

Investigating the behavior of steel shear wall consisting of double flat and one corrugated plates made of LYP steel

Leila Hosseinzadeh*

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Behnam Babaie

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

l.hosseinzadeh@iaut.ac.ir

Keywords:

Steel shear walls,
Low yield point steel,
Stiffness,
ultimate strength,
energy absorption.

Abstract

The steel shear wall is a lateral load resistant system that has received attention in recent decades. Steel shear walls are used in two ways: hardened and unhardened walls. Although the post-buckling behavior of the steel shear wall causes the post-buckling loading but this plate buckling is not always desirable. One of the useful solutions to prevent lateral buckling is the use of walls with corrugated plates. In this research, the behavior of a steel shear walls consisting of two flat plates and one corrugated plate was studied in two states of conventional structural steel (A36) and low yield point steel (LYP). The use of low yield strength steel improved the seismic performance of the steel shear wall system. Taking into account the changes in the thickness of the plate and different aspect ratio, LYP steel increased the values of stiffness, ultimate strength, and energy absorption by about 74%, 51% and 36%. The effect of increasing the plate thickness on the stiffness parameter for infill panel with A36 steel is more than that of LYP steel. Increasing the thickness of the plates increased the stiffness, ultimate strength, and energy absorption of the system for A36 steel by about 45%, 35%, and 44%, and for LYP steel by about 35%, 62%, and 53%, and also increase in the dimensional ratio of stiffness, strength and increased the energy absorption of the system for A36 steel by 51%, 36% and 38% respectively and for LYP steel by 52%, 46% and 49% respectively.

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).

بررسی رفتار دیوار برشی فولادی متشکل از دو ورق تخت و یک ورق موجدار با فولاد LYP

لیلا حسینزاده*

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

بهنام بابایی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

L.hosseinzadeh@iaut.ac.ir

تاریخ پذیرش: 05 آذر 1402

تاریخ دریافت: 10 مرداد 1402

چکیده

دیوار برشی فولادی، سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی است که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. دیوارهای برشی فولادی به دو صورت دیوارهای سخت شده و سخت نشده کاربرد دارند. هرچند رفتار پس کمانشی دیوار برشی فولادی باعث باربری پس از کمانش می‌شود، اما همواره این کمانش ورق مطلوب نیست. یکی از راه‌حل‌های مفید جهت از بین بردن کمانش جانبی، استفاده از دیوارهای با ورق موجدار است. در این تحقیق رفتار دیوار برشی فولاد متشکل از دو ورق تخت و یک ورق موجدار در دو حالت فولاد معمولی (A36) و فولادی با حد تسلیم پایین (LYP) مطالعه شد. استفاده از فولاد با حد تسلیم پایین، عملکرد لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی را بهبود بخشید. با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت ورق‌ها و نسبت ابعادی‌های مختلف، فولاد LYP، مقادیر سختی، مقاومت و جذب انرژی را حدود 74٪، 51٪ و 36٪ افزایش داد. میزان تاثیر افزایش ضخامت ورق در پارامتر سختی برای پانل برشی با فولاد A36 بیشتر از فولاد LYP است. افزایش ضخامت ورق‌ها، سختی، مقاومت نهایی و جذب انرژی سیستم را برای فولاد A36 به ترتیب حدود 45٪، 35٪ و 44٪ و برای فولاد LYP حدود 35٪، 62٪ و 53٪ افزایش داد و همین افزایش نسبت ابعادی سختی، مقاومت و جذب انرژی سیستم را برای فولاد A36 به ترتیب 51٪، 36٪ و 38٪ و برای فولاد LYP به ترتیب 52٪، 46٪ و 49٪ افزایش داد.

کلید واژگان: دیوار برشی فولادی، فولاد با حد تسلیم پایین، سختی، مقاومت، جذب انرژی

1- مقدمه

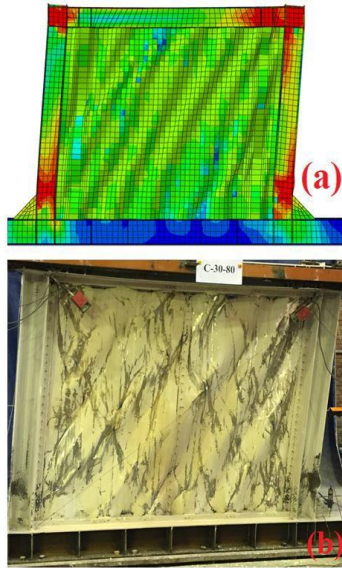
با توجه به خسارت جانی و مالی زیادی که هر ساله در اثر نیروهای زلزله و باد به وجود می آید، محققین همواره در تلاش هستند تا به یک سیستم سازه‌ای مناسب با حداقل خسارت دست یابند. سیستم سازه‌ای دیوار برشی فولادی، سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی است که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. یک قاب با دیوار برشی فولادی، متشکل از تیرها و ستون‌ها با ورق فولادی پرکننده می‌باشد که با اتصالات پیچی و یا جوشی به قاب اطراف خود متصل گشته است. از مزایای کاربرد سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به مشابه بتنی می‌توان به مواردی همچون، کاهش وزن مرده ساختمان و در نتیجه کاهش نیروی زلزله اشاره نمود. این سیستم از نظر سختی برشی از سخت‌ترین سیستم مهاربندی که X شکل می‌باشد سخت‌تر بوده و از مزایای همچون عدم شکست اتصالات به دلیل تعدیل و توزیع تنش‌ها (در مقایسه با تمرکز تنش در محل اتصال مهاربند با تیر و ستون) و امکان تعویض صفحه پس از وقوع زلزله برخوردار است [1]. دیوارهای برشی فولادی به دو صورت دیوارهای برشی سخت شده و سخت نشده کاربرد دارند. هرچند رفتار پس از کمانشی دیوار برشی فولادی باعث برابری پس از کمانش می‌شود، اما همواره این کمانش ورق به ویژه تحت بارهای بهره‌برداری مطلوب نیست. بدنبال تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر در کشورهای مختلف دنیا، ایده و مزایای استفاده از مقاومت پس از کمانش دیوارهای برشی فولادی در بین محققین مطرح شد. نتایج مطالعات در این زمینه نشان می‌دهد که استفاده از ظرفیت پس از کمانش ورق‌های فولادی نه تنها سختی و شکل‌پذیری مناسب و استهلاک انرژی قابل توجهی را برای سیستم به ارمغان می‌آورد بلکه با فراهم آوردن امکان بهره‌مندی از تمام ظرفیت ورق در بارگذاری، هزینه‌ی ساخت و اجرا را که از ضعف‌های اصلی دیدگاه نخست طراحی دیوار برشی فولادی است به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد [2-10]. یکی از راه‌حل‌های مفید و کارآمد جهت از بین بردن ضعف دیوارهای برشی در مقابل کمانش جانبی، استفاده از دیوارهای برشی ساخته شده از ورق موج‌دار می‌باشد. ورق‌های موج‌دار به علت شکل هندسی خود، از سختی هندسی درون صفحه‌ای قابل توجهی نسبت به ورق‌های صاف برخوردار است و به علت وجود خم‌های متعدد در ورق و تبدیل نیروی برون صفحه‌ای به نیروهای درون صفحه‌ای و برعکس در زیر صفحه‌ها، ورق‌های صاف تشکیل دهنده ورق موج‌دار، یکدیگر را مقید نموده و در واقع به نوعی نقش سخت کننده را ایفا می‌کند. استفاده از صفحات موج‌دار به عنوان اعضای مقاوم اولین بار در اواخر دهه 1930 توسط برگمن توسعه یافت [11]. پس از یافته‌های برگمن، کمانش برشی صفحات موج‌دار

