

تأثیر آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها در خصوصیات رفتار سیکلی سیستم دیوار برشی فولادی

سید علی اصغر حسین‌زاده* (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان

محمدعلی برخوردار (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

علی کاظمی (کارشناس ارشد)

پژوهشکده عمران، پژوهشگاه مهندسی بحران‌های طبیعی شاخص‌پژوه

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (ص. ۶۳-۷۳)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۶۳-۷۳

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش المان محدود، تأثیر آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها در اندرکنش قاب و ورق، خصوصیات رفتار سیکلی و جذب انرژی سیستم‌های دیوار برشی فولادی مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها، به دلیل تسلیم ناقص ورق و کاهش مشارکت آن در باربری، به طور نسبی از مقاومت، سختی و جذب انرژی کل سیستم کاسته می‌شود. برای نسبت‌های بزرگ‌تر طول دهانه به ارتفاع طبقه، باز کردن اتصال ورق از ستون‌ها تأثیر کمتری در رفتار سیستم می‌گذارد. با افزایش ضخامت ورق سیستم نیمه - متصل متناسب با افت نسبی مقاومت ورق، نه فقط افت نسبی مقاومت، بلکه افت نسبی جذب انرژی سیستم را نیز می‌توان جبران کرد. تعبیه ورق سخت‌کننده در لبه‌های آزاد ورق پرکننده دیوار تأثیر چندانی در قابلیت جذب انرژی سیستم نیمه - متصل ندارد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی، نیمه - متصل، جذب انرژی، تحلیل سیکلی، المان محدود.

۱. مقدمه

با توجه به مزایای گسترده مطرح شده، کاربرد و امکان استفاده از انواع مختلف سیستم دیوار برشی فولادی در دهه‌های اخیر مورد توجه جدی مهندسان قرار گرفته و بررسی خصوصیات رفتاری آن‌ها زمینه‌های پژوهشی متعددی را به خود اختصاص داده است.^[۱-۲] دیوارهای برشی فولادی در ظاهر به یک تیر ورق طره عمودی شباهت دارند که در آن‌ها ستون‌ها در نقش بال‌های تیر ورق و ورق پرکننده نیز در نقش جان تیر ورق عمل می‌کنند. اگرچه ثابت شده است که رفتار دو سیستم ذکر شده به دلیل سختی قابل توجه ستون‌ها در دیوار برشی فولادی چندان قابل قیاس با یکدیگر نیست.^[۸]

در سال‌های نخست معرفی سیستم دیوار برشی فولادی، دیدگاه طراحی بر استفاده از ورق‌های ضخیم و یا سخت شده به جهت جلوگیری از کماتش یا دست کم به تأخیر انداختن آن استوار بود. لیکن به دنبال مطالعات بعدی و حصول شناخت بیشتر از امکان بهره‌مندی از مقاومت پس از کماتش صفحات، استفاده از ورق نازک بدون سخت‌کننده مورد توجه پژوهشگران و طراحان قرار گرفت. در سال ۱۹۸۳،^[۹] با استفاده از روش تحلیلی و مبتنی بر تئوری کشش قطری که اولین بار در سال ۱۹۳۱ پیشنهاد شد،^[۱۰] مدل نواری قطری جهت محاسبه ی زاویه و ظرفیت نهایی

در دهه‌های اخیر، سیستم دیوار برشی فولادی (SPSW)^۱ به عنوان یک سیستم کارآمد مقاوم در مقابل بارهای جانبی مطرح شده است. در مقایسه با سایر سیستم‌های باربر جانبی، سیستم مذکور به دلیل داشتن مزایای گسترده، نظیر سرعت و سهولت اجرایی، کاهش وزن مرده ساختمان، سختی اولیه، مقاومت قابل توجه، قابلیت شکل‌پذیری و جذب انرژی بسیار مناسب مورد توجه پژوهشگران و مهندسان طراح در کشورهای مختلف جهان قرار گرفته است.^[۱] سیستم دیوار برشی فولادی از یک ورق فولادی نازک یا ضخیم، با یا بدون سخت‌کننده و قاب فولادی محاط بر آن تشکیل شده است که اتصال ورق فولادی با قاب می‌تواند از طریق اتصال پیچی یا جوشی فراهم شود. بنابراین، علاوه بر ساختمان‌های نو، در مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود، به خصوص با قاب‌های فولادی نیز به خوبی می‌توان از مزایای سیستم مذکور استفاده کرد. همچنین، با لحاظ تمهیداتی، امکان ایجاد بازشو با ابعاد و شکل‌های مختلف در سطح ورق سیستم وجود دارد.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۲/۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۵/۲، پذیرش ۱۳۹۵/۷/۳.

DOI:10.24200/J30.2018.1357

دیوار برشی فولادی پیشنهاد شد. پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی بعدی^[۱۱-۱۳] نیز صحت و دقت مدل پیشنهادی اخیر^[۹] را در شرایط مختلف ارزیابی و استفاده‌ی مؤثر از ظرفیت پس از کماتش تأیید کردند. در مجموع، کلیه‌ی پژوهش‌های انجام‌شده بر شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی قابل توجه سیستم دیوار برشی فولادی اذعان داشتند.

اولین کار آزمایشگاهی ارزنده در زمینه‌ی دیوار برشی فولادی با ورق نازک (سخت‌نشده) در سال ۱۹۹۸^[۱۴] با آزمایش سیکلی یک نمونه‌ی ۴ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی صورت پذیرفت و نتایج آن نشان داد که وقوع کماتش و تسلیم در ستون‌ها می‌تواند به گسترش تسلیم در سطح ورق و مقاومت و شکل‌پذیری سیستم لطمه بزند. در پژوهش دیگری (۲۰۰۰)^[۱۵] نیز مشاهده شد که تغییر شکل بیش از حد ستون‌ها (ناشی از صلبیت خمشی کم آن‌ها) می‌تواند وقوع تسلیم گسترده در سطح ورق را محدود کند. با توجه به مشاهدات مذکور و به جهت بهبود عملکرد دیوار برشی فولادی، برخی پژوهشگران (۲۰۰۱)^[۱۶] استفاده از سیستم دیوارهای برشی فولادی نیمه - مقید را که در آن‌ها ورق پرکننده‌ی دیوار به جای ستون اصلی به ستون‌های ثانویه در دو سمت خود متصل است، پیشنهاد کردند.

نقش اصلی باربری در سیستم دیوار برشی فولادی را ورق فولادی بر عهده دارد. از طرف دیگر، قاب فولادی نیز علاوه بر تحمل نیروهای ناشی از عملکرد خمشی قاب، با ایفای نقش مکمل خود در تحمل نیروهای منتقل‌شده از طرف ورق در فصل مشترک با اعضاء خود به توسعه‌ی تسلیم در سطح ورق کمک می‌کند. برای اطمینان از حصول تسلیم گسترده در سطح ورق و همچنین جلوگیری از خرابی زودرس در ستون‌ها (استفاده‌ی کامل از ظرفیت و قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری در سیستم)، آیین‌نامه‌های طراحی موجود^[۱۷-۱۹] روش طراحی براساس ظرفیت را برای اعضاء قاب پیشنهاد کردند که در آن، نیروی‌های طراحی ستون‌ها به صورت محافظه‌کارانه با فرض تسلیم کامل ورق‌ها و ایجاد مفاصل خمیری در دواتهای تیرهای کلیه‌ی طبقات تعیین می‌شوند. براساس روش طراحی مذکور، مقادیر قابل توجهی برای نیروهای داخلی ستون‌ها، به ویژه نیروهای محوری ستون‌های طبقات تحتانی ساختمان‌های بلندمرتبه، به دست می‌آید که در نهایت منجر به یک طرح غیراقتصادی می‌شود. با توجه به مطالعات انجام‌شده و پیشنهادهای ارائه‌شده^[۲۰-۲۲] می‌توان از راهکارهای متعددی برای مرتفع کردن یا تخفیف مشکل ذکرشده، نظیر استفاده از ورق فولادی با تنش تسلیم پایین، استفاده از سیستم نیمه - مقید، تغییر نوع اتصالات تیر و ستون‌ها، جابه‌جایی دیوار به دهانه‌های مجاور (ایجاد ناپیوستگی داخل صفحه‌ی) و آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها استفاده کرد.

