

رفتار جانبی دیوارهای برشی فولادی سرد نورد با پوشش ورق فولادی به روش اجزاء محدود

مرتضی قلی خانی^۱ و شهاب الدین حاتمی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: فولاد سرد نورد، قاب فولادی سبک، تحلیل غیر خطی، دیوار برشی فولادی، روش المان محدود.</p>	<p>دیوارهای برشی فولادی ساخته شده از قاب‌های فولادی سرد نورد شده و ورق پوشش فولادی یکی از سیستم‌های مقاوم در مقابل نیروهای جانبی، در ساختمان‌های فولادی سبک می‌باشد. در حال حاضر، آیین‌نامه‌های طراحی، مقاومت برشی اسمی را برای دامنه محدودی از ساختارهای مختلف دیوار برشی، ارائه می‌دهند. با توجه به رشد روز افزون ساخت سازه‌های فولادی سبک و رویکرد صنعتی سازی در ساخت، نیاز به داشتن مقاومت برشی دیوارها، برای طیف وسیعی از ابعاد و مشخصات دیوار، بیش از پیش احساس می‌شود. در این مطالعه، پانل‌های دیوار برشی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس تحلیل شده و روشی ساده برای مدل‌سازی پیچ‌های اتصال ورق پوشش به قاب ارائه می‌گردد، که امکان شبیه‌سازی خرابی در محل اتصالات را فراهم می‌نماید. از داده‌های آزمایشگاهی موجود برای راست‌نمایی پارامترهای مدل‌سازی استفاده شده است و پس از تایید کارایی مدل اجزاء محدود، تأثیر پارامترهای مختلف دیوار برشی از جمله ارتفاع قاب، تنش تسلیم مصالح دیوار، ضخامت ورق پوشش، ضخامت اعضای قاب و نحوه اتصال ورق پوشش به قاب بر رفتار جانبی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته است. در آخر نیز با ارزیابی نوع خرابی‌ها، روش‌هایی برای بهبود عملکرد جانبی این نوع دیوارها، ارائه گردیده است.</p>

۱- مقدمه^۱

زیرا این سازه‌ها از مقاطع جدار نازکی تشکیل شده‌اند، که مستعد انواع ناپایداری می‌باشند.

دیوارهای برشی فولادی سرد نورد یکی از سیستم‌های مقاوم در مقابل نیروهای جانبی در سازه‌های فولادی سبک می‌باشد. سرعت بالای ساخت، شکل‌پذیری و مقاومت جانبی مناسب، باعث گسترش این نوع سیستم مقاوم جانبی گردیده است. هر پانل دیوار برشی از یک قاب فولادی سرد نورد شده تشکیل می‌شود که تیرک‌ها و ستونک‌های قاب با پرچ‌ها یا پیچ‌های خودکار به یکدیگر متصل شده‌اند و پوششی از جنس ورق فولادی بر روی قاب پیچ شده است. آیین‌نامه‌های طراحی از جمله دستورالعمل طراحی جانبی AISI [۱] در حال حاضر

در سال‌های اخیر، استفاده از سازه‌های فولادی ساخته شده از فولادهای سرد نورد، به دلیل مزایای منحصر به فرد آن از قبیل مقرون به صرفه بودن، دوام، سبک وزنی و راحتی کار با آن رشد قابل ملاحظه‌ای در سراسر جهان داشته است. در مقایسه با سازه‌های فولادی نورد گرم متداول، رفتار سازه‌های فولادی سرد نورد پیچیده‌تر است،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hatami@yu.ac.ir

۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه یاسوج
۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

نوع سیستم باربر جانبی در نقاط مختلف دنیا و در برخی از پروژه‌های اجرا شده در کشور، استفاده می‌شود. اولین تحقیقات در زمینه رفتار جانبی دیوارهای برشی فولادی در سازه‌های سرد نورد شده توسط سرته و همکارانش [۱۳] و [۱۴] در سال ۱۹۹۶ صورت پذیرفت. در این تحقیق، قاب‌هایی با دو ساختار مختلف، به عرض‌های ۱/۲۲ و ۰/۶۱ متر و ارتفاع ۲/۴۴ متر، که در یک سمت با ورق نازک فولادی (۰/۴۵۷ و ۰/۶۸۶ میلی‌متر) پوشیده شده بودند، تحت دو نوع بارگذاری یک سویه و چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند و مقاومت جانبی هر دیوار مورد ارزیابی قرار گرفت. سرته مشاهده نمود که نوع خرابی در هر یک از ساختارهای دیوار، متفاوت است، ولی عموماً در دیوارهای با فواصل زیاد پیچ‌های اتصال ورق پوشش به قاب (۱۵ سانتی‌متر)، کنده شدن پیچ‌ها و تغییرشکل قابل ملاحظه در ورق پوشش علت خرابی بوده، درحالی‌که در دیوارهای با فواصل کم پیچ‌های اتصال (۵ سانتی‌متر)، کماتش ورق به‌همراه کماتش ستونک‌های کناری علت خرابی می‌باشد.

در سال ۲۰۰۲ سرته و همکارانش [۱۵] آزمایشاتی با بارگذاری چرخه‌ای بر روی دیوار با ابعاد ۱/۲۲×۲/۴۴ متر و با ضخامت ورق ۰/۶۸۶ میلی‌متر انجام دادند. پوشش از دو قطعه ورق به ابعاد ۰/۶۱×۲/۴۴ متر تشکیل شده بود که با استفاده یک ردیف پیچ به قاب متصل می‌شدند. مود خرابی مشاهده شده برای این نوع دیوار کنده شدن پیچ‌ها از ورق در ستونک میانی گزارش شد. در سال ۲۰۰۴، دستورالعمل طراحی جانبی AISI، نتایج تحقیقات سرته در سال ۱۹۹۷ و ۲۰۰۲ را وارد آیین نامه خود نمود.

در سال ۲۰۰۷ یو^۹ [۱۶] ساختارهای دیگری از دیوارهای برشی را مورد آزمایش قرار دادند و مقاومت جانبی را برای این دیوارها محاسبه نمودند. در این آزمایشات، تأکید بر استفاده از ورق‌های فولادی ضخیم‌تر (۰/۸۳۸ و ۰/۷۶۲ و ۰/۶۸۶ میلی‌متر) بود. نوع خرابی مشاهده شده در این آزمایشات مشابه با آزمایشات سرته گزارش شد.

مقاومت برشی اسمی را برای دامنه محدودی از ساختارهای مختلف دیوار برشی برحسب ضخامت ورق پوشش و نسبت ابعاد ورق ارائه می‌دهند. از طرفی این مقاومت‌ها تنها برای نوع خاصی از ستونک^۱ و تیرک^۲ ارائه شده است و مسلماً با تغییر نوع قاب، این مقاومت‌ها نیز کاربردی نخواهند داشت.

با گسترش گرایش به ساخت سازه‌های فولادی سبک در جهان و به‌طور خاص در کشور ایران، نیاز به اطلاعات وسیع‌تر در زمینه این نوع سیستم باربر جانبی بیش از پیش احساس می‌شود و دامنه وسیع‌تری از نسبت ابعاد دیوار و ضخامت ورق پوشش و پارامترهای متغیر دیگر در ساختار دیوار برشی، مورد نیاز مهندسان خواهد بود.

برای طراحی سازه‌های سرد نورد شده تعیین میزان مقاومت جانبی دیوار برشی اهمیت به‌سزایی دارد. تا کنون برای تعیین مقاومت جانبی پانل‌های دیوار برشی به‌دلیل رفتار نسبتاً پیچیده پانل، اکثراً از آزمایشات تمام مقیاس استفاده شده است. در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای بررسی عملکرد سیستم‌های مختلف مقاوم جانبی در سازه‌های سرد نورد به‌ویژه سیستم بادبندهای قطری و دیوارهای برشی چوبی انجام شده است که در زمینه کارهای آزمایشگاهی می‌توان به تحقیقات جد^۳ و همکاران [۲]، فلوپ و دوبینا^۴ [۳]، تیان^۵ و همکاران [۴]، سرته^۶ و همکاران [۵]، کیم^۷ و همکارانش [۶]، الخرات و راجرز^۸ [۷]، حاتمی و همکاران [۸]، و رونق و زینلیان [۹] اشاره نمود. در زمینه مطالعات عددی هم به‌عنوان نمونه می‌توان از تحقیقات فرحبد و حکیمی فرد [۱۰]، حاتمی و رحمانی [۱۱]، و گرامی و لطفی [۱۲] نام برد. با این وجود در زمینه دیوارهای برشی فولادی، تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است. این درحالی است که هم‌اکنون از این

¹ Stud

² Track

³ Gad

⁴ Flup and Dubina

⁵ Tian

⁶ Serrette

⁷ Kim

⁸ Al-Kharat and Rogers

⁹ Yu

سازه‌های سرد نورد ارائه می‌شود، که امکان شبیه‌سازی خرابی در اتصالات و تغییر مکان‌های ناشی از آن در تغییر مکان خرابی دیوار را فراهم می‌کند. از نتایج آزمایشگاهی موجود برای راست‌نمایی پارامترهای مدل‌سازی استفاده شده و پس از تایید کارایی مدل اجزاء محدود، تأثیر پارامترهای مختلف دیوار برشی از جمله ضخامت اجزاء قاب، ضخامت ورق پوشش و نحوه اتصال قاب با ورق پوشش، ارتفاع دیوار و تنش تسلیم مصالح بر رفتار جانبی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نهایتاً با ارزیابی نوع خرابی‌ها، روش‌هایی برای بهبود عملکرد جانبی این نوع دیوارها ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی اجزاء محدود

در تحقیق حاضر از روش المان محدود و نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی سرد نورد تحت بارهای جانبی استفاده شده است.

۲-۱- مشخصات هندسی مدل‌ها

هر پانل دیوار برشی از یک قاب فولادی سرد نود تشکیل شده است که تیرک‌ها و ستونک‌های قاب با پیچ‌های خودکار به یک‌دیگر متصل می‌شوند و پوششی از جنس ورق فولادی بر روی قاب پیچ می‌گردد (شکل ۱). در مطالعه حاضر، دو نوع قاب با عرض‌های ۱/۲۲ متر (شکل ۱-الف) و ۰/۶۱ متر (شکل ۱-ب) و همگی به ارتفاع ۲/۴۴ متر مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در تمام نمونه‌ها، مقاطع تیرک‌ها و ستونک‌ها یکسان بوده و ستونک‌ها از نوع 350S162 و تیرک‌ها از نوع 350T150 شرکت SSMA [۲۰] می‌باشند. مقطع ستونک و تیرک در شکل ۲ نشان داده شده است. مصالح مورد استفاده برای مقاطع اعضای قاب از نوع فولاد Grade33 مطابق با استاندارد ASTM A1003 [۲۱] می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. در مدل‌سازی نرم‌افزاری منحنی تنش-کرنش به صورت دو خطی مطابق شکل ۳ فرض شده

با توجه به کاربرد فراوان دیوارهای با عرض ۱/۸۳ متر، در سال ۲۰۰۹ یو و چن [۱۷] آزمایشاتی را برای به دست آوردن مقاومت جانبی این نوع دیوارها انجام دادند. این تحقیق شامل ۱۹ نمونه دیوار برشی فولادی در قالب ۴ ساختار قاب‌بندی و ضخامت ورق متفاوت می‌شد. پارامترهایی که در این آزمایشات مورد بررسی قرار گرفت شامل تأثیر عمق جان و ضخامت عضو قاب، ضخامت ورق پوشش، جزئیات ستونک محل اتصال ورق‌ها بر مقاومت جانبی دیوار بود. نتایج آزمایشات نشان داد که در دیوارهای با عرض ۱/۸۳ متر، در کنار کماتش ورق و کنده شدن پیچ‌ها، ممکن است کماتش ستونک‌های داخلی نیز رخ دهد. آن‌ها برای رفع این مشکل، جزئیات اجرایی خاصی را ارائه نمودند که مانع از وقوع کماتش ستونک‌های داخلی شده و از طرفی تأثیر چشم‌گیری بر مقاومت برشی و شکل‌پذیری دیوار داشت. همچنین آن‌ها دریافتند، که می‌توان از مقاومت‌های برشی اسمی مدون آیین نامه به‌طور محافظه کارانه برای این نوع دیوارها استفاده نمود. نتایج مطالعات یو و همکارانش در مراجع [۱۸ و ۱۹] نیز به چاپ رسیده است.

