

بررسی رفتار استاتیکی غیرخطی دیوارهای برشی فولادی سخت نشده با و بدون بازشو

فرهاد بهنام فر* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

هادی صیادپور (استادیار)

دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه باسوج

آرش محمدی (کارشناس ارشد)

مرتضی امیدی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دوره ۲ - ۳۷، شماره ۱/۱، ص. ۳۳-۲۳

استفاده از دیوار برشی فولادی در ساختمان‌های فولادی، به منظور مقابله با بارهای جانبی، سابقه‌ی بالغ بر چند دهه دارد. با وجود این، استفاده از سیستم اخیر به دلیل پیچیدگی‌های رفتاری آن هنوز با مشکلاتی مواجه است. در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار جانبی سیستم دیوار برشی فولادی سخت نشده پرداخته شده است. بدین منظور، سه قاب فولادی دوبعدی ۱، ۵ و ۱۰ طبقه مجهز به دیوار برشی فولادی سخت نشده، طراحی و به صورت استاتیکی غیرخطی تحلیل و مدل‌سازی قاب‌ها به دو صورت دقیق و تقریبی انجام شده است. از روش اجزاء محدود غیرخطی با امکان تغییرشکل‌های بزرگ در کماتش به عنوان مدل دقیق و از روش نواری معادل با استفاده از میله‌های کششی دو سر مفصل به جای دیوار به عنوان مدل تقریبی استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر عواملی نظیر: بارهای ثقلی، نوع توزیع بار جانبی، نوع مدل‌سازی و اثر وجود بازشوهای مستطیلی در پانل دیوار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که ضوابط آیین‌نامه‌ی در ارتباط با کمینه‌ی مقاومت موردنیاز ستون‌های طرفین دیوار، غیرمحافظة‌کارانه است، به گونه‌ی که در نتیجه طراحی براساس ضوابط مذکور، اولین مفاصل خمیری به جای دیوارها در ستون‌ها ایجاد و از این منظر لزوم اصلاح ضوابط اشاره شده آشکار می‌شود. همچنین وجود بازشو سبب کاهش مقاومت نهایی و سختی جانبی سیستم می‌شود که کاهش این رابطه‌ی تقریباً خطی با نسبت ابعاد بازشو دارد. در نهایت، روابطی نیمه‌تحلیلی به منظور تخمین میزان کاهش سختی و مقاومت جانبی قاب‌های بررسی شده ناشی از وجود بازشو در دیوار برشی فولادی پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی، بازشو، کاهش سختی، مقاومت جانبی، تحلیل استاتیکی غیرخطی.

farhad@cc.iut.ac.ir
hadi@yu.ac.ir
farsanim@yahoo.com
omidi_morteza@yahoo.com

۱. مقدمه

برشی فولادی سخت نشده انجام شده است که در ادامه به برخی از شاخص‌ترین آن‌ها اشاره شده است.

توربورن^۲ و همکاران^[۱] (۱۹۸۳)، مدل نواری را برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی سخت نشده‌ی نازک براساس نظریه‌ی کشش قطری خالص پیشنهاد کردند. تیمار و کولاک^[۲] (۱۹۸۳)، با انجام آزمایش‌های بارگذاری یکنواخت و تناوبی بر روی دیوارهای برشی فولادی سخت نشده دریافتند که رفتار آن‌ها شکل‌پذیر است و اضافه مقاومتی قابل ملاحظه دارند. همچنین در آزمایش اخیر، دقت کافی معادله‌ی پیشنهادی توربورن برای زاویه‌ی تمایل میدان کششی تأیید شده است. رابرتز^۴ و صبوری قمی^[۳] (۱۹۹۱)، نتایج ۱۶ آزمایش روی پانل‌های برشی فولادی را که

