

Evaluation of capacity and performance of composite shear walls with T-shaped stiffeners

H. H. Zarrintala¹, A. Maleki^{2*}, M. A. Lotfollahi-Yaghin³

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Maragheh branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

3- Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ABSTRACT

Composite steel sheet shear wall (CSPSW) is a relatively new structural system that has been proposed to improve the performance of steel sheet shear walls by adding one or two layers of concrete wall to the filler plate. In addition, the buckling of the filler steel sheet has a significant negative effect on the shear strength and energy dissipation capacity of general systems. Accordingly, in this study, using the finite element method (FE), the performance and behavior of composite steel shear walls using T-shaped stiffeners to prevent buckling of the filler steel sheet and increase the capacity of the CSPSW system have been investigated. In this paper, after modeling the shear walls of composite steel sheets with finite element methods and calibrating the models with experimental results, the effect of parameters such as the type of hardener including vertical, horizontal, diagonal and a combination of T-shaped stiffeners and its effect on the final capacity, the buckling of the sheet plates, the von Mises stress and the failure states have been investigated. The results show that the arrangement of vertical and horizontal stiffeners does not have a significant effect on the capacity and performance of CSPSW. Also, the use of vertical or horizontal stiffeners does not significantly affect the capacity and performance of CSPSW. On the other hand, the use of diagonal stiffeners potentially affects the performance of CSPSW and increases the capacity of steel shear walls by up to 25%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 August 2021

Revise Date: 18 December 2021

Accept Date: 28 January 2022

Keywords:

Composite steel shear walls,
system performance,
T-shaped stiffeners,
final capacity,
Finite element method.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.300411.2537>

*Corresponding author: Ahmad Maleki

Email address: A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

ارزیابی ظرفیت نهایی و عملکرد دیوارهای برشی کامپوزیت با سخت‌کننده‌های T- شکل

هادی زرین‌طلا^{۱*}، احمد ملکی^{۲*}، محمدعلی لطف‌اللهی یقین^۳

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

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

دیوار برشی ورق فولادی کامپوزیت (CSPSW) یک سیستم سازه‌ای نسبتاً جدید است که برای بهبود عملکرد دیوارهای برشی صفحه فولادی با افزودن یک یا دو لایه دیوار بتونی به صفحه پرکننده پیشنهاد شده است. بعلاوه، کمانش ورق فولادی پرکننده تأثیر منفی قابل توجهی بر مقاومت برشی و ظرفیت اتلاف انرژی سیستم دیوار برشی فولادی دارد. بر این اساس، در این مطالعه با استفاده از روش المان محدود، عملکرد و رفتار دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت با استفاده از سخت‌کننده‌های T-شکل برای جلوگیری از کمانش ورق فولادی و افزایش ظرفیت سیستم CSPSW استفاده شده است. در این مقاله، پس از مدلسازی دیوار برشی فولادی کامپوزیت با روش المان محدود و کالیبراسیون مدل‌ها با نتایج تجربی، اثر پارامترهایی مانند نوع سخت‌کننده و تعداد سخت‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. نوع چیدمان سخت‌کننده‌ها شامل عمودی، افقی، مورب و ترکیبی از سخت‌کننده‌های T-شکل است. برای ارزیابی و بررسی تأثیر نوع چیدمان سخت‌کننده‌ها، ظرفیت نهایی، کمانش صفحات ورق، تنش فون میزس و حالت‌های خرابی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که نحوه چیدمان سخت‌کننده‌ها عمودی و افقی تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت و عملکرد CSPSW ندارد. همچنین، به طوری که استفاده از سخت‌کننده‌های عمودی یا افقی تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت و عملکرد CSPSW ندارد. از طرف دیگر، استفاده از سخت‌کننده‌های مورب به طور بالقوه بر عملکرد CSPSW تأثیر گذاشته و ظرفیت دیوارهای برشی فولادی را تا ۲۵٪ افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی کامپوزیت، عملکرد سیستم، سخت‌کننده‌های T-شکل، ظرفیت نهایی، روش المان محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.300411.2537	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.300411.2537	۱۴۰۱/۰۸/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۰۸	۱۴۰۰/۱۱/۰۸	۱۴۰۰/۰۹/۲۷	۱۴۰۰/۰۵/۲۸
			احمد ملکی		*نویسنده مسئول:	
			A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

دیوار برشی ورق فولادی (SPSW) یک سیستم سازه‌ای متشکل از یک قاب فولادی و یک صفحه فولادی پرکننده است. این سیستم سازه‌ای با ترکیب سختی خمشی عناصر قاب مرزی و میدان کششی توسعه یافته در ورق فولادی در برابر بارهای جانبی مقاومت می‌کند [۱]. بر این اساس، این سیستم سازه‌ای بر اساس رفتار پس از کمانش ورق فولادی طراحی می‌شود [۲-۴]. تحقیقات گسترده گذشته در مورد سیستم SPSW عملکرد رضایت‌بخش آن را در مقاومت در برابر بارهای جانبی ناشی از حرکات شدید زمین یا بارهای باد نشان داده است [۵]. سیستم SPSW علی‌رغم مزایای بی‌شماری که دارد، دارای کاستی‌هایی نیز می‌باشد. اول از همه، مانند سایر سازه‌های فولادی، SPSW نیاز به محافظت در برابر آتش دارد [۶،۷]. علاوه بر این، سختی و کمانش خارج از صفحه از مشکلات عمده در برابر بارگذاری ضربه‌ای هستند. علاوه بر این، کمانش ورق فولادی تأثیر منفی قابل توجهی بر مقاومت برشی کلی سیستم و ظرفیت اتلاف انرژی دارد [۸-۱۰]. دیوار برشی ورق فولادی کامپوزیت (CSPSW) یک سیستم سازه‌ای نسبتاً جدید است که برای بهبود عملکرد دیوارهای برشی ورق فولادی با افزودن یک یا دو لایه دیواره بتونی به ورق فولادی، پیشنهاد شده است. پوشش‌های بتونی با استفاده از گل میخ‌ها یا پیچ و مهره‌ها به صفحه فولادی متصل می‌شوند. نقش پوشش‌های بتنی جلوگیری از کمانش ورق فولادی پرکننده است [۱۱،۱۲]. در مورد CSPSWs فقط با یک لایه بتنی، پوشش بتونی نقش سخت‌کننده‌ها را به عنوان یک دیوار برشی ورق فولادی سخت‌شده بازی می‌کند و مانع از کمانش موضعی و کلی ورق فولادی می‌شود. به این ترتیب، تسلیم برشی ورق فولاد اتفاق می‌افتد که منجر به ظرفیت تحمل جانبی بالاتر می‌شود. بر این اساس، CSPSW سختی جانبی و مقاومت برشی بیشتری ایجاد می‌کند و رفتار انعطاف پذیر بیشتری نسبت به SPSW نشان می‌دهد [۱۳].

ژائو و آستانه اصل [۱۴] اولین مطالعه را روی سیستم سازه‌ای CSPSW انجام دادند. آنها بر اساس شکاف بین پوشش بتونی و عناصر فولادی مرزی، CSPSW ها را به دو گروه تقسیم بندی کردند: با و بدون شکاف. CSPSW های دارای شکاف گاهی اوقات به عنوان دیوارهای برشی کامپوزیت ابتکاری نامیده می‌شوند. ژائو و آستانه اصل [۱۴] دریافتند که هر دو نوع رفتار انعطاف‌پذیر را با عملکرد پس از کمانش ثابت نشان می‌دهند. هنوز هم خسارات کمتری تحت سیکل‌های جابجایی نسبتاً بزرگ برای دیوارهای ابتکاری گزارش شده است. طبق مطالعات ژائو و آستانه اصل [۱۴]، یک راهنمای طراحی در آیین نامه طراحی لرزه‌ای آمریکا وجود دارد [۵]. از زمان گنجاندن این سیستم در AISC آیین نامه طراحی لرزه‌ای آمریکا [۵]، مطالعات مختلفی در مورد جنبه‌های مختلف CSSPW انجام شده است. رهایی و حاتمی [۱۵] با استفاده از رویکردهای تحلیلی و تجربی، تأثیر فاصله پیچ و مهره بر عملکرد سیستم را بررسی کردند. گوا و همکاران [۱۶] دریافت که اتصال صفحه فولادی به پوشش بتونی با استفاده از اتصالات مکانیکی، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی سیستم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، آنها نشان دادند که با وجود نقش اصلی ورق پرکننده در تحمل بارهای جانبی، اثر اعضای فولادی مرزی نیز قابل توجه است. شفایی و همکاران [۱۷] اثرات بازشو بر رفتار دیوارهای برشی ورق فولادی کامپوزیت را مطالعه کرد. آنها نشان دادند که با افزایش دهانه با کاهش سختی الاستیک سیستم و ظرفیت نهایی همراه است. در تحقیق دیگری، عرب زاده و همکاران [۱۸] نشان دادند که وجود باز شوها در گوشه‌های دیوار منجر به کاهش مقاومت بیشتر می‌شود. سیگاری یزد و همکاران [۱۹] یک آزمایش شبه استاتیک روی دیوار برشیهای صفحه فولادی با و بدون سخت کننده های مورب انجام داده است و به این نتایج رسیده است که اضافه کردن سخت کننده ها در بالا بردن بار افقی صفحات فولادی موثر است. علوی و ناطقی [۲۰] تأثیر پیکر بندی سخت کننده روی عملکرد دیوار برشیهای صفحه فولادی مورد آزمایش قرار داده و نشان داده است که سخت کننده های یک جهتی در برابر مقاوم سازی کمانشی از دو جهتی موثرترند. علی نیا و شیرازی [۲۱] تأثیر پیکربندی سخت کننده ها روی عملکرد دیوار برشیهای صفحه فولادی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که سخت کننده های یک جهتی در کمانش مقاومتی نسبت به دوجتهی ها بسیار موثرترند. در تحقیقات یو و همکاران [۲۲]، دیوار برشی های صفحه فولادی با افزودن سخت کننده ها، رفتار چرخه ای بیشتری بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهند. نقش صفحات فولادی عمدتاً در بالا بردن سختی و مقاومت کمانشی سازه در مرحله اول بارگذاری تأثیر می‌گذارند درحالی‌که سخت کننده ها توزیع نیرو بین صفحات فولادی در سازه را بهبود می‌بخشند. گیو و همکاران [۲۳] عملکرد دیوار برشی های فولادی را با اتصالات تیر و ستون نیمه صلب و سخت کننده های عرضی روی صفحات فولادی تحقیق کردند و به این نتیجه رسیدند که سخت کننده های عرضی در بالا بردن مقاومت

کمانشی و ظرفیت بارگذاری دیوار برشی های صفحه فولادی موثرند و این نتیجه با کاهش نسبت ارتفاع به ضخامت صفحات فولادی با حضور سخت کننده های عرضی به دست آمد. گیو و همکاران [۲۴] عملکرد دیوار برشی های فولادی را با اضافه کردن پوشش های بتن مسلح روی صفحات فولادی پر کننده مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به تحقیقات آنها پوششهای بتنی مستعد جدا شدن از صفحات فولادی به دلیل چسبندگی ضعیف آنها می باشد. وی و همکاران [۲۵] یک دیوار برشی صفحه فولادی مهار کننده کمانشی جدیدی که به طور جزئی به تیر و ستون متصل شده بود را مورد بررسی قرار دادند و مکانیزم برشی آن را بر اساس المان محدود نشان دادند. جین و همکاران [۲۶] یک بررسی عددی روی دیوار برشی های صفحه فولادی مهار کننده کمانشی با درزهای مورب انجام دادند و به این نتایج رسیدند که عرض نوارهای فولادی و نسبت عرض به ضخامت فولادی پارامترهای اصلی هستند که بر عملکرد دیواربرشی های صفحه فولادی تاثیر میگذارند. با استفاده از سخت کننده ها دیوار برشی های صفحه فولادی با درزهای مورب رفتار شکل پذیر از خود نشان می دهند.

