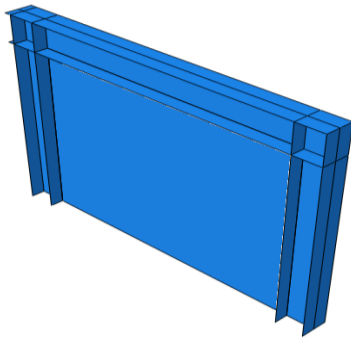
همان‌طور که از مقایسه بین منحنی چرخه‌ای مدل المان محدود و نمونه آزمایشگاهی پیداست، بین هر دو نتیجه انطباق مناسبی وجود دارد و این نشان‌دهنده آن است که مدل اجزاء محدود ساخته شده به درستی رفتار نمونه واقعی را شبیه‌سازی کرده و نتایج مشابهی ارائه داده است. در ضمن عدم تطابق‌های کوچک موجود می‌تواند ناشی از وجود نقص‌های اولیه یا تنش‌های پسماند موجود در مصالح نمونه آزمایشگاهی، اختلاف‌های کوچک اندازه‌های هندسی، اختلاف‌های کوچک در اتصالات و غیره باشد که این عدم تطابق‌ها به علت کوچک بودن قابل

### ۴- هندسه نمونه‌های تحقیق

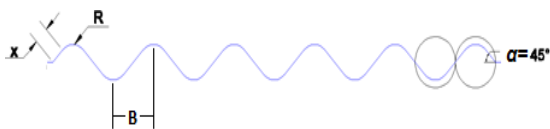
در این تحقیق، عملکرد لرزه ای ۳ نمونه دیوار برشی تخت، موج‌دار سینوسی با موج‌های قطری و موج‌دار دوزنقه‌ای با موج‌های قطری با هم مقایسه شده‌اند. گام موج هر یک از نمونه‌ها بر اساس بهینه‌سازی انجام شده در تحقیق Mortazavi و همکارانش انتخاب شده است [۲]. سپس دیوار موج‌دار ساخته شده، به گونه‌ای می‌چرخد که راستای موج‌ها در راستای قطر قاب قرار گیرد. ولی از آنجایی که کاربرد سیستم‌های موردنظر این تحقیق، مقابله با بارهای جانبی سیکلی همچون با زلزله است، سیستم پیشنهادی باید در کشش و فشار به وجود آمده ناشی از بار خارجی، عملکرد مناسبی ارائه دهد. از آنجایی‌که موج‌های دیوار همچون تارهای کششی یا فشاری کار می‌کنند، در سیکل‌هایی که تحت فشار قرار می‌گیرند کم‌اندام کرده و عملکرد مطلوبی ارائه نمی‌دهند. از این رو پیشنهاد شده است تا به جای یک دیوار موج‌دار با موج‌های قطری و با ضخامت ۴ میلی‌متر، دو دیوار موج‌دار یکی با تارهای کششی و دیگری با تارهای فشاری و هر یک با ضخامت ۲ میلی‌متر در سیستم تعبیه شود. بدین ترتیب سیستم پیشنهادی در مواجهه با بارهای سیکلی جانبی حداقل یک عضو کششی دارد و می‌تواند عملکرد بهتری در مقابل بار وارده ارائه دهد.

### ۴-۱- ابعاد المان‌های مرزی قاب پیرامونی

ابعاد اجزای مرزی که هندسه کلی آن‌ها در شکل (۳) نشان داده



شکل ۴- هندسه دیوار برشی تخت (نمونه Flat)



شکل ۵- مشخصات هندسی مقطع عرضی دیوار پرکننده نمونه Sin

جدول ۳- مشخصات هندسی مقطع عرضی دیوار پرکننده نمونه Sin

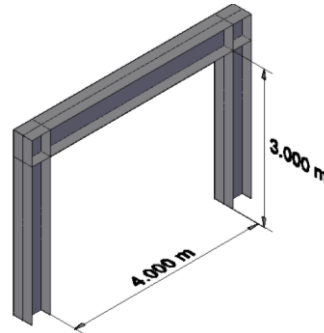
نمونه Sin		
X	طول بخش مایل (متر)	۰/۰۵۳
R	شعاع دایره (متر)	۰/۰۵۵
B	طول گام امواج (متر)	۰/۲۱۰
$\alpha$	زاویه ابتدایی بخش مایل (درجه)	۴۵
t	ضخامت دیوار (متر)	۰/۰۰۲

همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده، برای ساخت دیوار پرکننده نمونه Sin، دو دیوار پرکننده دارای مقطع عرضی مطابق جدول (۳) را به ترتیب ۴۵ درجه و ۱۳۵ درجه در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخانیم و در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از یکدیگر روبروی هم قرار می‌دهیم و این دیوار پرکننده را درون قاب پیرامونی نصب می‌کنیم. بنابراین موج‌های دیوارهای پرکننده در جهت هر دو قطر قاب پیرامونی قرار می‌گیرند و همیشه عضو کششی در بارگذاری جانبی حضور دارد.

#### ۴-۴- هندسه دیوار برشی موج دار قطری دوزنقه‌ای

دیوار برشی موج دار قطری دوزنقه‌ای، نمونه Tra نامیده می‌شود. مشخصات هندسی مقطع عرضی دیوار پرکننده این نمونه در شکل (۷) در جدول (۴) شرح داده شده است. برای ساخت نمونه Tra مطابق شکل (۸)، دو دیوار پرکننده بر اساس جدول (۴) ساخته و به ترتیب ۴۵ و ۱۳۵ درجه در

شده است، بر اساس استاندارد ضوابط لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی آمریکا محاسبه شده و در جداول (۱) و (۲) ارائه شده‌اند [۱۰]. یک دستک بارگذاری نیز به طول ۱۰ سانتی‌متر در بالای قاب و روبروی تیر قرار می‌گیرد که مشخصات مقطع عرضی آن دقیقاً مشابه تیر بالای قاب پیرامونی است. تعداد ۸ سخت‌کننده نیز در درون جان ستون و روبروی بال‌های تیر نصب می‌گردند.



شکل ۳- هندسه کلی قاب پیرامونی

جدول ۱- ابعاد اجزای مرزی ساخته‌شده از تیرورق

تیر	ستون	بعد (متر)
۰/۵۰	۰/۴۰	ارتفاع ورق جان
۰/۰۲	۰/۰۲	ضخامت ورق جان
۰/۴۰	۰/۴۰	عرض ورق بال
۰/۰۴	۰/۰۳	ضخامت ورق بال

جدول ۲- ابعاد سخت‌کننده‌ها

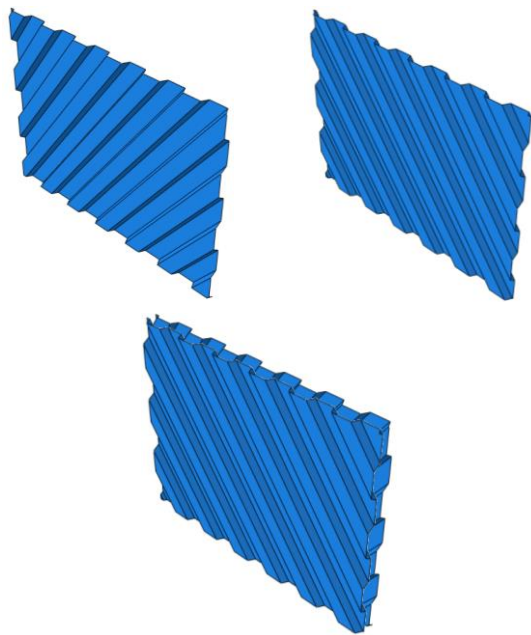
ضخامت پلیت	ابعاد پلیت	بعد (متر)
۰/۰۴	۰/۲ × ۰/۴	سخت‌کننده‌های جان ستون