به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفت [12-16]. چندین محقق رفتار هیستریسیس دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار را به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها قابلیت این نوع دیوارها را به عنوان یک سیستم موفق تحت بارگذاری جانبی تأیید کردند [17-22]. چودو و همکاران [23] دیوار برشی موج دار سینوسی را به صورت افقی و عمودی مورد بررسی قرار داد، نتایج نشان داد که در نسبت‌های ابعادی کمتر 1 دیوار برشی موج دار افقی عملکرد بهتری دارد، ولی در مقایسه با نسبت ابعادی بیشتر از 1 دیوار برشی موج‌دار عمودی افزایش قابل ملاحظه مقاومت و انرژی را دارد و همینطور کمانش محلی در این نوع دیوارها بیشتر می‌شود. تانگ و همکاران [24 و 25]، رفتار دیوارهای برشی فولادی دبل موج‌دار که با استفاده از پیچ و مهره‌های اتصال مونتاژ شده‌اند را بررسی و با توسعه مدل‌های عددی نشان داد که مقاومت برشی دیوارهای دبل بسیار بیشتر از دیوار برشی فولادی معادل با ورق تکی است. بروجردیان و همکاران [26]، رفتار دیوار برشی فولادی مرکب از ورق‌های تخت و موج‌دار را بررسی کردند محققین رفتار دیوار برشی فولادی با فولاد با تنش حد تسلیم پایین (LYP) را تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای بررسی کردند. نتایج ظرفیت اتلاف انرژی بالا، شکل‌پذیری خوب و مکانیسم تغییر شکل مطلوب را نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که چگونگی اتصالات تاثیر زیادی در بهبود سختی اولیه نمونه‌ها ندارند [27-30]. در این تحقیق رفتار دیوار برشی فولاد با در نظر گرفتن یک دهانه دیوار برشی فولادی با ابعادی نزدیک به موارد کاربردی در یک سازه ساختمانی متعارف و پانل برشی متشکل از دو ورق تخت و یک ورق موج‌دار در دو حالت فولاد معمولی (ASTM A36) و فولادی با حد تسلیم پایین (LYP) مورد بررسی قرار گرفت.

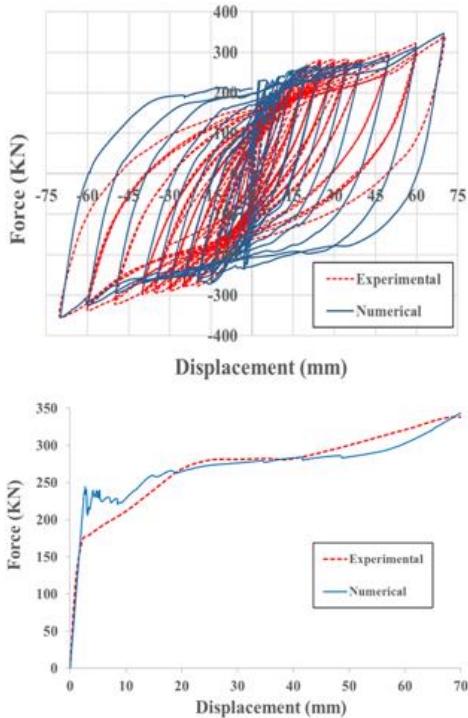
2- روش تحقیق

در این مطالعه، رفتار سیستم دیوار برشی فولادی، متشکل از دو ورق تخت و یک ورق موج‌دار برای صفحه پرکننده در دو حالت ورق‌های از جنس فولاد LYP و فولاد معمولی A36، به صورت عددی بررسی شد. نمای شماتیک دیوار برشی فولادی انتخابی در شکل 1 نشان داده شده است. ورق‌های موج دار پانل برشی، ورق موج‌دار دوزنقه‌ای با زاویه موج 30 درجه و به صورتی افقی داخل قاب قرار گرفته است. برای بررسی تاثیر فولاد LYP بر رفتار سیستم دیوار، با حفظ مقاومت تسلیم پانل برشی، ضخامت ورق‌های با فولاد LYP به نسبت $F_{y(A36)}/F_{y(LYP)}$ افزایش یافت. که در آن $F_{y(A36)}$ و $F_{y(LYP)}$ به ترتیب تنش تسلیم فولاد A36 و فولاد LYP هستند. با توجه به مقدار تنش تسلیم هر دو نوع فولاد نسبت تنش‌ها برابر 2.5 است، بنابراین برای مدل‌های با فولاد LYP از صفحات با ضخامتی برابر

و نمونه آزمایشگاهی را در انتهای بارگذاری نشان می‌دهد. برای ارزیابی صحت مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی، منحنی هیستریزیس حاصل از آنالیز اجزاء محدود با منحنی هیستریزیس حاصل از آزمایش مقایسه گردید (شکل 3). مقایسه دو نمودار مطابقت خوبی بین پاسخ‌های بدست آمده از دو مدل را نشان می‌دهد.