زمین لرزه یک بلای طبیعی غیره منتظره است که حیات و دارایی انسان را تهدید می کند. بسیاری از معیارهای زمین لرزه مدنظر قرار گرفته تا آثار مخرب آن را کاهش داد. یکی از روشها نصب میراگرها در قسمتهایی از سازه برای کنترل پاسخ دینامیکی است. روش دیگر بهینه سازی اعضاء رایج سازه برای توزیع انرژی در خود سازه می باشد. نتایج آزمایشگاهی و تحلیل های عددی نشان می دهد که ترکیب بتن و فولاد ارزش تئوریک و اهمیت کاربردی در تحمل نیروی برشی را دارد [۱۱،۱۲]. بنابراین دیوار برشی کامپوزیت با صفحه فولادی و بتن مورد توجه قرار گرفته است. در دیوار برشی کامپوزیت، ترکهای کششی را در مناطق کشش ایجاد می کند و در مناطق فشاری محلی در حین چرخش های چرخه ای بزرگ خرد می شود. این ترکها و شکست های خرد شده باعث پوکیدن دیوار و از بین رفتن جدی سختی و کاهش مقاومت می شود. بنابراین بهینه سازی دیوار برشی کامپوزیت برای عملکرد لرزه ای بهتر ضروری است. با طبقه بندی دیوار برشی کامپوزیت بر اساس موقعیت صفحه فولادی این دیوارها به دو دسته تقسیم می شوند که در دیوارهای کامپوزیت نوع اول صفحه فولادی در بیرون پانل بتنی بصورت یک جهتی و در نوع دوم دو جهتی می باشد. محققان آزمایشگاهی روی انواع دیوارها انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که دیوار برشیهای بتن مسلح با صفحات فولادی یک جهتی و دو جهتی، هر دو مقاومت و شکل پذیری عالی از خود نشان می دهند [۲۷-۳۰]. اگر چه آنها معایبی همانند کمانش صفحات فولادی و مشکل اتصال بین دیوار و کف و سایش صفحات فولادی را دارد. از این رو، هدف و نوآوری تحقیق استفاده از سخت کننده های T-شکل در سیستم دیوار برشی فولادی کامپوزیت می باشد. استفاده از سخت کننده های T-شکل باعث جلوگیری از کمانش کلی ورق، بهبود در اتصال ورق به دیوار بتنی و همچنین باعث ایجاد محصور شدگی بیشتر دیوار بتنی می گردد. از لحاظ اجرایی استفاده از سخت کننده ها در دیوار برشی فولادی در تحقیقات گسترده ای استفاده شده است. از این رو، روش متداول در اجزای این نوع سخت کننده ها استفاده از روش جوشکاری می باشد. در این روش لبه های سخت کننده به وسیله جوشکاری به ورق دیوار برشی جوش داده می شود.

با وجود تحقیقات قبلی، برای شناسایی دقیق پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد و طراحی لرزه ای دیوارهای برشی ورق فولاد کامپوزیت، تحقیقات بیشتری لازم است. یکی از مباحث مهمی که نادیده گرفته می شود، جزئیات CSPSW در حضور سخت کننده است. بر این اساس، در مقاله حاضر، تاثیر سخت کننده ها به صورت عددی تحقیق می شود. برای این منظور، ابتدا مجموعه ای از نمونه های CSPSW با و بدون سخت کننده مدل سازی و تحلیل می شود. نتایج نمونه فاقد سخت کننده به عنوان نمونه پایه و مقایسه ای با نمونه های دارای سخت کننده در نظر گرفته شده است. مدل های عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی شده است و برای تأیید نتایج نرم افزار مقایسه ای با نتایج بدست آمده از نمونه های آزمایشگاهی صورت گرفته است. سرانجام، یک مطالعه پارامتریک برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف مانند سخت کننده های T-شکل و تعداد سخت کننده ها بر رفتار کلی سیستم CSPSW انجام شده است.

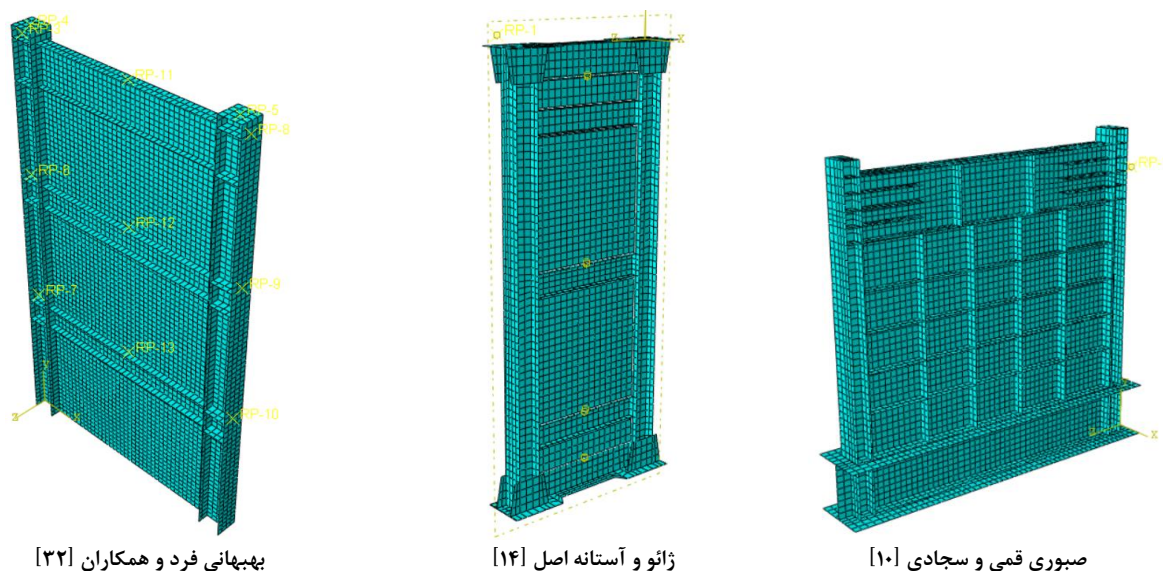
۲- روش عددی

در این بخش، با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS [۳۱] و روش عددی مدل های المان محدود غیر خطی برای پیش بینی رفتار چرخه ای SPSW و CSPSW توسعه داده شده است. برای شبیه سازی عددی رفتار چرخه ای SPSW، نمونه های آزمایشگاهی

بهبهانی فرد و همکاران [۳۲] و صبوری قمی و سجادی [۱۰] برای مدل سازی اجزای محدود به کار گرفته شدند. همچنین، رفتار یکنواخت نمونه آزمایشگاهی CSPSW از ژائو و آستانه اصل [۱۴] برای مدل سازی المان محدود نیز در نظر گرفته شد. در ادامه جزئیات مدل های المان محدود شامل مشخصات مصالح، بارگذاری و شرایط تکیه گاهی، نقص اولیه و مش بندی و همچنین روش تحلیل به کار برده شده ارائه شده است.

۲-۱- مش بندی، نوع المان و نوع تحلیل

در مدل سازی المان محدود CSPSW، از دیوارهای بتونی، المان های مرزی (تیر و ستونها)، ورق فولادی و میلگردهای تقویت کننده استفاده شد. از عناصر شش ضلعی هشت گره ای پیوسته یا جامد (DR3C8) با سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی در هر گره برای مدل سازی دیوارهای بتونی استفاده شد [۳،۳۳]. برای مدلسازی عناصر مرزی و صفحات فولادی از عناصر ۴ گره پیوسته (S4R) دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی در هر گره استفاده شد. عناصر تیرشکل ۲ گره (B31) دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی در هر گره برای مدل سازی میلگردهای تقویت کننده استفاده شد. هر عنصر دارای سه درجه آزادی حرکت در محورهای U1، U2 و U3 و سه درجه آزادی دوران در محورهای UR1، UR2 و UR3 است. این المان ها برای آنالیزهای خطی، غیرخطی، پیچیده، تماسی و پلاستیک مرتبط با تغییر شکل های بزرگ مناسب است. در مطالعه حاضر، آنالیز حساسیت مش بندی برای تعیین مش مناسب مورد بررسی قرار گرفت [۳۴،۳۵]. مش بندی بهینه در مدل ها در ابعاد 25×25 میلی متر برای همه ی مدل های اجزای محدود در نظر گرفته شد هندسه و مش بندی مدل های المان محدود نمونه های آزمایشی بهبودی فرد و همکاران [۳۲] و صبوری قمی و سجادی [۱۰]، ژائو و آستانه اصل [۱۴] در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: هندسه و مش بندی مدل های اجزای محدود.

از تحلیل شبه استاتیکی غیرخطی برای تحلیل مدل ها استفاده شده است. در مدل سازی رفتار هندسی غیرخطی، سخت شدگی کرنشی و تغییر شکل های بزرگ المان ها در نظر گرفته شده است [۳۶]. با توجه به مناسب بودن روش حل صریح برای تجزیه و تحلیل های شبه استاتیکی غیرخطی، این روش برای تجزیه و تحلیل غیرخطی سیستم دیوار برشی فولادی کامپوزیت که تحت بارگذاری چرخه ای قرار دارند، استفاده شد.

۲-۲- مدل‌ها و مشخصات مصالح

۲-۲-۱- فولادی

از مدل پلاستیسیته با ترکیبی سخت شدن ایزوتروپیک و سینماتیک برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح فولادی استفاده شده است. برای مدل‌سازی مصالح فولادی با استفاده از مدل Ramberg-Osgood، به دست آمده توسط الچالکانی و همکاران [۳۷] استفاده شده است. در تجزیه و تحلیل المان محدود، مصالح فولاد تا زمانی که به تنش تسلیم نرسند، مواد الاستیک در نظر گرفته می‌شوند. بعد از آن مرحله، مصالح به صورت پلاستیک شبیه سازی می‌شوند. مدول الاستیک برابر با ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال است و نسبت پواسون ۰٫۳ در نظر گرفته شده است. خصوصیات مکانیکی مصالح فولادی حاصل از آزمایشات تست کشش بهیپهانی فرد و همکاران [۳۲] و صبوری قمی و سجادی [۱۰]، ژائو و آستانه-اصل [۱۴] در جدول ۱ ارائه شده است. تنش تسلیم و مقاومت کششی نهایی فولاد در تجزیه و تحلیل از مراجع [۱۴،۳۲] برای مدل سازی المان محدود اقتباس و استفاده شده است.