#### ۴-۲- هندسه دیوار برشی تخت

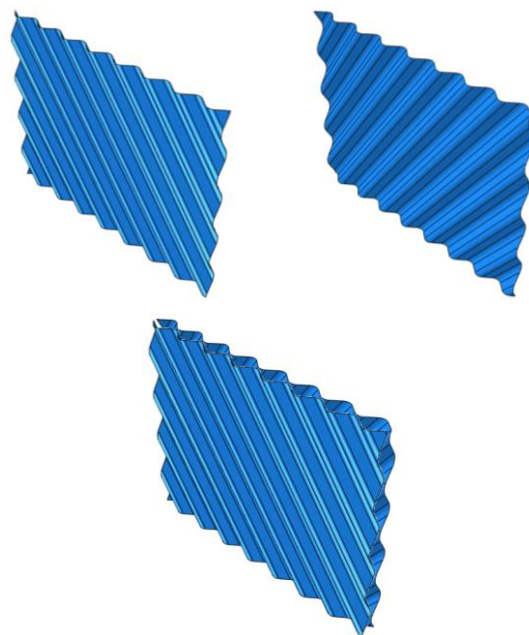
نمونه دیوار برشی تخت که نمونه Flat نامیده می‌شود، دارای یک دیوار پرکننده تخت با طول ۴ متر، ارتفاع ۳ متر و ضخامت ۵ میلی‌متر (یک فرض منطقی برای ضخامت) است که به صورت نشان داده شده در شکل (۴) می‌باشد.

#### ۴-۳- هندسه دیوار برشی موج دار قطری سینوسی

جزئیات هندسی مقطع عرضی نمونه موج دار قطری سینوسی که به نمونه Sin نامگذاری می‌شود، مطابق شکل (۵) است که پارامترهای نشان داده شده در شکل (۵) در جدول (۳) توضیح داده شده است.



شکل ۸- هندسه کلی دیوار پرکننده نمونه Tra



شکل ۶- هندسه کلی دیوار پرکننده نمونه Sin

پیرامونی از جنسی انتخاب می‌شود که تنش تسلیم بالاتری نسبت به دیوار داخلی داشته باشد تا دیرتر از آن تسلیم شود. بدین ترتیب با توجه به مطالب ذکر شده برای قاب، از فولاد ساختمانی ST37 [۱۱] و برای دیوار، از فولاد ST12 با قابلیت سرد نورد شدن استفاده می‌شود [۱۲].

براساس مقادیر ذکر شده در جدول (۵) نمودار تنش- کرنش هریک از مصالح فولادی در شکل (۹) نشان داده شده است و این مصالح در نرم افزار ABAQUS به جزء مورد نظر اختصاص داده می‌شود.

جدول ۵- خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده در سیستم‌های مورد نظر تحقیق [۱۰ و ۱۱]

مشخصه مکانیکی	ST37	ST12
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	۲۰۰	۲۰۰
مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	۲۳۵	۲۰۰
مقاومت کششی نهایی (مگاپاسکال)	۳۷۰	۳۰۰
مقاومت شکست (مگاپاسکال)	۳۴۰	۲۸۰

### ۶- بارگذاری مدل‌ها

در این تحقیق به منظور درک و مقایسه رفتار جانبی سیستم‌های مختلف، از دو نوع بارگذاری جانبی یکنواخت فرآینده<sup>۵</sup> و چرخه‌ای<sup>۶</sup> استفاده شده است. بارگذاری جانبی یکنواخت فرآینده تغییر مکان کنترل بوده و مقدار آن به صورت خطی افزایش



شکل ۷- مشخصات هندسی مقطع عرضی دیوار پرکننده نمونه Tra

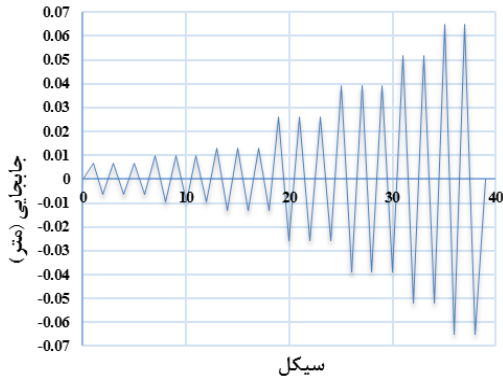
جدول ۴- مشخصات هندسی مقطع عرضی دیوار پرکننده نمونه Tra

نمونه Tra		
$X$	طول بخش افقی موج (متر)	۰/۲۱۹
$h$	طول مولفه قائم بخش مایل موج (متر)	۰/۰۵۰
$a$	طول مولفه افقی بخش مایل موج (متر)	۰/۰۲۱
$\alpha$	زاویه بخش مایل موج با راستای قائم (درجه)	۲۲/۵۰
$t$	ضخامت دیوار برشی (متر)	۰/۰۰۲