در سه دهه‌ی اخیر، استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی (SPSW)^۱ سخت نشده، توجه بسیاری از پژوهشگران و طراحان را به خود جلب کرده و اطلاعات قابل ملاحظه‌ی در مورد طراحی لرزه‌ی آن‌ها در منابع علمی گرد آمده است. مزایای استفاده از سیستم SPSW، شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی قابل قبول همراه با کمینه‌ی مصالح، سختی زیاد، سرعت نصب، اشغال فضای کمتر و سهولت بهسازی یا تعویض آن‌هاست. طی سال‌های اخیر، مطالعات زیادی روی رفتار لرزه‌ی دیوارهای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۰/۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۳/۲۴، پذیرش ۱۳۹۹/۴/۱

DOI:10.24200/J30.2020.54704.2662

به صورت قطری بارگذاری شده بودند، ارائه کردند و در بعضی از نمونه‌ها نیز بازشوی گرد تعبیه شده بود. یکی از نکات برجسته‌ی آزمایش‌های انجام شده، بررسی آثار بازشوی دیوار در سختی و مقاومت آن است. همچنین نشان داده شد که مقاومت و سختی دیوار با افزایش نسبت قطر سوراخ به بعد افقی دیوار به صورت خطی کاهش می‌یابد. دراپور^۵ و همکاران^[۵] (۱۹۹۸)، نیز رفتار یک نمونه‌ی ۴ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی را که با مقیاس ۱ به ۲ ساخته شده بود، مطالعه‌ی آزمایشگاهی کردند و پیشنهاد دادند که برای جلوگیری از کمناش موضعی بال ستون در قسمت‌هایی که انتظار می‌رود رفتار کاملاً خمیری در دیوار رخ دهد، باید از سخت‌کننده در ستون استفاده شود. به هر حال حتی با گسیختگی زود هنگام پای ستون در نمونه‌ی اخیر، ضریب اضافه مقاومتی در حدود ۱٫۳ و ضریب شکل‌پذیری بیشتر از ۶ به دست آمد. ایشان همچنین نمونه‌های آزمایشی خود را با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل کردند و انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایش به دست آوردند. در مطالعه‌ی الگالی^۶ و همکاران^[۶] (۲۰۰۰)، نشان داده شد که مدل اجزاء محدود غیرخطی توسعه داده شده توسط ایشان، رفتار نمونه را با دقت خوبی شبیه‌سازی می‌کند. آستانه‌ی اصل و همکاران^[۷] (۲۰۰۱)، آزمایش‌هایی را روی دو نمونه‌ی ۲ و ۳ طبقه از دیوار برشی فولادی با مقیاس ۱ به ۲ انجام دادند و شکل‌پذیری بسیار زیادی را در نمونه‌ها مشاهده کردند. رضایی و همکاران^[۸] (۲۰۰۴)، نیز توانایی روش‌های تحلیلی موجود در شبیه‌سازی رفتار مشاهده شده‌ی سیستم‌های دیوار برشی فولادی را ارزیابی کردند. بهبهانی فرد و همکاران^[۹] (۲۰۰۴)، روشی برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی سخت نشده تحت بارهای یکنواخت و تناوبی ارائه کردند که منجر به پیش‌بینی موفقیت‌آمیز مقاومت و همچنین رفتار جانبی سیستم‌های مذکور شد. برمن و برونو^[۱۰] (۲۰۰۳ و ۲۰۰۴)، در یک مطالعه‌ی تجربی برای بررسی امکان استفاده از دیوارهای برشی فولادی نازک در بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌ها نشان دادند که دیوارهای برشی فولادی نازک جوش شده به قاب محیطی می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای بهسازی لرزه‌ی باشد. لین و همکاران^[۱۲] (۲۰۰۷)، مطالعاتی تجربی و تحلیلی روی نمونه‌های دو طبقه‌ی SPSW تحت شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده‌ی زلزله‌ی چی‌چی تایوان (۱۹۹۹) انجام دادند و توانستند با استفاده از مدل نواری، رفتار مشاهده شده را شبیه‌سازی کنند. وین و برناو^[۱۳] (۲۰۰۵)، روی سیستم SPSW با سوراخ‌های شطرنجی که در امتداد ۴۵ درجه و با قطر و فاصله‌ی مشخص از هم قرار داشتند، مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی انجام دادند. به علاوه، ایشان تحلیل‌های اجزاء محدودی را روی مدل‌های ساده شده‌ی دیوار برای بازسازی نتایج آزمایش انجام دادند و از آن‌ها برای بررسی اثر قطرهای مختلف سوراخ‌ها استفاده کردند. پوربا و برونو^[۱۲] (۲۰۰۹)، مطالعاتی را در مورد سیستم SPSW با بازشوی‌های دایره‌ی انجام دادند و ابتدا تحلیل‌های پوش‌آور را روی مدلی از دیوار شامل یک مجموعه نوارهای سوراخ‌دار تکی و سپس روی یک مجموعه از دیوارهای دوپه‌ای سوراخ‌دار با شرایط مرزی و قطرهای مختلف سوراخ انجام دادند و بعد براساس نتایج تحلیلی، پیشنهادهایی برای طراحی سیستم‌های SPSW سوراخ‌دار ارائه کردند. قلهکی و صبوری^[۱۵] (۲۰۰۹)، نیز روی دو نمونه دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر ۳ طبقه با دو نوع اتصال تیر به ستون ساده و کاملاً صلب که در آن‌ها برای ورق پانل‌ها از فولاد نرم (جاذب انرژی) استفاده شده بود، آزمایش‌هایی تحت بار دوره‌ی انجام دادند و تأثیر ضریب شکل‌پذیری در ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی را بررسی کردند. ارزیابی‌های ایشان نشان داد که با فرض ثابت بودن ضریب اضافه مقاومت، ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی بیشتر از قاب‌های خمشی فولادی است. پلگرینو^۹ و همکاران^[۱۶] (۲۰۰۹)، رفتار خطی و غیرخطی کمناشی ورق‌های فولادی با سوراخ‌های دایره‌ی و مستطیلی را تحت بارگذاری برشی بررسی کردند.