نیروی محوری ستون‌ها در سیستم دیوار برشی فولادی از عملکرد خمشی قاب و تنش‌های حوزه‌ی کشش ورق ناشی می‌شود. با توجه به برخی مطالعات انجام‌شده^[۲۳] بخش قابل توجهی از نیروی محوری ستون‌های تحتانی ساختمان‌های بلندمرتبه (حدود ۸۰٪) از تنش‌های حوزه‌ی کشش ورق، به ویژه در فصل مشترک ورق با ستون‌های طبقات ناشی می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها بتواند به عنوان یک راهکار عملی و در عین حال مؤثر، در کاهش نیروی محوری ستون‌ها مطرح باشد. به علاوه، در الگوی اتصال مطرح‌شده حتی در صورت پیش‌بینی سخت‌کننده در لبه‌های آزاد ورق پرکننده‌ی دیوار (اگرچه در مطالعات به الزام استفاده از سخت‌کننده‌ی لبه‌ی اشاره نشده و این موضوع نیازمند بررسی بیشتر است)، احتمالاً ضرورتی به استفاده از سخت‌کننده با مقاطع بزرگ نباشد و حتی بتوان از ورق با مقاطع نسبتاً کوچک به عنوان سخت‌کننده استفاده کرد. بنابراین، به دلیل کاهش حجم مصالح مصرفی، استفاده از سیستم ذکرشده نسبت به سیستم نیمه - مقید نیز می‌تواند ارجحیت داشته باشد. مطالعات در مورد رفتار سیستم دیوار

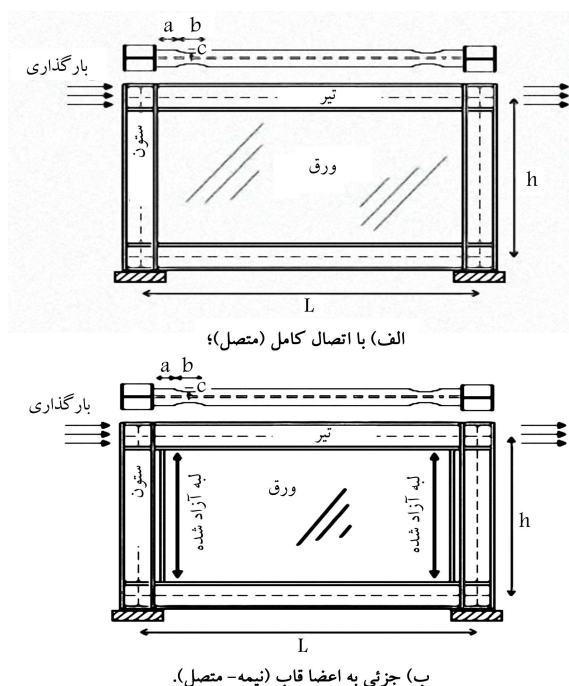
برشی فولادی با چنین الگوی اتصالی^[۲۴،۲۵] بسیار محدود است و بنابراین، انجام مطالعات جامع‌تر در زمینه‌ی مطرح‌شده و ارزیابی دقیق رفتار آن‌ها در شرایط مختلف بارگذاری ضروری به نظر می‌رسد.

پژوهش حاضر با استفاده از روش المان محدود، تأثیر آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها (اتصال جزئی ورق به اعضاء قاب) را در رفتار سیکلی (چرخه‌ی) و قابلیت جذب انرژی سیستم‌های دیوار برشی فولادی بررسی می‌کند. به جهت درک بهتر تأثیر الگوی اتصال مذکور در رفتار متقابل قاب و ورق (برای مطالعه‌ی اندرکنش قاب و ورق در سیستم‌های متعارف دیوار برشی فولادی به مرجع^[۲۵] مراجعه شود)، ابتدا رفتار کلی و اندرکنش قاب و ورق در دو سیستم متصل و نیمه - متصل با استفاده از نتایج تحلیل پوش‌آور در سیستم‌ها مطالعه و مقایسه شده است. سپس، خصوصیات باربری و قابلیت جذب انرژی سیستم‌های دیوار برشی فولادی با نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه با الگوی اتصال کامل و یا جزئی تحت بارگذاری سیکلی تحلیل و بررسی شد. همچنین در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر تغییرات ضخامت ورق پرکننده و یا امکان استفاده از ورق سخت‌کننده (با مشخصات هندسی مختلف) در لبه‌های آزادشده نیز در تغییر و یا احیاناً بهبود جذب انرژی در سیستم‌های نیمه - متصل لحاظ شده است. لازم به ذکر است که در پژوهشی^[۲۶] موازی با پژوهش حاضر، تأثیر آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها در خصوصیات رفتاری سیستم، نظیر: مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و بیشینه‌ی تغییر شکل‌های کماتشی تحت بارگذاری استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) به تفصیل بررسی شده است.

۲. روش مطالعه

۲.۱. مدل‌ها

شکل ۱، نمای شماتیک از مدل‌های مختلف دیوار برشی فولادی با اتصال کامل



شکل ۱. سیستم‌های دیوار برشی فولادی با اتصال کامل (متصل) یا جزئی به اعضاء قاب (نیمه - متصل).

جدول ۱. مشخصات مدل‌های اصلی یا با اتصال کامل (اتصال کامل ورق به اعضای قاب)، برگرفته از مرجع [۲].

نام مدل	طول دهانه L (mm)	ارتفاع طبقه h (mm)	نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه (L/h)	ضخامت ورق دیوار t_w (mm)	مقطع تیر	ستون
۱S۳L	۳۰۰۰	۳۵۰۰	۰/۸۶	۳/۱۸	$W14 \times 176$	$W14 \times 283$
۱S۴L	۴۰۰۰	۳۵۰۰	۱/۱۴	۳/۱۸	$W14 \times 193$	$W14 \times 311$
۱S۵L	۵۰۰۰	۳۵۰۰	۱/۴۳	۳/۱۸	$W14 \times 233$	$W14 \times 370$
۱S۶L	۶۰۰۰	۳۵۰۰	۱/۷۱	۳/۱۸	$W24 \times 250$	$W14 \times 455$
۱S۷L	۷۰۰۰	۳۵۰۰	۲/۰۰	۳/۱۸	$W24 \times 370$	$W14 \times 550$

جدول ۲. جزئیات اتصال RBS برای مقاطع مختلف تیرها براساس آیین‌نامه‌ی AISC۳۵۸-۰۵، برگرفته از مرجع [۲].

جزئیات اتصال	$W14 \times 176$	$W14 \times 193$	$W14 \times 233$	$W24 \times 250$	$W24 \times 370$
a (mm)	۲۰۰	۲۰۰	۲۲۰	۲۰۰	۱۷۵
b (mm)	۳۰۰	۳۰۰	۳۳۰	۵۵۰	۶۰۰
c (mm)	۹۵	۹۵	۱۰۰	۸۰	۸۵

جدول ۳. مشخصات مدل‌های نیمه - متصل یا با اتصال جزئی (اتصال ورق به تیرها).

نام مدل	ضخامت ورق (mm)		سیستم اصلی نظیر ^۲
	دیوار t_w	سخت‌کننده ^۱ t_R	
P – ۱S۳L	۳/۱۸	-	۱S۳L
P – ۱S۴L	۳/۱۸	-	۱S۴L
P – ۱S۵L	۳/۱۸	-	۱S۵L
P – ۱S۶L	۳/۱۸	-	۱S۶L
P – ۱S۷L	۳/۱۸	-	۱S۷L
۲T۱P – ۱S۵L	۰/۰۰	-	۱S۵L
T۲P – ۱S۵L	۱/۵۹	-	۱S۵L
T۴P – ۱S۵L	۴/۷۶	-	۱S۵L
T۵P – ۱S۵L	۶/۳۵	-	۱S۵L
T۶P – ۱S۵L	۷/۶۴	-	۱S۵L
T۷P – ۱S۵L	۹/۵۳	-	۱S۵L
R۲P – ۱S۵L	۳/۱۸	۶	۱S۵L
R۳P – ۱S۵L	۳/۱۸	۸	۱S۵L
R۴P – ۱S۵L	۳/۱۸	۱۰	۱S۵L
R۶P – ۱S۵L	۳/۱۸	۲۰	۱S۵L
R۸P – ۱S۵L	۳/۱۸	۳۰	۱S۵L

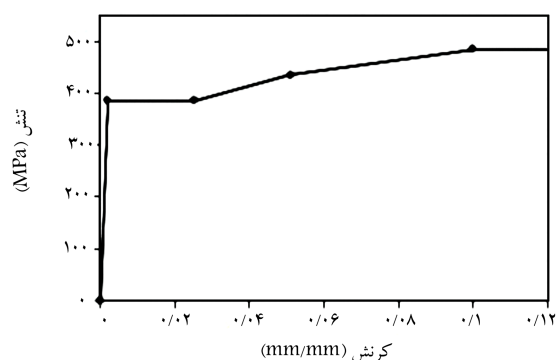
^۱ عرض ورق سخت‌کننده، ثابت و برابر با عرض بال تیر فرض شده است.

^۲ هندسه‌ی قاب و مقاطع تیر و ستون‌ها در سیستم‌های نیمه - متصل نظیر یکسان است.

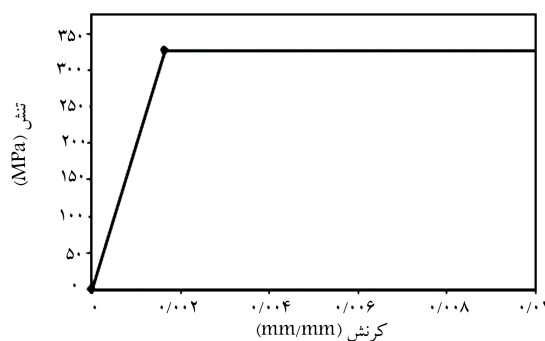
^۳ این مدل معادل با سیستم قاب خمشی تک است.