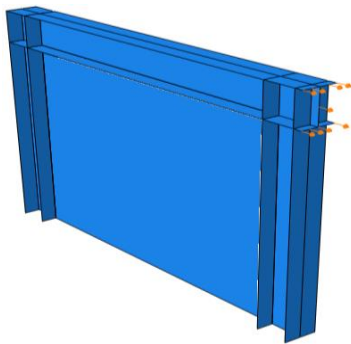
جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخانیم و در فاصله ۲۰ سانتی متری روبروی هم قرار می‌دهیم و در انتها در داخل قاب پیرامونی نصب می‌کنیم. بدین ترتیب موج‌های دو دیوار هر کدام در جهت یکی از افطار قاب قرار می‌گیرند و همواره عضو کششی خواهیم داشت.

### ۵- مصالح مورد استفاده در نمونه‌ها و تعریف آن در نرم افزار

به منظور شکل‌دهی دیوارهای موج‌دار، نیاز است تا از فولاد با قابلیت نورد سرد استفاده شود. همچنین مصالح فولادی قاب

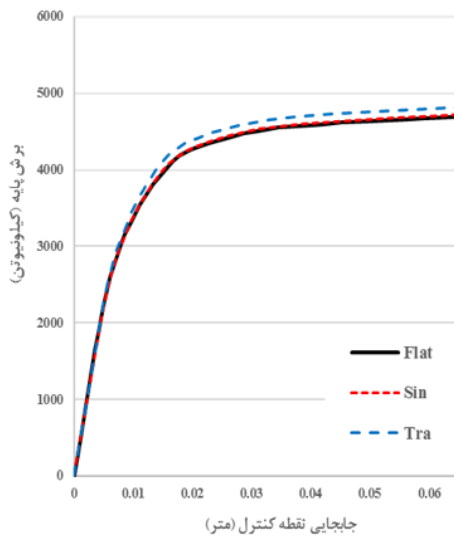


شکل ۱۰- پروتکل بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۱۱- محل اعمال بار جانبی به صورت تغییر مکان اجباری

بدین ترتیب می‌توان چنین نتیجه گرفت که عملکرد لرزه‌ای دو نمونه پیشنهادی در پارامتر مقاومت بهبود چندانی نیافته‌اند، اما به هر حال نمونه دوزنقه‌ای مقاومت بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر دارد.



شکل ۱۲- مقایسه منحنی بار افزون نمونه‌های Flat, Sin, Tra



شکل ۹- نمودار تنش-گرنش پلاستیک مصالح ST12 و ST37

می‌یابد. خروجی این بارگذاری منحنی بار افزون نمونه‌ها می‌باشد. بارگذاری چرخه‌ای نیز تغییر مکان کنترل بوده و مقدار آن به صورت چرخه‌ای و بر اساس یک پروتکل مشخص تغییر می‌کند. در این تحقیق از روش ATC-24 برای ساخت پروتکل بارگذاری جانبی سیکلی استفاده شده است [۱۳]. بر اساس روش گرافیکی ATC-24،  $\delta_y$  برای هر یک از سه نمونه حساب شده و در جدول (۶) ارائه شده است. اما از آنجایی که نیاز است تا همه سیستم‌ها تحت یک پروتکل بارگذاری یکسان قرار گیرند، از مقادیر به دست آمده برای  $\delta_y$  سیستم‌ها بر مبنای یک قضاوت مهندسی میانگین‌گیری شده و مبنای محاسبه پروتکل بارگذاری جانبی قرار می‌گیرد.

جدول ۶- مقادیر  $\delta_y$  نمونه‌ها مستخرج شده از منحنی بار افزون

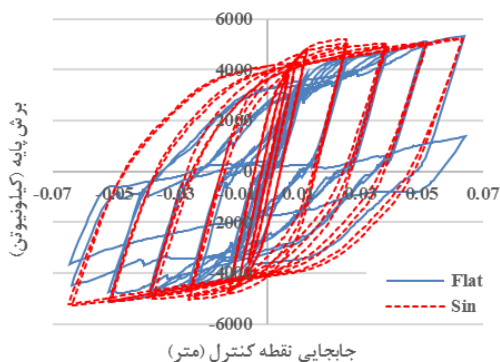
$\delta_y$ (m)	دیوار برشی
۰/۰۱۳۳	تخت
۰/۰۱۲۹	سینوسی قطری
۰/۰۱۳۵	دوزنقه ای قطری
۰/۰۱۳۰	$\delta_y$ میانگین