ایشان همچنین به تأثیر ابعاد، شکل و موقعیت قرارگیری سوراخ‌ها در پانل به همراه نسبت طول به عرض پانل توجه کردند و دریافته‌اند که ضریب بار کمناش برشی ورق متأثر از جهت گیری سوراخ‌های مستطیلی نیست.

مسعود و احمد^[۱۷] (۲۰۱۲)، در مطالعه‌ی خود، محدوده‌ی از بازشوی‌های دیوارهای برشی فولادی را که اثر قابل توجهی در سختی و مقاومت دیوار نداشته باشند، تعیین و نمودارهایی نیز برای انتخاب عرض بازشوی متناسب با پارامترهای طرح ارائه کردند. اکبری لر و همکاران^[۱۸] (۲۰۱۴)، روی کاربرد سخت‌کننده در گوشه‌های دیواری که در آن برای عبور تأسیسات، بازشو ایجاد شده بود، مطالعه‌ی به روش اجزاء محدود به انجام رساندند و دریافته‌اند که در صورت استفاده از سخت‌کننده در لبه‌ی بازشویی به شکل ربع دایره، اثر بازشو در سختی و مقاومت دیوار قابل ملاحظه نخواهد بود. گارمیری و حدیدی^[۱۹] (۲۰۱۴)، با تحلیل غیرخطی ۴۸ مدل دیوار دارای بازشوی دایره‌ی، مربعی و مستطیلی در اندازه‌های مختلف نشان دادند که مستقل از وجود سخت‌کننده، سختی و میزان جذب انرژی دیوار برشی با افزایش اندازه‌ی بازشوها کاهش می‌یابد. همچنین، میزان شکل‌پذیری لازم در بازشوی مربعی و مستطیلی شکل نسبت به بازشوی دایره‌ی به دلیل ورود سریع‌تر به محدوده‌ی غیرخطی بیشتر است.