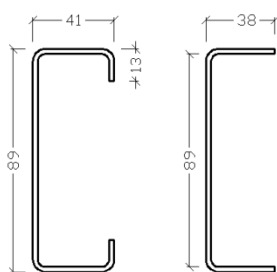
اگرچه بررسی رفتار جانبی دیوار برشی فولادی نیازمند مطالعات آزمایشگاهی می‌باشد، لیکن بررسی کلیه پارامترهای سازه‌ای در آزمایشگاه منوط به صرف وقت و هزینه گزاف می‌باشد؛ لذا با توجه به کمبود اطلاعات در زمینه این نوع سیستم مقاوم جانبی و این موضوع که تاکنون تحقیق عددی در زمینه این سیستم برابر جانبی در منابع در دسترس مشاهده نشده است، مطالعه حاضر به بررسی رفتار جانبی دیوارهای برشی فولادی سرد نورد با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس می‌پردازد.

یکی از مودهای خرابی رایج در دیوارهای سرد نورد، خرابی در اتصالات می‌باشد که در صورت عدم مدل‌سازی اتصالات، دیوار مقاومت بیشتری از خود نشان خواهد داد و مدل ساخته شده درک درستی از رفتار واقعی دیوار، ارائه نخواهد کرد. به همین منظور با جای‌گزینی پیچ‌های اتصال با المان فنر، روشی برای مدل‌سازی پیچ‌های اتصال در

تیرک دارد، متصل می‌شود. به‌همین دلیل در تحقیقات آزمایشگاهی، از تیرهای فولادی گرم‌نورد برای ایجاد تکیه‌گاه پایینی و بالایی و اعمال بار به دیوار استفاده می‌گردد (شکل ۴).

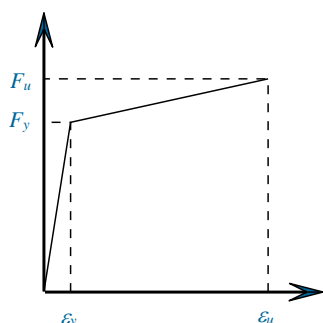
جدول ۱: مشخصات مصالح فولاد اعضای قاب و پوشش

تنش تسلیم F_y (MPa)	تنش نهایی F_u (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته E (MPa)
۲۲۷	۳۱۰	۰/۳	۲۰۳۴۰۰



تیرک 350T150 ستونک 350S162

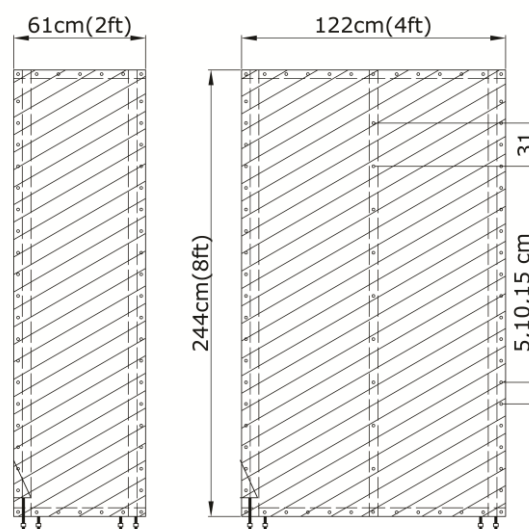
شکل ۲: ابعاد مقطع ستونک و تیرک برحسب میلی‌متر



شکل ۳: نمودار تنش-کرنش فولاد در مدل المان محدود

در آزمایش‌های یو و همکارانش [۱۶-۱۹]، دیوار بر روی یک تیر گرم‌نورد با مقطع $W 16 \times 67$ قرار گرفته و همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود تیرک پایینی، توسط چهار پیچ (دو تا در هر سمت) که فاصله هر یک از بر دیوار و تا پیچ بعدی $8/89$ سانتی‌متر می‌باشد به تیر گرم‌نورد متصل شده است. البته در سمت اعمال بار، پیچ به نگه‌دارنده متصل می‌شود. این شرایط در مدل

و کرنش نهایی (ϵ_{ii}) برابر با ۲۲ درصد در نظر گرفته شده است. همین مشخصات برای ورق فولادی پوشش نیز در نظر گرفته شد. برای مقابله با نیروی بلندشدگی، از قطعه نگه‌دارنده^۱ استفاده می‌شود. در نمونه‌های مورد بررسی، این قطعه در سمت اعمال بار (سمت چپ در شکل ۱) قرار داده می‌شود.



(الف) (ب)

شکل ۱: ابعاد پانل‌های دیوار و نحوه قرارگیری و اتصال اعضا و نگه‌دارنده [۱۶]

ستونک‌های کناری دیوارهای برشی به‌صورت دوتایی و ستونک‌های میانی به‌صورت منفرد استفاده می‌شوند. فواصل پیچ‌ها بر روی ستونک‌های میانی در تمام نمونه‌ها ۳۱ سانتی‌متر است، لیکن فواصل آن‌ها در پیرامون قاب یعنی بر روی ستونک‌های انتهایی و تیرک‌ها در نمونه‌های مختلف، متفاوت بوده و برابر با ۵، ۱۰ یا ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۱).

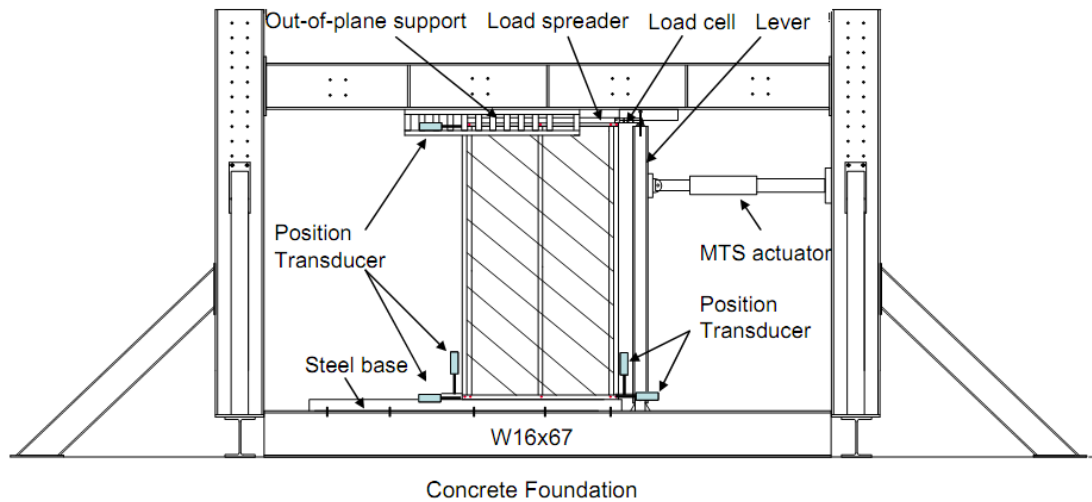
۲-۲- شرایط مرزی و بارگذاری

معمولاً دیوارهای برشی در سازه‌های فولادی سبک بر روی یک پی نواری بتنی اجرا می‌شوند و تیرک پایینی آن‌ها توسط پیچ‌هایی به شالوده متصل می‌گردد. تیرک بالایی نیز به سقف که معمولاً سختی بسیار بیشتری نسبت به

^۱ Hold Down

تیرک پایینی پارتیشن‌بندی شده و هر سه مؤلفه تغییرمکانی این بخش (u_x, u_y, u_z) بسته می‌شود.

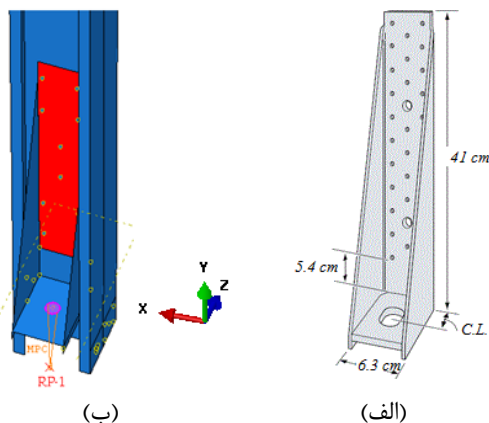
المان محدود نیز مدل‌سازی شده است، به‌گونه‌ای که در پایین دیوار، در موقعیت چهار پیچ مورد اشاره، بخشی از



شکل ۴: نمای قاب آزمایش [۱۶]

(نقاط پیرو) به تغییرمکان یک نقطه خاص از آن (نقطه کنترل) مقید می‌شود. در این‌جا در ناحیه اتصال پایه‌ی نگه‌دارنده، ناحیه‌ای به ابعاد پیچ تعریف نموده و آن را به نقطه‌ای روی تیرک پایینی که کلیه مؤلفه‌های تغییرمکانی آن بسته شده است، می‌بندیم. این موضوع در شکل ۵-ب نشان داده شده است.

در آزمایشات، قطعه‌ی نگه‌دارنده از محصولات شرکت سیمپسون با مشخصه Strong-Tie S/HD10S [۲۳] با ابعادی مطابق شکل ۵-الف انتخاب شده است. نگه‌دارنده توسط تعدادی پیچ خودکار به جان ستونک متصل شده و پایه آن به وسیله پیچی به تیر گرم‌نورد پایینی متصل می‌شود. به دلیل این‌که ضخامت مقاطع جدار سرد نورد بسیار نازک می‌باشد، عدم وجود نگه‌دارنده باعث تغییر شکل تیرک پایینی شده و سبب دوران صلب دیوار می‌شود. در مدل المان محدود نیز، مدل‌سازی صحیح نگه‌دارنده از اهمیت برخوردار است. هم به دلیل مسئله بلندشدگی دیوار و هم به دلیل ضخامت و سختی بیشتر این قطعه نسبت به اعضای قاب، بدون مدل‌سازی آن نمی‌توان به خوبی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شد. لذا در تحقیق حاضر، نگه‌دارنده با ابعادی مشابه نمونه آزمایشگاهی مطابق شکل ۵-ب مدل‌سازی شد. برای اعمال شرایط مرزی قطعه نگه‌دارنده، در ناحیه اتصال پیچ‌های نگه‌دارنده به ستونک، از قید Tie و برای مدل‌سازی پیچ اتصال آن به زمین از قید MPC استفاده می‌گردد. در قید MPC تغییرمکان نقاط معینی از مدل



شکل ۵: مشخصات قطعه نگه‌دارنده،

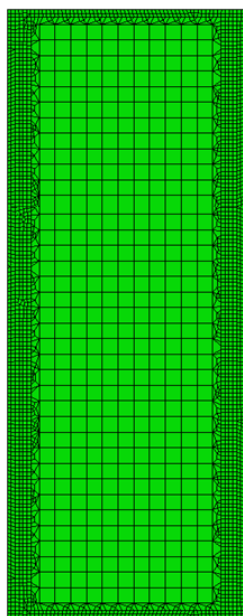
(الف) ابعاد قطعه [۲۳] (ب) مدل المان محدود

در آزمایشات [۱۶-۱۹]، بارگذاری جانبی دیوار از طریق یک تیر T-شکل گرم‌نورد به تیرک بالای دیوار منتقل

قسمت‌های با مش‌بندی بزرگ، می‌باشد. المان S3 نیز یک المان سه‌گره‌ای، مرتبه اول (خطی) می‌باشد. هر دو این المان‌ها توانایی تحلیل غیرخطی و تغییرشکل‌های بزرگ را دارا بوده و برای مدل‌سازی انواع سازه‌های جدار نازک مناسب می‌باشند.

در تحلیل پانل دیوار برشی، هر چه مش‌بندی منظم‌تر انجام شود، همگرایی تحلیل بهبود یافته و زمان آن کاهش می‌یابد. از طرفی در تحلیل تماس، هر چه مش بندی جسم پیرو ریزتر انجام شود، از فرورفتگی آن (ورق پوشش) در جسم مرجع (اعضای قاب) بهتر جلوگیری می‌شود.

اندازه مش، علاوه بر تأثیر بر دقت نتایج و زمان تحلیل، در دیوارهای برشی مورد بررسی، که در آن رفتار غیرخطی هندسی و مصالح به‌صورت چشم‌گیری رخ می‌دهد، بر همگرایی عددی مسئله نیز به شدت تأثیرگذار است. مشاهده گردید که در ورق پوشش، استفاده از مش مربعی به ابعاد ۳/۵ سانتی‌متر در ناحیه‌ای که تماس بین ورق و قاب وجود ندارد و مش به ابعاد یک سانتی‌متر در نواحی دارای تماس، دقت و همگرایی کافی را به‌دنبال دارد (شکل ۶). برای ستونک و تیرک از مش مثلثی به ابعاد ۳/۵ سانتی‌متر استفاده شده است.