بدین ترتیب پروتکل بارگذاری سیکلی جانبی بر اساس  $\delta_y$  برابر با ۰/۰۱۳ متر تولید می‌شود. نمودار جابجایی - سیکل این پروتکل در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در شکل (۱۱) محل اعمال بار یکنواخت و چرخه‌ای مشخص گردیده است.

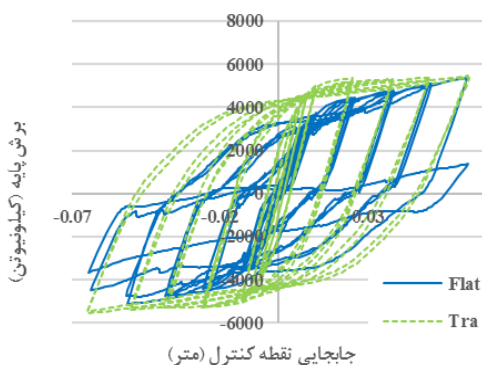
## ۷- بررسی نتایج

### ۷-۱- مقایسه منحنی بار افزون نمونه‌ها

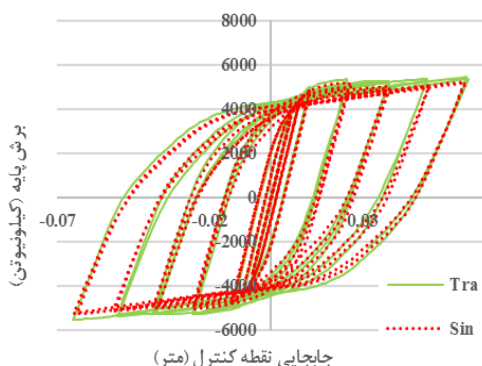
همان‌طور که از نمودار شکل (۱۲) پیداست، منحنی بار افزون همه نمونه‌ها تقریباً یکسان است و تنها منحنی بار افزون نمونه پیشنهادی دوزنقه‌ای کمی بالاتر از بقیه نمونه‌ها قرار گرفته است.



شکل ۱۴- مقایسه منحنی چرخه‌ای نمونه‌های Sin و Flat



شکل ۱۵- مقایسه منحنی چرخه‌ای نمونه‌های Tra و Flat



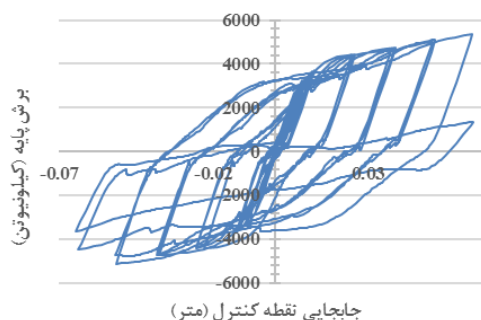
شکل ۱۶- مقایسه منحنی چرخه‌ای نمونه‌های Tra و Sin

### ۷-۳- مقایسه منحنی جذب انرژی پلاستیک تجمعی نمونه‌ها

همان‌طور که از مقایسه سطح زیر منحنی چرخه‌ای نمونه‌ها انتظار می‌رفت، از شکل (۱۷) نیز می‌توان چنین برداشت کرد که تحت یک بارگذاری جانبی سیکلی یکسان نمونه دوزنقه‌ای دارای بیشترین پتانسیل جذب انرژی و نمونه تخت دارای کمترین پتانسیل جذب انرژی است.