جدول ۱: خصوصیات مصالح فولاد نمونه‌های آزمایشگاهی

تنش تسلیم (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	اعضا	نمونه های آزمایشگاهی
332	478	تیر وستون	بهیپهانی فرد و همکاران [۲۲]
262	375	ورق فولادی	
551	415	تیر وستون	صبوری قمی و سجادی [۱۰]
277	192	ورق فولادی	
390	258	سخت کننده	
345	-	تیر وستون	ژائو و آستانه-اصل [۱۴]
248	-	ورق فولادی	
480	-	پیچ	

۲-۲-۲- بتن

برای ارزیابی توزیع تنش و انتشار ترک در عناصر بتنی، سه مدل ترک در نرم افزار ABAQUS وجود دارد: ترک خوردگی شکننده، ترک خوردگی آغشته به بتن، و خاصیت پلاستیکی آسیب دیده بتن. در مطالعه حاضر، از مدل انعطاف پذیری آسیب دیده بتن (CDP) برای مدل‌سازی بتن در مدل‌های المان محدود استفاده شده است. این خصوصیات رفتاری می‌تواند خسارت‌های فشاری و کششی غیرخطی عناصر بتنی تحت بارگذاری یکنواخت و دینامیکی را در نظر بگیرد [۳۸]. این مدل بر اساس رفتار سخت شوندگی و نرم شوندگی مواد شکننده مانند بتن ارائه شده است [۳۹،۴۰]. در مدل‌سازی المان محدود، از مدل مندر و همکاران [۴۱] برای رابطه تنش-کرنش مورد استفاده برای ناحیه فشاری مصالح بتن استفاده شده است. روابط معادلات رفتاری بتن به شرح زیر است:

$$\sigma = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c \left(1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right) \quad (3)$$

که f'_{cc} و ε_{cc} به ترتیب مقاومت فشاری و کرنش بتن محصور مربوطه هستند. f'_c و ε_c به ترتیب مقاومت فشاری و کرنش معادل بتن هستند. که در آن ε_c به طور کلی بین ۰٫۰۰۲ تا ۰٫۰۰۳ قرار دارد [۴۲].

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (4)$$

$$r = \frac{E_c - E_{sec}}{E_c} \quad (5)$$

مدول الاستسیته بتن توسط آیین نامه بتن امریکا [۴۳] به شرح زیر توصیه می‌شود:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (6)$$

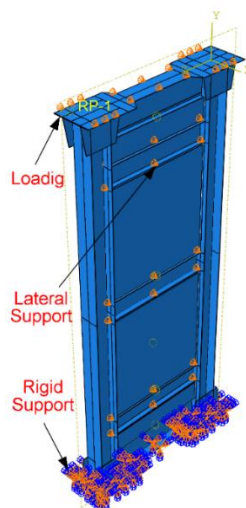
مقاومت فشاری بتن مطابق با مراجع [۱۴،۳۲] در تجزیه و تحلیل مدل‌های المان مورد استفاده قرار گرفته است. چگالی وزنی و نسبت پواسون ماده بتن به ترتیب ۲۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و ۰٫۲ فرض شده است. در مدل ماده سازنده CDP رفتار کششی بتن پس از شکست کششی را در نظر می‌گیرد [۴۴،۴۵]. مقاومت کششی بتن ۱۰ درصد مقاومت فشاری تک محوری بتن فرض شده است. پارامترهای پلاستیک شامل زاویه اتساع (ψ)، فاکتور شکل برای سطح عملکرد (K_c)، ضریب تنش دو محوری عملکرد تابع (f_{bo}/f_c)، پارامتر ویسکوزیته (μ) و خارج از مرکز پتانسیل پلاستیک (e) در جدول ۲ ارائه شده است [۴۶].

جدول ۲: مقادیر پارامترهای پلاستیک مورد استفاده در مدل‌سازی بتن

dilation angle (ψ)	K_c	(f_{bo}/f_c)	e	μ
21°	0.667	1.16	0.1	0.0002

۲-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

در مدل‌های المان محدود، شرایط مرزی و بارگذاری در نظر گرفته شده براساس پیکربندی تنظیمات نمونه‌های آزمایش است [۱۴،۳۲]. با توجه به تنظیمات آزمون مراجع [۱۴،۳۲]، از تکیه‌گاه صلب در پایه ستون استفاده شده است و از تکیه‌گاه‌های جانبی برای جلوگیری از تغییر شکل‌های خارج از صفحه مدل‌ها استفاده شده است. همچنین، بارگذاری شامل بارگذاری جانبی در بالای ستون در طبقه آخر می‌باشد که در مدل المان محدود استفاده شده است. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای بر اساس نمونه‌های آزمایش [۱۴،۳۲] و نوع بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان به مدل‌های المان محدود اعمال شده است (شکل ۲). شرایط بارگذاری چرخه‌ای و شرایط مرزی مطابق با جزئیات بارگذاری مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده است.



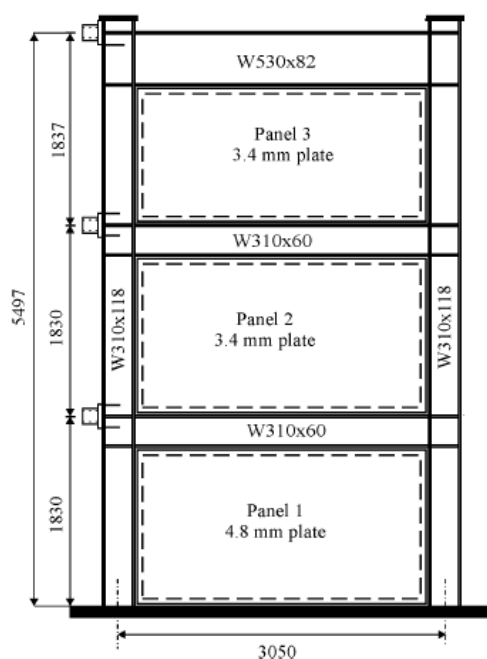
شکل ۲: شرایط مرزی و بارگذاری مدل‌های اجزای محدود ژائو و آستانه-اصل [۱۴].

۳- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

نتایج مدل‌های اجزای محدود باید با نتایج آزمایشگاهی مراجع [۱۴،۳۲] اعتبارسنجی شده است. بنابراین، مقایسه‌ای بین منحنی‌های هیستریزیس و حالت‌های خرابی پیش‌بینی‌های عددی با نتایج کارهای آزمایشگاهی گزارش شده توسط بهبهانی فرد و همکاران [۳۲] و ژائو و آستانه اصل [۱۴] صورت گرفته است.

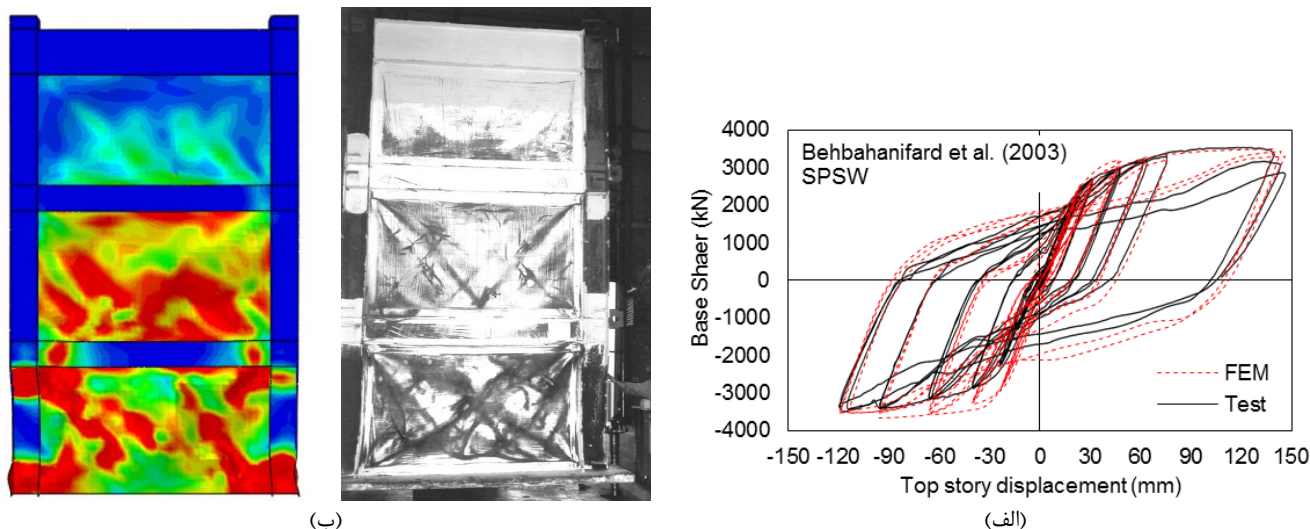
۳-۱- اعتبارسنجی اول

بهبهانی فرد و همکاران [۳۲] دیوار برشی فولادی ۳ طبقه تحت بارگذاری چرخه‌ای را آزمایش کردند. جزئیات نمونه‌های آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. مقاطع آمریکایی $W530 \times 82$ و $W310 \times 118$ برای ستون‌ها و تیر بالا استفاده شده است. برای تیرهای میانی از مقطع $W310 \times 60$ استفاده شد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، اتصالات تیر به ستون صلب و جان و بال تیرها به بال ستون جوش داده شده است.



شکل ۳: الف) مشخصات هندسی و ب) تنظیمات آزمایش.

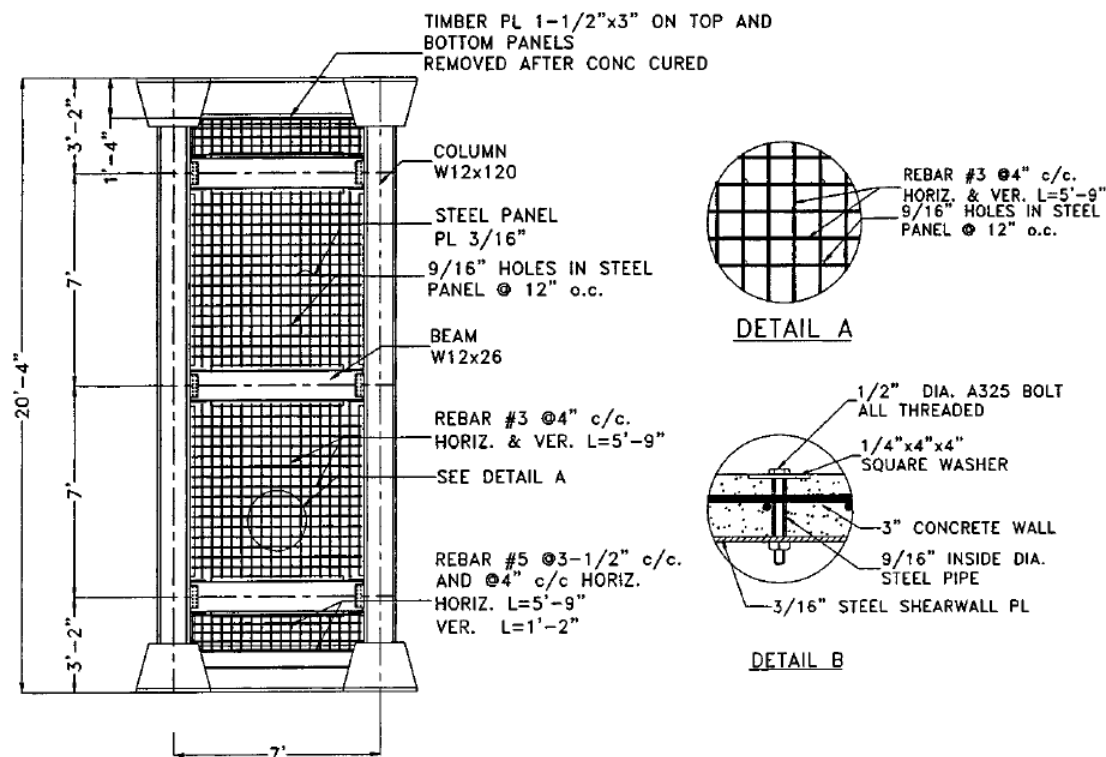
مدل المان محدود تحت بارگذاری چرخه‌ای بر اساس پروتکل بارگذاری آزمایشی [۳۲] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، نتایج منحنی هیستریزیس نیرو-جابجایی آن در شکل ۴-الف نشان داده شده است. نمونه دیوار برشی فولادی. شکل ۴-الف دقت و سازگاری مدل المان محدود را نشان می‌دهد. مشاهده شده است که مدل‌های اجزای محدود رفتارهای چرخه‌ای نمونه‌های آزمایش را با موفقیت به دست آورده‌اند. علاوه بر این، مشخص شده است که شبیه‌سازی المان محدود در پیش‌بینی سختی و مقاومت نمونه‌ها و همچنین پدیده پینچینگ تحت بارگذاری چرخه‌ای کاملاً موفق بوده است. با توجه به نتایج شکل ۴-الف، اختلافاتی در منطقه شروع تسلیم‌شدگی بین مدل المان محدود و نتایج آزمون مشاهده می‌شود. این اختلاف می‌تواند به دلیل شرایط آزمایشگاهی، جک بارگیری، لرزش تیر پایین عمیق و اتصالات پیچ و مهره باشد که در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. شکل ۴-ب حالت‌های خرابی مدل المان محدود و نمونه‌های آزمایش را مقایسه می‌کند [۳۲]. کرنش پلاستیکی معادل (PEEQ) برای ارزیابی مناطق خرابی در مدل‌های اجزای محدود استفاده شد. شکل ۴-ب مناطق خرابی نمونه آزمایش شده توسط بهبهانی فرد و دیگران را نشان می‌دهد. نمودارهای کانتور کرنش پلاستیکی معادل (PEEQ) مدل‌های اجزای محدود برای مقایسه با نمونه‌های آزمایش در شکل ۴-ب نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، نتایج مدل المان محدود توافق خوبی با نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی دارد.