شکل ۶: مش‌بندی ورق پوشش

می‌شود. برای این منظور، تیرک توسط دو ردیف پیچ در فواصل ۷/۶۲ سانتی‌متر (۳ اینچ) به تیر T-شکل متصل شده است. از حرکت این تیر در جهت عمود بر دیوار، توسط دو تکیه‌گاه در طرفین دیوار، جلوگیری شده است (شکل ۳). در مدل المان محدود، برای اعمال بار، از روش کنترل تغییرمکان استفاده می‌شود و نقاطی از تیرک بالایی که در موقعیت پیچ‌ها قرار دارد، توسط قید MPC به نقطه اعمال بار (نقطه مرجع) بسته می‌شود. تغییرمکان جانبی مورد نظر در راستای افق به نقطه مرجع وارد شده و از آن طریق به‌صورت یکسان به تمام نقاط تیرک اعمال می‌شود. تغییرمکان نقطه مرجع در راستای خارج از صفحه دیوار بسته می‌شود. لذا در تحلیل بار-افزون، کل تیرک بالایی تحت بارگذاری قرار گرفته و تغییرشکل جانبی دیوار برشی را موجب می‌شود بدون این‌که این تیرک از صفحه خارج شود.

۳-۲- نوع المان و مش‌بندی

آباکوس المان‌های متعددی برای مدل‌سازی محیط‌های مختلف دارد که از آن جمله می‌توان المان سه‌بعدی، پوسته، تیر، غشاء، خرپا و... را نام برد. در مدل‌سازی اعضای سرد نورد به علت کوچک بودن یک بعد نسبت به سایر ابعاد، از المان پوسته استفاده می‌شود. در این مطالعه المان S4R برای ورق پوشش و المان S3 برای مقاطع ستونک و تیرک به‌کار رفته و برای مدل‌سازی اندرکنش قاب و پوشش، در محل همپوشانی ورق پوشش با اعضای قاب (ستونک و تیرک) از تحلیل تماس استفاده شده است. برای این منظور ورق پوشش به‌عنوان جسم پیرو^۱ و اعضای قاب به عنوان جسم مرجع^۲ انتخاب شدند.

المان S4R یک المان پوسته چهارگره‌ای با انحنای دوطرفه، با تابع شکل مرتبه اول (خطی) و با انتگرال کاهش یافته برای جلوگیری از قفل شدگی برش در

¹ Slave

² Master

۴-۲- مدل سازی پیچها و اندرکنش قاب و دیوار

با توجه به این که یکی از مودهای خرابی انواع دیوارهای برشی سرد نورد، کنده شدن پیچهای اتصال می باشد (شکل ۴)، شاید بتوان گفت که اصلی ترین چالش در مدل سازی پانل های دیوارهای برشی سرد نورد، مدل سازی دیوار برشی به نحوی است که اثر کنده شدن پیچها^۱، لقی در اتصالات و پاره شدن ورق پوشش، در مقاومت برشی و تغییر مکان خرابی آن لحاظ شود. در صورتی که این نوع خرابیها مدل سازی نشود، دیوار مقاومت بیشتری از خود نشان خواهد داد و مدل ساخته شده درک درستی از رفتار واقعی دیوار، ارائه نخواهد کرد.

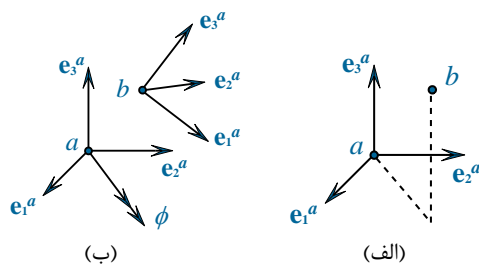


شکل ۷: خرابی اتصال ورق به قاب با پیچ خودکار تحت برش [۱۶]

می گردید، که این نوع مدل سازی نمی تواند گویای رفتار واقعی اتصال باشد.

در تحقیق حاضر، پس از مدل سازی های فراوان مشاهده گردید که جایگزینی پیچها با فنری که رفتار الاستیک داشته و تحت نیرو یا تغییر مکان خاصی به خرابی برسد، می تواند رفتار پیچ را به خوبی مدل نماید. چرا که می توان با استفاده از خاصیت الاستیسیته فنر، لهیدگی ورق و خم شدن پیچ در محل اتصال و با استفاده از تعیین مقاومتی نهایی برای فنر، کنده شدن پیچ را مدل نمود. البته رفتار واقعی نیرو-تغییر مکان اتصالات پیچی، رفتاری غیر خطی است، اما در تحلیل المان محدود دیوارهای برشی فولادی در سازه های فولادی سبک، با توجه به تعداد زیاد پیچهای اتصال پوشش به قاب، نازکی اعضاء و ورق پوشش و نیز تمرکز تنش در اتصالات، مسئله همگرایی پارامتر بسیار مهمی در مدل سازی است. لذا در مدل ارائه شده در مقاله، سعی گردیده که پیچیدگی های مدل در حدی نباشد که منجر به خطاهای عددی زیاد شود؛ و از این رو از مدل فنر خطی برای اتصالات پیچی استفاده گردید.

برای مدل سازی رفتار پیچهای خودکار متصل کننده ورق پوشش به ستونکها و تیرکها از رابط انتقالی Cartesian (شکل ۵-الف) و از رابط دورانی Rotation (شکل ۵-ب) استفاده شده است.



شکل ۸: رابطهای استفاده شده برای مدل سازی پیچها

رابط انتقالی Cartesian اتصال بین دو گره ایجاد می کند که امکان جابه جایی دو گره نسبت بهم فراهم شود. حسن این رابط آن است که درجات آزادی انتقالی آن (u_x, u_y, u_z) ، نسبت به هم صلب نبوده و در نتیجه قابلیت

با توجه به تعداد زیاد پیچهای اتصال و صعوبت مدل سازی آنها، تحقیقات عددی کمی در زمینه دیوارهای برشی سرد نورد صورت گرفته است و در تحقیقات صورت گرفته، عدم مدل سازی پیچهای اتصال، باعث ایجاد خطا و عدم اطمینان نسبت به نتایج به دست آمده شده است. در این تحقیقات، عموماً برای مدل سازی پیچها از تکنیک کوپلینگ استفاده شده است. بدین معنی که با یکسان نمودن درجات آزادی المانهای قرار گرفته در دو سمت پیچها، تنها جابه جایی المانهای محل اتصال یکسان

¹ Pull out

جابه‌جایی دو گره اتصال (نقاط a و b در شکل ۸) نسبت به هم وجود دارد، که می‌توان از این خاصیت برای تعریف اتصالی الاستیک و دارای معیار خرابی استفاده نمود. رابط Rotation مشابه با رابط Cartesian بوده ولی درجات آزادی دورانی بین دو گره را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مقاومت نهایی فنر (رابط) خطی به صورت ضریبی از "مقاومت اسمی اتصال با پیچ خودکار در برابر برش" به‌گونه‌ای محاسبه شده است که تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دیوارهای ۱ الی ۳ داشته باشد. براساس بخش E4.3 آیین‌نامه AISI در طراحی اعضای سازه‌ای فولاد سردنورد شده [۲۵] (یا بخش ۳-۴-۵ از نشریه شماره ۶۱۲ [۲۶])، مقاومت اسمی برشی اتصال دو ورق فولادی که با پیچ خودکار متصل شده‌اند، در صورتی که پیچ از لبه ورق فاصله کافی داشته و خود پیچ در برش دچار شکست نشود، با P_{ns} نشان داده می‌شود.

مقدار P_{ns} هر اتصال پیچی (با پیچ‌های خودکار ۸×۱۸-1/2-in مورد استفاده در آزمایشات یو و همکاران [۱۶] و [۱۷] برای اتصال ورق پوشش به قاب)، برای دیوارهای شماره ۱ الی ۳ حدود ۳ kN به دست می‌آید. در مدل‌سازی المان محدود، استفاده از ۱/۷ برابر P_{ns} ، به‌عنوان مقاومت نهایی فنر خطی، بهترین تطبیق را از حیث مقاومت برشی نهایی دیوار برشی با نتایج آزمایشگاهی دیوارهای شماره ۱ الی ۳ نشان می‌داد. لذا در کلیه مدل‌ها از این مقاومت افزایش‌یافته برای مدل‌سازی فنرهای خطی استفاده شد. توجیه علمی این افزایش مقاومت را می‌توان در این موضوع جستجو کرد که در تست آزمایشگاهی با توجه به تغییر شکل قاب و پوشش، پیچ‌های مجاور پیچ مورد بررسی، در باربری این پیچ مشارکت موثری می‌نمایند و از تمرکز تنش در آن می‌کاهند، اما این مشارکت در مدل المان محدود کمتر است. ضریب افزایشی می‌تواند جبران‌کننده این مسئله باشد. نمونه‌ای از شکست پیچ‌ها در گوشه یکی از قاب‌های آزمایشگاهی در شکل ۷ دیده می‌شود.

سختی فنر خطی معادل پیچ‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده است که تغییر مکان دیوارهای ۱ الی ۳ با نتایج آزمایشگاهی تطبیق خوبی داشته باشد. با این روش، سختی فنر، ۶/۵ kN/cm به دست آمد و این سختی برای همه دیوارها مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این سختی و مقاومت نهایی فنر، تغییر مکان نهایی فنر، حدود ۷/۸ میلی‌متر به دست می‌آید.

برای مدل‌سازی اندرکنش ورق و قاب، از تماس افقی با اصطکاک و تماس عمودی با عدم نفوذ دو سطح در هم‌دیگر، با قابلیت جدا شونده بعد از بارگذاری استفاده می‌شود. به این ترتیب سطوح در هم فرورفتگی نخواهند داشت و قابلیت لغزش بر روی هم را دارا می‌باشند و بعد از کماتش ورق پوشش، امکان جداشدگی ورق از قاب وجود دارد.

آیین‌نامه AISC [۲۷] برای لغزش سطوح گالوانیزه که با پیچ به یکدیگر متصل می‌شوند، ضریب اصطکاک ۰/۳۵ را ارائه می‌دهد و استانداردهای RCSC [۲۸] و AASHTO [۲۹] را ضریب اصطکاک ۰/۳۵ را در نظر می‌گیرند. مدل المان محدود به مقدار ضریب اصطکاک حساس نمی‌باشد و در این مدل، از ضریب اصطکاک ۰/۳ استفاده شد.

۳- راست‌نمایی مدل‌های اجزای محدود

به منظور راست‌نمایی نتایج عددی اجزاء محدود، از مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته توسط یو و چن [۱۸] و [۱۹] استفاده گردید و ۱۰ نمونه دیوار برشی با خصوصیات متفاوت از نظر ابعاد، ضخامت مقاطع تشکیل دهنده قاب، ضخامت ورق پوشش و فواصل پیچ‌های اتصال، مقایسه و تطبیق داده شد. در آزمایشگاه از هر نوع قاب، دو نمونه ساخته و مورد آزمایش قرار می‌گرفت. معیار درستی نتایج آزمایشگاهی، عدم وجود اختلاف بیش از ۱۵ درصد در نتایج مربوط به دو نمونه بوده است و در صورت وجود اختلاف بیش از ۱۵ درصد در مقاومت جانبی دو نمونه،

شماره ۱۰ مشابه دیوارهای قبلی است اما دارای ضخامت ورق پوشش ۰/۶۹ میلی‌متر (۲۷ میل) بوده و ضخامت اعضای آن هم با شش دیوار قبلی متفاوت است. دیوارهای شماره ۷ تا ۹ (مطابق شکل ۱-الف) دارای ابعاد ۱/۲۲×۲/۴۴ متر می‌باشند. ضخامت ورق پوشش در این سه دیوار، ۰/۸۴ میلی‌متر (۳۳ میل) است.