متمم آن،^[۱] انجام شده است. با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۱، ارتفاع طبقات در مدل‌های در نظر گرفته شده ثابت فرض شده است ($h = 3/5 m$)، در صورتی که نسبت طول دهانه به ارتفاع مدل‌ها (L/h) متغیر و به ترتیب برابر با ۰/۸۶، ۱/۱۴، ۱/۴۳، ۱/۷۱ و ۲/۰۰ انتخاب شده‌اند. همچنین به منظور متمرکز کردن محل تشکیل مفاصل خمیری در دو انتهای تیرها و محدود کردن تقاضای خمشی در ستون‌ها، از اتصال RBS^۲ در دو سمت تیرها استفاده و مشخصات آن‌ها برای

(متصل) و یا جزئی (نیمه - متصل) ورق به اعضای قاب که در پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است، را نشان می‌دهد. برای انجام مطالعات، مدل‌های اصلی دیوار برشی فولادی (با اتصال کامل ورق به اعضای قاب) از پژوهشی در سال ۲۰۱۲،^[۲] اقتباس شده‌اند (مدل‌های ۱S۳L تا ۱S۷L) که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. طراحی سیستم‌های دیوار برشی فولادی مبتنی بر اصول طراحی براساس ظرفیت و مطابق با دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ی آمریکا،^[۱۸] و راهنمای

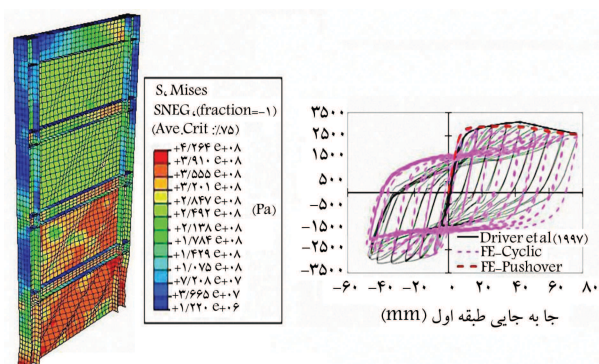


الف) اعضا قاب (تیر و ستون) و ورق سخت کننده ی لیه یی؛



ب) ورق پر کننده.

شکل ۲. منحنی های تنش - کرنش مصالح، برگرفته از مرجع [۲۸]



الف) مقایسه ی نتایج تحلیل های پوش اور و توزیع تنش فون میزس در مدل المان سیکلی با نتایج نمونه ی آزمایشگاهی مرجع؛ محدود در جا به جایی بیشینه.

شکل ۳. صحنه گذاری بر نتایج مدل سازی عددی.

آنالیز شد. در شکل ۳، نتایج تحلیل های عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، نتایج کفایت روش مدل سازی در پیش بینی رفتار پوش اور و سیکلی دیوار برشی فولادی را نشان می دهد و همچنین، مدل المان محدود به خوبی توانسته است کمناش ستون ها را که در نمونه ی آزمایشگاهی اتفاق افتاد، مدل سازی کند.

۳. بحث و بررسی نتایج

قاب و ورق در سیستم دیوار برشی فولادی با هم اندرکنش دارند و در رفتار یکدیگر تأثیر می گذارند. [۲۵] همان طور که مشخص شده است، ورق نقش اولیه و اصلی در باربری و جذب انرژی سیستم دیوار برشی فولادی ایفا می کند. به علاوه، بیشینه ی

تیرهای مدل های اصلی مطابق با آیین نامه ی ۵-۳۵۸-AISC، [۲۷] در جدول ۲ ارائه شده است.

برای مطالعه ی تأثیر الگوی اتصال ورق به اعضاء مرزی، سه مجموعه مدل با اتصال جزئی ورق به اعضاء قاب در نظر گرفته شده است (هندسه و مقاطع اعضاء قاب مشابه با مدل های اصلی نظیر است). در مجموعه ی اول، در مقایسه با مدل های اصلی، فقط اتصال ورق به ستون ها آزاد شده است، در حالی که اتصال ورق به تیرها همچنان برقرار است (مدل های P-۱SVL تا P-۱SVL). برای ارزیابی تأثیر تغییر ضخامت ورق در تغییر و احیاناً بهبود رفتار سیستم نیمه - متصل، در مجموعه ی دوم در مقایسه با مدل های اصلی، علاوه بر الگوی اتصال، ضخامت ورق (۰، ۱/۵۹، ۱/۱۸، ۱/۳۵، ۱/۴۶، ۱/۶۴، ۱/۷۳ میلی متر) نیز متغیر فرض شده است (مدل های T۱P-۱SVL تا T۱P-۱SVL). در نهایت به منظور مطالعه ی تأثیر استفاده از ورق سخت کننده ی لیه یی در رفتار سیستم های نیمه - متصل، در مجموعه ی سوم در مقایسه با مدل های اصلی، علاوه بر الگوی اتصال از ورق سخت کننده با مشخصات هندسی مختلف نیز در لیه های آزاد استفاده شده است (مدل های R۲P-۱SVL تا R۲P-۱SVL). در جدول ۳، مشخصات مدل های نیمه - متصل ارائه شده است.

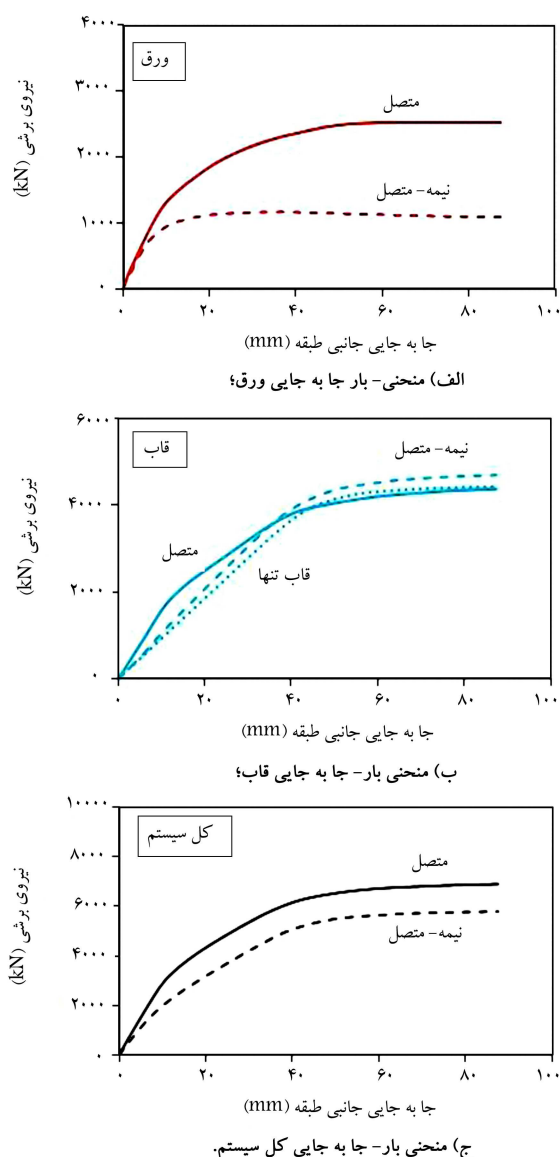
۲.۲. مشخصات مکانیکی مصالح

برای مصالح مصرفی در المان های مرزی (تیر و ستون ها) و همچنین ورق های تقویتی لیه یی (سخت کننده ها) از فولاد رده ی ASTM-A۵۷۲ (با تنش تسلیم ۳۸۵ MPa) و برای ورق پرکننده از فولاد رده ی ASTM-A۳۶ (با تنش تسلیم ۳۲۷/۶ MPa) استفاده و مدول کشسانی و نسبت پواسون فولادهای مصرفی به ترتیب برابر با ۲۰۰ GPa و ۰/۳ فرض شده است. شکل ۲، دیاگرام های تنش - کرنش مربوط به هر رده از فولاد را جهت مطالعه ی رفتار غیرخطی مدل ها نشان می دهد. در تحلیل های استاتیکی غیرخطی، رفتار مصالح به صورت ایزوتروپیک^۲ و در تحلیل های شبه - استاتیکی سیکلی^۴ به صورت سینماتیک^۵ با لحاظ اثر بیشنگر^۶ در نظر گرفته شده است.