شکل ۴: مقایسه‌ی منحنی بار-جابجایی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی، (ب) مقایسه حالت خرابی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی.

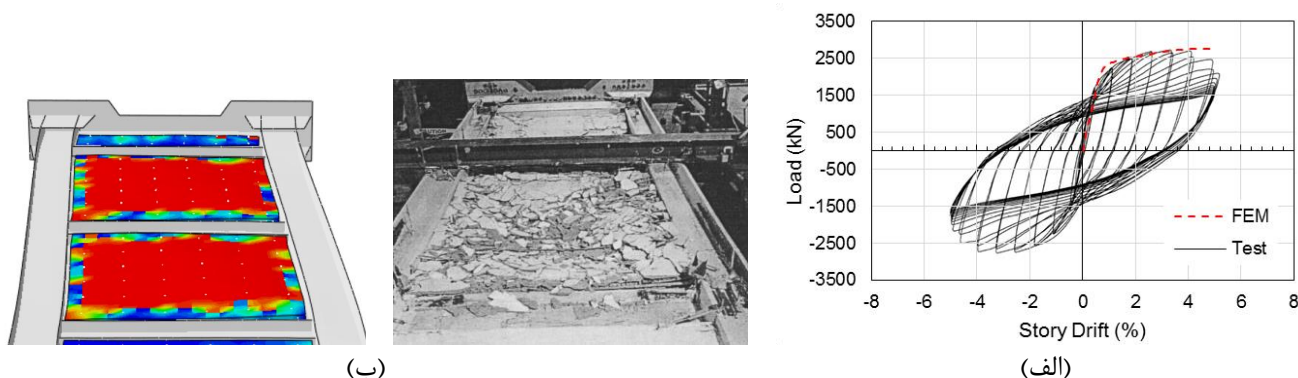
۳-۲- اعتبارسنجی دوم

ژائو و آستانه اصل [۱۴] ۲ دیوار برشی کامپوزیت ۲ طبقه را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش کردند. جزئیات نمونه‌های آزمایشی در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل‌های المان محدود تحت بارگذاری یکنواخت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با نتایج منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه آزمایشگاهی در شکل ۶-الف نشان داده شده است. شکل ۶-الف نمودار نیرو-جابجایی آزمایشی و عددی برای نمونه CSPPSW را نشان می‌دهد. شکل ۶-الف دقت و سازگاری مدل المان محدود را نشان می‌دهد. مشاهده شده است که مدل المان محدود رفتارهای یکنواخت نمونه آزمایش به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۵: مشخصات هندسی و (ب) تنظیمات آزمایش.

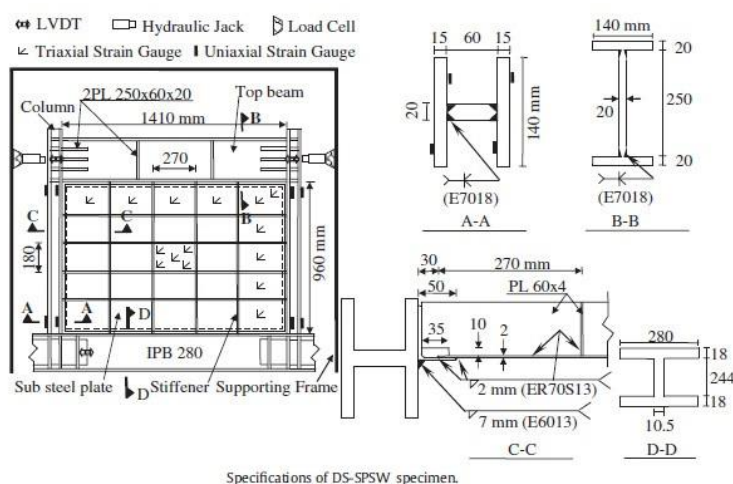
در شکل ۶-ب آسیب فشاری مدل المان محدود و نمونه آزمایشگاهی [۱۴] مقایسه شده است. شکل ۶-ب ناحیه آسیب فشاری نمونه آزمایشگاهی را که توسط ژائو و آستانه اصل [۱۴] آزمایش شده را نشان می‌دهد. کانتور آسیب فشاری (DAMAGEC) مدل المان محدود برای مقایسه با نمونه آزمایشگاهی در شکل ۶-ب نشان داده شده است. DAMAGEC بیشتر در دیوار بتونی رخ داده است، که با نتایج آزمایشگاهی سازگار است. با توجه به شکل ۶، مدل المان محدود CSPSW با دقت خوبی نمونه آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۶: الف) مقایسه‌ی منحنی بار-جابجایی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی، ب) مقایسه حالت خرابی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی.

۳-۳- اعتبارسنجی سوم

صبوری قمی و سجادی [۱۰] در تحقیقاتی آزمایشگاهی و تئوری به بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی با سخت کننده و بدون سخت پرداختند. آنها تحقیقاتشان دو دیوار برشی فولادی یک طبقه با و بدون سخت کننده با قاب محیطی مشابه را مورد آزمایش قرار دادند و رفتار آنها را مورد مطالعه قرار گرفت. خصوصیات مصالح مورد تست شده در آزمایشگاه در جدول ۱ ارائه شده است. پروتکل بار گذاری بر اساس بارگذاری ATC-24 می باشد که به صورت کنترل تغییر مکان و به صورت جکهای هیدرولیکی به تراز طبقه اعمال شده است. شرایط انتهایی قاب که در شکل ۷ نشان داده شده است به صورت گیردار می باشد. مدل‌های المان محدود تحت بارگذاری یکنواخت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با نتایج منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه آزمایشگاهی در شکل ۸-الف نشان داده شده است. شکل ۸-الف نمودار نیرو-جابجایی آزمایشی و عددی برای نمونه DS-SPSW را نشان می‌دهد. شکل ۸-الف دقت و سازگاری مدل المان محدود را نشان می‌دهد. مشاهده شده است که مدل المان محدود رفتارهای یکنواخت نمونه آزمایش به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۷: الف) مشخصات هندسی و ب) تنظیمات آزمایش.

شکل ۸-ب حالت های خرابی مدل المان محدود و نمونه های آزمایش را مقایسه می کند [۱۰]. کرنش پلاستیکی معادل (PEEQ) برای ارزیابی مناطق خرابی در مدل های اجزای محدود استفاده شد. شکل ۸-ب مناطق خرابی نمونه آزمایش شده توسط صبوری قمی و سجادی [۱۰] را نشان می دهد. نمودارهای کانتور کرنش پلاستیکی معادل (PEEQ) مدل های اجزای محدود برای مقایسه با نمونه های آزمایش در شکل ۸-ب نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، نتایج مدل المان محدود توافق خوبی با نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با سخت کننده دارد.



شکل ۸: الف) مقایسه منحنی بار-جابجایی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی، ب) مقایسه حالت خرابی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی.

۴- مطالعه پارامتریک

پس از مدلسازی المان محدود و مقایسه نتایج تجربی و عددی، مدل های جدیدی برای بررسی تاثیر سخت کننده های T-شکل در CSPSW در نظر گرفته شده است. متغیرها متشکل از تعداد سخت کننده ها، عمودی، افقی، مورب و ترکیبی از سخت کننده های T-شکل با مجموع ۲۰ مدل عددی که در جدول ۳ نشان داده شده است بررسی و با مدل CSPSW بدون سخت کننده مقایسه شده است. برای مطالعات پارامتریک، شش استراتژی برای استفاده از سخت کننده های T-شکل با استفاده از روش المان محدود انتخاب و مدلسازی شده است. مدل های المان محدود مطالعات پارامتریک بر اساس نمونه آزمایش تست شده توسط ژائو و آستانه اصل [۱۴] توسعه داده شده اند. این بخش سعی دارد با بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی رفتار و عملکرد CSPSW با سخت کننده ها را مطالعه کند تا بتوان بینشی جامع بدست آورد و بنابراین روند طراحی این سیستم ساختاری جدید را تسهیل کرد.

۴-۱- جزئیات مدل های پارامتریک

جزئیات و پیکربندی CSPSW مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۹ نشان داده شده است. مدل های المان محدود سازه های ۳ طبقه، ۱ دهانه در مقیاس ۱/۲ می باشند. مدل های پارامتری به جز تعداد و نوع آرایش سخت کننده ها خصوصیات یکسانی دارند. فاصله بین بتن و المان های مرزی ۳۰ میلی متر تنظیم شده است. در مدل های المان محدود فاصله مرکز به مرکز ستون به طول ۲،۱۳ متر و ارتفاع ستون ۶،۲ متر ساخته شده اند. پیکربندی تنظیمات شرایط مرزی و بارگذاری مدل های المان محدود در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، برای شرایط مرزی از تکیه گاه صلب و سخت در پایه ستون استفاده شده است و تکیه گاه های جانبی و بارگیری به صورت یکنواخت در بالای ستون در مدل المان محدود استفاده شده است. مقاطع ستون ها و تیرها به ترتیب $W 12 \times 120$ و $W 12 \times 26$ در نظر گرفته شدند. در مدل های المان محدود، برای ورق فولادی دیوار A36 با تنش تسلیم ۲۴۸ MPa استفاده شده است. تیرها و ستون ها در قاب عضو مرزی از فولاد با گرید A572 ۵۰ با تنش تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال ساخته شده اند. بتن مورد استفاده در مدل ها دارای مقاومت فشاری اسمی ۲۸ مگاپاسکال بود. دیوارهای بتن مسلح در مدل ها توسط پیچ و مهره های A325 به قطر ۱۳ میلی متر به ورق فولادی متصل شده اند. پروتکل بارگذاری مدل ها به صورت یکنواخت می باشد. مدل ها پارامتری و استراتژی های در نظر گرفته شده شامل موارد زیر است:

(i) دیواره برشی فولادی بدون سخت کننده (CSPSW-NS): این مدل همان نمونه اعتبار سنجی است و به عنوان مدل پایه انتخاب شده است که در شکل ۹ نشان داده شده است.

(ii) دیوار برشی فولادی کامپوزیت با سخت کننده افقی (CSPSW-0VnH): این مدل شامل n سخت کننده افقی است. که n شامل تعداد سخت کننده می باشد، که از ۱ تا ۳ است، همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است به عنوان نمونه ای از مدل CSPSW-0V2H.