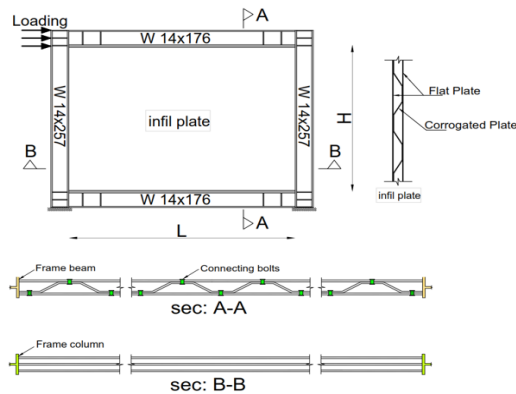


شکل 2- تغییر شکل مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی



شکل 3- مقایسه نتایج مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی

2.5 برابر ضخامت ورق‌های با فولاد A36 استفاده شد. برای ارزیابی تاثیر نسبت ابعادی پانل برشی، مدل‌هایی با نسبت ابعادی (L/H) برابر 1 و 1.5 و 2 انتخاب شد. به این منظور با ثابت نگهداشتن ارتفاع پانل (H) برابر 3 متر طول پانل (L) برابر 3، 4.5 و 6 متر تعیین شد. همچنین برای بررسی اثر ضخامت ورق‌های فولادی، مجموع ضخامت ورق‌های فولادی برای فولاد A36 در سه ضخامت 6، 9 و 12 میلی‌متر انتخاب شد.



شکل 1- نمای شماتیک دیوار برشی فولادی انتخابی

2-2- مدل‌های عددی

جدول 1 مشخصات مدل‌ها را نشان می‌دهد. برای سهولت در شناسایی مدل‌های مورد مطالعه و احتراز از بیان مکرر مشخصات آن‌ها، شناسه‌ای برای هر نمونه تعریف گردید. حرف اول شناسه نوع فولاد را نشان می‌دهد که فولاد معمولی (A36) با حرف A و فولاد LYP با حرف L مشخص شد. قسمت‌های بعدی شناسه به ترتیب مربوط به متغیرهای نسبت ابعادی (L/H) و ضخامت (t) است. لازم به یادآوری است که ضخامت مندرج در جدول مجموع ضخامت سه ورق را نشان می‌دهد.

2-2- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

از مدل‌های اجزاء محدود نمونه‌های آزمایش شده برای صحت‌سنجی و کنترل مدل‌سازی، المان‌های انتخابی، شرایط مرزی و بارگذاری مدل‌های عددی استفاده می‌شود. در این مقاله برای صحت‌سنجی از کار آزمایشگاهی حسین‌زاده و همکاران [21] استفاده شد. نمونه آزمایشگاهی انتخابی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای یک طبقه، یک دهانه و با مقیاس 1/2 است. نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق پرتکل بارگذاری [31] AC154 بارگذاری شد. در مدل‌های اجزاء محدود مساله گسیختگی مصالح و پارگی پانل برشی شبیه‌سازی نشده است. شکل 2 تغییر شکل مدل اجزاء محدود

جدول 1- مشخصات مدل‌های مورد مطالعه

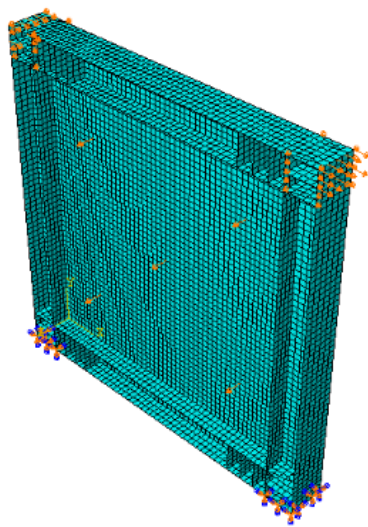
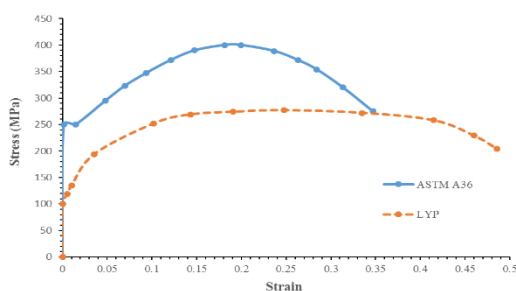
Model	L (m)	L/H	t (mm)	steel
A-1-6	3.00	1.0	6	A36
A-1-9	3.00	1.0	9	A36
A-1-12	3.00	1.0	12	A36
L-1-6*	3.00	1.0	6*2.5	LYP
L-1-9*	3.00	1.0	9*2.5	LYP
L-1-12*	3.00	1.0	12*2.5	LYP
A-1.5-6	4.50	1.5	6	A36
A-1.5-9	4.50	1.5	9	A36
A-1.5-12	4.50	1.5	12	A36
L-1.5-6*	4.50	1.5	6*2.5	LYP
L-1.5-9*	4.50	1.5	9*2.5	LYP
L-1.5-12*	4.50	1.5	12*2.5	LYP
A-2-6	6.00	2.0	6	A36
A-2-9	6.00	2.0	9	A36
A-2-12	6.00	2.0	12	A36
L-2-6*	6.00	2.0	6*2.5	LYP
L-2-9*	6.00	2.0	9*2.5	LYP
L-2-12*	6.00	2.0	12*2.5	LYP

2-3- شرایط مرزی و بارگذاری

در مدل‌ها، درجات آزادی فعال در گره‌های تراز سقف، درجات آزادی انتقالی داخل صفحه و چرخش حول محورها است و برای مهار جابجایی خارج از صفحه، درجه آزادی انتقالی خارج از صفحه گره‌ها در ناحیه اتصال تیر و ستون بسته شده است. تکیه‌گاه‌ها گیردار است و اتصالات صفحات تخت و موج‌دار به یکدیگر گیردار فرض شد و از اتصالات پیچ برای ساده‌سازی محاسبات صرف‌نظر گردید. انالیز مدل‌ها بر اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی شامل غیرخطی هندسی و مصالح انجام شده است. در این تحقیق به جای اعمال نیروی جانبی، از تغییر مکان جانبی استفاده شد. بارهای جانبی از نوع جابجایی به ناحیه اتصال تیر و ستون به صورت تدریجی وارد شد و تا تغییر مکان معادل دریفت مجاز 2/5 درصد مطابق [32] ASCE 7-10 افزایش یافت. در شکل 4 مدل اجزا محدود نمونه با نسبت ابعادی $L/H=1$ نشان داده شده است.