نمونه سومی مورد آزمایش قرار می‌گرفت. مشخصات ده پانل دیوار برشی مورد بررسی، منطبق بر جدول ۲ می‌باشد. هفت دیوار (مطابق شکل ۱-ب) دارای قاب به ابعاد ۰/۶۱×۲/۴۴ متر می‌باشند، که دیوارهای شماره ۱ الی ۳ دارای ضخامت ورق پوشش ۰/۸۴ میلی‌متر (۳۳ میل) و دیوارهای شماره ۴ الی ۶ دارای ضخامت ورق پوشش ۰/۷۶ میلی‌متر (۳۰ میل) می‌باشند. ابعاد دیوار

جدول ۲: مشخصات دیوارهای مورد مطالعه [۱۸ و ۱۹]

شماره دیوار	نام دیوار*	ابعاد قاب ارتفاع (h) × عرض (b) cm(ft)	ضخامت ورق پوشش (t ₂) mm(mili in)	ضخامت مصالح قاب‌بندی (t ₁) mm(mili in)	فاصله پیچ‌های کناری (S) cm(in)
۱	۲-۸-۴۳-۳۳-۶	۶۱×۲۴۴ (۲×۸)	۰/۸۳۸۲ (۳۳)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۱۵/۲۴ (۶)
۲	۲-۸-۴۳-۳۳-۴	۶۱×۲۴۴ (۲×۸)	۰/۸۳۸۲ (۳۳)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۱۰/۱۶ (۴)
۳	۲-۸-۴۳-۳۳-۲	۶۱×۲۴۴ (۲×۸)	۰/۸۳۸۲ (۳۳)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۵/۰۸ (۲)
۴	۲-۸-۴۳-۳۰-۶	۶۱×۲۴۴ (۲×۸)	۰/۷۶۲۰ (۳۰)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۱۵/۲۴ (۶)
۵	۲-۸-۴۳-۳۰-۴	۶۱×۲۴۴ (۲×۸)	۰/۷۶۲۰ (۳۰)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۱۰/۱۶ (۴)
۶	۲-۸-۴۳-۳۰-۲	۶۱×۲۴۴ (۲×۸)	۰/۷۶۲۰ (۳۰)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۵/۰۸ (۲)
۷	۴-۸-۴۳-۳۳-۶	۱۲۲×۲۴۴ (۴×۸)	۰/۸۳۸۲ (۳۳)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۱۵/۲۴ (۶)
۸	۴-۸-۴۳-۳۳-۴	۱۲۲×۲۴۴ (۴×۸)	۰/۸۳۸۲ (۳۳)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۱۰/۱۶ (۴)
۹	۴-۸-۴۳-۳۳-۲	۱۲۲×۲۴۴ (۴×۸)	۰/۸۳۸۲ (۳۳)	۱/۰۹۲۲ (۴۳)	۵/۰۸ (۲)
۱۰	۲-۸-۳۳-۲۷-۲	۶۱×۲۴۴ (۲×۸)	۰/۶۸۵۸ (۲۷)	۰/۸۳۸۲ (۳۳)	۵/۰۸ (۲)

* برای نام‌گذاری قاب‌ها از یک نام پنج قسمتی استفاده شده است، که به ترتیب نشان دهنده عرض و ارتفاع قاب بر حسب فوت، ضخامت اعضای قاب و ضخامت ورق پوشش بر حسب میلی اینچ و فاصله پیچ‌ها اتصال بر حسب اینچ می‌باشد.

با ضخامت ورق به نمونه‌ها اعمال می‌گردد. بنابراین برای تحلیل دیوار، به دو تحلیل مجزا نیاز می‌باشد. یکبار تحلیل خطی کمانش انجام شده و مودهای کمانش دیوار تعیین می‌شود. سپس تحلیل غیرخطی بار افزون با وجود یک تغییرشکل اولیه انجام گرفته و مقاومت جانبی دیوار تعیین می‌شود.

البته استخراج مودهای کمانش می‌تواند از منظر دیگری نیز سودمند باشند. در صورتی که اشتباهی در حین مدل‌سازی صورت گرفته باشد (مثلاً پیچی مدل نشده باشد)، این اشتباه می‌تواند با بررسی مودهای کمانش تشخیص داده شود و قبل از ورود به تحلیل بار افزون اشتباه تصحیح گردد. معمولاً تحلیل کمانش خطی یک

برای بررسی عملکرد دیوارها تحت بارگذاری یک‌سویه از تحلیل بارافزون غیرخطی استفاده می‌گردد. به‌منظور فراهم شدن امکان ورود به رفتار پس‌کمانشی برای اعضای قاب و پوشش در حین تحلیل بارافزون، لازم است ابتدا یک تغییرشکل اولیه (ناکاملی) به دیوار اعمال گردد. در صورت عدم اعمال ناکاملی، کمانش در ورق پوشش ایجاد نخواهد شد و دیوار مقاومت بیشتری نسبت به آزمایشات عملی از خود نشان خواهد داد. برای اعمال تغییرشکل اولیه، ابتدا تحلیل خطی کمانش انجام شده و مودهای کمانش ورق پوشش و ستونک‌ها به‌دست می‌آید. سپس باتوجه به پیشنهاد شیفر و پکز [۲۴] که ناکاملی برابر با ضخامت ورق را برای ستونک‌ها پیشنهاد می‌کنند، این مودها به‌عنوان تغییرشکل اولیه و با حداکثر مقداری برابر

تحلیل وقت گیر نمی باشد ولی تحلیل بار افزون، تحلیلی زمان بر می باشد.

در تحلیل غیرخطی بار افزون، از انتخاب اتوماتیک نرم افزار آباکوس برای تعیین میزان نمو بار و رواداری های همگرایی استفاده می شود که البته در طول تحلیل مقادیر آنها جهت دستیابی به یک جواب صحیح، تعدیل می شود. در نواحی از بارگذاری که همگرایی حل، مشکل تر است، مقادیر اعمال بار کوچک تر می شود؛ لیکن در حالت عادی این کار بیشتر از پنج بار انجام نمی شود و در صورتی که بعد از پنج بار کوچک کردن بازه، همگرایی حاصل نشد، تحلیل متوقف می شود.

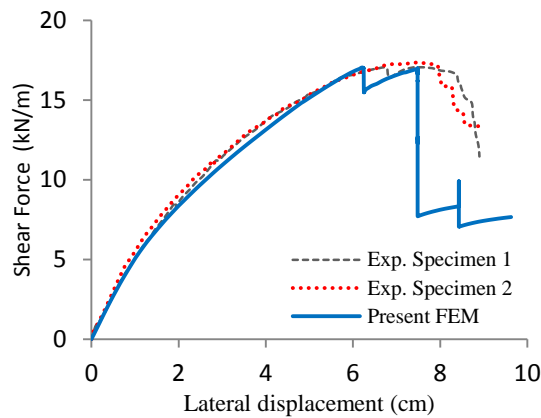
در هر ۱۰ دیوار مورد بررسی، بیشترین نیروی برشی قابل تحمل توسط دیوار (مقاومت جانبی) و تغییرمکان جانبی در حداکثر بار، از تحلیل اجزای محدود استخراج شده و در جدول ۳ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. در این جدول علاوه بر مقادیر مطلق مقاومت و تغییرمکان جانبی مدل های عددی و آزمایشگاهی، برای مقایسه بهتر بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیل اجزاء محدود، نسبت مقاومت و تغییرمکان جانبی محاسبه شده از روش اجزاء محدود به نتایج آزمایشگاهی نیز ارائه شده است. مقدار میانگین نسبت مقاومت جانبی برابر با $1/0.49$ با ضریب تغییرات $0/0.685$ می باشد. این موضوع نشان دهنده آن است که روش اجزاء محدود می تواند با دقت کافی مقاومت جانبی دیوارهای برشی فولادی سرد نورد را پیش بینی نماید.

همچنین در شکل ۹، برای دیوار ۴-۳۳-۴۳-۸-۲، منحنی بار- تغییرمکان جانبی با استفاده از روش المان محدود ترسیم شده و با نتایج نمونه های آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. این مقایسه نشان می دهد که روش المان محدود قابلیت پیش بینی منحنی بار- تغییرمکان دیوار برشی فولادی سرد نورد شده را به صورت بسیار نزدیکی دارد. اما در مورد تغییرمکان در بار حداکثر، مطابق جدول ۳، نتایج تحلیل اجزاء محدود کاملاً نتایج آزمایشگاهی را تعقیب نمی کند و در بعضی موارد تفاوت محسوسی با

نتایج آزمایشگاهی دارد. در این خصوص دو علت اصلی قابل ارائه است. اول این که تنوع مکانیزم هایی که در تغییرمکان و شکل پذیری این دیوارهای برشی اثرگذارند باعث می شود که در بسیاری از دیوارهای مورد آزمایش در آزمایشات یو و همکاران [۱۶ و ۱۷]، حتی نتایج تغییرمکان دو نمونه آزمایشگاهی کاملاً مشابه هم، تفاوت محسوسی باهم داشته باشند. دومین علت آن است که در مدل اجزاء محدود، خرابی هر اتصال پیچی و حذف آن از مدل، در همگرایی مسئله تاثیرگذار بوده و با حذف چند پیچ و رسیدن دیوار به حدود بار حداکثر، تغییرمکان مدل دیوار افزایش زیادی نمی یابد؛ درحالی که در نمونه آزمایشگاهی، بازه بیشتری از تغییرمکان در حدود بار حداکثر طی می شود. در نتیجه معمولاً تغییرمکان مدل اجزاء محدود از نمونه آزمایشگاهی کمتر است.

همچنین در شکل ۹، برای دیوار ۴-۳۳-۴۳-۸-۲، منحنی بار- تغییرمکان جانبی با استفاده از روش المان محدود ترسیم شده و با نتایج نمونه های آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. این مقایسه نشان می دهد که روش المان محدود قابلیت پیش بینی منحنی بار- تغییرمکان دیوار برشی فولادی سرد نورد شده را به صورت بسیار نزدیکی دارد.

در شکل های ۱۰ تا ۱۲ نوع خرابی در مدل اجزاء محدود با نمونه آزمایشگاهی برای چند دیوار متفاوت مقایسه گردیده است که مطابقت بسیار خوبی بین خرابی های مشاهده شده در هر دو روش وجود دارد. این موضوع نشان دهنده آن است که روش اجزاء محدود توانایی پیش بینی نوع خرابی های دیوار را با دقت بسیار مناسبی دارا می باشد. همانند روش آزمایشگاهی، خرابی ها بعد از افت چشم گیر در مقاومت نهایی دیوار نمایش داده شده است. در دیوار شکل ۱۰ که فاصله پیچ های اتصال ورق پوشش به قاب ۱۵ سانتی متر می باشد، در نمونه آزمایشگاهی خرابی ناشی از کمناش برشی ورق و کنده شدن پیچ های نزدیک نگه دارنده اتفاق می افتد که این نوع خرابی در نمونه اجزاء محدود نیز مشاهده می شود. در



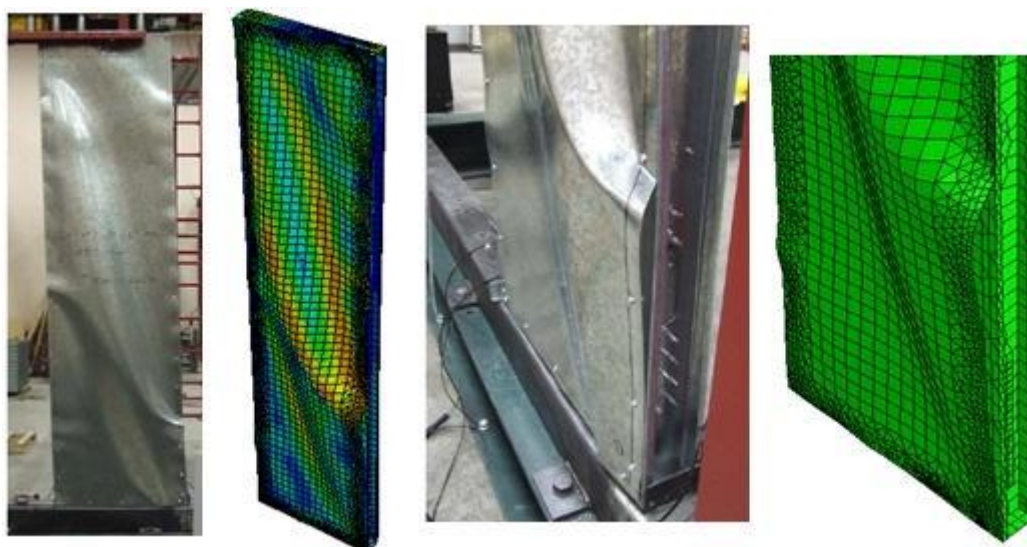
شکل ۹: نمودار نیرو- تغییرمکان دیوار ۴-۳۳-۴۳-۸-۲ در مدل اجزاء محدود و نمونه‌های آزمایشگاهی

دیوار شکل ۱۱ که فاصله پیچ‌های اتصال ورق پوشش به قاب ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، نوع خرابی مانند دیوار شکل ۱۰ می‌باشد؛ ولی کنده شدن پیچ‌ها در فاصله نزدیک‌تری تا گوشه دیوار اتفاق می‌افتد که در مدل اجزاء محدود نیز این موضع به خوبی دیده می‌شود. در شکل ۱۲ نوع خرابی برای دیوار با عرض ۱/۲۲ متر و با فاصله پیچ‌های اتصال ۱۵ سانتی‌متر نشان داده شده است که باز هم از دقت روش المان محدود خبر می‌دهد.