(iii) دیوار برشی فولادی کامپوزیت با سخت کننده عمودی (CSPSW-mV0H): این مدل شامل m سخت کننده عمودی است. m شامل تعداد سخت کننده می باشد که از ۱ تا ۳ است، همانطور که در شکل ۹ به عنوان نمونه ای از مدل CSPSW-3V0H نشان داده شده است.

(iv) دیواره برشی فولادی کامپوزیت با ترکیبی از سخت کننده افقی و عمودی (CSPSW-mVnH): این مدل شامل n و m سخت کننده های افقی و عمودی است. که n و m شامل تعداد سخت کننده ها می باشد که از ۱ تا ۳ است، همانطور که در شکل ۹ به عنوان نمونه ای از مدل CSPSW-2V2H نشان داده شده است.

(v) دیواره برشی فولادی کامپوزیت با سخت کننده مورب (CSPSW-kD): این مدل شامل k سخت کننده مورب است. که k شامل تعداد سخت کننده ها می باشد، که از ۱ تا ۳ است، همانطور که در شکل ۹ نمونه ای از مدل CSPSW-3D نشان داده شده است.

(iv) دیوار برشی فولادی کامپوزیت با ترکیبی از سخت کننده افقی، عمودی و مورب (CSPSW-1D1V1H): این مدل شامل یک سخت کننده مورب، یک عمودی و یک افقی است که در شکل ۹ نشان داده شده است. هندسه و جزئیات ابعاد مدل های پارامتریک در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، در جدول ۳ نام خلاصه مدل های المان محدود نیز ارائه شده است.



شکل ۹: مشخصات هندسی قاب های مورد مطالعه.

۴-۲- جزئیات مدل های پارامتریک

نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک مدل های المان محدود تحت بارگذاری یکنواخت در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج شامل حالت های برش پایه حداکثر، کمناش ورق فولادی، تنش فون مایسز و حالت های شکست می باشد. در ادامه، نتایج مورد بحث قرار گرفته و استراتژی های در نظر گرفته شده با مدل اصلی مقایسه می شوند.

جدول ۳: پارامترهای هندسی و نتایج مدل‌های پارامتری

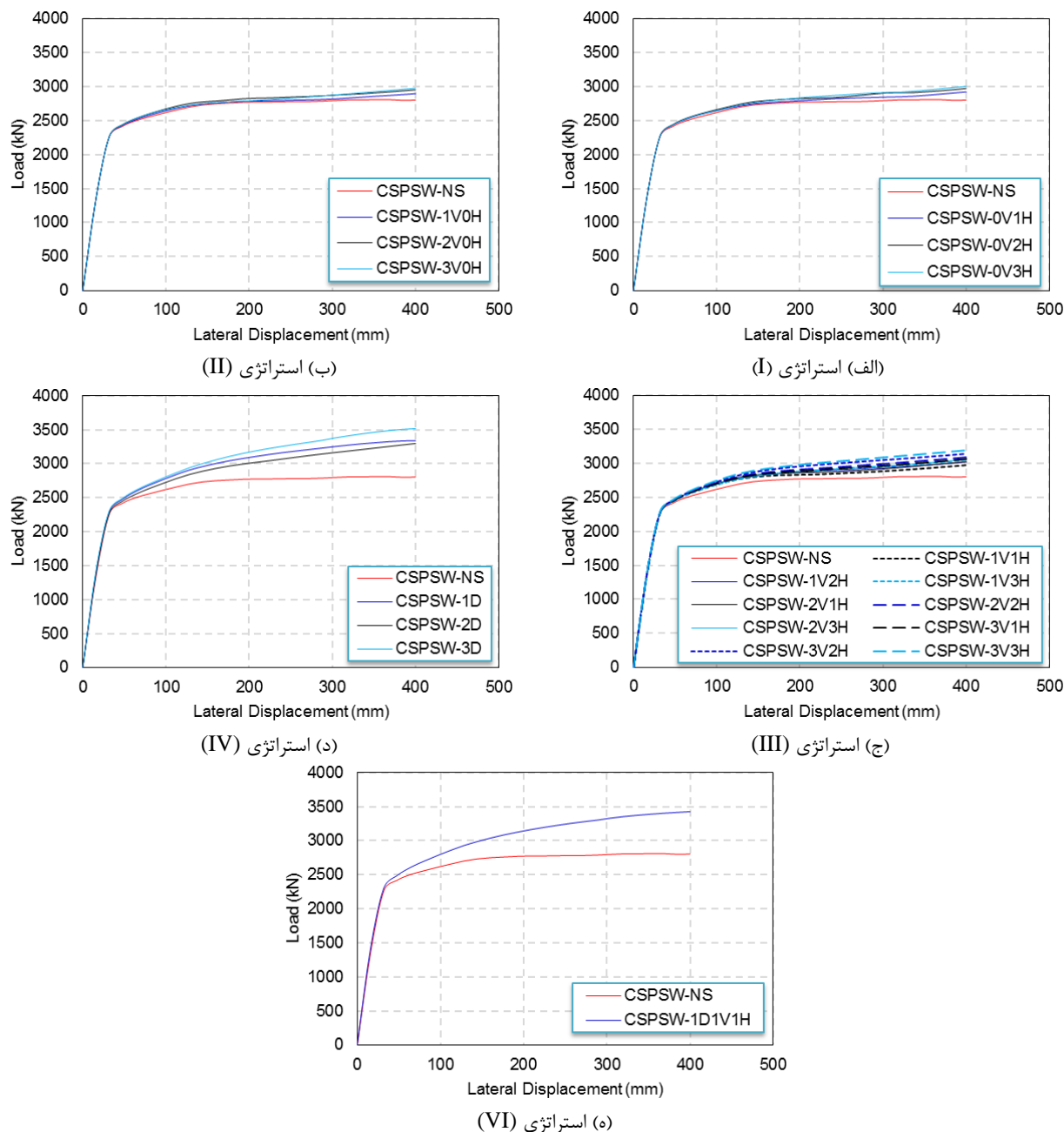
Strategies	Models	Type and number of stiffeners			Max. Load (kN)
		Horizontal	Vertical	Diagonal	
-	CSPSW-NS	-	-	-	2810
(I)	CSPSW-0V1H	1	-	-	2924
	CSPSW-0V2H	2	-	-	2974
	CSPSW-0V3H	3	-	-	3004
	CSPSW-1V0H	-	1	-	2898
(II)	CSPSW-2V0H	-	2	-	2954
	CSPSW-3V0H	-	3	-	2978
	CSPSW-1V1H	1	1	-	2970
(III)	CSPSW-1V2H	2	1	-	3023
	CSPSW-1V3H	3	1	-	3059
	CSPSW-2V1H	1	2	-	3026
	CSPSW-2V2H	2	2	-	3091
	CSPSW-2V3H	3	2	-	3059
	CSPSW-3V1H	1	3	-	3067
	CSPSW-3V2H	2	3	-	3142
	CSPSW-3V3H	3	3	-	3188
	(IV)	CSPSW-1D	-	-	1
CSPSW-2D		-	-	2	3297
CSPSW-3D		-	-	3	3516
(V)	CSPSW-1D1V1H	1	1	1	3426

۵- نتایج و بحث

۵-۱- رفتار دیوارهای برشی کامپوزیت با سخت‌کننده‌های T-شکل

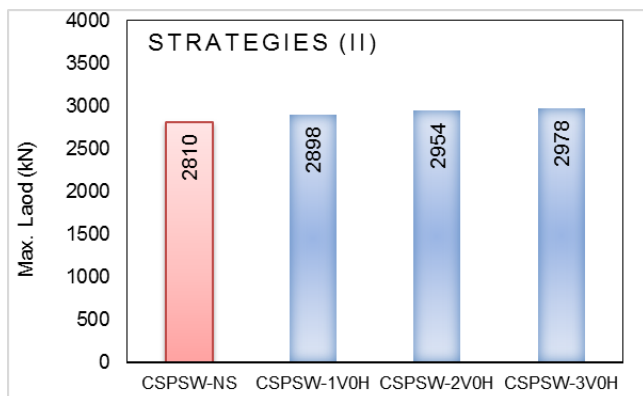
در شکل ۱۰، منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های المان محدود مطالعات پارامتریک ارائه شده است. برای مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های بهبود یافته با مدل پایه (به عنوان مثال دیواره برشی فولادی کامپوزیت بدون سخت‌کننده (CSPSW-NS) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتریک برای استراتژی (I) در مدل‌های بهبود یافته CSPSW-0V1H، CSPSW-0V2H و CSPSW-0V3H، رفتار یکنواختی مشابه مدل CSPSW-NS است و تغییرات قابل توجهی در ظرفیت آنها مطابق جدول ۳ مشاهده نمی‌شود، میزان افزایش نیروی برشی پایه مدل‌های استراتژی (I) نسبت به مدل پایه ۴،۱٪ تا ۶،۹٪ است که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی معادل ۵،۶٪ است. همچنین، با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتری برای استراتژی (II) در مدل‌های بهبود یافته CSPSW-1V0H، CSPSW-2V0H و CSPSW-3V0H، افزایش ظرفیت آنها به طور متوسط ۴،۷٪ مشاهده می‌شود.

شکل ۱۱ نمودار میله‌ای برش پایه ماکزیمم مدل‌های پارامتریک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌ها ۱۱-الف و ب، مقایسه مدل‌های بهبود یافته با مدل پایه نشان می‌دهد که تعداد سخت‌کننده‌های عمودی یا افقی تأثیر کمی بر روی حداکثر نیروی برشی پایه دیواره‌های برشی ورق فولاد کامپوزیت دارد. مطابق شکل ۱۱-ج، میزان افزایش نیروی برشی پایه مدل‌های استراتژی (III) نسبت به مدل پایه ۵،۷٪ تا ۱۳،۵٪ است که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی برابر با ۹،۲٪ است. استراتژی (III) از ترکیبی از سخت‌کننده‌های افقی و عمودی استفاده می‌کند و متناسب با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، ظرفیت برشی پایه نیز افزایش یافته است، اما مطابق با شکل ۱۰-ج این افزایش قابل توجه نیست.