موتوکومارو و مانوج^[۲۰] (۲۰۱۴)، با بررسی اندازه و موقعیت بازشوی‌های مختلف از طریق تحلیل غیرخطی دینامیکی نشان دادند که استفاده از بازشوی‌های کوچک به تعداد بیشتر، بر استفاده از تعداد کم بازشوی‌های بزرگ از نظر رفتار جانبی سیستم ارجحیت دارد. کیاشمشکی و همکاران^[۲۱] (۲۰۱۵)، ضریبی برای کاهش سختی جانبی دیوار برشی بر حسب نوع و آرایش بازشوها ارائه کردند. ونگ^{۱۱} و همکاران^[۲۲] (۲۰۱۵)، برای بررسی پارامترهای جذب انرژی، شکل‌پذیری، تغییر شکل خارج از صفحه و اثر میدان کششی در ستون‌ها، ۹ مدل متفاوت دیوار برشی، شامل: دیوار برشی بدون بازشو، دیوار برشی با ورق جان دارای تنش تسلیم پایین و دیوار دارای بازشو را تحلیل کردند و دریافته‌اند که در دیوار برشی با نقطه‌ی تسلیم پایین و سخت‌کننده‌ی T شکل، ظرفیت جذب انرژی بهبود می‌یابد؛ میدان کششی، اثر کمتری در ستون‌ها اعمال می‌کند، و تغییر شکل خارج از صفحه کاهش می‌یابد.

برخورداری و همکاران^[۲۳] (۲۰۱۶)، تأثیر بازشوی‌های مستطیلی تقویت شده در مقاومت، سختی اولیه، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی را بررسی کردند و نشان دادند که در صورت استفاده از سخت‌کننده‌های محیطی، می‌توان از کاهش مقاومت و شکل‌پذیری دیوار در اثر ایجاد بازشو جلوگیری کرد. مو - ونگ وی^{۱۲} و همکاران^[۲۴] (۲۰۱۷)، تأثیر پانل دیوار برشی در المان‌های اطراف در اثر ایجاد میدان کشش را مطالعه و روشی برای محاسبه‌ی کمیته‌ی مقدار سختی مورد نیاز ستون‌های اطراف دیوار ارائه کردند و نشان دادند که نتایج روش مزبور، هم‌خوانی خوبی با نتایج دقیق تحلیل اجزاء محدود دارد. رضایی‌بنا^[۲۵] (۲۰۱۹)، به تعیین تغییر مکان تسلیم و نسبت میرایی چرخه‌ی برای دیوار برشی فولادی پرداخت و نشان داد که پارامترهای مذکور عمدتاً به ارتفاع قاب، ضخامت ورق دیوار و جنس مصالح آن بستگی دارند. همچنین رابطه‌ی ساده‌ی برای محاسبه‌ی میرایی ارائه کرد. حسین‌زاده و همکاران^[۲۶] (۲۰۱۹)، تأثیر آزاد کردن اتصال ورق دیوار از ستون‌ها و اثر آن در رفتار غیرخطی دیوار تحت بارگذاری‌های پوش‌آور، چرخه‌ی و انفجاری را مطالعه کردند و دریافته‌اند که دلیل عدم اتصال پیوسته و عدم وقوع تسلیم کامل ورق، به‌طور نسبی از مقاومت، سختی اولیه و شکل‌پذیری سیستم کاسته شده است، ولی با افزایش ضخامت ورق می‌توان نقیصه‌ی اخیر را جبران کرد. همچنین مشاهده شد که اگر سیستم مذکور در برابر زلزله طراحی شود، در برابر بار انفجاری نیز تا حدی مقاوم خواهد بود.

