

بررسی عملکرد لرزه‌ی سیستم نوین پیشنهادی دیوار برشی فولادی مرکب از ورق‌های صاف و موج‌دار

Original Article

امیدکلانتری (کارشناس ارشد)

وحیدرضا جاری* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

در پژوهش‌های صورت پذیرفته بر روی دیوار برشی فولادی، دو حالت ورق صاف با و بدون سخت‌کننده و ورق فولادی موج‌دار مطالعه شده است. با وجود اینکه دیوارهای برشی موج‌دار توانسته‌اند میزان سختی سازه‌ی را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهند، اما از نظر پایداری در رفتار لرزه‌ی، مقاومت نهایی و جذب انرژی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به دیوارهای صاف سخت نشده از خود نشان داده‌اند. در پژوهش حاضر و در راستای بهبود عملکرد سیستم لرزه‌ی ذکر شده، دیوار برشی فولادی مرکب از ورق‌های صاف و موج‌دار (SSW-C-FCS) توسط مؤلفان پیشنهاد شده است. بدین منظور عملکرد لرزه‌ی دیوارهای برشی فولادی در حالت‌های صاف سخت نشده، موج‌دار و سیستم نوین پیشنهادی مرکب با جهت موج افقی و قائم در شرایط متفاوت از نظر ابعاد قاب و ضخامت ورق جان مقایسه شده‌اند. مدل‌های عددی نشان می‌دهند که دیوار برشی مرکب پیشنهادی توانسته است ضعف‌های مربوط به عملکرد لرزه‌ی دیوارهای صاف سخت نشده و موج‌دار را به‌خوبی بهبود بخشد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی مرکب (SSW-C-FCS)، دیوار برشی فولادی سخت نشده، دیوار برشی فولادی موج‌دار، ارزیابی لرزه‌ی، تحلیل اجزاء محدود.

۱. مقدمه

در چند دهه‌ی اخیر، استفاده از دیوارهای برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی مورد توجه پژوهشگران در نقاط مختلف جهان قرار گرفته است. سیستم دیوارهای برشی فولادی، که در جهان به سرعت رو به گسترش است، برای ساختمان‌های تازه ساخت و همچنین مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود به خصوص در کشورهای لرزه‌خیز استفاده شده است.^[۱] ارزیابی رفتار و عملکرد دیوارهای برشی فولادی در مقایسه با سایر سیستم‌های باربر - جانبی بیان‌گر رفتار مناسب آن‌هاست. دیوارهای برشی فولادی مزایای قابل توجهی، از جمله: مقاومت بسیار بالا، سختی مناسب، رفتار هیستریزیس پایدار و همچنین شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتری دارند. وزن کمتر دیوار برشی فولادی، اقتصادی شدن سیستم باربر جانبی و فونداسیون را به دنبال خواهد داشت.^[۲]

دیوارهای برشی فولادی در مقایسه با دیوارهای برشی بتنی، جایگزینی مناسب‌تر و مطمئن‌تر چه به لحاظ مسائل اجرایی و چه به لحاظ مقاومت هستند. از طرفی، به سبب یکنواختی بین مصالح دیوار و اعضاء پیرامونی آن، هیچ‌گونه نگرانی در مورد

* نویسنده مسئول

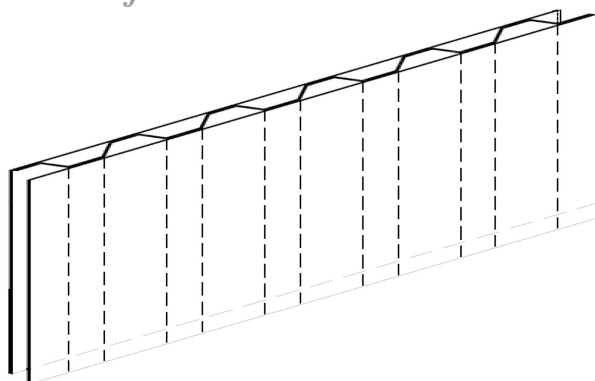
تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۶/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۲/۲۱، پذیرش ۱۳۹۸/۱/۱۸.

DOI:10.24200/J30.2019.51566.2416

اندرکنش دیوار و اجزاء سازه وجود ندارد. در سیستم دیوار برشی فولادی به دلیل گسترده‌گی مصالح و اتصالات، تعدیل تنش‌ها به مراتب بهتر از سیستم‌های مقاوم جانبی دیگر از قبیل قاب‌های خمشی و انواع مهاربندها صورت می‌پذیرد؛ زیرا در آن‌ها معمولاً مصالح به‌صورت دسته و اتصال‌ها به‌صورت متمرکز هستند، به علاوه سیستم دیوار برشی فولادی به‌خصوص در محدوده‌ی خمیری رفتار مناسب‌تری دارد.^[۳]

سیستم دیوار برشی فولادی به دو صورت سخت شده و سخت نشده استفاده می‌شود. در گذشته، طراحی ورق جان در سیستم دیوار برشی فولادی به کماتش برشی آن محدود بوده و کماتش کشسان به‌عنوان شکست سیستم در نظر گرفته می‌شده است. برای جلوگیری از مود شکست اخیر، تعداد زیادی سخت‌کننده در ورق جان استفاده می‌شود، به طوری که تنش بحرانی ورق جان نسبت به تنش تسلیم آن افزایش یابد. به این ترتیب کماتش ورق کنترل می‌شود و مقاومت کماتشی افزایش می‌یافت. پژوهش‌های انجام شده در سال‌های بعد نشان داد که وقوع کماتش برشی در ورق جان به معنای پایان ظرفیت باربری سیستم دیوارهای برشی فولادی نیست و با توسعه‌ی میدان کشش قطری در ورق، سیستم مذکور می‌تواند حتی پس از کماتش نیز همچنان به باربری خود ادامه دهد.^[۴]

دیوارهای سخت شده نسبت به دیوارهای سخت نشده، سختی اولیه‌ی بالاتر و از



شکل ۱. جزئیات ورق جان در دیوار برشی فولادی مرکب پیشنهادی (SSW-C-FCS).

غیرکشسان بزرگ در خود مستهلک کند. با توجه به اینکه ورق جان در دیوار برشی فولادی در باربری ثقلی مشارکت ندارد، انتخاب آن به عنوان عضوی شکل‌پذیر مطلوب و مؤثر است.

بارکمانش ورق‌های نازک و سخت نشده بسیار ناچیز است و پس از اعمال بار جانبی به سرعت دچار کمانش می‌شوند. بعد از وقوع کمانش قطری در ورق جان، نیروهای قابل ملاحظه‌ی در راستای عمود بر جهت کمانش در ورق جان توسعه می‌یابد که باعث ایجاد تنش‌های قطری کششی می‌شود و قادر خواهد بود با نیروی ناشی از زلزله به خوبی مقابله کند. بنابراین تسلیم کششی ورق جان و تشکیل مفصل خمیری در تیر، تأمین‌کننده‌ی رفتار شکل‌پذیر سیستم خواهد بود. ایجاد تنش‌های قطری در ورق جان، نیروهای قابل ملاحظه‌ی را به المان‌های مرزی (تیرها و ستون‌ها) اعمال می‌کند و برای توسعه‌ی تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در ورق جان و تأمین شرایط شکل‌پذیری سیستم دیوار برشی فولادی لازم است اعضاء مرزی افقی و قائم، سختی کافی داشته باشند. به این ترتیب تنش‌های ایجاد شده در فرایندهای اخیر به همراه بارهای ثقلی، کنترل‌کننده‌ی نیروهای اعمالی به سایر اعضاء تشکیل‌دهنده‌ی دیوار هستند.