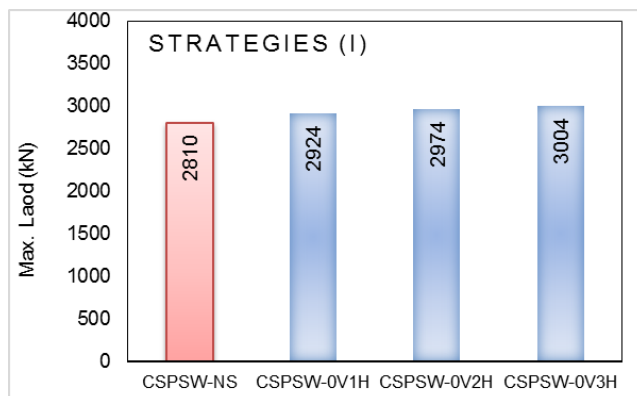


شکل ۱۰: نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتریک

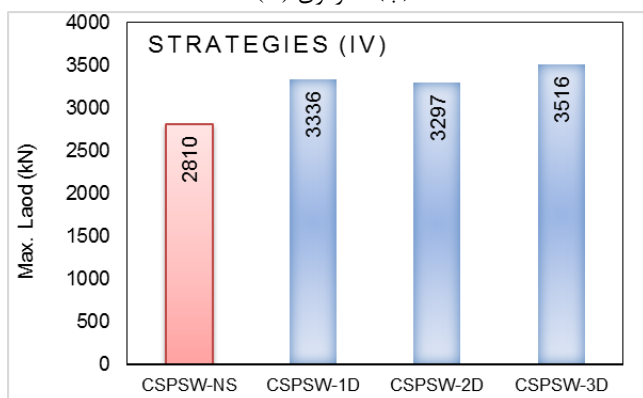
مطابق با مقادیر حداکثر برش پایه ارائه شده در جدول ۳، برای مدل‌های C-SPSW-1D، C-SPSW-2D و C-SPSW-3D (استراتژی (IV))، حداکثر نیروی جانبی ۳۳۳۶، ۳۲۹۷ و ۳۵۱۶ کیلو نیوتن بود که در مقایسه با مدل C-SPSW-NS به ترتیب ۱۸٫۷٪، ۱۷٫۳٪ و ۲۵٫۱٪ افزایش نشان می‌دهد. همچنین، با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتریک برای استراتژی (VI) و مدل بهبود یافته C-SPSW-1D1V1H با مدل پایه، ۲۱٫۹٪ افزایش در حداکثر برش پایه مشاهده می‌شود. مقایسه بین مدل‌های بهبود یافته و مدل پایه نشان داد که نیروی جانبی نهایی توسط مدل C-SPSW-3D بیش از سایر مدل‌ها است. با توجه به شکل‌های ۱۱-د و ۱۱-ه، مدل‌های بهبود یافته C-SPSW-1D، C-SPSW-2D، C-SPSW-3D و C-SPSW-1D1V1H رفتار متفاوتی را در مقایسه با سایر مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهند. این تفاوت در رفتار سیستم‌های پیشنهادی به دلیل عملکرد و مکانیسم تسلیم است. در استراتژی‌های (IV) و (VI)، افزایش ظرفیت برشی نهایی به طور کلی به دلیل سخت‌کننده‌های مورب است. سخت‌کننده‌های مورب از کمانش خارج از صفحه صفحات وب جلوگیری کرده و به طور موثر ظرفیت صفحات را افزایش می‌دهند.



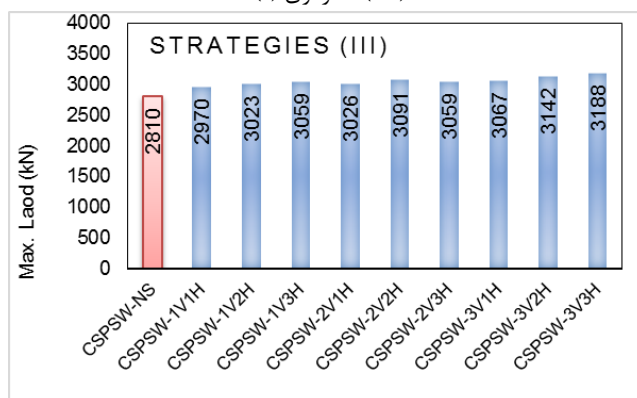
(ب) استراتژی (II)



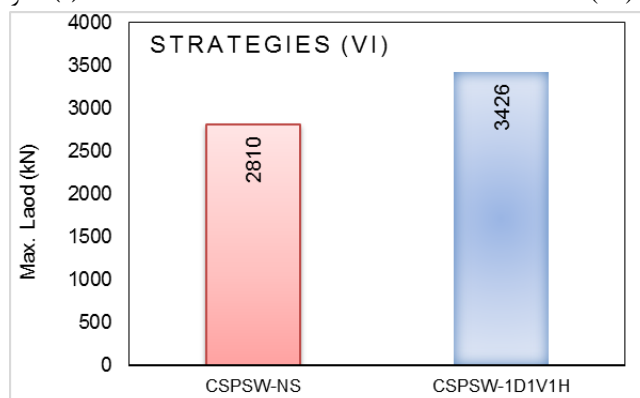
(الف) استراتژی (I)



(د) استراتژی (IV)



(ج) استراتژی (III)



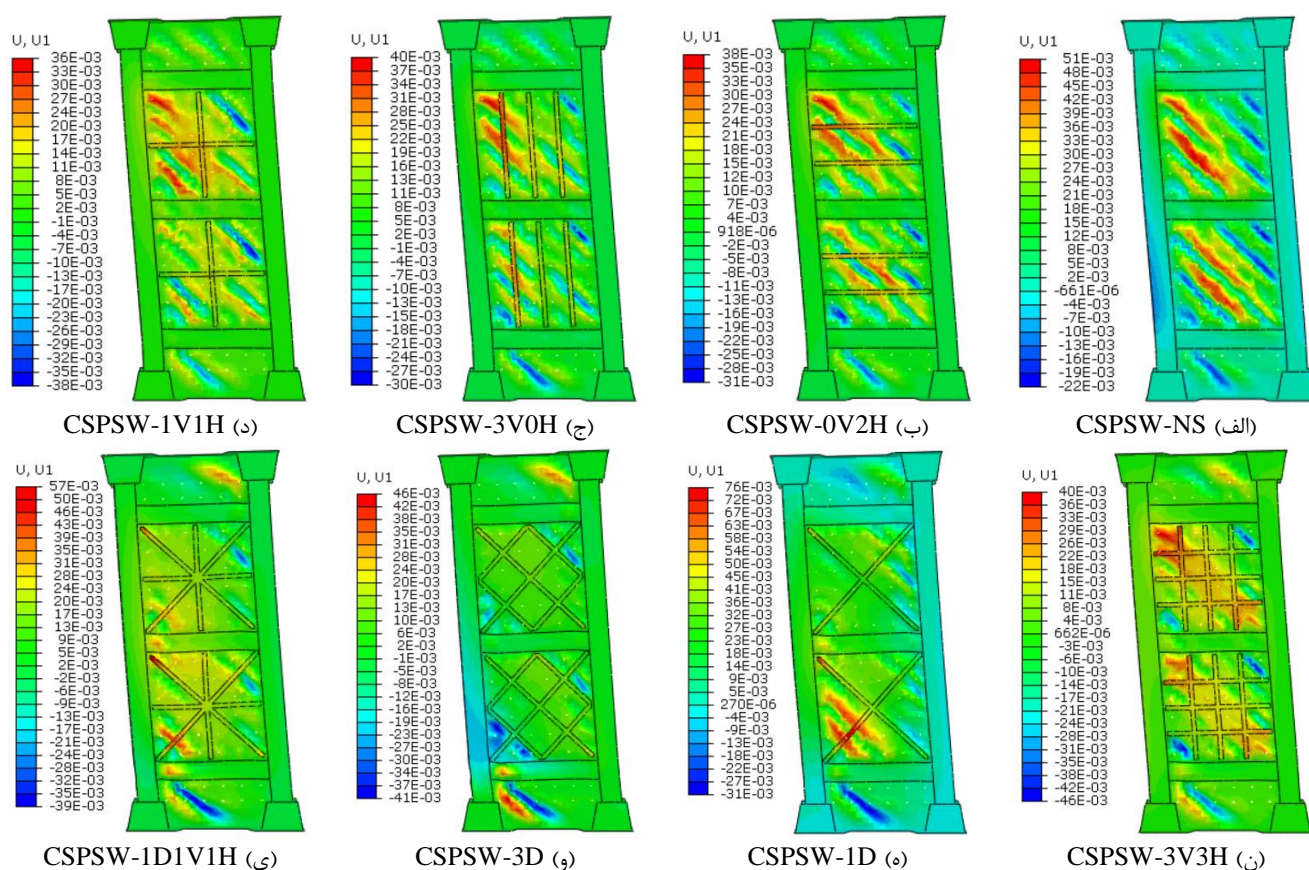
(ه) استراتژی (VI)

شکل ۱۱: ماکزیمم برش پایه مدل‌های پارامتریک

۵-۲- کمانش ورق فولادی

کانتور توزیع تغییرشکل خارج از صفحه در المان ورق فولادی برای مدل‌های پارامتری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر تغییرشکل خارج از صفحه برای مدل CSRCW-NS در ورق فولادی طبقه دوم رخ داده است. مطابق شکل ۱۲-الف حداکثر تغییرشکل خارج از صفحه در مدل CSRCW-NS برابر با ۵۱ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، مطابق با شکل‌های ۱۲-ب و ۱۲-ج حداکثر تغییرشکل خارج از صفحه برای مدل‌های CSRCW-0V2H و CSPSW-3V0H به ترتیب ۳۸ میلی‌متر و ۴۰ میلی‌متر در ورق فولادی طبقه دوم رخ داده است. مدل‌های CSRCW-0V2H و CSPSW-3V0H در مقایسه با مدل پایه (CSPSW-NS) به طور متوسط ۲۳،۵ درصد در جابجایی خارج از صفحه ورق کاهش می‌دهد. حداکثر تغییر شکل خارج از صفحه برای مدل‌های CSRCW-1V1H و CSPSW-3V3H مطابق با شکل‌های ۱۲-د و ۱۲-ن، به ترتیب ۳۶ میلی‌متر و ۴۰ میلی‌متر در ورق فولادی طبقه دوم رخ داده است. در