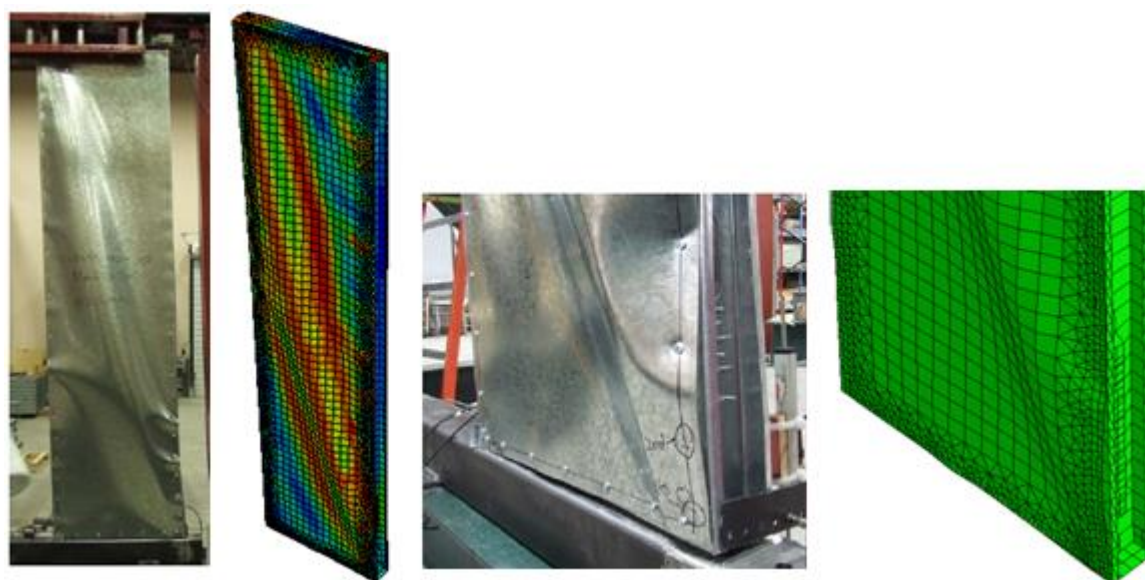
جدول ۳: مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۸ و ۱۹]

شماره دیوار	شماره نمونه (آزمایشگاهی)	مقاومت جانبی آزمایشگاهی (kN/m)	مقاومت جانبی اجزاء محدود (kN/m)	تغییرمکان جانبی آزمایشگاهی (cm)	تغییرمکان جانبی اجزاء محدود (cm)	نسبت مقاومت جانبی اجزاء محدود به جانبی آزمایشگاه	نسبت تغییرمکان جانبی اجزاء محدود به آزمایشگاه
۱	اول	۱۵/۸۴	۱۵/۰۹	۷/۹۵	۶/۶۵	۰/۸۴	۰/۹۵
	دوم	۱۴/۴۰		۶/۲۷		۱/۰۶	۱/۰۵
۲	اول	۱۷/۰۷	۱۷/۰۴	۶/۶۸	۶/۲۲	۰/۹۳	۱
	دوم	۱۷/۳۲		۷/۳۹		۰/۸۴	۰/۹۸
۳	اول	۲۰/۶۲	۱۹/۳۷	۸/۵۱	۶/۷۵	۰/۷۹	۰/۹۴
	دوم	۱۹/۸۷		۷/۷۵		۰/۸۷	۰/۹۸
۴	اول	۱۲/۹۸	۱۳/۹۸	۸/۳۸	۶/۷۳	۰/۸۰	۱/۰۸
	دوم	۱۳/۲۶		۸/۶۴		۰/۷۸	۱/۰۷
۵	اول	۱۳/۹۴	۱۶/۴۸	۸/۴۳	۷/۴۰	۰/۸۸	۱/۱۸
	دوم	۱۴/۳۳		۸/۲۵		۰/۹۰	۱/۱۵
۶	اول	۱۶/۳۱	۱۷/۵۱	۸/۳۸	۶/۰۸	۰/۷۳	۱/۰۷
	دوم	۱۶/۳۴		۸/۷۱		۰/۷۰	۱/۰۷
۷	اول	۱۵/۲۲	۱۵/۵۶	۵/۲۸	۳/۱۸	۰/۶۰	۱/۰۲
	دوم	۱۶/۷۳		۴/۳۷		۰/۷۳	۰/۹۳
۸	اول	۱۷/۴۵	۱۹/۸۱	۴/۳۹	۳/۶۷	۰/۸۴	۱/۱۳
	دوم	۱۷/۹۲		۵/۸۹		۰/۶۳	۱/۱۱
۹	اول	۱۹/۶۰	۲۱/۶۲	۶/۴۳	۳/۴۲	۰/۵۳	۱/۱۰
	دوم	۲۰/۴۸		۴/۱۹		۰/۸۲	۱/۰۵
۱۰	اول*	۱۲/۸۷	۱۳/۹۲	۵/۴۶	۶/۳۰	۱/۱۵	۱/۰۸
میانگین							
ضریب تغییرات							
						۰/۸۱	۱/۰۴۹
						۰/۱۸	۰/۰۶۸۵

* ۹ نمونه اول با مرجع [۱۸] و نمونه آخر با مرجع [۱۹] تطبیق داده شده است.



شکل ۱۰: مقایسه خرابی مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی [۱۶] برای دیوار ۲-۸-۴۳-۳۳-۶



شکل ۱۱: مقایسه خرابی مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی [۱۶] برای دیوار ۲-۸-۴۳-۳۳-۴

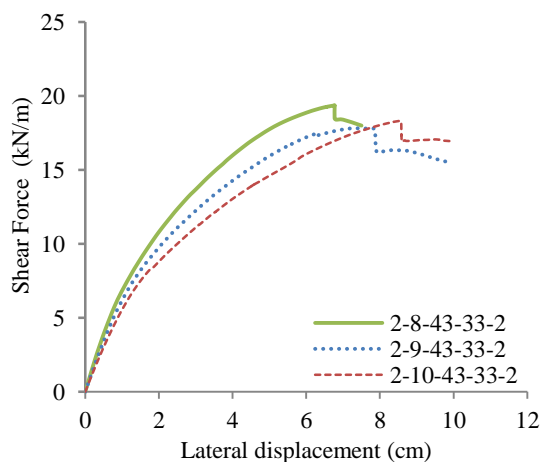


شکل ۱۲: مقایسه خرابی مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی [۱۶] برای دیوار ۴-۸-۴۳-۳۳-۶

۴-۱- تأثیر ارتفاع قاب بر مقاومت جانبی

با توجه به این که قاب‌های با ارتفاع بیش از ۲۴۴ سانتی‌متر نیز می‌توانند در ساخت سازه‌های فولادی سبک مورد استفاده قرار گیرند، به منظور ارزیابی تأثیر ارتفاع دیوار بر مقاومت جانبی آن، دو سری دیوار با ارتفاع‌های ۲۴۴، ۲۷۴ و ۳۰۴ سانتی‌متر مدل و مورد بررسی قرار گرفت. سری اول دیوارها، از نوع ۲-h-۴۳-۳۳-۲ و سری دوم از نوع ۲-h-۴۳-۳۳-۴ می‌باشد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمودار بار- تغییر مکان جانبی به ترتیب برای دیوار ۲-h-۳۳-۳۳-۲ و ۲-h-۴۳-۳۳-۴ ترسیم شده است.

در جدول ۴ بار نهایی دیوار برای ارتفاع‌های مختلف با هم مقایسه گردیده است. دیده می‌شود با افزایش ارتفاع دیوار، از مقاومت جانبی آن کاسته می‌شود. تنها در دیوار ۲-h-۳۳-۳۳-۲ از ۲-h-۴۳-۳۳-۲ با ارتفاع ۲۷۴ سانتی‌متر مقاومت جانبی کمتر از دیوار با ارتفاع ۳۰۴ سانتی‌متر است. که علت این امر آن است که در قاب به ارتفاع ۲۷۴ سانتی‌متر، خرابی علاوه بر کمناش ورق ناشی از کمناش اعوجاجی ستونک کناری نزدیک نگه دارنده می‌باشد. این همان نوع مکانیزم خرابی است که در تحقیقات یو [۲۲] مورد بررسی قرار گرفت. در قاب ۳۰۴ سانتی‌متری این نوع کمناش اتفاق نمی‌افتد در نتیجه مقاومت قاب ۳۰۴ سانتی‌متری بیشتر از قاب ۲۷۴ سانتی‌متری می‌باشد.

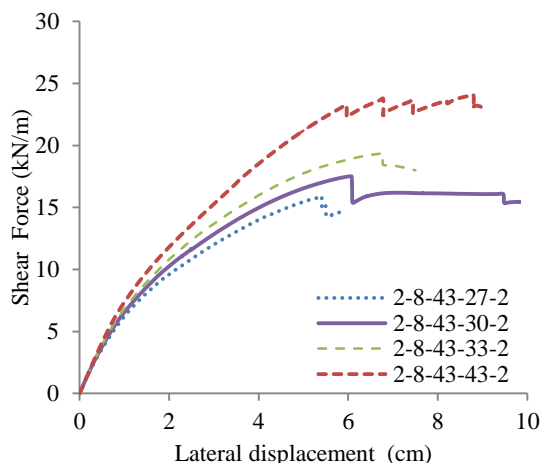


شکل ۱۳: تأثیر ارتفاع بر مقاومت جانبی دیوار ۲-h-۴۳-۳۳-۲

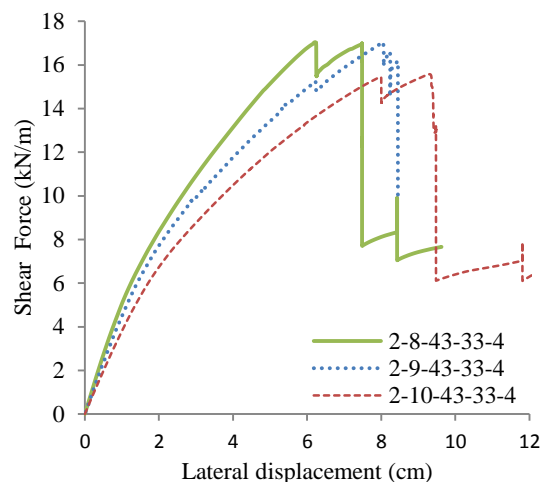
می‌افتد که این نوع خرابی در نمونه اجزاء محدود نیز مشاهده می‌شود. در دیوار شکل ۱۱ که فاصله پیچ‌های اتصال ورق پوشش به قاب ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، نوع خرابی مانند دیوار شکل ۱۰ می‌باشد ولی کنده شدن پیچ‌ها در فاصله نزدیک‌تری تا گوشه دیوار اتفاق می‌افتد که در مدل اجزاء محدود نیز این موضع به خوبی دیده می‌شود. در شکل ۱۲ نوع خرابی برای دیوار با عرض ۱/۲۲ متر و با فاصله پیچ‌های اتصال ۱۵ سانتی‌متر نشان داده شده است که باز هم از دقت روش المان محدود خبر می‌دهد.

۴- مطالعات پارامتریک

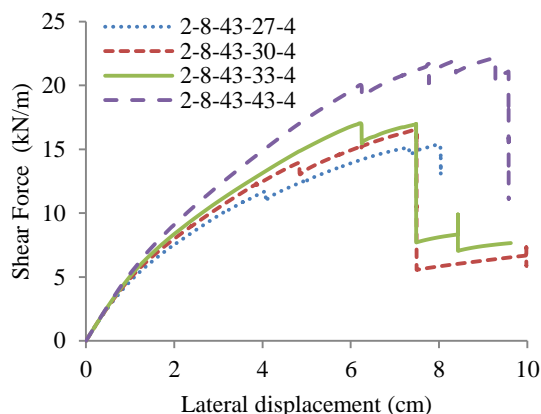
در قسمت قبل روش ارائه شده برای مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی سرد ساخت با نتایج آزمایشگاهی تطبیق داده شد و همان‌گونه که مشاهده گردید، این روش، تطبیق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. با توجه به این که بررسی تأثیر پارامترهای مختلف سازه‌ای در رفتار این نوع قاب‌ها در آزمایشگاه منوط به صرف هزینه و زمان زیاد و نیاز به تجهیزات و امکانات ویژه دارد؛ لذا با استفاده از این روش می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف را بررسی نمود. از طرفی روش المان محدود این بستر را فراهم می‌کند تا زمینه برای ایجاد درک بهتر نسبت به رفتار این دیوارها ایجاد شود و به صورت ساده‌تر بتوان از توزیع تنش در دیوار در طول مدت بارگذاری اطلاع پیدا نمود تا بتوان نقاط ضعیف آن را شناسایی کرده و از آن در جهت بهبود عملکرد دیوار استفاده شود؛ لذا در اینجا تأثیر پارامترهای مختلف از جمله ارتفاع قاب، ضخامت ورق پوشش، تنش تسلیم اعضای دیوار، ضخامت اعضای قاب و فاصله پیچ‌های متصل کننده ورق پوشش به اعضای قاب بر مقاومت جانبی دیوار مورد بررسی قرار گرفته و در هر مورد، نمودار بار- تغییر مکان جانبی دیوار ترسیم شده و بار خرابی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.