2-4- مشخصات مصالح

جنس مصالح مدل‌ها از فولاد معمولی (ASTM A36) و فولاد با حد تسلیم پایین (LYP) انتخاب شدند. فولاد مصرفی در اعضای قاب فولاد A36 و جنس ورق‌های صفحه پرکننده از فولاد A36 و LYP می‌باشد. در شکل 5 منحنی‌های تنش - کرنش هر دو نوع فولاد نشان داده شده است. مدول الاستیسیته فولاد $E=200$ GPa و ضریب پواسون $\nu=0.3$ است.

شکل 4- مدل اجزا محدود نمونه با نسبت ابعادی $L/H=1$ 

شکل 5- منحنی تنش-کرنش مصالح

2-5- معرفی پارامترهای لرزه‌ای

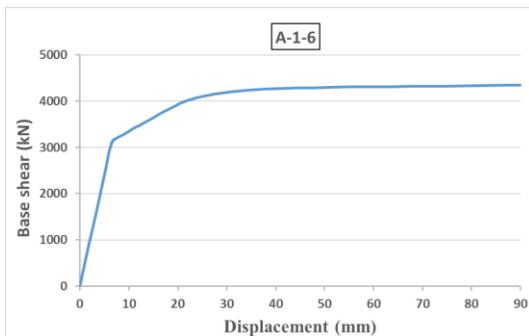
اصولاً معیارهای سنجش رفتار لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای بیشتر کیفی هستند. ولی برای بیان کمی مناسب بودن رفتار یک سیستم پارامترهای مختلفی معرفی شده‌اند که با نام پارامترهای لرزه‌ای شناخته می‌شوند. با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی و پس از عملیات

معادل اولین نقطه تسلیم، Δ_y و V_y تغییرمکان و نیروی برشی نقطه تسلیم ایده‌آل، Δ_e و V_e تغییرمکان و نیروی برشی معادل رفتار الاستیک و Δ_{max} حداکثر تغییرمکان سیستم که از ضوابط آیین‌نامه‌ای تعیین می‌شود. در ادامه پارامترهای مهم لرزه‌ای معرفی می‌گردد.

- K ، سختی الاستیک برابر است با شیب اولیه منحنی ظرفیت و از رابطه $K = \frac{V_y}{\Delta_y}$ قابل محاسبه است.

1-3- تاثیر نوع فولاد پانل برشی

به منظور بررسی تاثیر نوع فولاد در توزیع تنش، کانتور تنش فون میسر در انتهای بارگذاری برای دو نمونه با فولاد متفاوت در شکل 8 نشان داده شده است. همچنین شکل 9، منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه‌های انتخابی ($L/H=1$) با دو نوع فولاد متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد در پانل برشی با فولاد LYP به منظور حفظ مقاومت تسلیم نمونه‌ها در دو حالت A36 و LYP، ضخامت ورق‌های LYP به نسبت تنش حد تسلیم فولاد A36 و LYP ضرب شد. بنابراین افزایش سختی نمونه‌های با فولاد LYP در مقایسه با فولاد A36 بدیهی است. برای تعیین میزان تاثیر تغییر نوع فولاد، در جدول 3 مقادیر مدل‌های با فولاد LYP به مقدار متناظر نمونه‌های با فولاد A36 تقسیم شده است. اعداد بزرگتر از یک جدول بیانگر این است که استفاده از فولاد با حد تسلیم پایین، پارامترهای لرزه‌ای را بهبود می‌بخشد. میزان تاثیر فولاد LYP بر روی همه پارامترها یکسان نیست. استفاده از فولاد LYP در نمونه‌های با $L/H=1$ ، سختی، مقاومت نهایی و جذب انرژی سیستم را به طور میانگین به ترتیب 73٪، 44٪ و 29٪ افزایش می‌دهد و همچنین ضریب رفتار را به طور میانگین حدود 87 درصد بهبود می‌بخشد.



شکل 7- منحنی ظرفیت مدل A-1-6

پس پردازش بر روی نتایج تحلیل‌های عددی، منحنی‌های ظرفیت ترسیم می‌شود. این منحنی‌ها بیانگر تغییرمکان بالاترین نقطه مدل در مقابل نیروی برشی ایجاد شده در سیستم است. پارامترهای لرزه‌ای از منحنی‌های ظرفیت استخراج می‌شود. شکل 6 منحنی ظرفیت واقعی و منحنی ایده‌آل دوخطی را نشان می‌دهد. پارامترهای نشان داده شده روی منحنی عبارتند از Δ_s و V_s به ترتیب تغییرمکان و نیروی برشی

E-، انرژی جذب شده برابر است با مساحت زیر منحنی ظرفیت

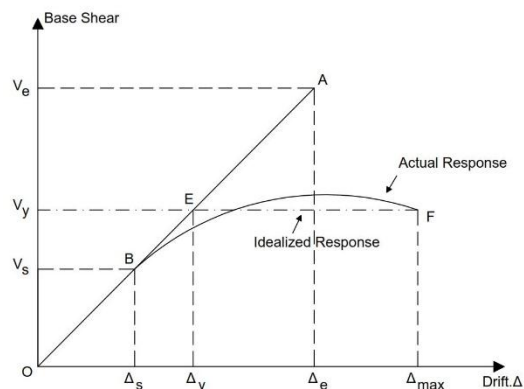
μ -، ضریب شکل‌پذیری برابر است با نسبت حداکثر تغییر مکان به تغییرمکان نظیر نقطه تسلیم، $\mu = \Delta_{max} / \Delta_y$

Ω -، ضریب اضافه مقاومت برابر است با نسبت نیروی برش نقطه تسلیم به نیروی برش اولین نقطه تسلیم، $\Omega = \frac{V_y}{V_s}$

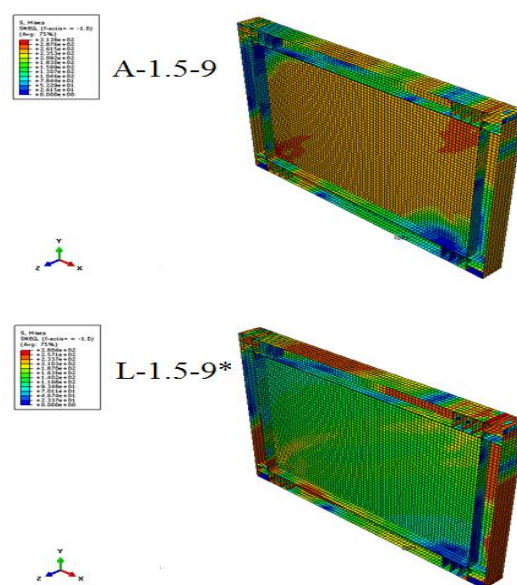
R -، ضریب رفتار برابر است با نسبت نیروی برش معادل رفتار الاستیک به نیروی برش اولین نقطه تسلیم، $R = \frac{V_e}{V_s}$