تیمبر و کولاک (۱۹۸۳)، زاویه‌ی شیب میدان کشش قطری (α) را تابعی از سختی محوری اعضاء مرزی و سختی خمشی ستون‌ها در نظر گرفته و به صورت رابطه‌ی ۱ ارائه داده‌اند:^[۶]

$$\tan^2 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{r_{Ac}^2}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^2}{r_{c}^2 I_c L} \right)} \quad (1)$$

اعضاء مرزی افقی که فقط از یک طرف به ورق جان متصل هستند، مانند عضو مرزی واقع در تراز بام، نسبت به اعضاء مرزی میانی که از دو طرف به ورق جان متصل هستند، آزادی عمل بیشتری در خمش حول محور عمود بر دیوار دارند. برای منظور کردن اثر مذکور، تیمبر و کولاک رابطه‌ی ۲ را ارائه دادند:^[۶]

$$\tan^2 \alpha = \frac{1 + t_w L \left(\frac{1}{r_{Ac}^2} + \frac{L^2}{r_{c}^2 I_c h} \right)}{1 + t_w h \left(\frac{1}{r_{Ac}^2} + \frac{h^2}{r_{c}^2 I_c L} \right)} \quad (2)$$

که در آن‌ها، t_w ضخامت ورق جان، I_b و I_c به ترتیب ممان اینرسی ستون و تیر حول محور عمود بر ورق جان است. A_b و A_c نیز به ترتیب سطح مقطع ستون و تیر هستند. همچنین L و h به ترتیب طول و ارتفاع دیوار برشی در تراز موردنظر است. با تعیین مقدار دقیق زاویه‌ی α می‌توان طراحی نهایی المان‌های مرزی را انجام داد. ضوابط لرزه‌ی طراحی دیوار برشی فولادی بر مبنای آیین‌نامه‌های ۵-۱۰-۳۴ AISC و ۲۰ AISC Design Guide به این شرح است:^[۸،۷]

نظر لرزه‌ی عملکرد نسبتاً بهتری دارند، اما استفاده از تعداد زیاد سخت‌کننده باعث می‌شود که ساخت دیوارهای سخت شده نیاز به زمان و هزینه بیشتری داشته و به خصوص برای ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه توجیه اقتصادی نداشته باشد. با توجه به استفاده‌ی موفقیت‌آمیز از ورق‌های موج‌دار در طراحی تیورق‌های فولادی و نیز شباهت‌های زیاد میان تیورق‌های فولادی و دیوارهای برشی، ورق‌های موج‌دار را نیز می‌توان با قرار دادن در قاب‌های سازه‌ی، به عنوان دیوار برشی فولادی موج‌دار استفاده کرد. ورق‌های موج‌دار به علت شکل هندسی خود، سختی هندسی برون صفحه‌ی قابل توجهی نسبت به ورق‌های صاف دارند. همچنین به علت وجود خم‌های متعدد در ورق و تبدیل نیروی درون صفحه‌ی به نیروهای برون صفحه‌ی و برعکس، ورق‌های صاف تشکیل‌دهنده‌ی ورق موج‌دار، یکدیگر را مقید و در واقع به نوعی، نقش سخت‌کننده را ایفا می‌کنند. بنابراین دیوار برشی فولادی موج‌دار را از نظر عملکرد سازه‌ی، می‌توان جزء دیوارهای برشی سخت شده محسوب کرد. از طرفی، رفتار پس‌کمانشی ورق موج‌دار را می‌توان از دو دیدگاه موضعی و کلی بررسی کرد. در حالت کمانش کلی مطالعات نشان داده‌اند که با شروع هر نوع از کمانش در ورق موج‌دار، به علت گسترش آن به اطراف و تغییرات شدید در هندسه‌ی ورق، در منحنی مقاومت برشی به زاویه‌ی تغییرمکان نسبی کاهش شدیدی در مقاومت برشی ایجاد می‌شود، و رفتار کمانشی ورق در بیشتر مواقع به صورت فروجهشی خواهد بود و با توجه به ابعاد ورق می‌تواند با بازگشت نمودار نیز همراه باشد. در مقابل، در حالت کمانش موضعی، هر چه عرض زیرصفحه‌های ورق افزایش یابد، مقاومت برشی کشسان آن‌ها کم می‌شود و مقدار مقاومت نهایی و مقاومت پس‌کمانشی ورق افزایش می‌یابد؛ زیرا به‌طور کلی مقاومت نهایی ورق موج‌دار در حالتی که توسط جاری شدن یا کمانش موضعی که در واقع کمانش ورق‌های صاف است، حاکم شود، بیشترین مقدار خود را اختیار می‌کند؛ چون این ورق‌های صاف هستند که منشأ مقاومت پس‌کمانشی را برای کل ورق موج‌دار فراهم می‌آورند.^[۵]

اما نکته‌ی حائز اهمیت این است که در بیشتر موارد، کمانش ورق‌های موج‌دار از نوع کمانش ترکیبی است؛ بنابراین مقاومت نهایی ورق‌های موج‌دار کمتر از ورق‌های صاف خواهد بود. همچنین با توجه به توضیحات ذکر شده، منحنی مقاومت برشی به زاویه‌ی تغییرمکان نسبی ورق‌های موج‌دار بعد از کمانش به صورت فروجهشی و ناپایدار خواهد بود. از طرفی، ورق‌های موج‌دار با توجه به شکل هندسی خود، سختی و شکل‌پذیری بالاتری نسبت به ورق‌های صاف دارند.

بنابراین با توجه به مطالب اخیر می‌توان بیان کرد که هر یک از ورق‌های صاف و موج‌دار از نظر شرایط تأمین پارامترهای لرزه‌ی نسبت به یکدیگر ویژگی‌هایی دارند و به نظر می‌رسد بتوان با استفاده از ترکیب ورق‌های صاف و موج‌دار و ارائه‌ی سیستم نوین لرزه‌ی، عملکرد دیوارهای برشی فولادی را ارتقاء داد. شکل ۱، جزئیات ورق جان برای دیوار برشی فولادی مرکب از ورق صاف و موج‌دار SSW-C-FCS^۱ که توسط نگارنده پیشنهاد شده است را نشان می‌دهد. در سیستم مذکور ورق‌های موج‌دار و صاف کاملاً به یکدیگر و همچنین به المان‌های مرزی متصل هستند.

۲. روابط طراحی

طراحی و انتخاب اعضاء دیوار برشی فولادی باید به گونه‌ی باشد که از شکست ترد جلوگیری و شرایط لازم برای ایجاد شکل‌پذیری فراهم شود. در طراحی دیوار برشی فولادی ترجیح داده می‌شود که ورق جان نقش اساسی در جذب انرژی ایفا کند و انرژی اعمالی ناشی از زلزله را با عملکرد کششی و تجربه‌ی تغییرشکل‌های

از طرفی با توجه به حضور نیروهای محوری در تیر باید از لنگرهای خمیری کاهش یافته استفاده کرد (رابطه ی ۱۱):

$$V_u = \frac{M_{pr1}^* + M_{pr2}^*}{L_h} + \frac{(W_u + W_g)}{2} L_{cf} \quad (11)$$

که در آن M_{pr1}^* : لنگر کاهش یافته در حضور نیروی محوری P_{HBE1} و M_{pr2}^* : لنگر کاهش یافته در حضور نیروی محوری P_{HBE2} است.

۲.۲. طراحی نهایی ستون ها

ستون ها نیز همانند تیرها تحت اثر نیروی محوری، برشی، و لنگر خمشی هستند. نیروی محوری ایجاد شده در ستون ها در اثر تسلیم ورق جان، نیروی برشی تیر، بار ثقلی و نیروی محوری ستون های طبقات بالاتر ایجاد می شود (رابطه ی ۱۲). همچنین لنگر طراحی و نیروی برشی ستون در اثر تسلیم ورق جان و لنگر خمیری تیر محاسبه می شود (روابط ۱۳ و ۱۷).

$$E_{mi} = \frac{1}{\gamma} R_y F_y h_c \sin \alpha + V_u + P_g + E_{mi+1} \quad (12)$$

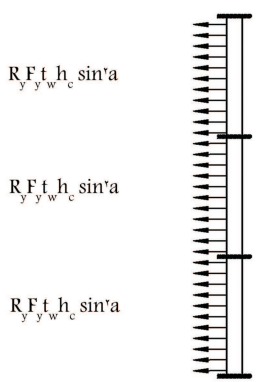
که در آن، E_{mi} نیروی محوری ستون، E_{mi+1} نیروی محوری ستون در تراز بالاتر، V_u نیروی برشی تیر طبق رابطه ی ۹ و P_g نیروی محوری ستون در اثر بار ثقلی در تراز بالاتر هستند. به غیر از تحلیل غیرخطی، مناسب ترین روش برای تعیین نیروی برشی و لنگر خمشی طراحی در ستون، استفاده از مدل تحلیلی مانند شکل ۳ است. در مدل مذکور، ستون مانند یک عضو پیوسته که تحت بار گسترده ی یکنواخت ناشی از عملکرد کششی ورق جان و نیروهای خمشی وارد شده از تیر قرار دارد، در نظر گرفته می شود. اثر تیرها در ستون را می توان به صورت صلب و یا فنرهای خطی، با توجه به صلیبیت محوری اعضاء افقی منظور کرد. در شکل ۳، از انعطاف پذیری محوری تیرها صرف نظر شده است.

$$M = M_{VEB(web)} + M_{VEB(HBE)} \quad (13)$$

اگر شرایط مرزی گیردار برای هر قطعه ستون در نظر گرفته شود، $M_{VEB(web)}$ لنگر خمشی ناشی از عملکرد کششی ورق جان از رابطه ی ۱۴ به دست می آید:

$$M_{VEB(web)} = R_y F_y t_w \frac{h_c}{\gamma} \sin \alpha \quad (14)$$

لنگر خمشی موجود در ستون ناشی از مفصل خمیری در تیر را می توان معادل نصف مجموع ظرفیت خمشی تیر در محل اتصال آن به ستون در نظر گرفت



شکل ۳. مدل تحلیلی برای محاسبه ی نیروی برشی و لنگر خمشی طراحی ستون.