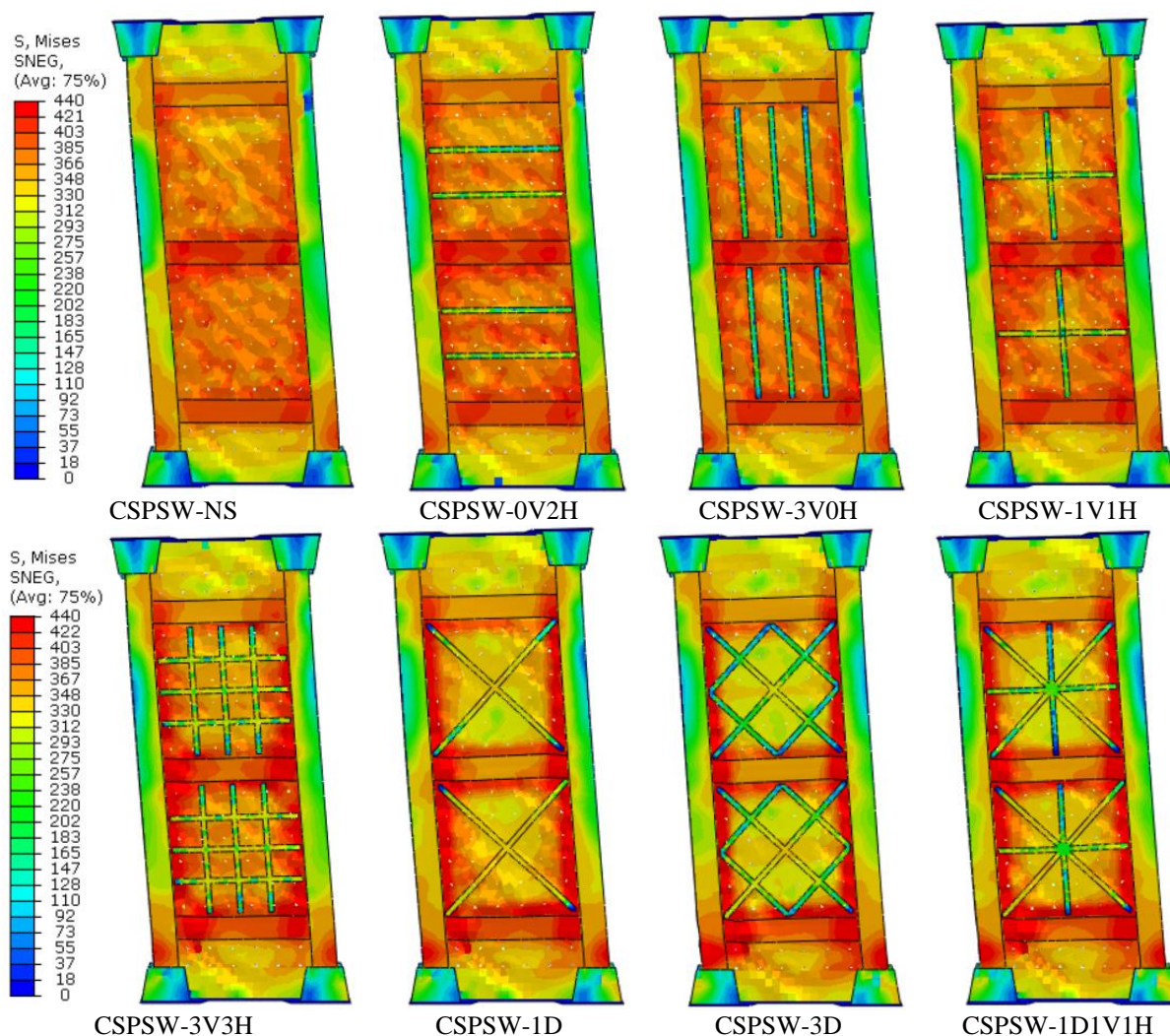
مقایسه با مدل CSPSW-NS، جابجایی خارج از صفحه این مدل‌ها به ترتیب ۲۹٫۴٪ و ۲۱٫۵٪ کاهش یافته است. مطابق با شکل‌های ۱۲-ه و ۱۲-و نشان داده شده است، حداکثر تغییر شکل خارج از صفحه برای مدل‌های CSRCW-1D و CSPSW-3D به ترتیب ۷۶ میلی متر و ۳۰ میلی متر بدست آمده است. در مقایسه با مدل CSPSW-NS، مدل‌های CSPSW-1D افزایش ۴۹ درصدی در جابجایی خارج از صفحه را نشان می‌دهند. همچنین، با مقایسه مدل‌های CSPSW-3D با مدل CSPSW-NS، نتایج حاکی از کاهش ۴۱ درصد جابجایی خارج از صفحه در مدل با سخت‌کننده‌های قطری می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲-ی، حداکثر تغییر شکل خارج از صفحه در مدل CSPSW-1D1V1H در ورق فولادی طبقه اول رخ داده است که مقدار آن برابر با ۵۷ میلی متر بدست آمده است. بنابراین، در مقایسه با مدل CSPSW-NS، مدل CSPSW-1D1V1H افزایش ۱۱ درصدی در جابجایی خارج از صفحه را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۱۲-الف حداکثر جابجایی خارج از صفحه در مدل CSPSW-NS به صورت گسترده در سرتاسر ورق‌ها فولادی طبقه اول و دوم رخ داده است که عامل اصلی این نوع پدیده وجود میدان کششی قطری در سرتاسر و ورق دیوار می‌باشد. در ادامه به اضافه شدن سخت‌کننده‌ها، میدان کشش محدود به ناحیه سخت‌کننده شده است، مطابق شکل‌های ۱۲-ب تا ۱۲-ن. همچنین، با افزایش تعداد سخت‌کننده‌های عمودی و افقی توزیع جابجایی خارج از صفحه در ورق‌های فولادی به صورت یکنواخت‌تر شده است (به عنوان نمونه مدل CSPSW-3V3H). در مدل‌های با سخت‌کننده‌های قطری بیشترین جابجایی خارج از صفحه در گوشه سمت چپ ورق فولادی طبقه اول رخ داده است. با توجه به میدان کشش ایجاد شده در ورق فولادی منجرب به تولید نیروی محوری در سخت‌کننده‌ها می‌شود و این عملکرد می‌تواند ایجاد نیروی فشاری در ستون سمت چپ و به نوبه آن کماتش در ورق فولادی گردد.



شکل ۱۲: کانتور توزیع تغییر شکل خارج از صفحه

۳-۵- توزیع تنش فون مایسز

توزیع تنش فون مایسز در جابجایی سقف ۴۰۰ میلی متر برای هشت مدل معمولی CSPSW در شکل ۱۳ به نمایش درآمده است. با توجه به شکل ۱۳، توزیع تنش فون مایسز نشان می‌دهد که در CSPSW، صفحات وب طبقه اول و دوم کاملاً تسلیم شده‌اند. همچنین، در این مدل‌ها، تسلیم شدگی در ورق‌های فولادی تیرهای طبقه اول و دوم و پایه ستون طبقه اول مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، در مدل‌های با سخت‌کننده‌های مورب، کاهش قابل توجهی در تنش فون مایسز به ۳۱۲ مگاپاسکال در مرکز ورق‌های فولادی رخ داده است. ارزیابی توزیع تنش در شکل ۱۳ برخی از شواهد برای ایجاد یک منطقه غیر الاستیک در مدل‌های CSPSW را نشان می‌دهد، جایی که تغییر شکل پلاستیک در دیواره‌های کامپوزیت رخ داده است. بنابراین، می‌توان استنباط کرد که به نظر می‌رسد رفتار این سخت‌کننده‌های ترکیبی قابل انعطاف است. بنابراین، انرژی بین عناصر مرزی و سایر اجزای دیواره‌های برشی به طور موثر اتلاف می‌شود.



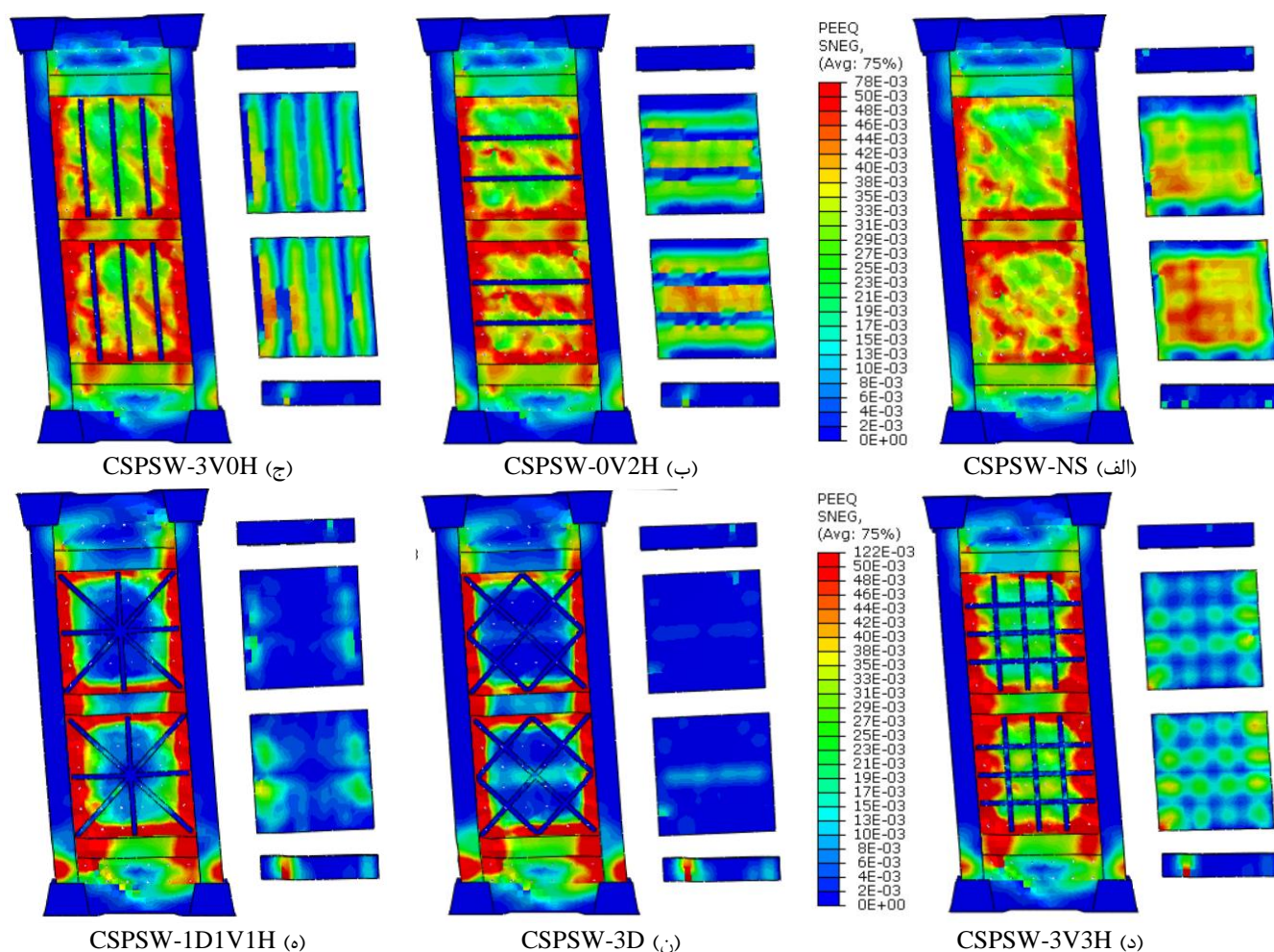
شکل ۱۳: کانتور توزیع تنش فون مایسز مدل‌های مطالعات پارامتریک

۴-۵- حالت‌های خرابی

حالت‌های خرابی مدل‌های المان محدود در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۴-الف نشان داده شده است، در مدل‌های CSPSW-NS، تسلیم شدگی کامل ورق و لولاهای پلاستیکی در قسمت‌های تیر و ستون طبقه اول شکل گرفته است، خرابی

به ورق فولادی در کل پانل شامل تسلیم شدگی و چین خوردگی ناشی از کمناش است. همچنین، در این مدل خرابی کلی در دیوار بتونی مشاهده می‌شود که ناشی از کمناش خارج از صفحه ورق‌های فولادی است. در نمونه‌های دارای سخت‌کننده‌های افقی و عمودی همانطور که در شکل ۱۴-ب و ۱۴-ج نشان داده شده است، خرابی ورق‌های فولادی محدود به مناطقی است که ورق فولادی به عناصر مرزی متصل می‌شود و سخت‌کننده‌ها خرابی نقاط مرکزی صفحات را محدود می‌کنند. از طرف دیگر خرابی دیوار بتونی بین سخت‌کننده‌ها محدود شده و از شدت خرابی دیوار بتونی نیز در مقایسه با مدل CSPSW-NS کاسته می‌شود. همچنین، در این مدل‌ها، تسلیم کامل ورق‌های فولادی و لولاهای پلاستیکی تشکیل شده در بخش‌های تیر و پایه ستون طبقه اول مشاهده شد. در مدل‌های با سخت‌کننده‌های افقی و عمودی ترکیبی، همانطور که در شکل ۱۴-د نشان داده شده است، شدت خرابی صفحه وب بیشتر از نمونه‌های با سخت‌کننده‌های افقی یا عمودی است. این محدود به مناطقی است که صفحه به عناصر مرزی متصل می‌شود. از طرف دیگر خرابی دیوار بتونی بین سخت‌کننده‌ها محدود شده و شدت خرابی در دیوار بتونی نسبت به مدل‌های قبلی کاهش یافته است.

با توجه به شکل‌های ۱۴-ه و ۱۴-و در مدل‌هایی با سخت‌کننده‌های مورب و ترکیبی (مدل CSPSW-1D1V1H)، آسیب شدیدتری در تیرها و پایه ستون طبقه اول و همچنین کمناش موضعی در جان و بال تیرها مشاهده می‌شود. همچنین، شدت و محل خرابی ورق‌های فولادی مشابه مدل‌هایی با ترکیبی از سخت‌کننده‌های افقی و عمودی است و محدود به مناطقی است که صفحه وب به عناصر مرزی می‌پیوندد. از طرف دیگر، کاهش قابل توجهی در آسیب به دیوار بتونی در این مدل‌ها مشاهده می‌شود. علت اصلی کاهش خرابی دیوارهای بتونی کمناش خارج از صفحه پانل است، بنابراین استفاده از سخت‌کننده‌های مورب منجر به جلوگیری از کمناش ورق فولادی می‌شود که در نتیجه باعث کاهش آسیب در دیواره بتن می‌شود، همانطور که در شکل ۱۴-ه نشان داده شده است.