شکل ۱۵: تأثیر ضخامت ورق پوشش بر مقاومت جانبی دیوار ۲-۸-۴۳-۲-۲



شکل ۱۴: تأثیر ارتفاع بر مقاومت جانبی دیوار ۲-h-۴۳-۳۳-۴



شکل ۱۶: تأثیر ضخامت ورق پوشش بر مقاومت جانبی دیوار ۲-۸-۴۳-۲-۴

جدول ۴: تأثیر ارتفاع دیوار (h) بر مقاومت جانبی آن

مقاومت جانبی N/m(plf)	ارتفاع دیوار cm(ft)	نام دیوار
۱۹۳۷۴ (۱۳۰۲)	۲۴۴ (۸)	۲-۸-۴۳-۳۳-۲
۱۷۸۱۷ (۱۱۹۷)	۲۷۴ (۹)	۲-۹-۴۳-۳۳-۲
۱۸۳۱۶ (۱۲۳۱)	۳۰۴ (۱۰)	۲-۱۰-۴۳-۳۳-۲
۱۷۰۴۲ (۱۱۴۵)	۲۴۴ (۸)	۲-۸-۴۳-۳۳-۴
۱۷۰۱۲ (۱۱۴۳)	۲۷۴ (۹)	۲-۹-۴۳-۳۳-۴
۱۵۵۶۴ (۱۰۴۶)	۳۰۴ (۱۰)	۲-۱۰-۴۳-۳۳-۴

۲-۴- تأثیر ضخامت ورق پوشش فولادی

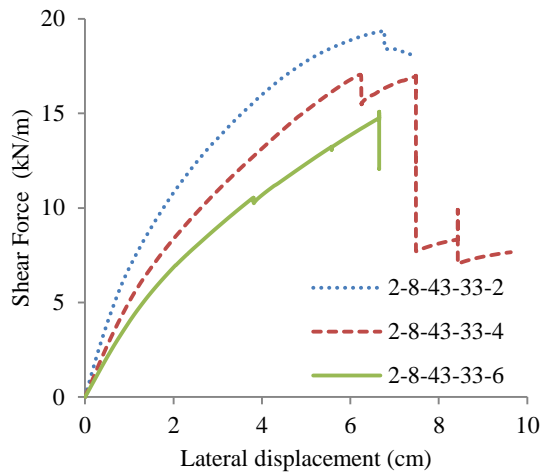
بدیهی است که جنس و ضخامت ورق پوشش تأثیر قابل توجهی بر مقاومت جانبی و شکل پذیری دیوار برشی خواهد داشت. نکته حائز اهمیت آن است که در مواقعی که کنده شدن پیچ‌ها یکی از مدهای خرابی دیوار باشد، این تأثیر کمتر است. این موضوع در دیوارهای با فاصله پیچ ۱۵ سانتیمتر اتفاق می‌افتد. ولی اگر مود خرابی تنها کمانش ورق پوشش باشد، ضخامت ورق تأثیر بیشتری بر مقاومت جانبی دیوار دارد.

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمودار نیرو- تغییرمکان به ترتیب برای دیوار ۲-۸-۴۳-۲-۲ و ۲-۸-۴۳-۲-۴ ترسیم شده است.

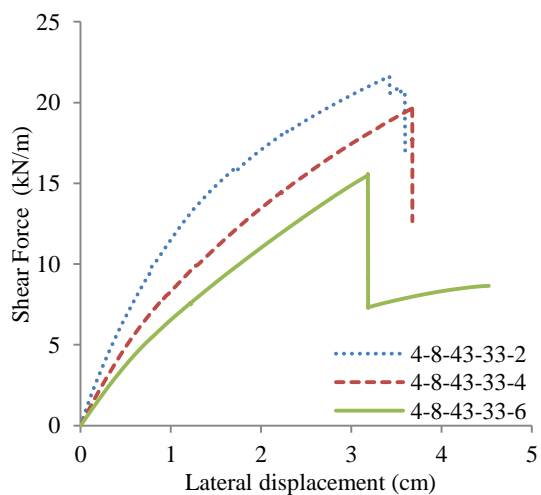
جدول ۵: تأثیر ضخامت ورق (t₂) بر مقاومت جانبی دیوار

مقاومت جانبی N/m(plf)	ضخامت ورق mm(mili in)	نام دیوار
۱۵۸۸۲ (۱۰۶۷)	۰/۶۸۶ (۲۷)	۲-۸-۴۳-۲۷-۲
۱۷۵۱۶ (۱۱۷۷)	۰/۷۶۲ (۳۰)	۲-۸-۴۳-۳۰-۲
۱۹۳۷۴ (۱۳۰۲)	۰/۸۳۸ (۳۳)	۲-۸-۴۳-۳۳-۲
۲۴۰۶۶ (۱۶۱۷)	۱/۰۹۲ (۴۳)	۲-۸-۴۳-۴۳-۲
۱۵۳۵۹ (۱۰۳۲)	۰/۶۸۶ (۲۷)	۲-۸-۴۳-۲۷-۴
۱۶۴۷۹ (۱۱۰۷)	۰/۷۶۲ (۳۰)	۲-۸-۴۳-۳۰-۴
۱۷۰۴۲ (۱۱۴۵)	۰/۸۳۸ (۳۳)	۲-۸-۴۳-۳۳-۴
۲۲۱۵۷ (۱۴۸۹)	۱/۰۹۲ (۴۳)	۲-۸-۴۳-۴۳-۴

در جدول ۵ بار نهایی دیوار برای ضخامت‌های مختلف ورق پوشش با هم مقایسه گردیده است. نکته جالب این‌که، مقاومت جانبی دیوار ۲-۸-۴۳-۲۷-۴ برابر



شکل ۱۷: تأثیر فاصله پیچ‌ها بر مقاومت جانبی دیوار
۲-۸-۴۳-۳۳-s



شکل ۱۸: تأثیر فاصله پیچ‌ها بر مقاومت جانبی دیوار
۴-۸-۴۳-۳۳-s

جدول ۶: تأثیر فاصله پیچ‌های اتصال (S) بر مقاومت جانبی دیوار

مقاومت جانبی N/m(plf)	فاصله پیچ‌ها اتصال cm (in)	نام دیوار
۱۹۳۷۴ (۱۳۰۲)	۵/۰۸ (۲)	۲-۸-۴۳-۳۳-۲
۱۷۰۴۲ (۱۱۴۵)	۱۰/۱۶ (۴)	۲-۸-۴۳-۳۳-۴
۱۵۰۸۸ (۱۰۱۴)	۱۵/۲۴ (۶)	۲-۸-۴۳-۳۳-۶
۲۱۶۲۳ (۱۴۵۳)	۵/۰۸ (۲)	۴-۸-۴۳-۳۳-۲
۱۹۸۱۳ (۱۳۳۱)	۱۰/۱۶ (۴)	۴-۸-۴۳-۳۳-۴
۱۵۵۵۹ (۱۰۴۶)	۱۵/۲۴ (۶)	۴-۸-۴۳-۳۳-۶

۱۵۳۵۹ نیوتن بر متر به دست آمده است. لازم به ذکر است که مقاومت جانبی این دیوار در دستورالعمل طراحی جانبی AISI [۱] نیز موجود و برابر ۱۴۸۸۰ نیوتن بر متر می‌باشد. با مقایسه مقاومت به دست آمده در تحلیل المان محدود و با توجه به استفاده از ستونک نازک‌تر در دستورالعمل AISI، به دقت مدل‌سازی المان محدود پی می‌بریم.

۳-۴- تأثیر فاصله پیچ‌های اتصال بر مقاومت جانبی قاب

پیچ‌های اتصال دهنده ورق پوشش و قاب نقش بسیار مؤثری در عملکرد دیوارهای برشی فولادی، در برابر نیروهای جانبی باد و زلزله دارند. این پیچ‌ها علاوه بر انتقال بار جانبی از قاب به ورق پوشش، نقش تکیه‌گاه جانبی ستونک‌ها را ایفا نموده و می‌توانند با ممانعت از کمانش‌های کلی و اعوجاجی مقطع جدار نازک ستونک، مقاومت فشاری آن را افزایش دهند. مقاومت ستونک‌ها را می‌توان با استفاده از پیچ‌های اتصال کافی و کم کردن ضریب طول مؤثر به صورت قابل توجهی افزایش داد. از طرفی در دیوارهای با فواصل کم پیچ‌ها، معمولاً کنده شدن پیچ رخ نمی‌دهد و مود خرابی دیوار به سمت کمانش ورق حرکت می‌کند. ولی در دیوارها با فاصله فواصل بزرگ پیچ‌ها، کنده شدن پیچ اتفاق می‌افتد، که این موضوع باعث عدم استفاده از کل ظرفیت ورق در مقاومت جانبی دیوار می‌شود و دیوار در بار کوچک‌تری به خرابی می‌رسد.

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمودار بار- تغییرمکان به ترتیب برای دیوار ۲-۸-۴۳-۳۳-s و ۴-۸-۴۳-۳۳-s ترسیم گردیده و در جدول ۶ بار نهایی این دیوارها با هم مقایسه شده است.

۴-۴- تأثیر ضخامت اعضای قاب

در جدول ۷ بار نهایی دیوار برای ضخامت‌های مختلف اعضای قاب با هم مقایسه گردیده است.

جدول ۷: تأثیر ضخامت اعضای قاب (t_1) بر مقاومت جانبی دیوار

نام دیوار	ضخامت اعضای قاب mm(mili in)	مقاومت جانبی N/m(plf)
۲-۸-۳۳-۳۳-۲	۰/۸۳۸۲ (۲۷)	۱۵۶۹۷ (۱۰۵۵)
۲-۸-۴۳-۳۳-۲	۱/۰۹۲ (۴۳)	۱۹۳۷۴ (۱۰۳۲)
۲-۸-۵۳-۳۳-۲	۱/۳۴۶ (۵۳)	۲۱۱۹۱ (۱۴۲۴)
۲-۸-۳۳-۳۳-۴	۰/۸۳۸۲ (۲۷)	۱۴۵۸۴ (۹۸۰)
۲-۸-۴۳-۳۳-۴	۱/۰۹۲ (۴۳)	۱۷۰۴۲ (۱۱۴۵)
۲-۸-۵۳-۳۳-۴	۱/۳۴۶ (۵۳)	۱۸۹۷۴ (۱۲۷۵)

۴-۵- تأثیر حد تنش تسلیم اعضای قاب

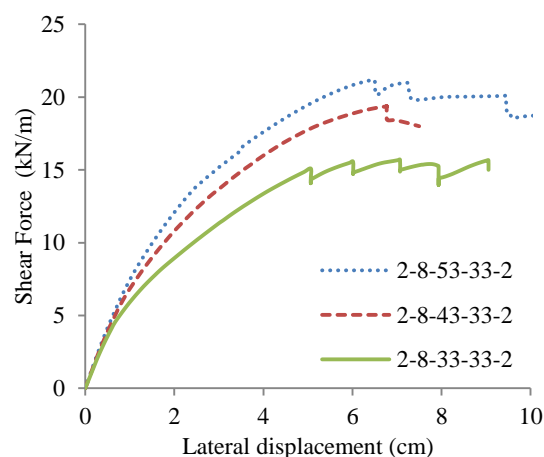
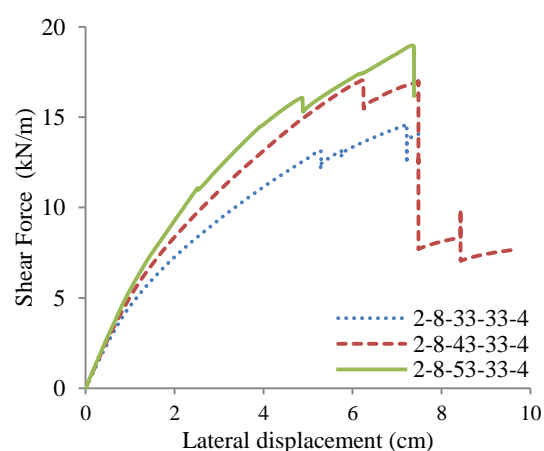
به منظور بررسی تأثیر تغییرات تنش تسلیم بر مقاومت جانبی دیوار، دو دسته دیوار ۲-۸-۴۳-۳۳-۲ و ۲-۸-۴۳-۳۳-۴ با تنش‌های تسلیم مصالح به شرح جدول ۸، مورد بررسی قرار گرفت. این فولادها منطبق بر ضوابط A-3-1 آیین نامه AISI می‌باشد. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نمودار بار- تغییرمکان برای دیوارهای فوق ترسیم گردیده و در جدول ۹ مقاومت جانبی دیوارها با هم مقایسه شده است.