۱.۲. طراحی نهایی تیرها

کنترل تیر بر اساس لنگرهای خمشی، نیروی محوری و همچنین نیروهای برشی انجام می گیرد. لنگر خمشی به وجود آمده در تیر بر اساس تسلیم ورق جان دیوار برشی و بار ثقلی وارده از رابطه ی ۳ به دست می آید:

$$M_{max} = \frac{(W_u + W_g) L_h}{\lambda} \quad (3)$$

که در آن، W_u بار گسترده ی اعمال شده بر تیر در اثر تسلیم ورق جان است که از رابطه ی ۴ به دست می آید:

$$W_u = R_y F_y (t_{i+1} - t_i) \cos^2 \alpha \quad (4)$$

نیروی محوری تیر P_{HBE} شامل دو قسمت $P_{HBE(VEB)}$ وارد شده از طرف ستون و $P_{HBE(web)}$ وارد شده از طرف ورق جان است (رابطه های ۵ و ۶):

$$P_{HBE(VEB)} = \frac{1}{\gamma} R_y F_y (t_{i+1} h_{i+1} + t_i h_i) \quad (5)$$

$$P_{HBE(web)} = \frac{1}{\gamma} R_y F_y (t_i \sin \alpha + t_{i-1} \sin \alpha) L_{cf} \quad (6)$$

همان طور که در شکل ۲ مشخص است، نیروی محوری از جانب ستون های هر دو سمت به صورت فشاری به تیر اعمال می شوند که در یک سمت هم جهت با نیروی محوری وارد شده از طرف ورق جان و در سمت دیگر مخالف با آن است. بنابراین روابط ۷ و ۸ را داریم:

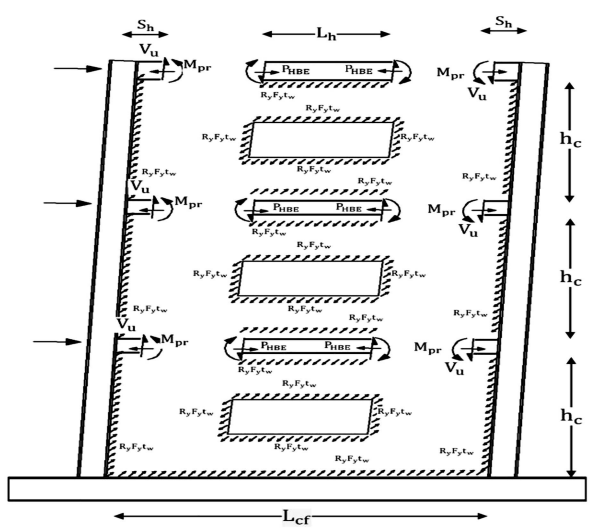
$$P_{HBE1} = P_{HBE(VEB)} + \frac{1}{\gamma} P_{HBE(web)} \quad (7)$$

$$P_{HBE2} = P_{HBE(VEB)} - \frac{1}{\gamma} P_{HBE(web)} \quad (8)$$

نیروی برشی ایجاد شده در تیر در اثر تسلیم ورق جان دیوار برشی، بارهای ثقلی و لنگر خمیری تیر است که از رابطه های ۹ و ۱۰ به دست می آید:

$$V_u = \frac{2M_{pr}}{L_h} + \frac{(W_u + W_g)}{2} L_{cf} \quad (9)$$

$$M_{pr} = \lambda \gamma R_y F_y Z_b \quad (10)$$



شکل ۲. نمودار آزاد دیوار برشی فولادی تحت بار جانبی.

| عضو | تنش (MPa) | | مدول یانگ (E) (Mpa) |
|--------|------------|------------|------------------------|
| | تسلیم (Fy) | نهایی (Fu) | |
| Plate | ۲۰۷ | ۲۹۰ | ۲۱۰۰۰۰ |
| Column | ۳۰۰ | ۴۴۳ | ۲۱۰۰۰۰ |
| Beam | ۲۸۸ | ۴۵۶ | ۲۱۰۰۰۰ |

(روابط ۱۵ و ۱۶):

$$M_{VBE(HEB)} = \frac{1}{4} MP_b \quad (15)$$

$$MP_b = \frac{MP_r}{\sqrt{1} R_y} + \left(\frac{M_{pr}^*}{L_h} + \frac{M_{pr}^*}{L_h} + \frac{(W_u + W_g)}{2} L_h \right) S_h \quad (16)$$

نیروی برشی ستون نیز در اثر تسلیم ورق جان و لنگر وارده از تیر مطابق رابطه‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود:

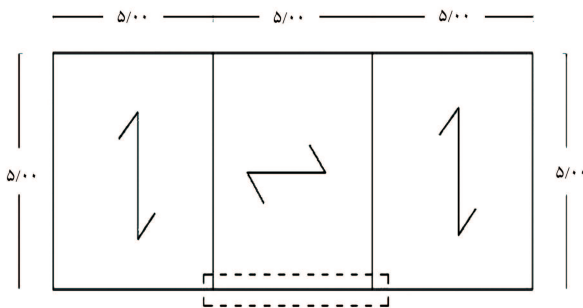
$$V = V_{VBE(HEB)} + V_{VBE(web)} \quad (17)$$

که در آن، $V_{VBE(HEB)}$ و $V_{VBE(web)}$ از روابط ۱۸ و ۱۹ به دست می‌آید:

$$V_{VBE(web)} = \frac{1}{4} R_y F_y t_w h_c \sin \alpha \quad (18)$$

$$V_{VBE(HEB)} = \frac{1}{2} \frac{MP_b}{h_c} \quad (19)$$

با مشخص شدن نیروهای ایجاد شده در المان‌های مرزی با کمک روابط آیین‌نامه، طراحی و کنترل مقاطع تیرها و ستون‌ها انجام می‌پذیرد. با توجه به اینکه المان‌های مرزی تحت اثر هم‌زمان نیروهای محوری و لنگر خمشی هستند، باید با استفاده از روابط تیر - ستون طراحی شوند.



دیوار برشی فولادی

شکل ۴. جانمایی دیوار برشی فولادی در پلان.

۲.۳. بارگذاری ثقلی

بارهای ثقلی جزء بارهای دائمی هستند که قبل، بعد و در حین اعمال بارهای لرزه‌یی در المان‌های سازه‌یی اثر می‌کنند. مهم‌ترین تأثیر بارهای ثقلی در حین بارگذاری جانبی آثار $\Delta - p$ است. در حالت اخیر، اعمال هم‌زمان بارهای جانبی و ثقلی باعث تشدید لنگر در ستون‌ها و افزایش تغییر مکان‌ها می‌شود؛ بنابراین اعمال بارهای ثقلی، هم‌زمان با بارگذاری جانبی تأثیر به‌سزایی در شناسایی عملکرد لرزه‌یی سیستم‌های سازه‌یی دارد.

با تغییر طول دهانه‌ی پانل دیوار برشی، میزان بارهای ثقلی نیز تغییر می‌کند. بارهای ثقلی در هر طبقه مستقیماً بر ستون‌ها اعمال می‌شوند. این بار قبل از شروع بارگذاری جانبی کاملاً بر سازه وارد می‌شوند و تا انتهای بارگذاری جانبی نیز باقی می‌مانند. محل دیوار برشی فولادی ارزیابی شده در پژوهش حاضر در قاب بیرونی یک ساختمان مسکونی با پلان مشخص شده در شکل ۴ در نظر گرفته شده است. با توجه به پلان و جهت تیرریزی و همچنین مقدار بارهای ثقلی (بارهای مرده و زنده به ترتیب برابر ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع) بار ضریب‌دار هر ستون مطابق رابطه‌ی ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{(5 \times 5 + 5 \times L)}{4} \times (1,2 \times 500 + 1,6 \times 200) \quad (20)$$

۳.۳. بارگذاری جانبی

در پژوهش حاضر، بارگذاری جانبی از نوع کنترل تغییر مکان بوده و الگوی بارگذاری بر حسب زاویه‌ی دوران اعمال شده است. بارگذاری جانبی در هر طبقه به بال فوقانی تیرها اعمال و برای در نظر گرفتن تأثیر دیاگرام، حرکت جانبی تیرها در بال فوقانی مهار شده است.