۳.۲. مدل سازی عددی و صحنه گذاری نتایج

نحوه ی مدل سازی، اعمال شرایط مرزی و روش بارگذاری پیشتر در مراجع [۲۵، ۲۳، ۲۲] ارائه و در اینجا فقط به اختصار به آن اشاره شده است. به منظور مدل سازی و انجام تحلیل های خطی کمناشی و غیرخطی استاتیکی از نرم افزار المان محدود آباکوس^۷ [۲۹] استفاده و در تحلیل های غیرخطی، آثار تغییر شکل های بزرگ^۸ و غیرخطی هندسی^۹ نیز منظور شد. به جهت تسهیل وقوع کمناش در ورق پرکننده و کمک به توسعه ی حوزه ی کشش قطری در آن، باید اثر تغییر شکل های اولیه در ورق پرکننده در نظر گرفته شود. برای اطمینان از حصول نتایج رضایت بخش، در بعضی از مراجع استفاده از تغییر شکل های اولیه یی که الگوی آن مطابق با مدل اول کمناش و بیشینه ی مقدار آن متناسب با روش اجرا باشد، توصیه شده است. [۳۰] اگرچه، در مورد صفحات نازک، اختیار الگو و مقدار بیشینه ی تغییر شکل های اولیه ی مذکور اهمیت چندانی در نتایج ندارد. [۳۱] بر این اساس، تغییر شکل اولیه یی مطابق با مدل اول کمناش ورق با بیشینه ی مقدار ۱ میلی متر به مدل ها اعمال و بیشینه ی دریافت^{۱۰} مجاز طبقات، با توجه به آیین نامه ی ۵-۳۵۸-ASCE، [۳۲] برابر با ۲/۵٪ ارتفاع طبقه منظور شد.

به منظور صحنه گذاری بر نتایج آنالیزهای پوش اور و سیکلی، نمونه ی آزمایشگاهی ۴ طبقه یی درایور^{۱۴} در نرم افزار مدل سازی و تحت بارگذاری های پوش اور و سیکلی



شکل ۴. مقایسه‌ی منحنی‌های بار- جابه‌جایی در سیستم‌های متصل (۱S5L) و نیمه - متصل نظیر (P-۱S5L).

سختی ورق. همچنین نتایج در شکل ۵ نشان می‌دهد که با آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها، به دلیل کاهش نسبی اندرکنش قاب و ورق، از تأثیر ورق در رفتار قاب کاسته می‌شود. از این رو، اختلاف چندانی در منحنی‌های سختی - جابه‌جایی قاب در دیوار برشی فولادی و قاب خمشی تک (بدون ورق) مشاهده نمی‌شود.

برای درک و بررسی بهتر تأثیر الگوی اتصال کامل یا جزئی ورق به اعضاء مرزی در اندرکنش قاب و ورق در سیستم‌های دیوار برشی فولادی، در شکل ۶ منحنی‌های درصد مشارکت ورق در باربری سیستم‌ها برای ترازهای مختلف ترسیم شده است. شکل (الف) نشان می‌دهد که در حالت کلی در یک سیستم متعارف دیوار برشی فولادی با اتصال کامل ورق به اعضاء مرزی، ورق در ابتدای بارگذاری نقش برجسته‌یی در جذب برش طبقه دارد. با افزایش جابه‌جایی طبقه، به تدریج از درصد مشارکت ورق در برش طبقه کاسته می‌شود و در مقابل، نقش قاب در باربری سیستم برجسته‌تر می‌شود. مقایسه‌ی درصد مشارکت‌های ورق در ترازهای مختلف نیز حاکی از رفتار متفاوت ورق در ترازهای مختلف از یک سیستم متعارف دیوار برشی فولادی است.

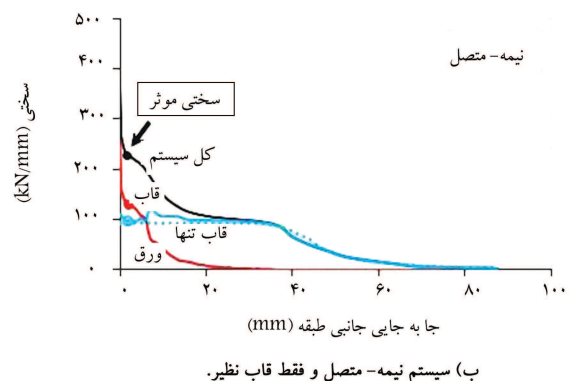
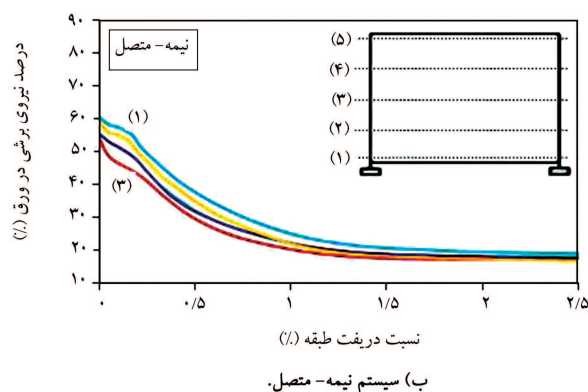
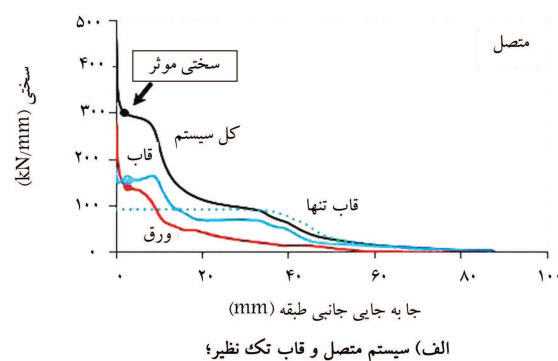
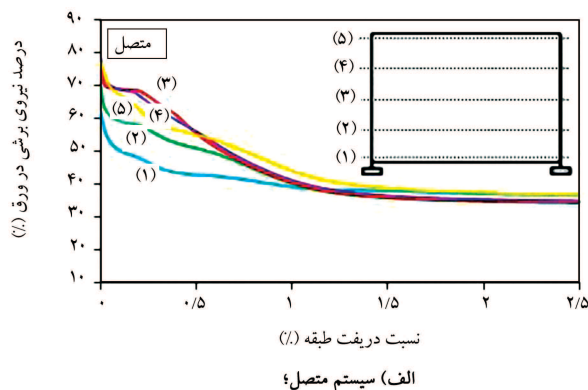
باربری و جذب انرژی در سیستم نیز زمانی رخ می‌دهد که قاب سختی و مقاومت کافی برای ایفای نقش مکمل خود در تحمل نیروهای ناشی از حوزه‌ی کشش ورق و در نتیجه، توسعه‌ی تسلیم کامل در ورق داشته باشد. بدیهی است که در صورت عدم تسلیم یا تسلیم ناقص ورق، از جذب انرژی و شکل‌پذیری سیستم کاسته خواهد شد. مطالعات انجام‌شده در سال ۲۰۱۶^[۲۶] تأیید می‌کند که آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌های دیوار برشی فولادی می‌تواند علاوه بر اینکه در زمینه‌ی وقوع تسلیم کامل در سطح ورق محدودیت ایجاد کند، تغییرشکل‌های کمانشی عمود بر صفحه‌ی ورق را نیز افزایش دهد. بنابراین انتظار می‌رود الگوی پاسخ و جذب انرژی نیز در سیستم نیمه - متصل در مقایسه با سیستم اولیه با اتصال کامل (متصل) دچار تغییر شود. در بخش حاضر، ابتدا رفتار کلی و اندرکنش قاب و ورق در دو سیستم متصل و نیمه - متصل در طول بارگذاری بحث شده است. سپس، تأثیر باز کردن اتصال ورق از ستون‌ها برای نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه در رفتار سیکلی و جذب انرژی سیستم‌ها مطالعه و در ادامه، به نقش ورق پرکننده‌ی دیوار و تأثیر تغییرات ضخامت آن در جذب انرژی سیستم‌ها توجه شده است. در نهایت نیز تأثیر استفاده از ورق سخت‌کننده‌ی لبه‌یی با مشخصات مختلف در دو لبه‌ی آزاد ورق پرکننده‌ی دیوار در رفتار سیکلی سیستم‌های نیمه - متصل ارزیابی و بررسی شده است.

۱.۳. رفتار کلی سیستم و اندرکنش قاب و ورق

در شکل ۴، منحنی‌های بار - جابه‌جایی ورق، قاب و کل برای یک سیستم دیوار برشی فولادی نیمه - متصل (P-۱S5L) با سیستم نظیر کاملاً متصل (۱S5L) مقایسه شده است.