جدول ۸: خواص مکانیکی فولادهای مورد بررسی

نوع فولاد	حد اقل تنش تسلیم F_y (MPa)	تنش نهایی F_u (MPa)	نسبت کش آمدگی F_u/F_y (%)	حد اقل تنش تسلیم
Gr. 33	۲۲۷	۳۱۰	۱/۳۶	۲۰
Gr. 37	۲۵۵	۳۵۸	۱/۴۱	۱۸
Gr. 40	۲۷۶	۳۷۹	۱/۳۸	۱۶
Gr. 50	۳۴۵	۴۴۸	۱/۳۰	۱۲

لازم به ذکر است که خواص مکانیکی مقاطع سرد ساخت متفاوت از ورق، نوار، و یا میلگرد فولادی قبل از شکل‌دهی است. از آن‌جا که مصالح موجود در گوشه‌های مقطع تحت درجه بالاتری از کار سرد نسبت به مصالح مربوط به اجزای قسمت تخت قرار می‌گیرند، خواص مکانیکی در قسمت‌های مختلف مقطع متفاوت می‌باشد. اما به‌طور

اصولاً ضخامت می‌تواند عوامل بسیار تأثیرگذار بر روی رفتار قاب‌های سرد ساخت باشد. اکثر اعضای قاب‌های سرد ساخت به صورت مقاطع باز می‌باشد و احتمال رخ دادن کمانش‌های موضعی و اعوجاجی در این سازه‌ها بسیار زیاد است. این مسئله به‌خصوص در قاب‌هایی که یکی از مودهای خرابی دیوار، خرابی در ستونک‌ها و تیرک‌ها باشد، می‌تواند نمود بیشتری پیدا کرده و اثر به‌سزایی در مقاومت جانبی قاب داشته باشد. در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نمودار بار- تغییرمکان به ترتیب برای دیوار ۲-۸- t_1 -۳۳-۲ و ۲-۸- t_1 -۳۳-۴ ترسیم شده است.

شکل ۱۹: تأثیر ضخامت اعضای قاب بر مقاومت جانبی دیوار ۲-۸- t_1 -۳۳-۲شکل ۲۰: تأثیر ضخامت اعضای قاب بر مقاومت جانبی دیوار ۲-۸- t_2 -۳۳-۴

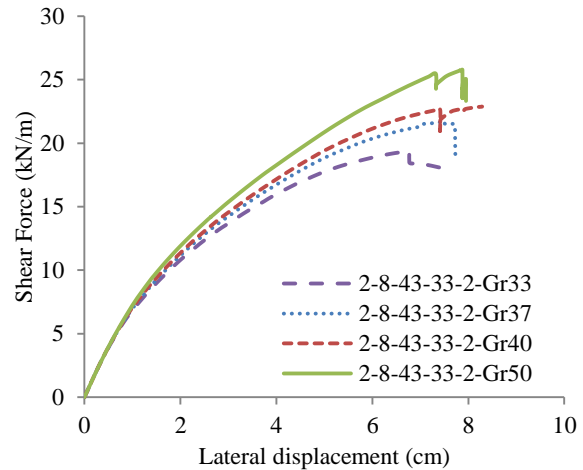
۵- ارائه روش‌هایی برای تقویت دیوار

۵-۱- تقویت دیوارهای با فاصله زیاد پیچ‌های اتصال

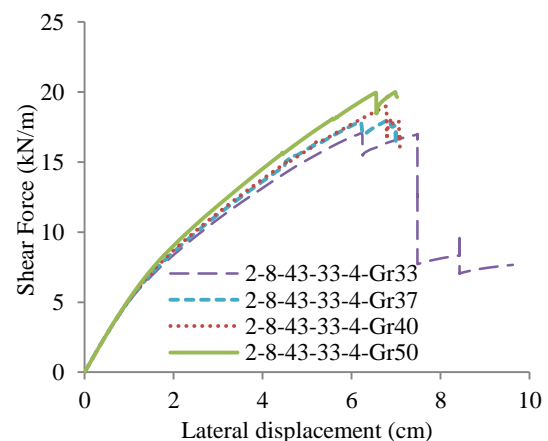
معمولاً در دیوارهای با فاصله پیچ ۱۵ سانتی‌متر (۶ اینچ)، مود خرابی که سبب کاهش ظرفیت باربری پانل دیوار برشی می‌شود، کنده شدن پیچ‌های اتصال ورق پوشش به قاب می‌باشد. در صورتی که به نحوی از کنده شدن پیچ‌ها جلوگیری شود، می‌توان از کل ظرفیت ورق پوشش در مقاومت جانبی دیوار برشی استفاده نموده و مقاومت جانبی دیوار را افزایش داد. معمولاً کنده شدن پیچ‌ها در نقاط تحت کشش، مانند گوشه پایینی دیوار در سمت اعمال بار، اتفاق می‌افتد. البته با توجه به شرایط یکسان رأس مقابل این گوشه و قرار گرفتن آن در کشش، احتمال کنده شدن پیچ‌ها در این ناحیه نیز وجود دارد. هر چند که نتایج آزمایشگاهی مورد اخیر را نشان نداده، ولی در تحقیق عددی دیده شده است. از طرفی برای مقابله با نیروی زلزله و طبیعت رفت و برگشتی آن، تقویت دیوار باید در تمام گوشه‌ها انجام گیرد. یکی از روش‌هایی که می‌توان برای تقویت دیوار از آن استفاده نمود، قرار دادن پیچ‌های اضافی در چهار گوشه دیوار می‌باشد. برای بررسی اثر پیچ‌های اضافی بر مقاومت جانبی دیوار، سه آرایش مختلف برای پیچ‌های تقویت به صورت زیر در نظر گرفته و اثر آن بر مقاومت جانبی بررسی گردید:

روش اول: استفاده از ۳ پیچ اضافی در ابتدا و انتهای ستونک‌ها (اضافه کردن پیچ‌های ۱ الی ۳ در شکل ۲۳)
روش دوم: استفاده از پنج پیچ اضافی در ابتدا و انتهای ستونک (اضافه کردن پیچ‌های یک تا پنج در شکل ۲۳)
روش سوم: استفاده از پنج پیچ اضافی در ابتدا و انتهای ستونک و پیچ‌های با آرایش مرکز به مرکز دو اینچ در تیرک‌ها (اضافه کردن پیچ‌های یک تا ۱۱ در شکل ۲۳)

اجمالی، شکل‌دهی سرد فولاد، موجب افزایش نقطه جاری شدن و مقاومت کششی متوسط مقطع و هم‌زمان کاهش شکل‌پذیری می‌گردد.



شکل ۲۱: تأثیر تنش تسلیم بر مقاومت جانبی دیوار
۲-۸-۴۳-۳۳-۲

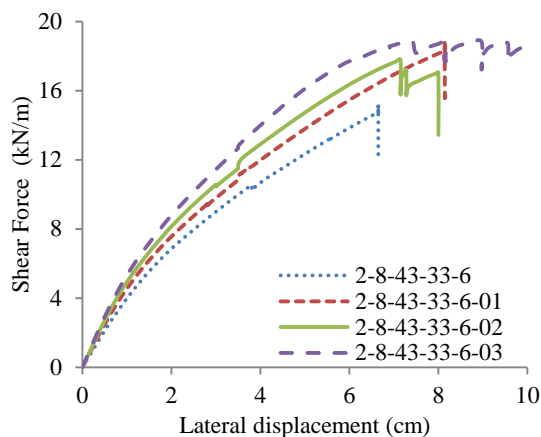


شکل ۲۲: تأثیر تنش تسلیم بر مقاومت جانبی دیوار
۲-۸-۴۳-۳۳-۴

جدول ۹: تأثیر تنش تسلیم مصالح بر مقاومت جانبی دیوار
(N/m)

نام دیوار	Gr.33	Gr.37	Gr.40	Gr.50
۲-۸-۴۳-۳۳-۲	۱۹۳۷۴	۲۱۷۴۷	۲۲۸۸۳	۲۵۷۹۱
۲-۸-۴۳-۳۳-۴	۱۷۰۴۲	۱۸۰۵۰	۱۸۹۷۲	۱۹۹۹۸

یافته است که این موضوع موجب افزایش شکل پذیری قاب می‌گردد. در شکل ۲۱ نمودار بار- تغییرمکان دیوار در هر سه روش مقایسه شده است.



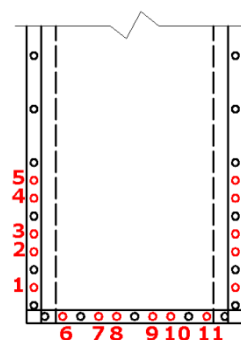
شکل ۲۴: تأثیر تقویت قاب‌های با فاصله پیچ ۱۵ cm

جدول ۱۰: تأثیر تقویت دیوار بر مقاومت جانبی آن

نوع تقویت	بدون تقویت	تقویت با روش اول	تقویت با روش دوم	تقویت با روش سوم
مقاومت جانبی دیوار (N/m)	۱۵۰۸۷	۱۸۲۷۰	۱۷۷۸۵	۱۸۸۷۶

۲-۵- تقویت دیوارهای با فاصله کم پیچ‌های اتصال

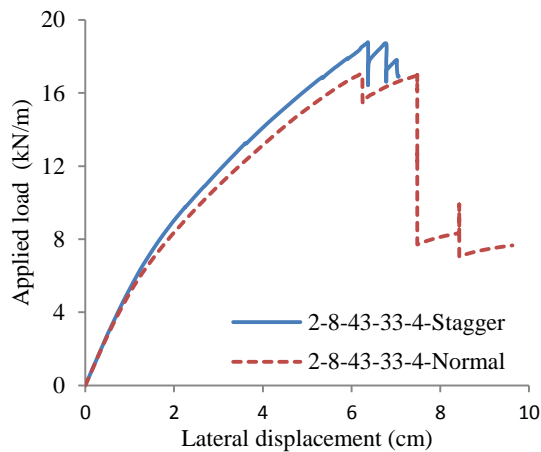
معمولاً در دیوارهای با فواصل کم پیچ‌های اتصال، مورد خرابی قالب، کمانش ورق پوشش می‌باشد. در صورتی که به نحوی بتوان از کمانش ورق جلوگیری نمود، مقاومت جانبی دیوار افزایش می‌یابد. در ساخت سازه‌های سبک ستونک‌های کناری دیوار برشی به صورت دوتایی استفاده می‌شود و ورق پوشش به ستونک‌های بیرونی متصل می‌شود (شکل ۲۵-الف). در صورت اتصال ورق پوشش به ستونک داخلی، عرض ورق کاهش می‌یابد، در نتیجه بار کمانش افزایش یافته و مقاومت جانبی قاب افزایش می‌یابد. همچنین این روش از کمانش اعوجاجی ستونک بیرونی سمت نگه‌دارنده جلوگیری می‌کند [۲۲].



شکل ۲۳: روش تقویت دیوار با پیچ‌های اضافی

در روش اول که تنها از ۱۲ پیچ اضافی استفاده می‌شود، افزایشی به اندازه ۲۱ درصد در مقاومت جانبی دیوار خواهیم داشت. در روش دوم که از ۲۰ پیچ اضافی استفاده می‌شود، افزایشی به اندازه ۱۸ درصد در مقاومت جانبی دیوار خواهیم داشت. ولی پانل دیوار برشی نسبت به روش اول که از دو پیچ کم‌تر استفاده شده است، مقاومت جانبی کم‌تری از خود نشان می‌دهد. برای مشخص شدن علت موضوع، نوع خرابی در هر دو روش مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که در روش اول، کمانش ورق دارای موج‌های بیشتری بوده و نیروی کمتری به هر پیچ وارد می‌شود و خرابی در ستونک اتفاق می‌افتد. ولی در روش دوم، تعداد پیچ‌های بیشتر، باعث می‌شود، خرابی در ستونک اتفاق نیفتد و تنها یک موج کمانش که از تیرک می‌گذرد، ایجاد شود. به علت ضعیف‌تر بودن اتصال ورق به تیرک و اعمال نیروی بیشتر به پیچ‌ها به علت وجود یک موج کمانش، کنده شدن پیچ‌ها در ناحیه تیرک اتفاق می‌افتد. برای بهبود این روش، در روش سوم، علاوه بر پیچ‌های روش دوم، از پیچ‌های مرکز به مرکز پنج سانتی‌متر در تیرک استفاده شد که باعث افزایشی به اندازه ۲۵ درصد در مقاومت جانبی دیوار گردید.