### ۷-۲- مقایسه منحنی چرخه‌ای نمونه‌ها

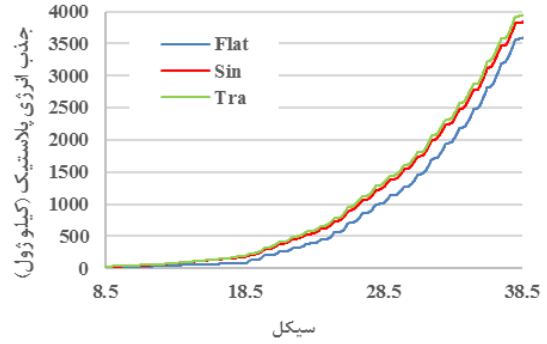
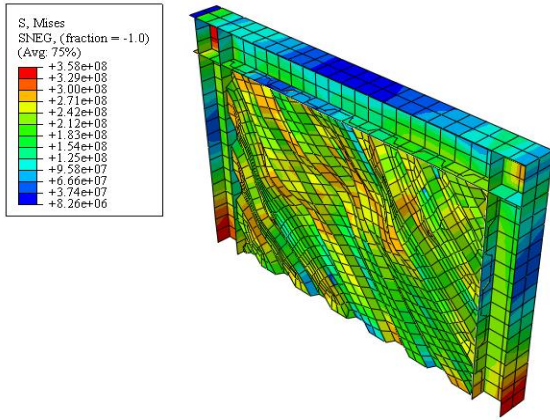
همان‌طور که در شکل (۱۳) ملاحظه می‌گردد، منحنی چرخه‌ای نمونه تخت در سیکل آخر خود دچار زوال شدید مقاومت و سختی شده است. این افت شدید در مقاومت و سختی به دلیل رخداد کماتش کلی در دیوار به وجود آمده است. از طرفی در منحنی چرخه‌ای نمونه تخت واضح است که عملکرد آن در فشار، به دلیل رخداد کماتش کلی، ضعیف‌تر از عملکرد آن در کشش است. این رفتار بیانگر آن است که نمونه تخت در مقابل کماتش تاب پایینی دارد و در صورت اعمال تغییر مکان‌های بزرگ به آن به سرعت وارد محدوده غیرخطی کماتشی شده و سختی و مقاومت خود را از دست می‌دهد.



شکل ۱۳- منحنی چرخه‌ای نمونه Flat

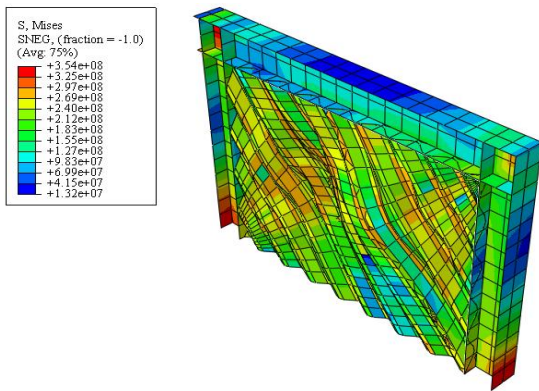
از شکل (۱۴) و (۱۵) می‌توان چنین نتیجه گرفت که منحنی چرخه‌ای نمونه سینوسی و دوزنقه‌ای یک چرخه هیستریزس کامل و پایدار است. این نمونه در طول بارگذاری چرخه‌ای دچار افت سختی نشده و افت مقاومت کمی در آن دیده می‌شود. همچنین در هر دو جهت بارگذاری (چه رفت و چه برگشت) دارای رفتار نسبتاً یکسانی است. به‌علاوه سطح زیر منحنی چرخه‌ای آنها، که معیاری است از کار انجام شده توسط سیستم یا به عبارتی انرژی مستهلک شده توسط آن، از نمونه تخت بیشتر است. به‌عبارت‌دیگر نمونه‌های سینوسی و دوزنقه‌ای دچار کماتش‌های کلی نشده و تاب کماتشی بیشتری دارند.

همان‌طور که از شکل (۱۶) پیداست، از آنجایی که سطح زیر منحنی چرخه‌ای نمونه دوزنقه‌ای کمی بیشتر از نمونه سینوسی است می‌توان به این نتیجه رسید که تحت یک بارگذاری جانبی یکسان نمونه دوزنقه‌ای کار بیشتری از نمونه سینوسی انجام داده و می‌تواند انرژی بیشتری از بار وارده را جذب کند. از این امر می‌توان چنین نتیجه گرفت که رفتار لرزه‌ای نمونه دوزنقه‌ای بهتر از رفتار لرزه‌ای نمونه سینوسی است.