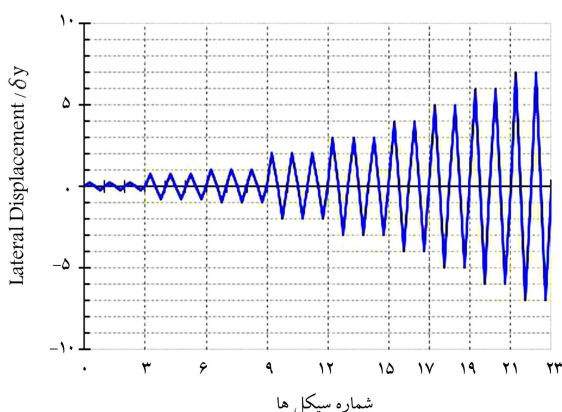
شکل (۴الف) به خوبی نشان می‌دهد که رفتار ورق در دو سیستم متصل و نیمه - متصل نظیر، کاملاً متفاوت است. در نتیجه‌ی آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌های دیوار برشی فولادی، به دلیل وقوع تسلیم ناقص در سطح ورق، به میزان نسبتاً قابل توجهی از ظرفیت ورق در سیستم کاسته می‌شود. شکل (۴ب) اختلاف اندکی را در منحنی‌های بار - جابه‌جایی قاب در دو سیستم متصل و نیمه - متصل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل اندرکنش قاب و ورق، مقاومت قاب در سیستم نیمه - متصل به میزان کمی از مقاومت قاب در سیستم متصل بزرگ‌تر است و در مقابل، سختی اولیه‌ی قاب در سیستم متصل نسبت به سختی قاب در سیستم نیمه - متصل نظیر بیشتر است. بنابراین، مقاومت و سختی اولیه در سیستم نیمه - متصل نسبت به سیستم کاملاً متصل نظیر تا حدی کاهش نشان می‌دهد (شکل ۴ج).

در شکل ۵، تاریخچه‌ی تغییرات سختی ورق، قاب و کل سیستم برای سیستم‌های دیوار برشی فولادی با اتصال کامل (۱S5L) و اتصال جزئی (P-۱S5L) در جابه‌جایی‌های مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود و نتایج مطالعات پیشین نیز بر آن تأکید دارند^[۲۸،۲۵،۲۴] و سختی سیستم در همان بارهای اولیه به دلیل کمانش ورق، دچار افت ناگهانی می‌شود. به لحاظ عملی نیز ورق به دلیل عملیات مونتاژ و جوش‌کاری همواره تغییرشکل‌های اولیه دارد که این موضوع نیز وقوع کمانش در ورق را تسهیل می‌کند. بنابراین، در نظر گرفتن اثر کمانش زود هنگام ورق در سختی سیستم (سختی مؤثر) می‌تواند تخمین واقع‌گرایانه‌تری از سختی سیستم را در اختیار قرار دهد. نتایج در شکل ۵ به خوبی نشان می‌دهد که سختی اولیه و سختی مؤثر (با لحاظ اثر کمانش زود هنگام ورق) سیستم با آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها دچار کاهش می‌شود. با توجه به نتایج مشاهده‌شده در شکل ۵، کاهش سختی سیستم عمدتاً ناشی از افت در سختی قاب است تا



شکل ۵. منحنی‌های سختی - جابه‌جایی در سیستم‌های متصل (۱S5L) و نیمه متصل (P-۱S5L).

شکل ۶. منحنی‌های درصد مشارکت ورق برای ترازهای مختلف از سیستم‌های متصل (۱S5L) و نیمه - متصل نظیر (P-۱S5L).



شکل ۷. تاریخچه‌ی جابه‌جایی سیکلی.

جابه‌جایی معادل با ۷ برابر جابه‌جایی حد تسلیم ($7\delta_y$) ادامه یافته است. به طور کلی با توجه به دستورالعمل ATC-24^[۳۳]، برای جابه‌جایی‌های کوچک‌تر یا مساوی با ۳ برابر جابه‌جایی حد تسلیم ($3\delta_y$)، سه سیکل بارگذاری و برای جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از آن، دو سیکل بارگذاری در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۸، منحنی‌های هیستریزس ورق، قاب و کل سیستم برای دو سیستم دیوار برشی فولادی با اتصال کامل (۱S5L) و جزئی (P-۱S5L) ورق به اعضاء قاب نمایش داده شده است. به جهت بررسی بهتر اندرکنش قاب و ورق در سیستم‌های دیوار برشی فولادی، منحنی رفتار هیستریزس فقط قاب (قاب بدون ورق) نیز در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج در شکل مذکور به خوبی نشان می‌دهد که با باز کردن اتصال ورق از ستون‌های دیوار برشی فولادی، جذب انرژی در سیستم

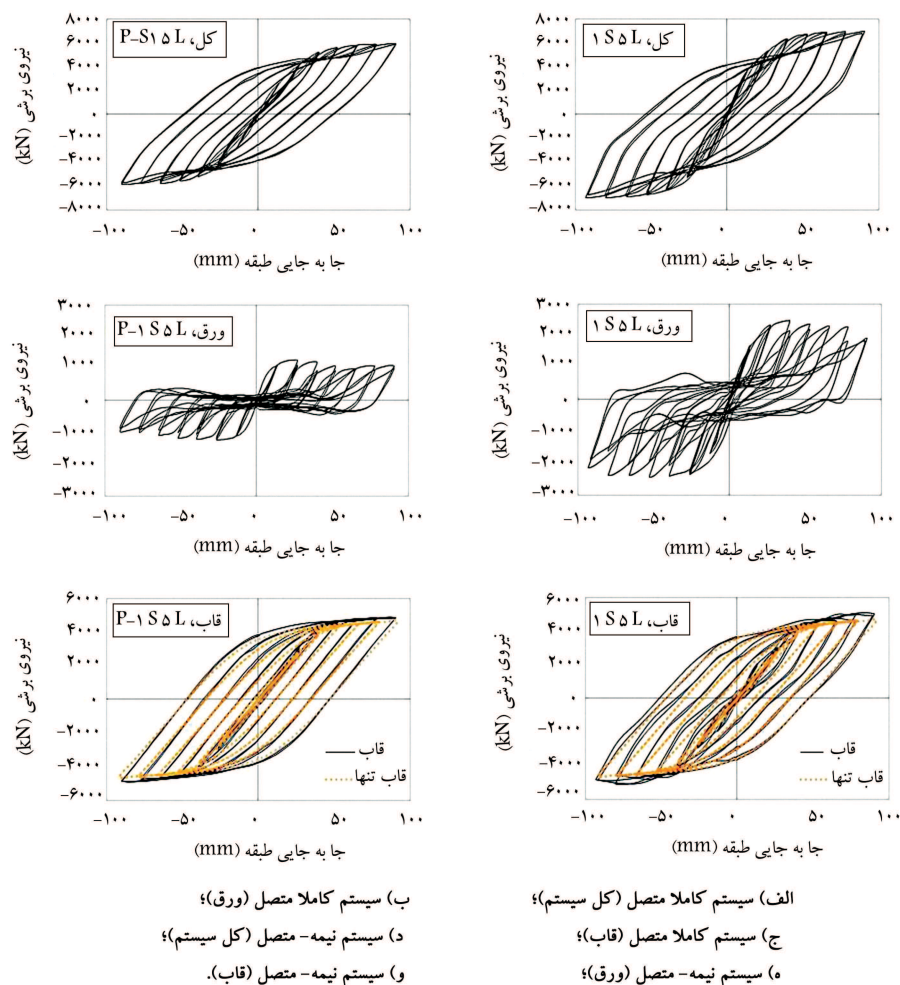
در جابه‌جایی‌های اولیه، ورق در پایین‌ترین تراز، کمترین مشارکت را در جذب برش طبقه دارد، لیکن با افزایش جابه‌جایی، منحنی‌های مشارکت در ترازهای مختلف به یکدیگر هم‌گرا می‌شوند. شکل (۶b) نشان می‌دهد که با آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها، در حالت کلی به دلیل تسلیم ناقص در سطح ورق از درصد مشارکت ورق در سیستم کاسته می‌شود و اختلاف چندانی بین منحنی‌های مشارکت ورق در ترازهای مختلف مشاهده نمی‌شود که این مسئله نیز کاهش نسبی اندرکنش قاب و ورق در سیستم نیمه - متصل را تأیید می‌کند.

۲.۳. رفتار سیکلی و قابلیت استهلاک انرژی

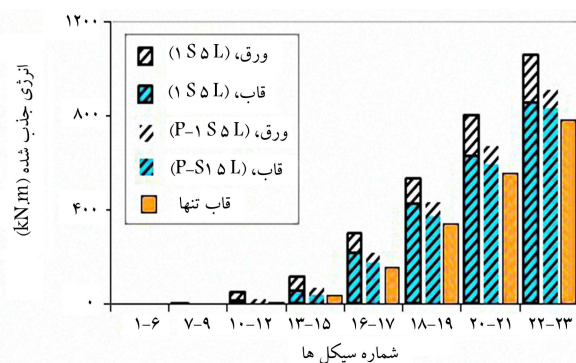
در بخش حاضر با استفاده از نتایج آنالیز سیکلی، تأثیر باز کردن اتصال ورق از ستون‌ها در قابلیت جذب انرژی سیستم‌ها و مشارکت قاب و ورق در آن به صورت کمی و کیفی مطالعه شده است و در آن‌ها، تأثیر نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه، ضخامت‌های مختلف ورق پرکننده و همچنین حضور ورق تقویتی لبه‌یی با مقاطع مختلف نیز در نظر گرفته شده است.