۴.۳. مدل سازی در نرم افزار اجزاء محدود و صحت سنجی

جهت مدل سازی و تحلیل سازه از نرم افزار آباکوس^۲ استفاده و رفتار غیرخطی هندسی

۳. روش مطالعه

در بخش کنونی، مشخصات نمونه‌های دیوار برشی فولادی که در پژوهش حاضر ارزیابی و تحلیل شده‌اند، از نظر شرایط مدل‌سازی، بارگذاری، اتصال‌ها و مشخصات هندسی شرح داده شده‌اند. در پژوهش حاضر تلاش شده است که شرایط و مشخصات دیوارهای برشی فولادی به صورتی انتخاب شوند که تمامی عوامل و متغیرهای مهم و تأثیرگذار در رفتار سیستم مذکور لحاظ و دقیقاً بررسی شوند.

۱.۳. مدل طراحی شده

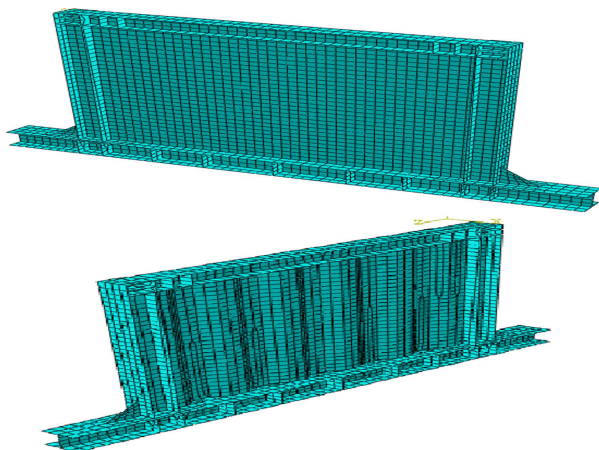
برای تطبیق هر چه بیشتر شرایط مدل‌سازی و نتایج حاصل شده با دیوارهای برشی فولادی که در سیستم سازه‌یی ساختمان‌های واقعی استفاده می‌شوند، نمونه‌ها در مقیاس واقعی مدل‌سازی شده‌اند. نسبت طول دهانه به ارتفاع پانل دیوار برشی فولادی ($\frac{L}{h}$) در ۳ حالت ۱، ۱٫۵ و ۰٫۵ در نظر گرفته شده است. به این ترتیب طول دهانه‌ی قاب در ۳ اندازه‌ی ۱۷۵، ۳۵۰ و ۵۲۵ میلی‌متر و ارتفاع هر طبقه از نمونه‌ها برابر با ارتفاع معمول طبقات یک ساختمان واقعی و برابر با ۳۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است. همچنین برای در نظر گرفتن تأثیر تعداد طبقات در عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی و المان‌های مرزی (تیرها و ستون‌ها)، نمونه‌ها در یک قاب ۱ دهانه و در ۳ طبقه مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. اتصال‌های تیرها به ستون‌ها در تمامی مدل‌ها به صورت صلب خمشی در نظر گرفته شده‌اند. در جهت عملکرد هر چه مناسب‌تر دیوارهای برشی فولادی، کلیه‌ی اجزاء تشکیل دهنده‌ی نمونه‌هایی که از نظر طول دهانه و یا ضخامت ورق فولادی متفاوت از یکدیگر هستند، به‌طور جداگانه و براساس روابط ارائه شده در بخش ۲ و الزامات آیین‌نامه‌های AISC 341-05 و AISC Design Guide 20 طراحی شده است. مشخصات مکانیکی فولاد مفروض در اجزاء مختلف دیوار برشی فولادی و مشخصات هندسی مقاطع المان‌های مرزی برای مدل‌های دیوارهای برشی فولادی در حالت‌های مختلف به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مقاطع و نسبت ابعاد و ضخامت دیوار در مدل‌های مورد بررسی.

| مقطع تیر طبقه‌ی | | | مقطع ستون‌ها | h/t | L/t | L/h | t (mm) | طول دهانه (mm) |
|-----------------|--------|--------|--------------|------|------|-----|-----------|-------------------|
| سوم | دوم | اول | | | | | | |
| IPE۲۲° | IPE۲۰° | IPE۲۰° | IPB۳۰° | ۲۳۰° | ۱۱۵° | ۰٫۵ | ۱٫۵ | |
| IPE۳۰° | IPE۲۷° | IPE۲۷° | IPB۴۰° | ۱۱۵° | ۵۸° | ۰٫۵ | ۳ | ۱۷۵° |
| IPE۴۰° | IPE۳۳° | IPE۳۳° | IPB۶۰° | ۷۷° | ۳۹° | ۰٫۵ | ۴٫۵ | |
| IPE۳۶° | IPE۲۴° | IPE۲۴° | IPB۳۰° | ۲۳۰° | ۲۳۰° | ۱ | ۱٫۵ | |
| IPE۴۵° | IPE۳۶° | IPE۳۶° | IPB۵۰° | ۱۱۵° | ۱۱۵° | ۱ | ۳ | ۳۵۰° |
| IPE۵۰° | IPE۴۰° | IPE۴۰° | IPB۶۰° | ۷۷° | ۷۷° | ۱ | ۴٫۵ | |
| IPB۳۰° | IPB۱۸° | IPB۱۸° | IPB۳۶° | ۲۳۰° | ۳۰۰° | ۱٫۵ | ۱٫۵ | |
| IPB۳۶° | IPB۲۰° | IPB۲۰° | IPB۵۵° | ۱۱۵° | ۱۵۰° | ۱٫۵ | ۳ | ۵۲۵° |
| IPB۵۰° | IPB۲۴° | IPB۲۴° | IPB۷۵° | ۷۷° | ۱۰۰° | ۱٫۵ | ۴٫۵ | |



شکل ۵. نمونه‌های آزمایشگاهی امامی و همکاران (۲۰۱۲). [۲]



شکل ۶. مدل اجزاء محدود نمونه‌ی آزمایشگاهی امامی و همکاران (۲۰۱۲).

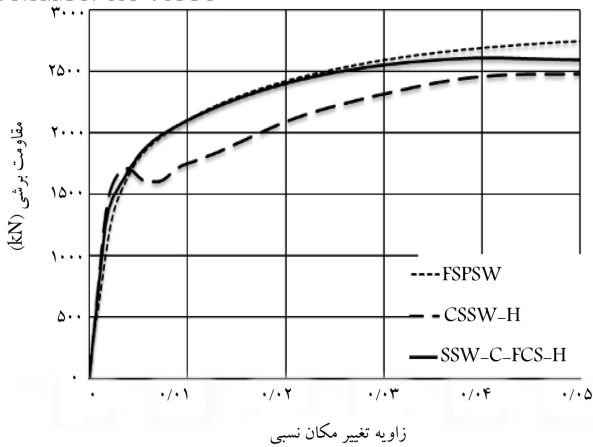
اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی برای دیوار برشی فولادی با استفاده از ورق صاف بدون سخت‌کننده و ورق موج‌دار تحت بارگذاری چرخه‌ی نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده و ارزیابی نمودار مقایسه‌ی نتایج اجزاء محدود و آزمایشگاهی برای هر دو نمونه‌ی دیوار برشی فولادی می‌توان اذعان داشت که دقت نتایج به دست آمده در حد مطلوب قرار دارد (جدول ۴). بنابراین با توجه به نتایج

و مادی در نظر گرفته شده است. کلیه‌ی اعضاء سازه، شامل: تیرها، ستون‌ها، و ورق‌ها توسط المان S۴R مدل شده‌اند. المان S۴R دارای ۴ گره با خاصیت انتگرال‌گیری کاهش یافته است، به نحوی که هر گره ۶ درجه آزادی، شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی است. المان S۴R قابلیت مدل‌سازی پوسته‌ی نازک تا ضخیم را دارد و می‌تواند کرنش‌ها و تغییرمکان‌های بزرگ را به خوبی مدل‌سازی کند. همچنین برای در نظر گرفتن نقص اولیه بر مبنای آیین‌نامه‌ی اروپا، تغییرمکانی برابر $\frac{1}{400}$ طول کوچک‌ترین بُعد ورق فولادی در مرکز آن و در جهت عمود بر صفحه‌ی ورق جان اعمال می‌شود.