3- تجزیه و تحلیل نتایج

پس از اتمام مدلسازی و آنالیز نمونه‌ها، عملیات پس پردازش بر روی نتایج حاصل از نرم‌افزار انجام شد و منحنی‌های ظرفیت هر نمونه ترسیم گردید. شکل 7 منحنی ظرفیت مدل A-1-6 را نشان می‌دهد در قسمت‌های بعدی منحنی ظرفیت تمام مدل‌ها به تفکیک متغیر مورد بررسی نشان داده می‌شود. در جدول 2 پارامترهای لرزه‌ای مستخرج از منحنی‌های ظرفیت محاسبه گردید.



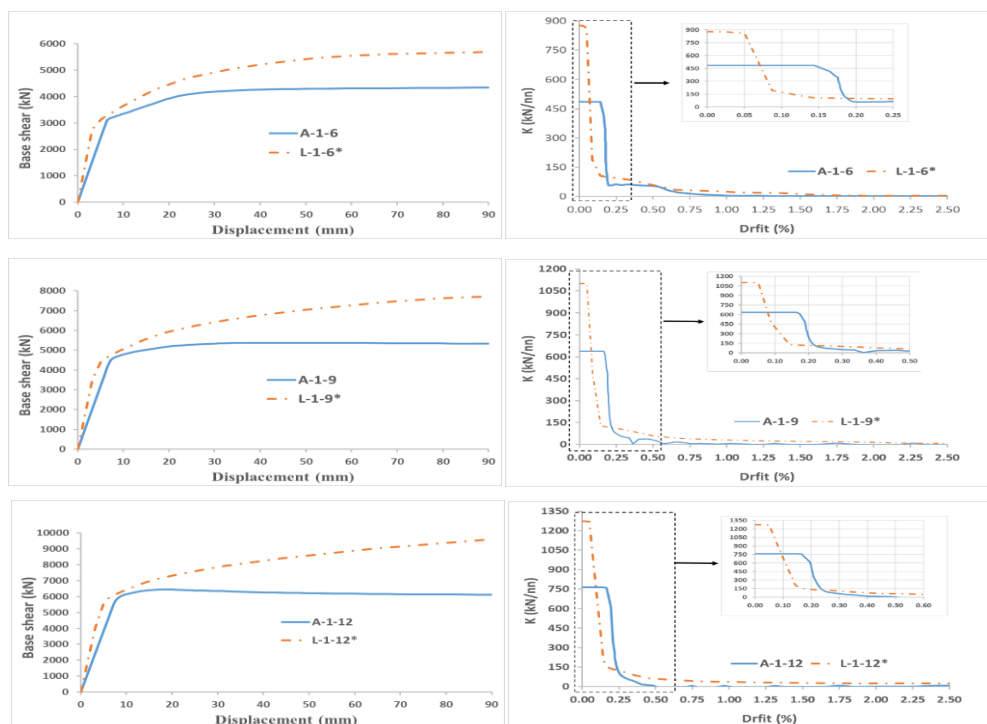
شکل 6- منحنی رفتار واقعی و منحنی ایده‌آل دو خطی



شکل 8- کانتور تنش فون میسز نمونه‌های انتخابی

جدول 2- پارامترهای لرزه‌ای مدل‌های عددی

Model	K (kN/mm)	Vu (kN)	E (kN.m)	μ	Ω	R
A-1-6	485.0	4346.1	361.1	10.15	1.43	6.17
A-1-9	636.2	5324.4	459.1	10.87	1.22	5.52
A-1-12	764.5	6125.5	541.7	11.36	1.07	5.03
A-1.5-6	656.2	5366.7	447.4	11.13	1.27	5.71
A-1.5-9	870.8	6655.4	582.1	11.91	1.07	5.13
A-1.5-12	1052.9	7993.5	717.8	11.99	0.99	4.82
A-2-6	800.9	6183.2	516.3	11.79	1.12	5.22
A-2-9	1057.4	7674.8	673.1	12.54	0.97	4.76
A-2-12	1271.0	9344.0	854.8	12.38	0.90	4.48
L-1-6*	875.9	5694.7	448.0	14.00	2.05	10.10
L-1-9*	1100.3	7731.3	594.2	12.95	2.21	10.32
L-1-12*	1272.7	9631.1	730.2	12.03	2.38	10.64
L-1.5-6*	1210.4	7172.4	581.1	15.36	1.87	9.77
L-1.5-9*	1528.1	10543.5	803.7	13.19	1.88	8.84
L-1.5-12*	1773.0	13033.5	994.9	12.38	2.31	10.53
L-2-6*	1453.0	8463.6	709.4	15.62	1.63	8.73
L-2-9*	1813.5	12921.0	991.9	12.77	2.24	10.40
L-2-12*	2086.7	15725.6	1213.3	12.08	2.37	10.72

شکل 9- منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه های انتخابی ($L/H=1$)

جدول 3- نسبت پارامترهای لرزه‌ای نمونه‌های انتخابی (مقیاس شده به مقادیر متناظر با A36)

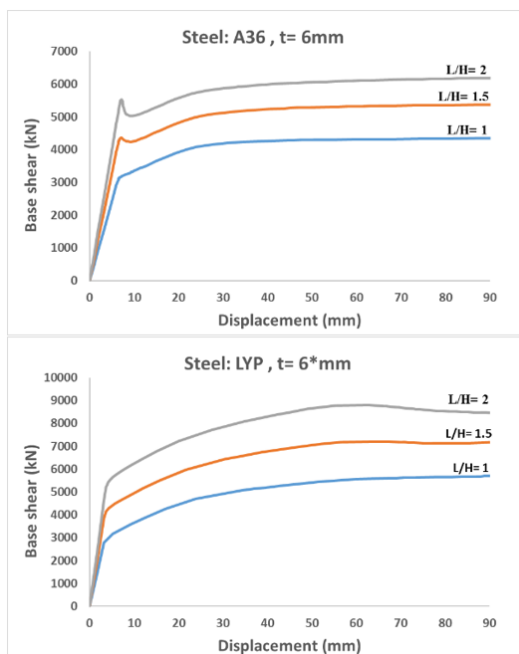
Model	K	Vu	E	Ω	R	μ
L-1-6*	1.81	1.31	1.24	1.43	1.64	1.38
L-1-9*	1.73	1.45	1.29	1.82	1.87	1.19
L-1-12*	1.66	1.57	1.35	2.22	2.12	1.06