شکل ۱۷- مقایسه منحنی جذب انرژی پلاستیک تجمعی نمونه‌های Flat، Sin و Tra

شکل ۱۹- نحوه توزیع تنش فون میزس و تغییر شکل در نمونه Tra در پایان تحلیل چرخه‌ای



شکل ۲۰- نحوه توزیع تنش فون میزس و تغییر شکل در نمونه Sin در پایان تحلیل چرخه‌ای

### ۷-۴- مقایسه شکل توزیع تنش فون میزس و تغییر شکل نمونه‌ها در پایان تحلیل چرخه‌ای

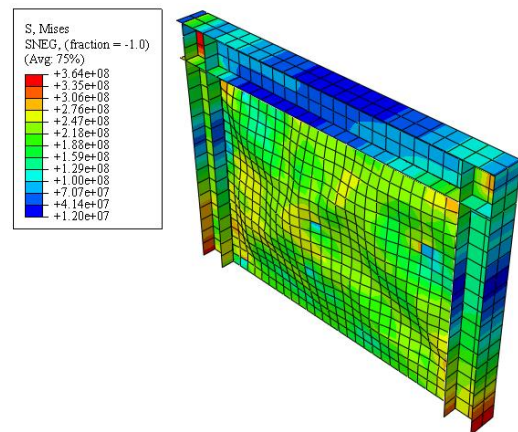
همان‌طور که در شکل (۱۸) تا (۲۰) پیداست، در چرخه‌هایی که تغییر مکان بزرگی به سیستم تحمیل می‌شود، نمونه تخت در انتهای آن چرخه دچار کماتش کلی شده و در شروع چرخه بعدی باید تغییر شکل زیادی را جبران کند. از این رو این دیوار، پیوسته در هر چرخه، چه در بارگذاری رفت و چه در بارگذاری برگشت، کماتش کلی رخ داده و باربری آن کاهش می‌یابد. ولی در دیوارهای موج‌دار، از آنجایی که راستای موج‌های دو دیوار بر هم عمود است و در جهت قطر قرار دارند، علاوه بر آنکه بخشی از انرژی بار وارد صرف باز کردن و تغییر شکل موج‌ها می‌شود، همواره یکی از این دو دیوار، با توجه به جهت بار وارد، آمادگی تحمل بار فشاری و به وجود آمدن کماتش را دارد. از این روست که نمونه‌های موج‌دار عملکرد لرزه‌ای بهتری از خود نشان داده‌اند.

### ۷-۵- بررسی کمی تاثیر هندسه جدید پیشنهادی بر روی پارامترهای لرزه‌ای

همان‌طور که از بخش‌های قبل مشخص شد نمونه پیشنهادی دوزنقه‌ای یا همان نمونه Tra، در پارامترهای لرزه‌ای عملکرد بهتری نسبت به دو نمونه دیگر از خود نشان داد. در صد بهبود عملکرد این نمونه در این پارامترهای لرزه‌ای از نتایج تحلیل استخراج گردیده و در جدول (۷) نشان داده شده است.

### ۸- نتیجه گیری

۱- با چرخاندن راستای موج دیواری با شرایط هندسی بهینه در راستای قطر آن، و تقسیم دیوار حاصل به دو دیوار با راستای موج عمود برهم و حجم یکسان، می‌توان باعث افزایش مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی آن نسبت به دیوار تختی با حجم مصالح برابر شد.