در هر پژوهش برای آن که بتوان نتایج تحلیل‌های رایانه‌ی را مبنایی برای نتیجه‌گیری‌ها و مقایسه‌های بعدی قرار داد، لازم است صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی بررسی شود. بهترین روند برای نیل به هدف اخیر آن است که نمونه‌های مطالعات آزمایشگاهی انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل شوند و نتایج تقریباً مشابه به دست آید.

در پژوهش حاضر، نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی امامی و همکاران (۲۰۱۲)، [۲] شامل دیوار برشی فولادی با ورق‌های صاف بدون سخت‌کننده (FSPSW) [۳] و دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار (CSSW) [۴] مقایسه شده است. نمونه‌ها در مقیاس $\frac{1}{4}$ و به صورت یک قاب ۱ طبقه و ۱ دهانه ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ی قرار گرفته است. ابعاد نمونه‌ها 2320×1640 (mm) بوده است. برای اجزاء مرزی از مقاطع I شکل و برای ورق فولادی جان دیوار از فولاد با تنش تسلیم پایین استفاده شده است. اتصال تیر به ستون و اتصال ورق فولادی به اجزاء مرزی از نوع اتصال‌های صلب است. نمونه‌ها از لحاظ ضخامت، اتصال‌های تیر به ستون، و اتصال‌های ورق فولادی به اجزاء مرزی (تیر و ستون) کاملاً یکسان است (شکل ۵).

بارگذاری نمونه‌ها از نوع کنترل تغییرمکان بوده و بارگذاری در قسمت تیر فوقانی اعمال شده است. جهت جلوگیری از کمناش جانبی، جابه‌جایی تیرها در راستای عمود بر صفحه‌ی بارگذاری با استفاده از مهار جانبی مقید شده است. برای شبیه‌سازی زلزله و بررسی دقیق رفتار چرخه‌ی دیوارهای برشی فولادی از بارگذاری شبه استاتیکی با افزایش بار و جابه‌جایی در هر چرخه استفاده شده است. در شکل ۶، مدل‌های اجزاء محدود نمونه‌های آزمایشگاهی امامی و همکاران (۲۰۱۲) به همراه مش‌بندی مشاهده می‌شود. مش‌بندی با سایز ۵۰ میلی‌متر انجام شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ و همچنین جدول ۳ مقایسه‌ی بین نتایج تحلیل مدل‌های



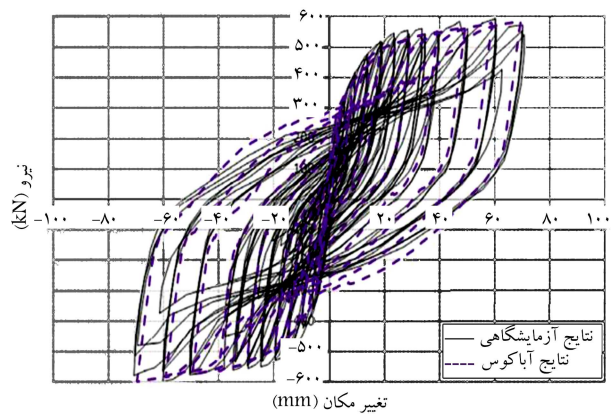
شکل ۹. منحنی مقاومت برشی به زاویه‌ی دوران نسبی نمونه‌ها.

۱. ضخامت ورق موج‌دار و ورق‌های صاف یکسان باشند (حالت A).
۲. ضخامت ورق موج‌دار بیشتر از ورق‌های صاف باشد (حالت B).
۳. ضخامت ورق موج‌دار کمتر از ورق‌های صاف باشد (حالت C).

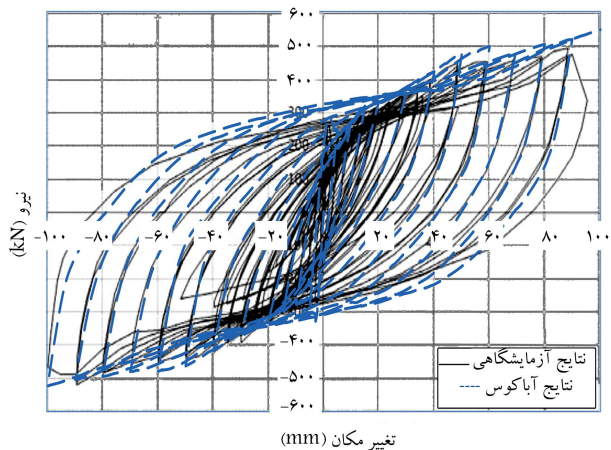
البته نکته‌ی حائز اهمیت در ارزیابی ذکر شده این است که در هر سه حالت، مجموع ضخامت ورق‌های موج‌دار و صاف، یکسان در نظر گرفته شده است. بررسی‌های اخیر برای دیوارهای برشی فولادی با نسبت $\frac{L}{h} = 0.5, 1, 1.5$ و مجموع ضخامت ۳ میلی‌متر در دو حالت ورق موج‌دار با جهت موج افقی و عمودی صورت گرفته و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است که در آن، k سختی اولیه‌ی سازه، F_u مقاومت نهایی و E مقدار جذب انرژی است. مقادیر پارامترهای لرزه‌ی جدول ۴، برای حالت‌های B و C نسبت به نتایج نمونه‌ها در حالت A نرمالیزه شده است. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات ضخامت ورق جان، تأثیر چندانی در مقادیر مقاومت نهایی و جذب انرژی نمونه‌ها ندارد؛ اما در مقابل، سختی نمونه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سختی نمونه‌ها در حالت B در مقایسه با حالت A ، ۴٪ تا ۱۱٪ بیشتر است، در حالی که این مقادیر برای حالت C ، ۶٪ تا ۲۳٪ کاهش را به دنبال داشته است.

۲.۴. مقایسه‌ی عملکرد لرزه‌ی نمونه‌های FSPSW و CSSW.SSW-C-FCS

منحنی مقاومت برشی به زاویه‌ی تغییر مکان نسبی نمونه‌های FSPSW و CSSW با جهت موج افقی و SSW-C-FCS با جهت موج افقی، با نسبت $\frac{L}{h}$ و ضخامت ۳ میلی‌متر در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است نمونه‌ی FSPSW در طول بارگذاری، رفتاری پایدار توأم با جذب انرژی و مقاومت نهایی مطلوب را از خود نشان داده است. این در حالی است که در مرحله‌ی کشسان، شیب منحنی مدل‌های مذکور کمتر است. در نمونه‌ی CSSW، شیب منحنی در مرحله‌ی کشسان مقداری بیشتر است و بیانگر سختی بالاتر نمونه‌ی CSSW است. در مقابل، میزان مقاومت نهایی و جذب انرژی آن کمتر است. همچنین منحنی نمونه‌ی CSSW نشان می‌دهد که در حین بارگذاری و بعد از مرحله‌ی کشسان، دچار کاهش شدید سختی شده و بدون افزایش در باربری، تغییر مکان زیادی را تجربه کرده است. ارزیابی نحوه‌ی رفتار نمونه‌ی پیشنهادی SSW-C-FCS، بیانگر عملکرد مناسب مدل مذکور است. نمونه‌ی SSW-C-FCS، سختی بالاتری از نمونه‌ی FSPSW و نزدیک به نمونه‌ی CSSW است. سیستم اخیر در طول بارگذاری رفتاری پایدار



شکل ۷. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود مدل دیوار با ورق صاف.



شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود مدل دیوار با ورق موج‌دار.

جدول ۳. مقایسه‌ی عددی نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود.

| اعتبارسنجی نمونه‌ی صاف | نتایج آزمایشگاهی | نتایج اجزاء محدود | اختلاف |
|---------------------------------|------------------|-------------------|--------|
| بار بیشینه | ۵۷۲ KN | ۵۸۴ KN | ۲٪ |
| تغییر مکان متناظر با بار بیشینه | ۷۰ mm | ۶۹٫۵ mm | ۰٫۷٪ |
| اعتبارسنجی نمونه‌ی موج‌دار | نتایج آزمایشگاهی | نتایج اجزاء محدود | اختلاف |
| بار بیشینه | ۵۲۱ KN | ۴۹۵ KN | ۵٪ |
| تغییر مکان متناظر با بار بیشینه | ۹۱ mm | ۸۹ mm | ۲٪ |

به دست آمده می‌توان بیان کرد که مدل‌های اجزاء محدود، اعتبار دارند و نتایج حاصل از مطالعه‌ی پارامتریک و عددی با استفاده از نحوه‌ی مدل‌سازی ذکر شده قابل اطمینان خواهد بود.