جابه‌جایی حد تسلیم (δ_y) که پارامتر اصلی در اعمال بارگذاری سیکلی است، با استفاده از نتایج تحلیل پاش‌اُور، تقریباً معادل با ۱۲/۵ میلی‌متر برای سیستم‌های مختلف دیوار برشی فولادی با اتصال کامل در نظر گرفته شد. به منظور انجام مقایسه، از یک الگوی یکسان بارگذاری برای سیستم‌های با اتصال کامل و اتصال جزئی استفاده شده است. براساس دستورالعمل ATC-24^[۳۳]، بارگذاری سیکلی با اعمال ۲۳ سیکل جابه‌جایی به تراز تیر طبقه صورت گرفته است (شکل ۷).

مطابق شکل ۷، شش سیکل ابتدایی مبنی بر جابه‌جایی‌های کوچک‌تر از جابه‌جایی تسلیم ($33\delta_y$ و $67\delta_y$) بوده و در سیکل‌های بعدی، بارگذاری تا



شکل ۸. منحنی‌های هیستریزیس سیستم‌های دیوار برشی فولادی متصل (۱۵L) و نیمه - متصل (P-۱۵L).



شکل ۹. مقایسه‌ی متوسط انرژی جذب‌شده در سیکل‌های مختلف بارگذاری برای سیستم‌های دیوار برشی فولادی متصل (۱۵L) و نیمه - متصل (P-۱۵L) و قاب تک.

بارگذاری تأیید می‌کند که عمدتاً ناشی از کاهش در جذب انرژی توسط ورق و تا حدی کاهش در جذب انرژی توسط قاب است. همچنین، مقایسه‌ی جذب انرژی قاب به صورت تک (بدون حضور ورق) و یا در سیستم‌های دیوار برشی فولادی (با حضور ورق) نشان می‌دهد که جذب انرژی قاب در سیستم‌های دیوار برشی فولادی نسبت به قاب تک، به دلیل اندرکنش قاب و ورق تا حدی افزایش می‌یابد. با توجه

دیوار برشی فولادی کاهش می‌یابد که عمدتاً ناشی از کاهش ظرفیت سیستم و تا حدی افزایش پدیده‌ی تنگ‌شدگی در منحنی‌های هیستریزیس رفتار سیستم است. همچنین از مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزیس ورق (شکل‌های ۸ ب و ۸ ه) و قاب (شکل‌های ۸ ج و ۸ و) در دو سیستم کاملاً مشهود است که علت اصلی کاهش نسبی جذب انرژی در سیستم نیمه - متصل، کاهش نسبی مقاومت و جذب انرژی توسط ورق است، در حالی که مقاومت و جذب انرژی قاب در دو سیستم متصل و نیمه - متصل تغییر قابل توجهی را نشان نمی‌دهد.

به علاوه، از مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزیس قاب تک و قاب در سیستم‌های دیوار برشی فولادی (شکل‌های ۸ ج و ۸ و) مشاهده می‌شود که صرف‌نظر از الگوی اتصال ورق به اعضاء قاب، حضور یا عدم حضور ورق تأثیر چندانی در رفتار قاب ندارد. البته با توجه به نتایج به دست آمده، به دلیل کاهش اندرکنش قاب و ورق در سیستم دیوار برشی فولادی نیمه - متصل، به طور نسبی بین منحنی‌های هیستریزیس قاب تک با قاب در سیستم نیمه - متصل هماهنگی بیشتری وجود دارد تا قاب در سیستم کاملاً متصل.

به جهت مقایسه‌ی کمی نتایج در شکل ۸، شکل ۹ متوسط انرژی جذب‌شده در سیکل‌های مختلف بارگذاری سیکلی را برای سیستم‌های دیوار برشی فولادی متصل و نیمه - متصل و قاب تک مقایسه می‌کند. نتایج در شکل ۹، به روشنی کاهش در جذب انرژی سیستم نیمه متصل نسبت به سیستم متصل را در سیکل‌های مختلف

جدول ۴. مقایسه‌ی میانگین انرژی جذب شده در دو سیکل انتهایی (سیکل‌های ۲۲ و ۲۳) سیستم‌های با اتصال جزئی با سیستم‌های نظیر با اتصال کامل برای نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه.

نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه (L/h)				
۲/۰۰	۱/۷۱	۱/۴۳	۱/۱۴	۰/۸۶
۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۷۹
۰/۶۳	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۲۶	۰/۱۶
۱/۰۱	۰/۹۸	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۹

کل ورق قاب

به نتایج، جذب انرژی قاب در سیستم متصل از جذب انرژی قاب در سیستم نیمه - متصل اندکی بیشتر است.

۱.۲.۳. نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه

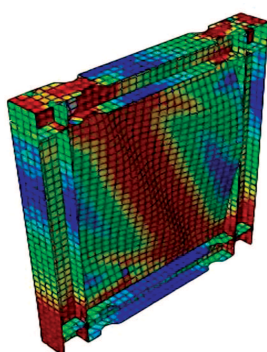
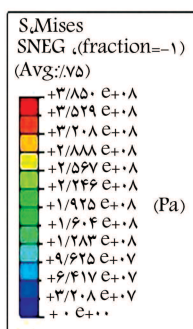
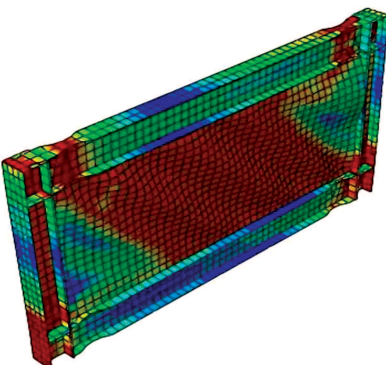
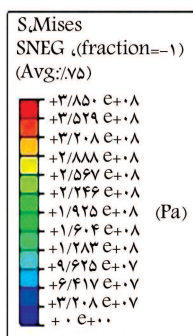
در جدول ۴، نسبت‌های انرژی جذب شده از طریق سیستم‌های با اتصال جزئی (مدل‌های P-۱S۳L تا P-۱S۷L) نسبت به سیستم‌های نظیر با اتصال کامل (مدل‌های ۱S۳L تا ۱S۷L) برای نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه ($L/h = ۰/۸۶ - ۲/۰۰$) ارائه شده است. نسبت‌های ارائه شده در جدول ۴ براساس میانگین انرژی‌های جذب شده در دو سیکل انتهایی (سیکل‌های ۲۲ و ۲۳) محاسبه شده است. مطابق جدول مذکور، با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه، نسبت مشارکت ورق در جذب انرژی در سیستم نیمه - متصل افزایش می‌یابد و تدریجاً از میزان اختلاف بین جذب انرژی ورق در دو سیستم متصل و نیمه - متصل کاسته می‌شود. در واقع، با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه، نسبت سطح مؤثر ورق (سطحی از ورق که در جذب نیرو و انرژی مشارکت می‌کند) به سطح کل آن افزایش می‌یابد (شکل ۱۰)، در نتیجه مشارکت ورق در جذب انرژی کل به طور نسبی افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج، انرژی جذب شده توسط قاب مستقل از هندسه‌ی قاب (نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه) و نوع اتصال ورق به اعضاء قاب در دو سیستم متصل و نیمه - متصل نظیر تقریباً مشابه است. بنابراین در حالت کلی برای نسبت‌های بزرگ‌تر طول دهانه به ارتفاع طبقه، نسبت انرژی کل جذب شده توسط هر یک از سیستم‌های متصل و نیمه - متصل به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، برای بزرگ‌ترین نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه ($L/h = ۲$) اختلاف در جذب انرژی کل توسط دو سیستم به حدود ۵٪ محدود می‌شود.

۲.۲.۳. ضخامت‌های مختلف ورق پرکننده

همان‌طور که در بخش‌های پیشین مشاهده شد، با آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها، به دلیل کاهش مشارکت ورق در جذب انرژی، به طور نسبی از جذب انرژی سیستم کاسته می‌شود. با هدف مطالعه‌ی امکان جبران کاهش جذب انرژی مذکور در سیستم‌های با اتصال جزئی، در بخش حاضر، تأثیر تغییرات ضخامت ورق در سیستم‌های دیوار برشی فولادی با اتصال جزئی بررسی شده است.

در جدول ۵، نسبت‌های انرژی جذب شده از طریق سیستم‌های با اتصال جزئی و ضخامت ورق‌های مختلف (مدل‌های T۱P-۱S۵L تا T۱P-۱S۵L) نسبت به سیستم نظیر با اتصال کامل و ضخامت ورق مشخص (مدل ۱S۵L) برای یک نسبت مشخص طول دهانه به ارتفاع طبقه ($L/h = ۱/۴۳$) ارائه شده است. به جهت بررسی بهتر، در جدول ۶ نیز نتایج نسبت‌های مقاومت (که از تحلیل پوش‌آور به دست آمده است) برای سیستم‌های نیمه - متصل در نظر گرفته شده در بخش کنونی در اختیار قرار گرفته و نسبت‌های ارائه شده در جدول ۵ براساس میانگین انرژی‌های جذب شده در دو سیکل انتهایی (سیکل‌های ۲۲ و ۲۳) محاسبه شده است.