شکل ۱۸- نحوه توزیع تنش فون میزس و تغییر شکل در نمونه Flat در پایان تحلیل چرخه‌ای

## ۹- مراجع

- [1] The Abaqus 6.11.3 Software is a product of Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- [2] Mortazavi, S.M.R., Heidarpour, B. A. and Emamjomeh, H. (2018), "Optimization and evaluation of geometry of sinusoidal and trapezoidal steel shear walls with equal volume of materials", M.Sc Thesis, Civil Engineering Faculty, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.
- [3] Gergely, V.L, Liel, A.B., Deierlein, Gregory G, Eduardo, M., and Tipping, S. (2014), "Component model calibration for cyclic behavior of a corrugated shear wall", *Thin-Walled Structures*, Vol. 75, pp. 53-62.
- [4] Stojadinovic, B. and Tipping, S., (2008), "Structural testing of corrugated sheet steel shear walls", 19<sup>th</sup> International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis: University of Science and Technology Scholars Mine, pp. 425-439.
- [5] Emami, F., Mofid, M. and Vafai, A. (2015), "Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls", *Engineering Structures*, Vol. 48, pp. 750-762.
- [6] Dou, C., Jiang, Z.Q., Pi, Y.L. and Guo, Y.L. (2016), "Elastic shear buckling of sinusoidally corrugated steel plate shear wall", *Engineering Structures*, Vol. 121, pp. 136-146.
- [7] Yadollahi, Y., Pakar, I. and Bayat, M. (2014), "Evaluation and comparison of behavior of corrugated steel plate shear walls", *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 12, pp. 763-786.
- [8] Hosseinpour, E., Shahrizan, B., and Yadollahi, Y. (2015), "Evaluation of steel shear walls behavior with sinusoidal and trapezoidal corrugated plates", *Hindawi Publishing Corporation*, Vol. 2015, pp. 1-11.
- [9] Wang, M., Shi, Y., Xu, J., Yang, W., and Li, Y. (2015), "Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 112, pp. 373-386.
- [10] AISC, ANSI/AISC341-16., (2016), *Seismic provisions for structural steel buildings*, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago, Illinois, USA.
- [11] DIN17100/Steels for General Structural Purposes., (1987), Carbon and low alloy steel EN10025 St37-2 steel plate.
- [12] DIN EN 10130., (2006), St 12, Mild steels for cold forming.
- [13] ATC-24., (1992), National Center for Earthquake Engineering Research. Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures: 9-12.

جدول ۷- درصد بهبود پارامترهای لرزه‌ای نمونه دوزنقه ای پیشنهادی

(نمونه Tra) نسبت به نمونه تخت (نمونه Flat)

پارامتر لرزه‌ای	درصد (%) بهبود پارامتر لرزه‌ای در نمونه Tra
مقاومت تسلیم مؤثر سیستم	۳/۴۵
جابجایی تسلیم سیستم	۱/۹۲
مقاومت نهایی سیستم	۲/۶۶
جابجایی نهایی سیستم	۲/۲۹
سختی جانبی مؤثر	۶/۲۲
سختی جانبی الاستیک	۱/۵۰
ضریب شکل پذیری	۰/۳۶
اتلاف انرژی پلاستیک تجمعی	۹/۳۲

۲- در چرخه هیستریزس نمونه تخت زوال شدید مقاومت و سختی مشاهده می‌شود. این افت شدید در مقاومت و سختی به دلیل رخداد کمانش کلی در دیوار به وجود آمده است. همچنین عملکرد آن در فشار، به دلیل رخداد کمانش، ضعیف‌تر از عملکرد آن در کشش است. این رفتار بیانگر آن است که نمونه تخت در مقابل کمانش تاب پایینی دارد.

۳- منحنی چرخه‌های نمونه‌های سینوسی و دوزنقه‌ای قطری دارای چرخه‌های هیستریزس کامل و پایدار هستند. این نمونه‌ها در طول بارگذاری سیکلی دچار افت سختی نشده و افت مقاومت کمی در آن‌ها دیده می‌شود. همچنین در هر دو جهت بارگذاری (چه رفت و چه برگشت) دارای رفتار نسبتاً یکسانی هستند. به علاوه این نمونه‌ها دچار کمانش‌های کلی نشده و تاب کمانشی بیشتری نسبت به نمونه تخت دارند.

۴- تحت یک بارگذاری جانبی سیکلی یکسان نمونه دوزنقه‌ای پیشنهادی دارای بیشترین پتانسیل اتلاف انرژی و نمونه تخت دارای کمترین پتانسیل اتلاف انرژی است.

۵- از مطالب ارائه شده در بالا می‌توان چنین نتیجه گرفت که تمام پارامترهای لرزه‌ای نمونه دوزنقه‌ای پیشنهادی نسبت به نمونه تخت هم‌حجمش، بهبود پیدا کرده است.

پی نوشت

- <sup>1</sup> Push over
- <sup>2</sup> Hysteresis
- <sup>3</sup> Finite Elements
- <sup>4</sup> 3D Shell
- <sup>5</sup> Monotonic
- <sup>6</sup> Cyclic