3-2- تاثیر ضخامت ورق‌ها

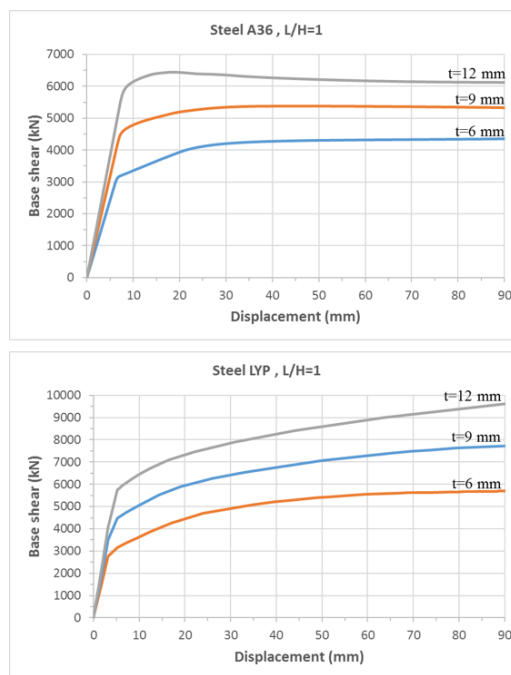
افزایش می‌یابد که برای مدل‌های متناظر با فولاد LYP به ترتیب 45٪، 69٪ و 63٪ است. همچنین در مدل‌های با فولاد A36 با افزایش ضخامت، Ω و R کاهش می‌یابد در صورتی که برای فولاد LYP با افزایش ضخامت Ω و R کاهش می‌یابد.

در شکل 10 منحنی‌های ظرفیت برای مدل‌های با نسبت ابعادی $L/H=1$ و ضخامت متغیر نشان داده شده است. برای تعیین میزان تاثیر افزایش ضخامت ورق‌های پانل برشی، در جدول 4 مقادیر مدل‌های با ضخامت 9 و 12 میلی‌متر به مقدار متناظر نمونه‌های با ضخامت 6 میلی‌متر تقسیم شده است. داده‌های جدول نشان می‌دهد که با افزایش 50 درصدی ضخامت ورق‌ها، مقادیر سختی، مقاومت نهایی و انرژی جذب شده در مدل‌های با فولاد A36 به ترتیب 23٪، 31٪ و 27٪ افزایش می‌یابد که این مقادیر برای فولاد LYP به ترتیب 26٪، 36٪ و 33٪ است و با دوبرابر کردن ضخامت ورق در مدل‌های A36 سختی، مقاومت و انرژی جذب شده به ترتیب 58٪، 41٪ و 50٪

و 38٪ افزایش یافت و با دو برابر شدن طول پانل برشی، سختی برای فولاد A36 و LYP به ترتیب 65٪ و 66٪ افزایش داشت. در مدل‌های A-1-5-6 و A-2-6 نسبت به مدل A-1-6 مقاومت نهایی به ترتیب حدود 23٪ و 42٪ افزایش یافت و این مقادیر برای مدل‌های متناظر با فولاد LYP به ترتیب 26٪ و 49٪ است. تاثیر نسبت ابعادی بر روی پارامتر جذب انرژی نیز افزایشی است و با افزایش مقدار L/H از 1 به 1.5 و 2 جذب انرژی به ترتیب حدود 24٪ و 43٪ برای فولاد A36 و 30٪ و 58٪ برای فولاد LYP افزایش می‌یابد.



شکل 11- منحنی ظرفیت نمونه‌های با L/H متفاوت



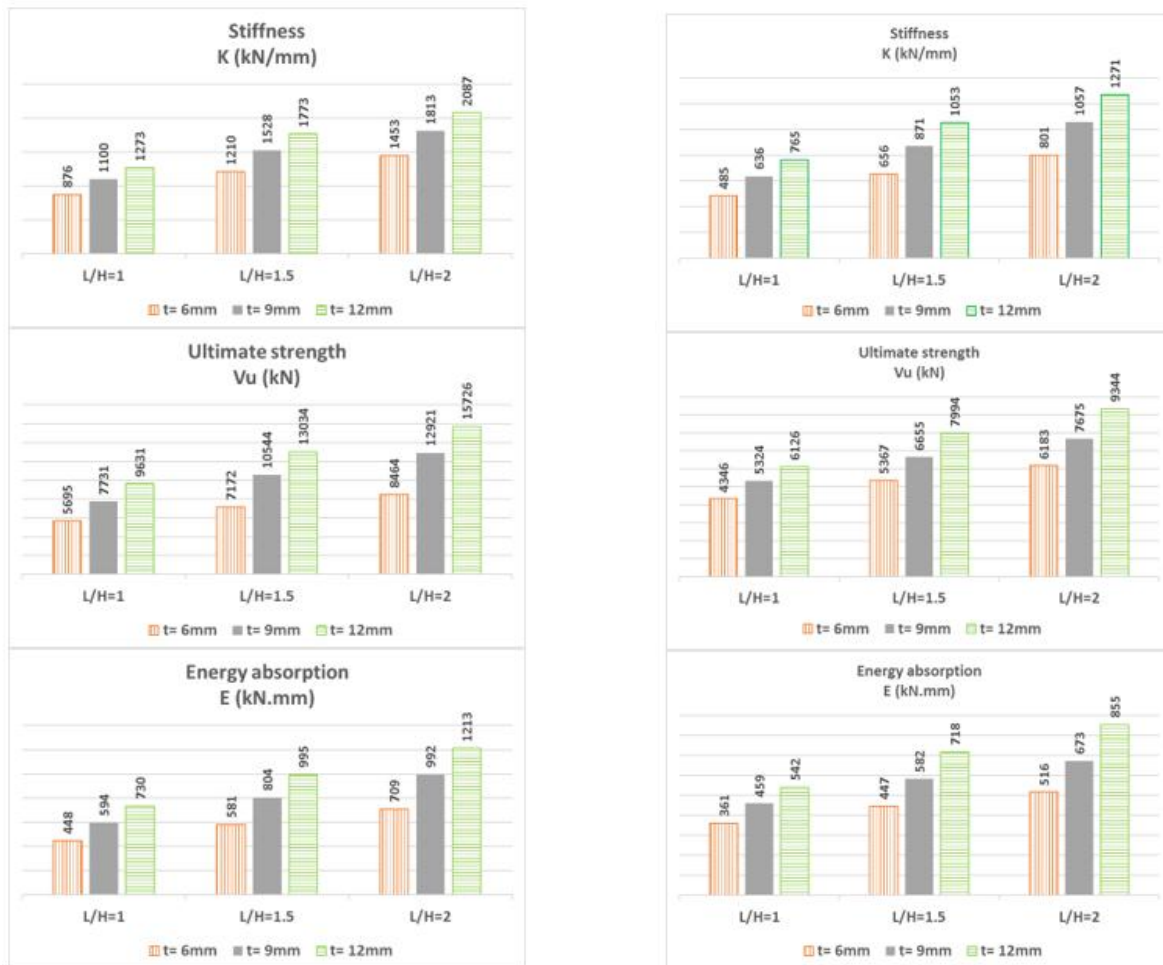
شکل 10- تاثیر ضخامت ورق‌ها بر منحنی ظرفیت نمونه‌های با L/H=1