الف) $L/H=۰/۸۶$ ب) $L/H=۲/۰۰$

شکل ۱۰. توزیع تنش فون مایزس در حد نهایی جابه‌جایی در سیستم‌های دیوار برشی فولادی با اتصال جزئی.

جدول ۵. تأثیر تغییرات ضخامت ورق در میانگین انرژی جذب شده در دو سیکل انتهایی (سیکل‌های ۲۲ و ۲۳) سیستم‌های با اتصال جزئی و $L/h = ۱/۴۳$ نسبت به سیستم اولیه‌ی نظیر با اتصال کامل.

ضخامت ورق دیوار (mm)	قاب	ورق	کل
۱۰/۰۰	۰/۹۸	۰/۰۰	۰/۷۴
۱/۵۹	۰/۹۸	۰/۱۹	۰/۷۹
۲۳/۱۸	۱/۰۰	۰/۳۵	۰/۸۵
۴/۷۶	۰/۹۹	۰/۵۸	۰/۸۹
۶/۳۵	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۹۸
۷/۶۴	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۰۲
۹/۵۳	۱/۰۰	۰/۶۷	۰/۹۲

۱ معادل با سیستم قاب خمشی تنها است.

۲ ضخامت اولیه‌ی ورق.

نتایج در جدول ۵ نشان می‌دهد که به‌طور کلی با افزایش ضخامت ورق تا یک ضخامت به‌خصوص (۷/۶۴ میلی‌متر)، میزان جذب انرژی توسط ورق و سیستم افزایش می‌یابد، لیکن برای ضخامت‌های بزرگ‌تر از آن، نه فقط جذب انرژی افزایش نمی‌یابد، بلکه کاهش نیز می‌یابد. علت این موضوع را می‌توان به وقوع تسلیم زودرس و یا تغییر شکل‌های قابل توجه در اعضاء قاب، ناشی از افزایش بی‌رویه‌ی ضخامت ورق نسبت داد که وقوع تسلیم گسترده و جذب انرژی در ورق و در نتیجه کل سیستم را با اختلال مواجه کرده است. با توجه به نتایج، با اصلاح ضخامت ورق

جدول ۶. مقایسه‌ی نسبت‌های مقاومت در سیستم‌های با اتصال جزئی به سیستم نظیر با اتصال کامل برای ضخامت‌های مختلف ورق. [۲۶]

قاب	ورق	کل	ضخامت ورق دیوار (mm)
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۶۸	۱۰/۰۰
۱/۰۳	۰/۲۵	۰/۷۷	۱/۵۹
۱/۰۴	۰/۵۱	۰/۸۵	۲۳/۱۸
۱/۰۴	۰/۷۵	۰/۹۳	۴/۷۶
۱/۰۴	۰/۹۵	۱/۰۱	۶/۳۵
۱/۰۷	۱/۱۰	۱/۰۸	۷/۶۴
۱/۱۳	۱/۲۲	۱/۱۶	۹/۵۳

^۱ معادل با سیستم قاب خمشی تنها است.

^۲ ضخامت اولیه‌ی ورق.

در سیستم نیمه - متصل از ۳/۱۸ میلی‌متر به حدود ۶/۳۵ میلی‌متر، کاهش نسبی در جذب انرژی ورق و جذب انرژی کل سیستم نیمه - متصل جبران می‌شود. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۶ مشاهده می‌شود که برای ضخامت اصلاح شده (۶/۳۵ میلی‌متر)، علاوه بر جذب انرژی، افت نسبی مقاومت ورق و کل سیستم نیز در سیستم با اتصال جزئی جبران می‌شود.

همچنین مشاهده می‌شود که برای جبران افت نسبی مقاومت در سیستم نیمه - متصل، افزایش نسبی ضخامت ورق در سیستم (۲ برابر) باید تقریباً با افت نسبی مقاومت ورق (۵۱٪) متناسب باشد. به بیان دیگر، با افزایش ضخامت ورق متناسب با افت مقاومت ورق در سیستم نیمه - متصل، نه فقط کاهش نسبی مقاومت، بلکه کاهش نسبی جذب انرژی سیستم را نیز می‌توان جبران کرد. نتایج مطالعات انجام‌شده در پژوهش موازی با پژوهش حاضر، [۲۶] صحت مطلب ذکرشده را در حالت کلی برای سایر سیستم‌های دیوار برشی فولادی با ورق نازک و نسبت طول به ارتفاع مختلف تأیید می‌کند.

۳.۲.۳. ورق سخت‌کننده‌ی لبه‌یی با مشخصات مختلف

به لحاظ نظری و در حالت کلی، حضور المان تقویتی در لبه‌های آزاد ورق پرکننده‌ی دیوار برشی فولادی نیمه - متصل می‌تواند با افزایش در مقاومت کل سیستم، [۲۲] و یا کاهش بیشینه‌ی تغییرشکل‌های عمود بر صفحه‌ی ورق (که معمولاً در لبه‌های آزاد ورق اتفاق می‌افتد)، [۲۶] یا افزایش ظرفیت کمانشی آن به افزایش جذب انرژی در سیستم نیمه - متصل کمک کند.

برای انجام مطالعات در بخش کنونی، برای هر مدل از دیوار برشی فولادی نیمه - متصل، از دو ورق سخت‌کننده‌ی لبه‌یی با عرض ثابت (عرض ورق سخت‌کننده برابر با عرض بال تیر طبقه فرض شده است) و ضخامت متغیر در دو سمت لبه‌های آزاد ورق پرکننده‌ی دیوار و در جهت عمود بر صفحه‌ی دیوار استفاده شده است. در جدول ۷، میانگین انرژی جذب‌شده در دو سیکل انتهایی (سیکل‌های ۲۲ و ۲۳) در سیستم‌های با اتصال جزئی و شامل ورق سخت‌کننده‌ی لبه‌یی با مشخصات مختلف (سیستم‌های R2P-1S5L تا RAP-1S5L) و یا بدون ورق سخت‌کننده‌ی لبه‌یی (سیستم P-1S5L) ارائه شده است. با توجه به مدل‌های در نظر گرفته‌شده، در کلیه‌ی مدل‌ها نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه (L/h) ثابت و برابر با ۱/۴۳ منظور شده است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، استفاده از ورق سخت‌کننده‌ی لبه‌یی صرف‌نظر از مشخصات هندسی آن، انرژی جذب‌شده توسط ورق را تا حدی افزایش می‌دهد و در مقابل، به دلیل اندرکنش قاب و ورق، کاهش اندکی را در

جدول ۷. تأثیر ورق سخت‌کننده‌ی لبه‌یی در میانگین انرژی جذب‌شده در دو سیکل انتهایی (سیکل‌های ۲۲ و ۲۳) سیستم‌های با اتصال جزئی $L/h = 1/43$.

ضخامت ورق			انرژی جذب‌شده (KN.m)	
سخت‌کننده (mm)	کل	ورق	قاب	ورق
۲۰	۹۱۵/۲	۷۹/۱	۸۳۶/۱	۷۹/۱
۶	۹۳۲/۵	۱۲۴/۱	۸۰۸/۴	۱۲۴/۱
۸	۹۳۳/۲	۱۲۹/۵	۸۰۳/۷	۱۲۹/۵
۱۰	۹۳۳/۶	۱۳۷/۸	۷۹۵/۸	۱۳۷/۸
۲۰	۹۳۵/۴	۱۴۴/۴	۷۹۱/۰	۱۴۴/۴
۳۰	۹۳۷/۴	۱۵۴/۳	۷۸۳/۱	۱۵۴/۳

^۱ عرض ورق سخت‌کننده برابر با عرض بال تیرها فرض شده است.

^۲ این مدل فاقد ورق سخت‌کننده لبه‌یی است.

انرژی جذب‌شده توسط قاب موجب می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، افزایش ضخامت ورق تقویت لبه‌یی تأثیر چندانی در میزان تغییرات مذکور ندارد. بنابراین در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ورق تقویت لبه‌یی، تأثیر چندانی در جذب انرژی کل سیستم نخواهد داشت.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش المان محدود، تأثیر الگوی اتصال کامل (به تیر و ستون‌ها) یا جزئی (به تیرها) ورق به اعضاء قاب در اندرکنش بین قاب و ورق، و خصوصیات باربری سیکلی و جذب انرژی سیستم دیوار برشی فولادی مطالعه شده است. برای این منظور، سیستم‌های دیوار برشی فولادی با نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه با الگوی اتصال کامل و یا جزئی ورق به اعضاء قاب با استفاده از آنالیزهای پوش‌آورو سیکلی تحلیل و اندرکنش قاب و ورق و خصوصیات جذب انرژی در سیستم‌ها برای دو الگوی اتصال مقایسه شدند. همچنین، تأثیر افزایش یا کاهش ضخامت ورق پرکننده‌ی دیوار و یا استفاده از ورق سخت‌کننده در لبه‌های آزادشده‌ی ورق پرکننده نیز در تغییر و یا احیاناً بهبود خصوصیات جذب انرژی سیستم‌های با اتصال جزئی ارزیابی شد. نتایج برجسته عبارت‌اند از:

-- با آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها، به دلیل وقوع تسلیم ناقص در سطح ورق از مقاومت ورق در سیستم دیوار برشی فولادی کاسته می‌شود. در مقابل، مقاومت قاب در سیستم نیمه - متصل، به دلیل اندرکنش بین قاب و ورق افزایش اندکی می‌یابد، لیکن سختی اولیه‌ی آن در مقایسه با سختی اولیه‌ی قاب در سیستم کاملاً متصل نظیر، کاهش نسبتاً قابل توجهی نشان می‌دهد. بنابراین در مجموع، مقاومت و سختی کل سیستم نیمه - متصل در مقایسه با سیستم متصل نظیر کاهش می‌یابد.