که در آن، دیوار برشی فولادی به صورت نوارهای کششی که تحت زاویه α نسبت به محور طولی ستون قرار گرفته‌اند، مدل می‌شود. زاویه α ، زاویه میدان کشش در ورق دیوار نسبت به محور قائم است که طبق ضوابط مندرج در آیین‌نامه‌ی AISC^[۲۹،۲۸] و با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\tan^{\alpha} = \frac{1 + \frac{t_w L}{2 A_c}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^2}{46 I_c L} \right)} \quad (1)$$

که در آن، L ، h و t_w به ترتیب طول، ارتفاع و ضخامت دیوار برشی فولادی، I_c ، A_c به ترتیب ممان اینرسی، سطح مقطع ستون و A_b سطح مقطع تیر است. بنا بر توصیه‌ی آیین‌نامه‌ها، عرض نوارهای ذکر شده یکسان است و کمینه‌ی تعداد آن‌ها برای حفظ دقت نتایج، برابر با تعداد طبقات فرض می‌شود. همچنین سطح مقطع هر نوار برابر با پهنای آن ضربدر ضخامت ورق دیوار برشی است.

بر این اساس، در مدل‌های نواری از 1° المان میله‌یی به جای هر ورق استفاده شده است. فواصل بین میله‌ها یکسان و فاصله‌ی میله‌های ابتدا و انتها از گوشه‌ی قاب نیز نصف مقدار اشاره شده در نظر گرفته شده است. تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل نواری با استفاده از نرم افزار SAP۲۰۰۰ انجام شده است.^[۳۱] به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی از مفصل خمیری با مشخصات ارائه شده در آیین‌نامه‌ی ASCE۴۱-۱۶^[۳۰] استفاده شده است.

۳. صحت‌سنجی روش مدل‌سازی غیرخطی

برای ارزیابی و صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود غیرخطی استفاده شده در پژوهش حاضر، به مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی پژوهشگران دیگر پرداخته شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از نتایج ارائه شده‌ی رضایی (۱۹۹۹)^[۳۲] و لوبل^[۳۳] (۱۹۹۷)، به منظور ارزیابی میزان دقت روش‌های مدل‌سازی استفاده شده است.

۱.۳. نمونه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی رضایی و همکاران

در بخش حاضر، نمونه‌ی دوم آزمایشی لوبل با عنوان SPSW۲، در مقیاس یک چهارم که نماینده‌ی پانلی از هسته‌ی یک ساختمان اداری است، بررسی شده است.^[۳۳] تصویر نمونه در شکل ۱ و مشخصات مصالح مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. در مدل اجزاء محدود از یک شبکه‌ی 15×15 برای ورق فولادی استفاده شده است. شبکه‌بندی تیرها و ستون‌ها نیز منطبق بر شبکه‌بندی ورق بوده است. با توجه به ابعاد ورق، قبل از انجام تحلیل غیرخطی یک تغییرمکان خارج از صفحه برابر با 0.7009 میلی‌متر به ورق فولادی تحمیل شد تا بتوان کماتش را در تحلیل غیرخطی مشاهده کرد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که مشاهده‌های صورت گرفته در حین آزمایش، از جمله تغییرشکل‌های به‌وجود آمده پس از کماتش ورق فولادی و جهت‌گیری آن‌ها، تسلیم اولیه‌ی ورق فولادی و به دنبال آن ایجاد مفصل خمیری در بالا و پایین ستون‌ها به خوبی توسط مدل اجزاء محدود غیرخطی توسعه داده شده در پژوهش حاضر شبیه‌سازی شده است.