3-3- تاثیر نسبت ابعادی (L/H)

در شکل 11 منحنی ظرفیت مدل‌های با فولاد A36 و LYP با نسبت ابعادی متفاوت مقایسه شده است. در نمونه‌های با ضخامت ثابت با وجود این که با افزایش طول پانل برشی، لاغری دیوار افزایش می‌یابد ولی پارامترهای لرزه‌ای نه تنها کاهش نیافته بلکه عملکرد لرزه‌ای دیوار بهبود می‌یابد. برای بررسی میزان تاثیر نسبت ابعادی در سختی، مقاومت نهایی و جذب انرژی، نمودارهای مقایسه‌ای در شکل‌های 12 و 13 ترسیم شد. این دو شکل اثر تغییر ضخامت و نسبت ابعادی را نشان می‌دهد. با افزایش 50 درصدی طول پانل برشی در مدل‌های با فولاد A36 و LYP سختی دیوار به ترتیب 35٪

جدول 4: تاثیر تغییرات ضخامت بر پارامترهای لرزه‌ای نمونه‌های انتخابی (مقیاس شده به مقادیر متناظر با t=6mm)

Model	K	Vu	E	μ	Ω	R
A-1-6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
A-1-9	1.31	1.23	1.27	1.07	0.85	0.89
A-1-12	1.58	1.41	1.50	1.12	0.75	0.81
L-1-6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
L-1-9	1.26	1.36	1.33	0.93	1.07	1.02
L-1-12	1.45	1.69	1.63	0.86	1.16	1.05



شکل 11- نمودارهای مقایسه‌ای مدل‌های با فولاد A36

شکل 12- نمودارهای مقایسه‌ای مدل‌های با فولاد LYP

در این مقاله رفتار دیوار برشی فولادی با پانل برشی متشکل از ورق‌های ترکیبی موج‌دار و تخت بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل 18 مدل عددی نبه شرح زیر خلاصه می‌شود:

- استفاده از فولاد با حد تسلیم پایین، عملکرد لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی را ارتقا می‌دهد. میزان تاثیر فولاد LYP بر روی همه پارامترها یکسان نیست. استفاده از فولاد LYP در نمونه‌های با $L/H=1$ ، سختی، مقاومت نهایی و جذب انرژی سیستم را به طور

میانگین به ترتیب 73٪، 44٪ و 29٪ افزایش می‌دهد و همچنین ضریب رفتار را به طور میانگین حدود 87 درصد بهبود بخشید. با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت ورق‌ها و نسبت ابعادی مختلف، فولاد LYP، مقادیر سختی، مقاومت و جذب انرژی را حدود 74٪، 51٪ و

4 - نتیجه گیری

36٪ افزایش داد. بیشترین تاثیر فولاد با حد تسلیم پایین در پارامتر ضریب رفتار می‌باشد که حدودا 94٪ افزایش مشاهده شد.

- با افزایش 50 درصدی ضخامت ورق‌ها، مقادیر سختی، مقاومت نهایی و انرژی جذب شده در مدل‌های با فولاد A36 به ترتیب 31٪،

Proceedings of the 17th Czech and Slovak International Conference on Steel Structures and Bridges, Bratislava, Slovakia, 1994.

[4] Alinia, M.M, Dastfan, M, Cyclic behavior, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels, Journal of Constructional Steel Research, 2006; 63: 554-563.

[5] Sabouri-Ghomi, S, Sajjadi, R, Experimental and theoretical studies of steel shear wall with and without stiffeners, Journal of Constructional Steel Research, 2012; 75: 152-159.

[6] Alavi, E, Nateghi, F, Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation, Journal of Constructional Steel Research, 2013; 89: 9-20.

[7] Shojaeifar, H, Maleki, A, Lotfollahi-Yaghin, M.A, Improving the seismic resistance of structure using FRP/steel shear walls, International Journal of Engineering, 2020; 33(1): 55-67.

[8] Khaloo, A, Ghamari, A, Foroutani, M, On the design of stiffened steel plate shear wall with diagonal stiffeners considering the crack effect, Structures, 2021; 31: 828-841. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.027>.

[9] Ebadi-Jamkhaneh, M, Kontoni, D-P N, Numerical finite element investigation of thin steel shear walls retrofitted with CFRP layers under reversed cyclic loading Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2022; 62(7): 1-10. <https://doi.org/10.1007/s41024-022-00200-2>.

[10] Maleki, A, Donchev, T, Hadavinia, H, Limbachiya, M, Improving the seismic resistance of structure using FRP/steel shear walls, The 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 1 January, 2012.

[11] Bergman, S, Reissner, H, Neuere probleme aus der flugzeugstatik-über die knickung von wellblechstreifen bei schubbeanspruchung, Zeitschrift für Flugzeugtechnik und Motorluftschiffahrt. 1929; 20(18): 475-81.

[12] Elgaaly M, Hamilton RW, Seshadri A, Shear strength of beam with corrugated webs, ASCE, Journal of Structural Engineering, 1996; 122(4): 390-398.