۴. نتایج عددی

۱.۴. بررسی تأثیر ضخامت ورق‌های صاف و موج‌دار در دیوارهای

SSW-C-FCS در عملکرد لرزه‌ی آن

در بخش حاضر، تأثیر ضخامت ورق‌های فولادی موج‌دار و صاف در عملکرد لرزه‌ی سیستم دیوار برشی فولادی پیشنهادی SSW-C-FCS بررسی شده است. برای این منظور، در این سه حالت ارزیابی و مقایسه انجام شده است:

جدول ۴. تأثیر ضخامت ورق‌های تشکیل‌دهنده جان در عملکرد لرزه‌یی نمونه‌های SSW-C-FCS.

| $\frac{L}{h}$ | حالت ورق موجدار | K | | | F_u | | | E | | |
|---------------|-----------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | | C | B | A | C | B | A | C | B | A |
| ۰٫۵ | Hor | ۰٫۹۰ | ۱٫۱۱ | ۱٫۰۰ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ |
| | Ver | ۰٫۸۶ | ۱٫۰۵ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ |
| ۱ | Hor | ۰٫۸۴ | ۱٫۱۱ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ |
| | Ver | ۰٫۷۷ | ۱٫۱۰ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ |
| ۱٫۵ | Hor | ۰٫۸۸ | ۱٫۰۸ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۱ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ |
| | Ver | ۰٫۸۹ | ۱٫۰۴ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۱ | ۰٫۹۹ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ | ۱٫۰۰ |

دارد و مقاومت نهایی و جذب انرژی آن نزدیک به نمونه FSPSW است. ارزیابی پارامترهای لرزه‌یی، نظیر سختی سازه‌یی، مقاومت اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی که از منحنی دو خطی مقاومت برشی به تغییرمکان به دست می‌آید در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

نمونه FSPSW با وجود اینکه میزان مقاومت نهایی و جذب انرژی بالاتری دارد، اما میزان سختی کشسان که تأثیر به‌سزایی در عملکرد لرزه‌یی دارد، در نمونه‌ی اخیر کمتر است. در مقابل نمونه‌ی CSSW با اینکه سختی کشسان مناسبی دارد،

۳.۴. ارزیابی تأثیر ضخامت ورق جان

یکی از عوامل بسیار مهم در رفتار و عملکرد دیوار برشی فولادی، ضخامت ورق جان است. مسلماً افزایش ضخامت ورق جان باعث بهبود رفتار و عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی می‌شود و مقاومت برشی آن را افزایش می‌دهد. در بخش حاضر، پارامترهای لرزه‌یی نمونه‌ی دیوارهای برشی فولادی FSPSW، CSSW و SSW-C-FCS در ضخامت‌های کل ۱٫۵، ۳، و ۴٫۵ میلی‌متر در نسبت $\frac{L}{h} = ۱٫۵$ بررسی و مقایسه شده است (شکل ۱۱). برای نمونه‌های SSW-C-FCS از حالت B استفاده شده و ضخامت کل برای سه نمونه یکسان بوده است.

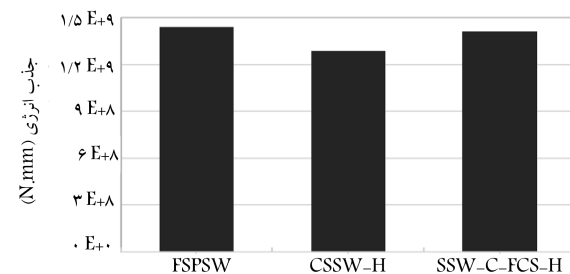
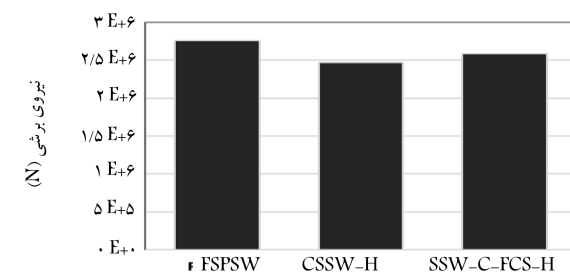
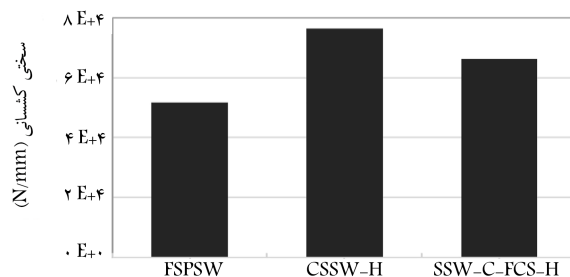
ارزیابی انجام شده نشان می‌دهد که از نظر سختی کشسان، نمونه‌های FSPSW در مقایسه با نمونه‌های CSSW و SSW-C-FCS عملکرد مناسبی ندارند و مقادیر آن برای ضخامت‌های مختلف ۳۱٪ تا ۷۵٪ کمتر از نمونه‌های دیگر است. در مقابل نمونه‌های CSSW و SSW-C-FCS عملکرد تقریباً مشابهی داشته‌اند، به طوری که در ضخامت ۱٫۵ و ۳ میلی‌متر، میزان سختی کشسان نمونه‌ی SSW-C-FCS به ترتیب ۱۵٪ و ۶٪ کمتر و برای ضخامت ۴٫۵ میلی‌متر، ۴٪ بیشتر از نمونه‌ی CSSW بوده است (شکل ۱۱ الف).

با توجه به شکل‌های ۱۱ ب و ۱۱ ج ملاحظه می‌شود که مقاومت نهایی و جذب انرژی نمونه‌های FSPSW و SSW-C-FCS در ضخامت‌های مختلف تقریباً برابر است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که مقاومت نهایی نمونه‌ی CSSW کمتر از نمونه‌های دیگر است و با افزایش ضخامت، اختلاف آن بیشتر می‌شود. مقاومت نهایی نمونه‌ی CSSW نسبت به نمونه‌ی SSW-C-FCS برای ضخامت‌های ۱٫۵، ۳ و ۴٫۵ میلی‌متر به ترتیب ۱۰٪، ۱۶٪ و ۱۹٪ کمتر است. از طرفی جذب انرژی نمونه‌های CSSW نیز ۲۰٪ تا ۳۰٪ کمتر از نمونه‌ی SSW-C-FCS است.

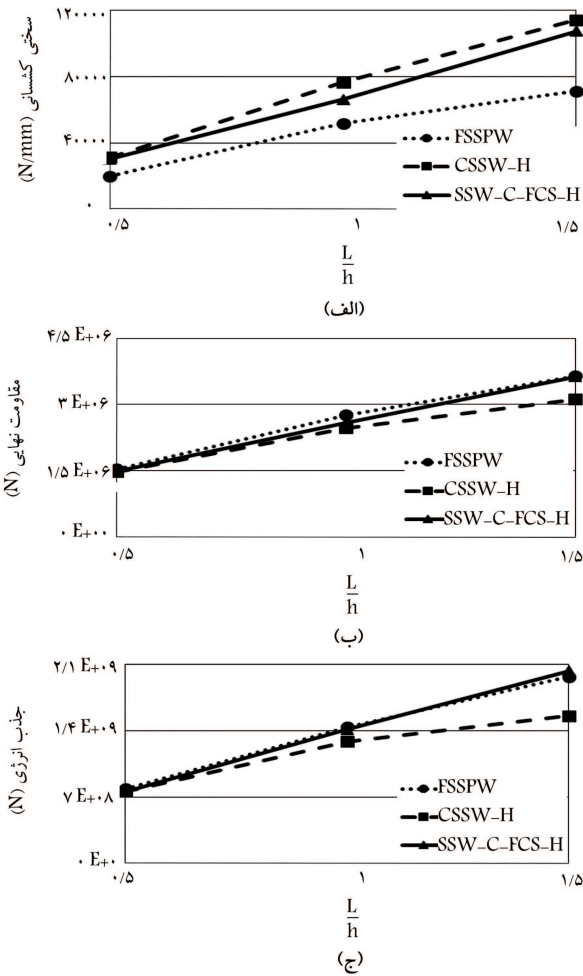
۴.۴. تأثیر نسبت $\frac{L}{h}$

در شکل ۱۲، مقادیر پارامترهای لرزه‌یی برای نسبت‌های متفاوت $\frac{L}{h}$ در نمونه‌های FSPSW، CSSW و SSW-C-FCS مشاهده می‌شود که مطابق آن نمونه‌های FSPSW از نظر مقاومت نهایی و جذب انرژی عملکرد خوبی دارند، اما سختی کشسان کمتری دارند. از طرفی، نمونه‌های CSSW با وجود اینکه سختی کشسان