-- با آزاد کردن اتصال ورق از ستون‌ها، به‌طور کلی از مشارکت ورق در جذب برش طبقه کاسته می‌شود. به‌علاوه در این حالت، به دلیل کاهش اندرکنش قاب و ورق، برخلاف رفتار ورق در سیستم متصل نظیر، مشارکت ورق در ترازهای مختلف به یکدیگر نزدیک می‌شود. همچنین، رفتار قاب نیز در سیستم نیمه - متصل، به دلیل کاهش اندرکنش بین قاب و ورق به رفتار قاب تک نزدیک‌تر می‌شود.

نیمه - متصل، بین منحنی‌های هیستریزیس قاب تک با قاب در سیستم نیمه - متصل هماهنگی نسبتاً بیشتری وجود دارد تا قاب در سیستم کاملاً متصل.

-- در سیستم نیمه - متصل، با اصلاح (افزایش) ضخامت ورق متناسب با افت نسبی مقاومت آن، نه فقط کاهش نسبی مقاومت، بلکه کاهش نسبی جذب انرژی را نیز می‌توان جبران کرد.

-- علی‌رغم تأثیر مثبت استفاده از ورق سخت‌کننده در لبه‌های آزادشده‌ی ورق در سیستم‌های نیمه - متصل در کاهش تغییرشکل‌های کمانشی دیوار، مزیت خاصی برای استفاده از آن در جهت افزایش جذب انرژی سیستم مشاهده نشد.

-- با باز کردن اتصال ورق از ستون‌های دیوار برشی فولادی، جذب انرژی در سیستم دیوار برشی فولادی کاهش می‌یابد. این کاهش در جذب انرژی سیستم نیز عمدتاً ناشی از کاهش مقاومت سیستم و تا حدی افزایش پدیده‌ی تنگ‌شدگی در منحنی‌های هیستریزیس رفتار سیستم است. با توجه به اینکه مقاومت و جذب انرژی قاب در دو سیستم متصل و نیمه - متصل تقریباً یکسان است، علت اصلی کاهش نسبی جذب انرژی در سیستم نیمه - متصل را می‌توان به کاهش نسبی مقاومت و جذب انرژی توسط ورق نسبت داد.

-- به‌طور کلی، به دلیل کاهش اندرکنش قاب و ورق در سیستم دیوار برشی فولادی

پانوشته‌ها

1. steel plate shear wall (SPSW)
2. reduced beam section
3. isotropic
4. quasi-static cyclic
5. kinematic
6. bauschinger
7. Abaqus
8. large deformation
9. geometrical nonlinearity
10. drift

منابع (References)

1. AISC. "Steel design guide 20, steel plate shear walls", Chicago (IL): American Institute of Steel Construction (2007).
2. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **77**, pp. 180-192 (2012).
3. Berman, J.W. and Bruneau, M. "Experimental investigation of light-gauge steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **131**(2), pp. 259-267 (2005).
4. Clayton, P.M., Berman, J.W. and Lowes, L.N. "Seismic design and performance of selfcentering steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **138**(1), pp. 22-30 (2012).
5. Wei, M.W., Liew, J.Y.R., Xiong, M.X. and Fu, X.Yi. "Hysteresis model of a novel partially connected buckling-restrained steel plate shear wall", *Journal of Constructional Steel Research*, **125**, pp. 74-87 (2016).
6. Dou, C., Jiang, Z.Q., Pi, Y.L. and Guo, Y.L. "Elastic shear buckling of sinusoidally corrugated steel plate shear wall", *Engineering Structures*, **121**, pp. 136-146 (2016).
7. Akhavan, M.H., Joghataie, A. and Attari, N.K.A. "Analysis and design recommendations for diagonally stiffened steel plate shear walls", *Thin-Walled Structures*, **103**, pp. 72-80 (2016).
8. Berman, J.W. and Bruneau, M. "Steel plate shear walls are not plate girders", *Engineering Journal, AISC*, **41**(3), pp. 95-106 (2004).
9. Thorburn, L.J., Kulak, G.L. and Montgomery, C.J. "Analysis of steel plate shear walls", Structural Engineering Report No. 107, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada (1983).
10. Wagner, H. "Flat sheet metal girders with very thin metal webs: Part I- general theories and assumptions, and part III: Sheet metal girders with spars resistant to bending - the stress in uprights - diagonal tension fields", Technical Memorandum Nos.604 and 606, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D.C. (1931).
11. Timler, P.A. and Kulak, G.L. "Experimental study of steel plate shear walls", Structural Engineering Report No. 114, Department of Civil Engineering University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada (1983).
12. Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. "Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels", *Thin-Walled Structures*, **12**(2), pp. 145-162 (1991).
13. Elgally, M., Caccese, V. and Du, C. "Postbuckling behavior of steel plate shear walls under cyclic loads", *Struct. Eng.*, **119**(2), pp. 588-605 (February 1993).
14. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and Elwi, A.E. "Cyclic test of four-story steel plate shear wall", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**(2), pp. 112-130 (1998).
15. Lubell, A.S., Prion, G.L., Ventura, C.E. and Rezai, M. "Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading", *J. Struct. Eng, ASCE*, **126**(4), pp. 453-460 (2000).
16. Driver, R.G., Gilbert, G.Y., Behbahani, M.R. and Hussain, M.A. "Recent development and future directions in steel plate shear wall research", *Proceeding of North American Steel Construction Conference*, Ft. Lauderdale, FL (May 9-12, 2001).

17. Building Seismic Safety Council, "2003 NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450)", Federal Emergency Management Agency (2004).
18. AISC, ANSI/AISC 341-05, "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago (IL): American Institute of Steel Construction (2005).
19. Appendix M, CSA, "Standard CAN/CSA-S16.1.94 (S16.1)", Canada's National Standard for Limit States Design of Steel Structures (1994).
20. Xue, M. and Lu, L. "Interaction of steel plate shear panels with surrounding frame members", *Proceedings of the Structural Stability Research Council Annual Technical Session*, Bethlehem, PA, pp. 339-354 (1994).
21. Jahanpour, A., Moharrami, H. and Aghakoochak, A. "Evaluation of ultimate capacity of semi-supported steel shear walls", *Journal of Constructional Research*, **67**(6), pp. 1022-1030 (2011).
22. Choi, I.R. and Park, H.G. "Steel plate shear walls with various infill plate designs", *J. Struct. Eng., ASCE*, **135**(7), pp. 785-796 (2009).
23. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "Behavioral characteristics of code designed steel plate shear wall systems", *Journal of Constructional Steel Research*, **99**, pp. 72-84 (2014).
24. Hitaka, T. and Matsui, C. "Experimental study on steel shear walls with slits", *J. Struct. Eng., ASCE*, **129**(5), pp. 586-595 (2003).
25. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "The wall-frame interaction effect in steel plate shear wall systems", *Journal of Constructional Steel Research*, **98**, pp. 88-99 (2014).
26. Kazemi, A. "A study on the behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only", MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Shakhsh pajouh research Institute, Esfahan, Iran (2016).
27. AISC, ANSI/AISC 358-05, "Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications", Chicago (IL): American Institute of Steel Construction (2005).
28. Habashi, H.R. and Alinia, M.M. "Characteristics of the wall-frame interaction in steel plateshear walls", *Journal Constructional Steel Research*, **66**, pp. 150-158 (2010).
29. *ABAQUS/Standard Theory Manual*, Version 6.5.1, Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc. (HKS) (2004).
30. Wang, H. and Croll, J. "Optimization of shell buckling using lower bound capacities", *Thin-Walled Struct.*, **46**(7-9), pp. 1011-1120 (2008).
31. Brando, G. and De Matteis, G. "Experimental and numerical analysis of a multi-stiffened pure aluminium shear panel", *Thin-Walled Struct.*, **49**(10), pp. 1277-1287 (2011).
32. ASCE, SEI/ASCE 7-05, "Minimum design loads for buildings and other structures", Virginia (USA): American Society of Civil Engineers (2005).
33. ATC-24, "Guidelines of cyclic seismic testing on components for steel structures", Redwood City, California, U.S.A.: Applied Technology Council (1992).