شکل ۱۴: حالت‌های خرابی مدل‌های مطالعات پارامتریک

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، رفتار و عملکرد CSPSW از طریق روش عددی بررسی شد. در این تحقیق، چندین روش برای بهبود رفتار و عملکرد CSPSW ارائه شده است. رفتار یکنواخت دیوارهای برشی کامپوزیت با سخت‌کننده‌های T-شکل با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های المان محدود با جزئیات ساختاری مختلف برای مطالعات پارامتریک ساخته شده اند. مدل‌های المان محدود با استفاده از یک روش کلی استاتیک مدل‌سازی و تحلیل شدند. همچنین، مدل‌ها در برابر نتایج آزمون تأیید شدند. در مدل‌سازی المان محدود، رفتار غیرخطی هندسی و مواد در مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعات پارامتریک، تأثیر تعداد سخت‌کننده‌ها T-شکل عمودی، افقی، مورب و ترکیبی در مدل‌های بهبود یافته بررسی شد. نتایج مطالعات عددی شامل حداکثر برش پایه، کمانش ورق فولادی، تنش فون مایسز و حالت‌های خرابی بود. نتایج نشان می‌دهد که نوع سخت‌کننده‌های تأثیر بسزایی در تعیین ظرفیت و عملکرد نهایی دارد. همچنین، نتایج نشان داد که جزئیات و نوع سخت‌کننده‌های T-شکل در مدل‌های بهبود یافته به طور قابل توجهی بر رفتار یکنواخت مدل‌ها تأثیر می‌گذارد. مطابق مطالعات پارامتریک، طراحی و عملکرد مطلوب فقط در مدل‌های CSPSW-1D، CSPSW-2D، CSPSW-3D و CSPSW-1D1V1H مشاهده شده است که باعث افزایش ظرفیت نهایی و کاهش آسیب دیواره‌های بتونی می‌شود. بنابراین، انتخاب یک استراتژی مناسب منجر به افزایش ظرفیت نهایی و بهبود عملکرد سیستم CSPSWs می‌شود.

مراجع

- [1] Gorji Azandariani M, Gholhaki M, Kafi MA, Zirakian T, Khan A, Abdolmaleki H, et al. Investigation of performance of steel plate shear walls with partial plate-column connection (SPSW-PC). *Steel Compos Struct* 2021;39:109–23. <https://doi.org/10.12989/scs.2021.39.1.109>.
- [2] Monsef Ahmadi H, Sheidaii M, Boudaghi H, De Matteis G. Experimental and numerical study on largely perforated steel shear plates with rectangular tube-shaped links. *Adv Struct Eng* 2020;23:3307–22. <https://doi.org/10.1177/1369433220937147>.
- [3] Kalali H, Hajsadeghi M, Zirakian T, Alaei FJ. Hysteretic performance of SPSWs with trapezoidally horizontal corrugated web-plates. *Steel Compos Struct* 2015;19:277–92. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.2.277>.
- [4] Soltani N, Abedi K, Poursha M, Golabi H. An investigation of seismic parameters of low yield strength steel plate shear walls. *Earthq Struct* 2017;12:713–23. <https://doi.org/10.12989/eas.2017.12.6.713>.
- [5] AISC 341-10. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, (ANSI/AISC 341-10) 2010.
- [6] Xu L, Li Z, Lv Y. Nonlinear seismic damage control of steel frame-steel plate shear wall structures using MR dampers. *Earthq Struct* 2014;7:937–53. <https://doi.org/10.12989/eas.2014.7.6.937>.
- [7] Korkmaz HH, Ecemis AS. Seismic upgrading of reinforced concrete frames with steel plate shear walls. *Earthq Struct* 2017;13:473–84. <https://doi.org/10.12989/eas.2017.13.5.473>.
- [8] Fathy E. Seismic assessment of thin steel plate shear walls with outrigger system. *Struct Eng Mech* 2020;74:267–82. <https://doi.org/10.12989/sem.2020.74.2.267>.
- [9] Zoghi MA, Mirtaheri M. Progressive collapse analysis of steel building considering effects of infill panels. *Struct Eng Mech* 2016;59:59–82. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.59.1.059>.
- [10] Sabouri-Ghomi S, Sajjadi SRA. Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners. *J Constr Steel Res* 2012;75:152–9. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2012.03.018>.
- [11] Chen L, Mahmoud H, Tong SM, Zhou Y. Seismic behavior of double steel plate-HSC composite walls. *Eng Struct* 2015;102:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.017>.
- [12] Yang Y, Liu J, Fan J. Buckling behavior of double-skin composite walls: An experimental and modeling study. *J Constr Steel Res* 2016;121:126–35. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.01.019>.
- [13] Astaneh-Asl A. Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls. Structural Steel Educational Council, USA: 2002.
- [14] Zhao Q, Astaneh-Asl A. Cyclic Behavior of Traditional and Innovative Composite Shear Walls. *J Struct Eng* 2004;130:271–84. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:2\(271\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(271)).
- [15] Rahai A, Hatami F. Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings. *J Constr Steel Res* 2009;65:1528–37. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.03.011>.
- [16] Guo L, Rong Q, Ma X, Zhang S. Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only. *Int J Steel Struct* 2011;11:467–79. <https://doi.org/10.1007/s13296-011-4006-7>.
- [17] Shafaei S, Ayazi A, Farahbod F. The effect of concrete panel thickness upon composite steel plate shear walls. *J Constr Steel Res* 2016;117:81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.006>.

- [18] Arabzadeh A, Soltani M, Ayazi A. Experimental investigation of composite shear walls under shear loadings. *Thin-Walled Struct* 2011;49:842–54. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.02.009>.
- [19] Sigariyazd MA, Joghataie A, Attari NKA. Analysis and design recommendations for diagonally stiffened steel plate shear walls. *Thin-Walled Struct* 2016;103:72–80. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.02.008>.
- [20] Alavi E, Nateghi F. Experimental Study of Diagonally Stiffened Steel Plate Shear Walls. *J Struct Eng* 2013;139:1795–811. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000750](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000750).
- [21] Alinia MM, Sarraf Shirazi R. On the design of stiffeners in steel plate shear walls. *J Constr Steel Res* 2009;65:2069–77. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.06.009>.
- [22] Yu JG, Hao JP. Behaviour of semi-rigid steel frames with steel plate shear walls. *Adv Steel Constr* 2016;12:154–73. <https://doi.org/10.18057/IJASC.2016.12.2.5>.
- [23] Guo HC, Li YL, Liang G, Liu YH. Experimental study of cross stiffened steel plate shear wall with semi-rigid connected frame. *J Constr Steel Res* 2017;135:69–82. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.04.009>.
- [24] Zhang Y, Song Y, Zhu G, Jiang Z. Hysteretic performance and shear deformation of external ring-stiffened joint between composite CFST column and steel beam. *Jianzhu Jieqou Xuebao/Journal Build Struct* 2020;41:154–64. <https://doi.org/10.14006/j.zjgxb.2018.0131>.
- [25] Wei MW, Liew JYR, Fu XY. Panel action of novel partially connected buckling-restrained steel plate shear walls. *J Constr Steel Res* 2017;128:483–97. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.09.008>.
- [26] Jin S, Bai J, Ou J. Seismic behavior of a buckling-restrained steel plate shear wall with inclined slots. *J Constr Steel Res* 2017;129:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.10.005>.
- [27] Rassouli B, Shafaei S, Ayazi A, Farahbod F. Experimental and numerical study on steel-concrete composite shear wall using light-weight concrete. *J Constr Steel Res* 2016;126:117–28. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.016>.
- [28] Li X, Li X. Steel plates and concrete filled composite shear walls related nuclear structural engineering: Experimental study for out-of-plane cyclic loading. *Nucl Eng Des* 2017;315:144–54. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.019>.
- [29] Qin Y, Shu GP, Fan SG, Lu JY, Cao S, Han JH. Strength of double skin steel-concrete composite walls. *Int J Steel Struct* 2017;17:535–41. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-6013-9>.
- [30] Nguyen NH, Whittaker AS. Numerical modelling of steel-plate concrete composite shear walls. *Eng Struct* 2017;150:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.030>.
- [31] ABAQUS-6.10. Standard user's manual. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. 2010.
- [32] Behbahanifard MR, Grondin GY, Elwi AE. Experimental and numerical investigation of steel plate shear walls. *Structural Engineering Report, Rep. No. 254: 2003*.
- [33] Mansouri I, Arabzadeh A, Farzampour A, Hu JW, Mansouri I, Arabzadeh A, et al. Seismic behavior investigation of the steel multi-story moment frames with steel plate shear walls. *Steel Compos Struct* 2020;37:91. <https://doi.org/10.12989/SCS.2020.37.1.091>.
- [34] Gorji Azandariani M, Roustaa AM, Mohammadi M, Rashidi M, Abdolmaleki H. Numerical and analytical study of ultimate capacity of steel plate shear walls with partial plate-column connection (SPSW-PC). *Structures* 2021;33:3066–80. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.046>.
- [35] Usefi N, Ronagh H, Sharafi P. Lateral performance of a new hybrid CFS shear wall panel for mid-rise construction. *J Constr Steel Res* 2020;168:106000. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106000>.
- [36] Usefi N, Ronagh H. Seismic characteristics of hybrid cold-formed steel wall panels. *Structures* 2020;27:718–31. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.033>.
- [37] Elchalakani M, Patel VI, Karrech A, Hassanein MF, Fawzia S, Yang B. Finite element simulation of circular short CFDST columns under axial compression. *Structures* 2019;20:607–19. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.004>.
- [38] Ghanbari-Ghazijahani T, Nabati A, Gorji Azandariani M, Fanaie N. Crushing of steel tubes with different infills under partial axial loading. *Thin-Walled Struct* 2020;149:106614. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106614>.
- [39] Adibi M, Talebkhaha R, Yahyaabadib A. Simulation of cyclic response of precast concrete beam-column joints. *Comput Concr* 2019;24:223–36. <https://doi.org/10.12989/cac.2019.24.3.223>.
- [40] Sasmal S, Novák B, Ramanjaneyulu K. Numerical analysis of under-designed reinforced concrete beam-column joints under cyclic loading. *Comput Concr* 2010;7:203–20. <https://doi.org/10.12989/cac.2010.7.3.203>.
- [41] Mander JB, Priestley MJN, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *J Struct Eng* 1988;114:1804–26. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)).
- [42] Yang YF, Zhu LT. Recycled aggregate concrete filled steel SHS beam-columns subjected to cyclic loading. *Steel Compos Struct* 2009;9:19–38. <https://doi.org/10.12989/scs.2009.9.1.019>.
- [43] American Concrete Institute. *Building Code Requirements for Structural Concrete and (ACI 318-14) Commentary*. Farmington Hills (MI), Detroit, USA: 2014.
- [44] Han LH, Yao GH, Zhao XL. Behavior and calculation on concrete-filled steel CHS (circular hollow section) beam-columns. *Steel Compos Struct* 2004;4:169–88. <https://doi.org/10.12989/scs.2004.4.3.169>.

- [45] Campione G, Scibilia N. Beam-column behavior of concrete filled steel tubes. *Steel Compos Struct* 2002;2:259–76. <https://doi.org/10.12989/scs.2002.2.4.259>.
- [46] Liu D, Li H, Ren H. Study on the performance of concrete-filled steel tube beam-column joints of new types. *Comput Concr* 2020;26:547–63. <https://doi.org/10.12989/cac.2020.26.6.547>.