در جدول ۱۰ اثر وجود پیچ‌های اضافی بر رفتار قاب ۶-۳۳-۴۳-۸-۲ در حالات مختلف با هم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که هر سه روش و به خصوص روش اول و سوم، تغییرمکان نظیر نقطه حداکثر بار نیز افزایش



شکل ۲۷: تأثیر آرایش پیچ زیگزاگ بر مقاومت جانبی دیوار
۲-۸-۴۳-۳۳-۴

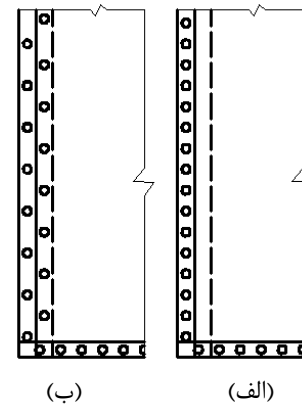
جدول ۱۱: تأثیر استفاده از آرایش پیچ زیگزاگ بر مقاومت

جانبی دیوار (N/m)			
نام دیوار	معمولی	یک در میان	درصد افزایش مقاومت
۲-۸-۴۳-۳۳-۲	۱۹۳۷۴	۲۱۶۲۲	۱۱
۲-۸-۴۳-۳۳-۴	۱۷۰۴۲	۱۸۷۷۰	۱۰

۶- نتیجه گیری

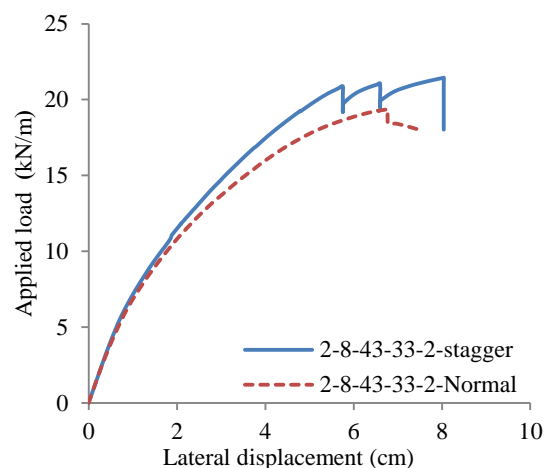
در این مطالعه رفتار دیوارهای برشی فولادی در سازه‌های سرد نورد شده با استفاده از تحلیل بارافزون به روش اجزاء محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس، مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی مسئله، قابلیت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح، تغییر شکل اولیه در ستونک‌ها و ورق پوشش برای فراهم شدن امکان کمانش، مقاومت پس از کمانش اعضای فولادی و نوع خرابی پیچ‌های اتصال ورق پوشش به قاب را دارد.

برای بررسی صحت مدل‌سازی، نتایج حاصل از روش اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی ۱۰ نمونه پانل دیوار برشی مقایسه گردید و صحت و دقت نتایج روش اجزاء محدود مورد تایید قرار گرفت. سپس مطالعات پارامتریک بر روی مدل تایید شده صورت گرفته و نتایج ذیل حاصل گردید.



شکل ۲۵: استفاده از پیچ‌های زیگزاگ

برای بررسی این موضوع، دو قاب متفاوت با آرایش پیچ یک در میان، مدل شد که یکی از پیچ‌ها به ستونک داخلی و دیگری به ستونک بیرونی متصل گردید (شکل ۲۵-ب). همان‌گونه که در نمودارهای شکل‌های ۲۶ و ۲۷ مشاهده می‌شود این روش تأثیر خوبی بر مقاومت جانبی دیوار دارد و باعث گردیده است که در دیوار ۲-۸-۴۳-۳۳-۲ افزایش ۱۱ درصدی در مقاومت جانبی ایجاد شود و در دیوار ۴-۳۳-۳۳-۲ افزایش ۱۰ درصدی در مقاومت جانبی داشته باشیم. که پیشنهاد می‌شود این روش در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۲۶: تأثیر آرایش پیچ زیگزاگ بر مقاومت جانبی دیوار
۲-۸-۴۳-۳۳-۲

دیوار داشته باشیم. جالب این‌که مقاومت جانبی دیوار برشی با فاصله پیچ ۱۵ سانتی‌متر تقویت شده، ۷ درصد بیشتر از مقاومت دیوار با فاصله پیچ‌های اتصال ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد.

۱- نحوه مدل‌سازی اتصال ورق پوشش به قاب و خرابی‌های آن، تأثیر به‌سزایی در میزان صحت مدل اجزاء محدود و دقت نتایج خواهد داشت. جای‌گزینی پیچ‌های اتصال با رابطی که رفتار الاستیک داشته باشد و تغییر مکان‌های محل اتصال را شبیه‌سازی کند، تجربه موافقی برای مدل‌سازی اتصال و به‌دست آوردن رفتار جانبی دیوار می‌باشد.

۲- فاصله پیچ‌های اتصال ورق پوشش به اعضای قاب تأثیر شدیدی بر مقاومت جانبی و مکانیزم خرابی دیوار دارد. به‌گونه‌ای که برای فواصل زیاد پیچ‌های اتصال، مود خرابی حاکم به سمت کنده شدن پیچ‌ها سوق پیدا می‌کند، درحالی‌که در فواصل کم پیچ‌های اتصال، کمانش ورق و اعوجاج ستونک کناری، می‌تواند تعیین‌کننده مقاومت جانبی دیوار باشد.

۳- افزایش ارتفاع پانل دیوار برشی، موجب کاهش محسوس در سختی و مقاومت جانبی دیوار برشی می‌شود. ۴- ضخامت ورق پوشش تأثیر قابل‌توجهی در سختی و مقاومت جانبی نهایی پانل‌های دیوار برشی خواهند داشت. البته با افزایش عرض دیوار از میزان تأثیر آن در مقاومت جانبی کاسته می‌شود. به‌طوری‌که در دیوارهای با عرض ۰/۶۱ متر نسبت به دیوارهای با عرض ۱/۲۲ متر، این افزایش بیشتر است.

۵- افزایش تنش تسلیم ورق پوشش تأثیر زیادی در سختی اولیه و مقاومت جانبی نهایی سیستم دارد.

۶- معمولاً ورق پوشش به ستونک‌های بیرونی پیچ می‌شود. استفاده از پیچ‌های زیگزاگ می‌تواند تأثیر به‌سزایی در مقاومت جانبی قاب داشته باشد و باعث افزایش نزدیک به ۱۰ درصدی در مقاومت جانبی پانل دیوار برشی داشته باشد.

۷- استفاده از پیچ‌های اضافی در نقاط بحرانی دیوارهای با فاصله پیچ‌های اتصال ورق پوشش به قاب برابر با ۱۵ سانتی‌متر، تأثیر به‌سزایی در مقاومت جانبی آن دارد. به‌طوری‌که با اضافه کردن تنها ۱۲ پیچ در گوشه‌های آن، می‌توان افزایشی به اندازه ۲۱ درصد در مقاومت جانبی

مراجع

- [1] AISI (2007). "Standard for cold-formed steel framing Lateral design". 2007 edition, Washington (DC): American Iron and Steel Institute.
- [2] Gad, E.F., Duffield, C.F., Hutchinson, G.L., Mansell, D.S., Stark, G. (1999). "Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures". *Engineering Structures*, Vol.21, pp. 83–95.
- [3] Fulop, L.A., Dubina, D. (2004). "Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading, Part I: experimental research". *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, pp. 321–338.
- [4] Tian, Y.S., Wang, J., Lu, T.J. (2004). "Racking strength and stiffness of cold-formed steel wall frames". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, pp. 1069–1093.
- [5] Serrette, R., Ogunfunmi, K. (1996). "Shear resistance of gypsum-sheathed light-gauge steel stud walls". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, pp. 383–389.
- [6] Kim, T.W., Wilcoski, J., Foutch, D.A., Lee, M.S. (2006). "Shaketable tests of a cold-formed steel shear panel". *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 1462–1470.
- [7] Al-Kharat, M., Rogers, C.A. (2007). "Inelastic performance of cold-formed steel strap braced walls". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, pp. 460–474.
- [8] Hatami, S., Ronagh, H.R., Azhari, M. (2008). "Behaviour of thin strap-braced cold-formed frames under cyclic loads". *Fifth International Conference on Thin-Walled Structures*, Brisbane, Australia, 18-20 June.
- [9] Zeynalian, M., Ronagh, H.R. (2012). "An experimental investigation on the lateral behaviour of knee-braced cold-formed steel shear walls". *Thin Walled Structures*, Vol. 51, pp. 64–75.
- [۱۰] فرحبند، ف.، حکیمی فرد، ف. (۱۳۸۹). "مدل‌سازی اجزای محدود و تحلیل غیر خطی دیوارهای سبک فولادی سرد نورد مهاربندی شده تحت بارهای جانبی یکنواخت و سیکلیک". *فصلنامه مهندسی ساختمان و علوم مسکن*، سال هشتم، شماره ۱۶، ص. ۳۳.
- [۱۱] حاتمی، ش.، رحمانی، ح. (۱۳۹۰). "تعیین مقاومت و تغییرمکان جانبی پانل‌های دیوار برشی در سازه‌های فولادی سرد نورد شده". *روش‌های عددی در مهندسی*، سال ۳۰، شماره ۲، ۵۷–۷۳.
- [۱۲] گرامی، م.، لطفی، م. (۱۳۹۱). "آنالیز المان محدود غیر خطی ساده شده ای برای سازه‌های فولادی سرد نورد شده با دیوار برشی". *سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی*، تهران، ۴ و ۵ دی ماه.
- [13] Serrette, R.L., Nguyen, H., Hall, G. (1996). "Shear wall values for light weight steel framing". Report No. LGSRG-3-96, Santa Clara University.
- [14] Serrette, R.L. (1997). "Additional shear wall values for light weight steel framing". Report No. LGSRG-1-97, Santa Clara University.
- [15] Serrette, R.L. (2002). "Performance of cold-formed steel-framed shear walls: alternative configurations". Final Report: LGSRG-06-02, Santa Clara University.
- [16] Yu, C. (2007). "Steel Sheet Sheathing Options for Cold-Formed Steel Framed Shear Wall Assemblies Providing Shear Resistance". Report No. UNT-G76234, University of North Texas.
- [17] Yu, C., Chen Y. (2009). "Steel Sheet Sheathing Options for Cold-Formed Steel Framed Shear Wall Assemblies Providing Shear Resistance – Phase 2". Report No. UNT-G70752, University of North Texas.
- [18] Yu, C. (2008). "Shear resistance of cold-formed steel framed shear wall assemblies with 0.027, 0.030, 0.033-inch sheet steel sheathing". *Journal of Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 1522-1529.
- [19] Yu, C., Chen Y. (2010). "Detailing recommendations for 1.83 m wide cold formed steel shear walls with steel sheathing". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, pp. 93-101.
- [20] SSMA (2001). "SSMA Product technical information." ICBO ER-4943P, Glen Ellyn (IL): Steel Stud Manufacturers Association.
- [21] ASTM A1003 (2008). "Standard specification for sheet steel, carbon, metallic and non-metallic coating for cold-formed framing members".

- [22] Yu, C. (2010). "Distortional Buckling of Cold-Formed Steel Shear Wall Studs under Uplift Force". Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 136, pp. 317-323
- [23] SIMPSON, S/HDS & S/HDB Holdowns (2013). Retrieved from http://www.strongtie.com/products/cfs/s_hds-s_hdb.asp
- [24] Schafer, B.W., Pekoz, T. (1998). "Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses". Journal of Constructional Steel Research, Vol. 47, pp. 193-210.
- [25] AISI (2007). "North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members". American Iron and Steel Institute, Washington DC.
- [۲۶] نشریه شماره ۶۱۲ (۱۳۹۱). "آیین نامه طراحی و اجرای سازه‌های فولادی سردنورد (بخش سازه)". مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [27] AISC (2005). "ANSI/AISC360-05: Specification for Structural Steel Building, American Institute of Steel Construction." Chicago, USA.
- [28] RCSC (2004). "Specifications for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts". Research Council on Structural Connections.
- [29] AASHTO (2005). "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications." 3rd edition, American Association of State Highway and Transportation officials, Washington, DC.