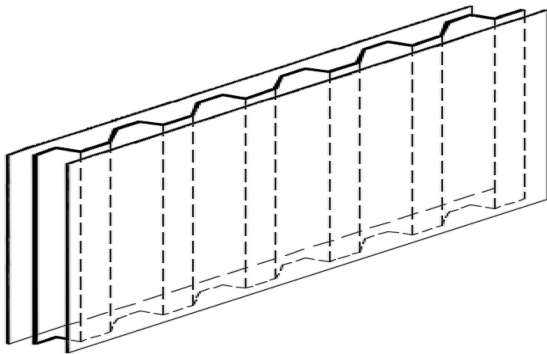
نمونه‌ی FSPSW با وجود اینکه میزان مقاومت نهایی و جذب انرژی بالاتری دارد، اما میزان سختی کشسان که تأثیر به‌سزایی در عملکرد لرزه‌یی دارد، در نمونه‌ی اخیر کمتر است. در مقابل نمونه‌ی CSSW با اینکه سختی کشسان مناسبی دارد،



شکل ۱۰. مقایسه‌ی پارامترهای لرزه‌یی نمونه‌های SSW، CSSW، و SSW-C-FCS.



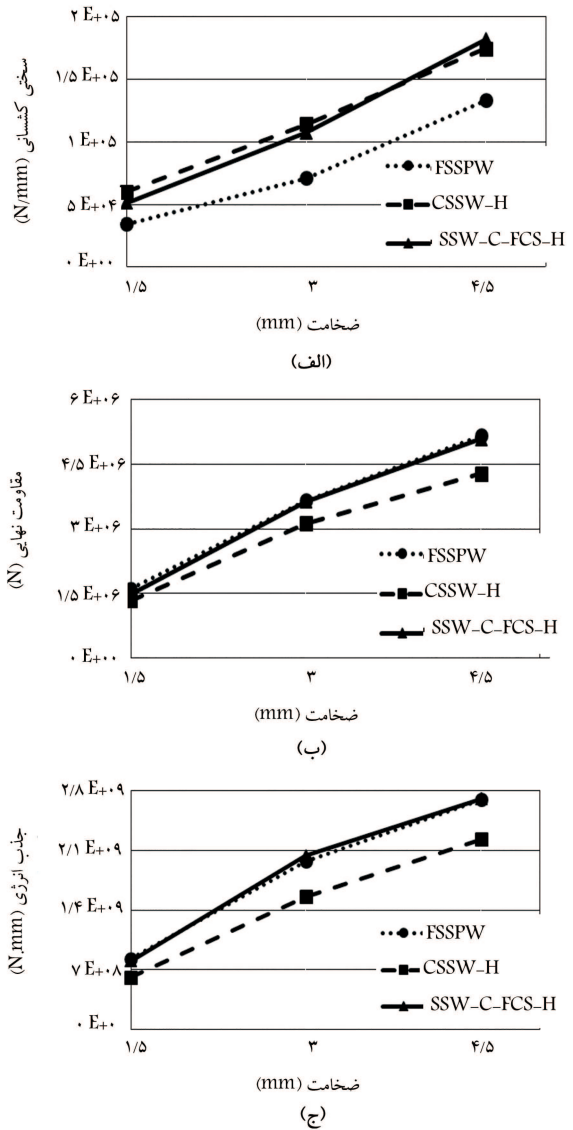
شکل ۱۲. تأثیر نسبت L/h در پارامترهای لرزه‌ی.



شکل ۱۳. جزئیات ورق جان در دیوار برشی فولادی SSW-C-FCS بدون اتصال به یکدیگر.

مرحله‌ی کنونی، بررسی‌ها برای دیوارهای برشی فولادی با نسبت‌های $L/h = 0.75$ ، $L/h = 1$ و $L/h = 1.5$ و برای ضخامت کل ۳ میلی‌متر انجام شده است. ارزیابی برای دیوارهای SSW-C-FCS با ورق موج‌دار قائم بوده و ضخامت ورق‌های صاف و موج‌دار، یکسان در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۴ تا شکل ۱۶، منحنی مقاومت برشی به زاویه‌ی دوران نسبی را برای نمونه‌های SSW-C-FCS با اتصال و بدون اتصال نشان می‌دهد. همچنین در

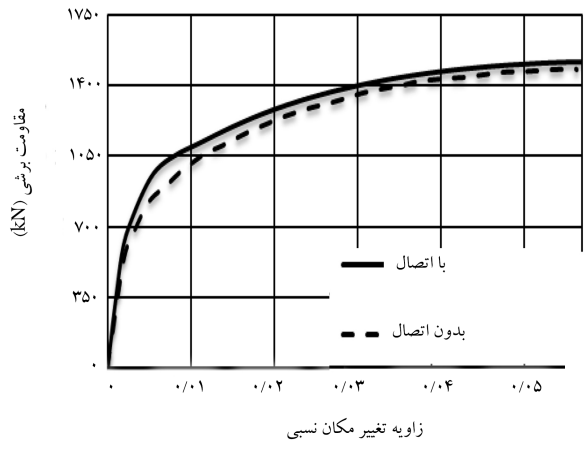
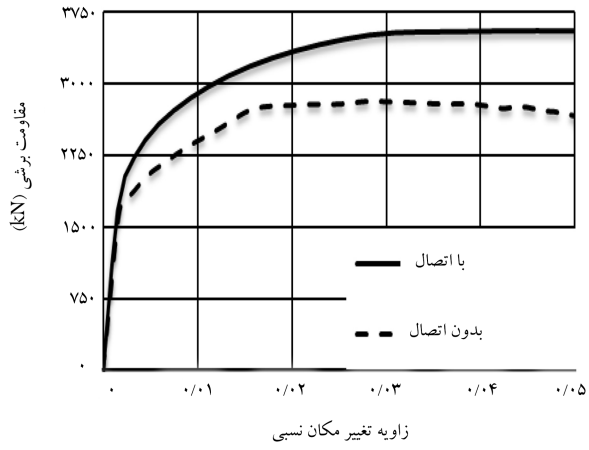


شکل ۱۱. تأثیر ضخامت ورق جان در پارامترهای لرزه‌ی.

بالایی دارند، اما میزان مقاومت نهایی و جذب انرژی آن‌ها کمتر از نمونه‌های دیگر است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش نسبت L/h میزان اختلاف موارد اخیر بیشتر شده است. نمونه‌های SSW-C-FCS در نسبت‌های مختلف L/h عملکرد پایداری را از خود نشان داده و میزان سختی کشسان آن‌ها، بسیار بهتر از نمونه‌های سخت نشده بوده و در مقابل، از نظر مقاومت نهایی و جذب انرژی نسبت به نمونه‌های CSSW عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند.

۵.۴. تأثیر اتصال بین ورق‌های جان

در کلیه‌ی مدل‌های SSW-C-FCS مورد بررسی فرض شده است که علاوه بر اینکه ورق‌های جان به المان‌های مرزی اتصال دارند، بین ورق‌موج‌دار میانی و ورق‌های صاف نیز اتصال از نوع کامل است. در بخش حاضر، دیوارهای برشی فولادی SSW-C-FCS در حالتی که اتصالی بین ورق‌های جان وجود ندارند، بررسی شده‌اند. در این حالت فاصله‌ی ۲۵ میلی‌متری بین ورق‌های صاف و موج‌دار در نظر گرفته شده و ورق‌های جان فقط به المان‌های مرزی اتصال یافته‌اند (شکل ۱۳).