23٪ و 27٪ افزایش می‌یابد که این مقادیر برای فولاد LYP به ترتیب 26٪، 36٪ و 33٪ است و با دوبرابر کردن ضخامت ورق در مدل‌های A36 سختی، مقاومت و انرژی جذب شده به ترتیب 58٪، 41٪ و 50٪ افزایش می‌یابد که برای مدل‌های متناظر با فولاد LYP به ترتیب 45٪، 69٪ و 63٪ است. همچنین در مدل‌های با فولاد A36 با افزایش ضخامت، Ω و R کاهش می‌یابد در صورتی که برای فولاد LYP با افزایش ضخامت Ω و R کاهش می‌یابد.

- میزان تاثیر افزایش ضخامت ورق در پارامتر سختی برای پانل برشی با فولاد A36 بیشتر از فولاد LYP است. افزایش ضخامت ورق‌ها با در نظر گرفتن نسبت ابعادی‌های مختلف، سختی سیستم را برای فولاد A36 حدود 45٪ و برای فولاد LYP حدود 35 درصد افزایش داد.

- افزایش ضخامت ورق‌ها با در نظر گرفتن نسبت ابعادی‌های مختلف، مقاومت نهایی و جذب انرژی سیستم را برای فولاد A36 به ترتیب حدود 35٪ و 44٪ و برای فولاد LYP حدود 62٪ و 53٪ افزایش می‌دهد.

- با افزایش نسبت ابعادی (L/H)، عملکرد لرزه‌ای دیوار بهبود می‌یابد. تاثیر افزایش L/H در مدل‌های با فولاد LYP بیشتر از فولاد A36 است.

- افزایش نسبت ابعادی با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف، سختی، مقاومت و جذب انرژی سیستم را برای فولاد A36 به طور میانگین به ترتیب 51٪، 36٪ و 38٪ افزایش داد.

- افزایش نسبت ابعادی با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف، سختی، مقاومت و جذب انرژی سیستم را برای فولاد LYP به طور میانگین به ترتیب 52٪، 46٪ و 49٪ افزایش داد.

مراجع

- [1] صبوری، سعید، سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی، نشر انگیزه، چاپ اول، 1380.
- [2] Elgaaly, M, Caccese, V, Post-buckling Behavior of Steel-Plate Shear Walls under Cyclic Loads 588-605., ASCE, Journal of Structural Eng., 1993; 119(2):
- [3] Xue, M, Lu, Le-Wu, Monotonic and Cyclic Behavior of Infilled Steel Shear Panels,

- with Trapezoidally Corrugated Webs, AISC, Engineering Journal, 1998; 35(1): 1–11. <https://doi.org/10.62913/engj.v35i1.694>
- [14] Bergfelt, A, Leiva, L, Shear buckling of trapezoidally corrugated girders webs, Chalmers University of Technology Publ.s., 1986; 49. <https://doi.org/10.5169/seals-38283>
- [15] Abbas, HH, Sause, R, Driver R, Shear strength and stability of high performance steel corrugated web girders, Proceedings - Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council, 2002; 361–87.
- [16] Hosseinzadeh, L, Mofid, M, Aziminejad, A, Emami, F, Elastic interactive buckling strength of corrugated steel shear wall under pure shear force, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017; 26(8), e1357.
- [17] Stojadinovic, B, Tipping, S, Structural Testing of Corrugated Sheet Steel Shear Walls, Nineteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, U.S.A, October 14, 2008.
- [18] Emami, F, Mofid, M, On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel plate <https://doi.org/10.1002/stco.202200048>.
- [23] C. Dou, Y. Pi, W. Gao, Shear resistance and post-buckling behavior of corrugated panels in steel plate shear walls, Thin-Walled Structures, 2018; 131: 816–826.
- [24] Tong, J, Guo, Y, Zuo, J, Goa, J, Ultimate shear resistance and post-ultimate behavior of double corrugated-plate shear walls. Journal of Constructional Steel Research, 2020; 165: 105895. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105895>.
- [25] Tong, J, Guo, Y, Zuo, J, Goa, J, Experimental and numerical study on shear resistant behavior of double-corrugated-plate shear walls, Thin-Walled Structures, 2020; 147: 106485. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106485>
- [26] Broujerdian, V, Ghamari, A, Abbaszadeh, A, Introducing an efficient compound section for steel shear wall using flat and corrugated plates, Structures, 2021; 33: 2855-2871. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.027>
- [13] Elgaaly M, Seshadri, A, Steel Built-up Girders shear walls, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2012; 23 (2): 94–104.
- [19] Emami, F, Mofid, M, Vafai, A, Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel plate shear walls, Eng. Struct., 2013; 48: 750–762.
- [20] Bahrebar, M, Zaman Kabir, M, Zirakian, T, Hajsadeghi, M, Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls, Journal of Constructional Steel Research, 2016; 122: 584-594.
- [21] Hosseinzadeh, L, Mofid, M, Emami, F, Experimental investigation on the behavior of corrugated steel shear wall subjected to the different angle of trapezoidal plate, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017; 26(17), e1390.
- [22] Hosseinzadeh, L, Ghamari, A, Investigation of the effect of trapezoidal infill plate angle on the behavior of the corrugated steel shear walls – An experimental and numerical study, Steel Construction, 2023; 17(1): 43-52.
- [27] Nakashima, M, Strain-Hardening Behavior of Shear Panels Made of Low-Yield Steel. I: Test, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995; 121: 1742-1749.
- [28] Tadeh Zirakian, a, Jian Zhang, b, Structural performance of unstiffened low yield point steel plate shear walls, Journal of Constructional Steel Research, 2015; 112 :40-50.
- [29] Gorji Azandariani M, Gholhaki M, Kafi M, Experimental and numerical investigation of low-yield-strength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading, Eng Struct, 2020; 203:109866.
- [30] Hosseinzadeh, L, Kontoni, D-P N, Babaei, B, Investigation of the Behavior of Steel Plate Shear Walls Considering Double Corrugated Low-Yield-Point Steel Infill Plate, International Journal of Civil Engineering, 2023; 138. <https://doi.org/10.1007/s40999-023-00855-z>

[31] AC 154, Cyclic racking shear tests for metal-sheathed shear walls with steel framing, ICC Evaluation Service, INC., 2008. www.icc-es.org

[32] ASCE, SEI/ASCE 7-10, Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers. Virginia, 2013, <https://doi.org/10.1061/9780784412916>.