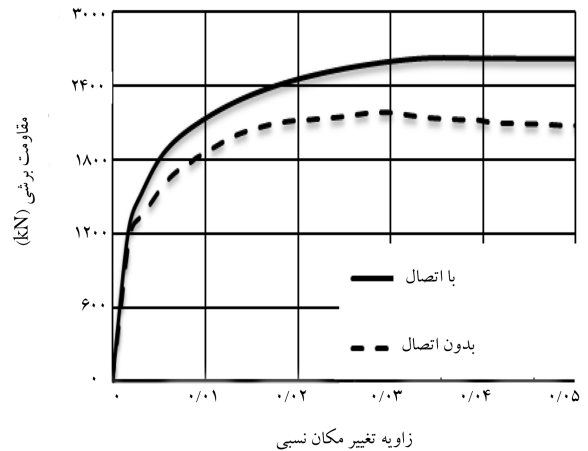


شکل ۱۶. مقایسه‌ی منحنی ظرفیت برشی به زاویه‌ی تغییر مکان نسبی نمونه‌ی SSW-C-FCS در حالت بدون اتصال و با اتصال با نسبت $\frac{L}{h} = 1.5$

شکل ۱۴. مقایسه‌ی منحنی ظرفیت برشی به زاویه‌ی تغییر مکان نسبی نمونه‌ی SSW-C-FCS در حالت بدون اتصال و با اتصال با نسبت $\frac{L}{h} = 0.5$

جدول ۵. تأثیر اتصال بین ورق‌های جان در پارامترهای لرزه‌ی نمونه‌های SSW-C-FCS

| E | Fu | K | L/h | |
|------|------|------|-----|------------|
| ۱۷۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱۷۰۰ | ۰٫۵ | با اتصال |
| ۰٫۸۰ | ۰٫۹۸ | ۰٫۹۶ | ۰٫۵ | بدون اتصال |
| ۱۷۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱ | با اتصال |
| ۰٫۹۸ | ۰٫۷۷ | ۰٫۸۳ | ۱ | بدون اتصال |
| ۱۷۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱٫۵ | با اتصال |
| ۱۷۰۰ | ۰٫۷۵ | ۰٫۷۰ | ۱٫۵ | بدون اتصال |



شکل ۱۵. مقایسه‌ی منحنی ظرفیت برشی به زاویه‌ی تغییر مکان نسبی نمونه‌ی SSW-C-FCS در حالت بدون اتصال و با اتصال با نسبت $\frac{L}{h} = 1$

توضیح مبانی طراحی سیستم لرزه‌ی اشاره شده، رفتار و عملکرد دیوارهای برشی فولادی در حالت‌های FSPSW و CSSW قائم و SSW-C-FCS با جهات موج قائم و افقی دقیقاً بررسی و مقایسه شده و این نتایج به دست آمده است:

۱. نتایج بررسی تأثیر ضخامت ورق‌های صاف و موج‌دار در دیوارهای برشی فولادی پیشنهادی SSW-C-FCS بیانگر آن است که در شرایطی که مجموع ضخامت کل ورق‌های جان برابر باشد، در حالتی که ضخامت ورق موج‌دار بیشتر از ورق صاف باشد، عملکرد لرزه‌ی مناسب‌تری حاصل می‌شود.

۲. مقایسه‌ی عملکرد لرزه‌ی دیوارهای FSPSW، CSSW و SSW-C-FCS نشان می‌دهد که دیوارهای FSPSW با وجود اینکه مقاومت نهایی و جذب انرژی بالایی دارند، اما سختی سازه‌ی کمتری نسبت به دو سیستم دیگر دارند. از طرفی نمونه‌های CSSW با وجود اینکه سختی سازه‌ی خوبی دارند، اما مقاومت نهایی و جذب انرژی آن‌ها در مقایسه با نمونه‌های دیگر کمتر است. همچنین منحنی‌های نیرو - دوران نسبی نشان می‌دهند که پس از مرحله‌ی کشسان، دچار کاهش شدید در سختی سازه‌ی می‌شوند و بدون افزایش قابل توجه در بارگذاری جانبی، تغییر مکان زیاد (۲ تا ۳ برابر تغییر مکان کشسان) متحمل می‌شوند. بررسی عملکرد دیوارهای SSW-C-FCS نشان می‌دهد که سیستم مذکور در طول بارگذاری، رفتاری پایدار و مناسب از خود نشان داده و توانسته است ضعف‌های مربوط به عملکرد لرزه‌ی دیوارهای FSPSW و CSSW را بهبود بخشد. این دیوارهای SSW-C-FCS در مقایسه با دیوارهای CSSW، مقاومت نهایی و جذب انرژی بیشتری داشته و در مقایسه با دیوارهای

جدول ۵، عملکرد لرزه‌ی نمونه‌های SSW-C-FCS ارزیابی و مقایسه شده است. مقادیر سختی کشسان، مقاومت برشی نهایی و جذب انرژی برای نمونه‌های بدون اتصال نسبت به مقادیر نمونه‌های با اتصال، نرمالیزه شده است.

بررسی منحنی‌های نیروی برشی به زاویه‌ی دوران نسبی بیانگر این مطلب است که نمونه‌های دیوار برشی SSW-C-FCS با اتصال، عملکرد مناسب‌تری دارند. دقت در منحنی‌های ذکر شده و نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که در نسبت $\frac{L}{h} = 0.5$ ، شیب مدل SSW-C-FCS بدون اتصال، کمتر است و کاهش ۲۰ درصدی سختی کشسان را به دنبال دارد. با افزایش نسبت $\frac{L}{h}$ (افزایش طول دهانه)، مقاومت برشی و سطح زیر منحنی نمونه‌های بدون اتصال نسبت به نمونه‌های با اتصال کاهش بسیار زیادی یافته است. به طوری که برای نسبت $\frac{L}{h} = 1$ ، مقادیر مقاومت نهایی برشی و جذب انرژی به ترتیب کاهش ۲۳٪ و ۱۷٪ و برای نسبت $\frac{L}{h} = 1.5$ به ترتیب کاهش ۲۵٪ و ۳۰٪ را از خود نشان می‌دهند.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ضمن معرفی و تشریح عملکرد دیوار برشی فولادی و همچنین

Archive of SID

۴. با افزایش نسبت $\frac{l}{h}$ ، مقادیر سختی سازه‌ی برای دیوارهای FSPSW و مقاومت نهایی و جذب انرژی برای دیوارهای CSSW نسبت به حالت‌های دیگر کاهش یافته است. این در حالی است که دیوارهای پیشنهادی SSW-C-FCS در تمامی نسبت‌های $\frac{l}{h}$ عملکرد لرزه‌ی پایدارتری از خود نشان داده‌اند.

۵. اتصال بین ورق‌های جان در دیوارهای SSW-C-FCS تأثیر به‌سزایی در عملکرد لرزه‌ی آن دارد. اتصال ورق‌های جان در نسبت $\frac{l}{h} = 0.5$ ، 20% افزایش در جذب انرژی و در نسبت $\frac{l}{h} = 1$ به ترتیب 23% و 17% افزایش در مقاومت نهایی و سختی سازه‌ی نسبت به حالت بدون اتصال از خود نشان داده‌اند. این مقادیر برای نسبت $\frac{l}{h} = 1.5$ به ترتیب افزایش 25% و 30% را نتیجه داده است.

FSPSW توانسته‌اند سختی سازه‌ی که بزرگ‌ترین ضعف دیوارهای سخت نشده در مقایسه با دیوارهای موج‌دار است را به‌خوبی بهبود بخشند.

۳. ارزیابی تأثیر ضخامت ورق جان نشان می‌دهد که عملکرد دیوار برشی فولادی پیشنهادی SSW-C-FCS از نظر سختی سازه‌ی نزدیک به دیوار برشی فولادی CSSW و از نظر مقاومت نهایی و جذب انرژی نزدیک به دیوار برشی فولادی FSPSW است. با افزایش ضخامت ورق جان این اختلاف کاهش یافته و نتایج حتی بهتر شده است. در دیوارهای CSSW نسبت به دیوارهای SSW-C-FCS به ازاء ضخامت 1.5 ، 3 و 4.5 به ترتیب کاهش 10% ، 16% و 19% در مقاومت نهایی و بین 20% تا 30% کاهش در جذب انرژی حاصل شده است.

پانوشتها

1. steel shear wall of flat and corrugated sheets consisting
2. Abaqus
3. flat steel plate shear wall (FSPSW)
4. corrugated steel shear wall (CSSW)

منابع (References)

1. Pavir, A. and Shekastehband, B. "Hysteretic behavior of coupled steel plate shear walls", *Constructional Steel Research*, **114**, pp. 19-35 (2017).
2. Emami, F. and Mofid, M. "On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel plate shear walls", *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **23**(2), pp. 94-104 (2012).
3. Sabouri-Ghomi S.R. and Sajjadi, M. "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **23**(2), pp. 94-104 (2012).
4. Farzampour, A. and Laman, J.A. "Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openin andgs", *Constructional Steel Research*, **114**, pp. 258-326 (2015).
5. Stojadinovic, B. and Tipping, S. "Structural testing of corrugated sheet shear walls", University of California at Berkeley (2008).
6. Timler, p. and Kulak, G.L. "Experimental study of steel plate shear walls", Structural Engineering Reportt, No.114, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada (1983).
7. AISC, ANSI/AISC 341-05, "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago (IL), American Institute of Steel Construction (2005).
8. AISC Design Guide 20, "Steel plate shear walls", American InSTITUTE of Steel Construction inc (2007).