رضایی و همکاران (۲۰۰۴)، در بخشی از مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی خود، با استفاده از نرم‌افزار غیرخطی CANNY به تحلیل نمونه‌ی SPSW۲ پرداخت.^[۸] در شکل ۲، منحنی برش پایه در مقابل تغییرمکان جانبی نراز فوقانی حاصل از آزمایش به همراه نتایج حاصل از روش‌های مدل‌سازی مشاهده می‌شود که مطابق آن تطابق بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برقرار است و

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اگرچه مطالعات تجربی و تحلیلی ارزنده‌ی در مورد خصوصیات مصالح، هندسه، بارگذاری و مدل‌سازی دیوار برشی فولادی انجام شده است، لیکن در خصوص بازشوهای مستطیلی در دیوارهای برشی فولادی سخت نشده‌ی قاب‌های چندطبقه، مطالعات کمتری صورت گرفته و از این رو به مطالعات بیشتری برای فراهم‌سازی زمینه‌های لازم برای گسترش بیشتر سیستم باربر جانبی مذکور نیاز است. نتایج برخی از پژوهش‌های پیشین، نیاز به وجود عناصر مرزی بسیار قوی برای ایجاد و حفظ میدان کششی در ورق به خصوص در سازه‌های چندطبقه را ضروری تشخیص داده است.^[۲۶-۱۶] این در حالی است که بیشتر مطالعات روی خود دیوار انجام شده و توجه چندانی به ستون‌های اطراف نشده است. با توجه به این موارد، در مطالعه‌ی حاضر ابتدا چند قاب دوطبقه‌ی با سیستم دیوار برشی فولادی سخت نشده، براساس ضوابط آیین‌نامه‌یی طراحی و سپس با استفاده از روش اجزاء محدود غیرخطی و انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، رفتار جانبی دیوار بررسی شده است. همچنین تأثیر عواملی، نظیر: بارهای ثقلی، نوع توزیع بار جانبی، نوع مدل‌سازی و اثر وجود بازشوهای مستطیلی در پانل دیوار برشی فولادی بررسی شده است.

۲. مدل‌سازی

همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، به منظور مدل‌سازی قاب‌های فولادی به همراه دیوار برشی فولادی از دو روش مدل‌سازی دقیق و تقریبی استفاده می‌شود. شبیه‌سازی در روش دقیق با استفاده از روش اجزاء محدود با لحاظ کردن آثار رفتار غیرخطی ناشی از مصالح و هندسه انجام می‌شود. در مقابل، در روش تقریبی از نوارهای معادل برای مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی استفاده می‌شود. جزئیات مربوط به دو روش اخیر در ادامه ارائه شده است.

۱.۲. مدل اجزاء محدود

برای مدل‌سازی اجزاء محدود دیوارهای برشی فولادی از نرم‌افزار انسیس^[۲۷]، برای مدل‌سازی ورق فولادی دیوار برشی از المان Shell۱۴۳ استفاده شده است. المان Shell۱۴۳ با ۳ یا ۴ گره تعریف می‌شود که هر گره ۶ درجه آزادی دارد، سه درجه آزادی انتقالی در راستاهای x ، y و z و سه درجه آزادی دورانی حول راستاهای x ، y و z از المان BEAM۱۸۸ برای مدل‌سازی اعضاء مرزی تیر و ستون استفاده شده است. این المان با دو گره تعریف می‌شود که هر گره ۶ یا ۷ درجه آزادی دارد. سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی مشابه با المان Shell و دو المان BEAM۱۸۸ و Shell۱۴۳ می‌توان به: شبیه‌سازی پدیده‌هایی همچون رفتار خمیری، خزش، سخت‌شوندگی کرنش، تغییرشکل بزرگ و قابلیت تولد و مرگ در حین آنالیز اشاره کرد. در مدل اجزاء محدود، ابعاد المان‌های ورق یکنواخت و المان‌بندی تیرها و ستون‌ها نیز منطبق بر المان‌بندی ورق بوده است. در نرم‌افزار انسیس برای حل معادلات غیرخطی از دو روش نیوتن - رافسون و طول - قوس^{۱۵} استفاده می‌شود.

۲.۲. مدل نواری

مدل ساده‌شده‌ی که در پژوهش حاضر برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی استفاده شده است، همان مدل نواری پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌های مختلف است،^[۳۰-۲۸]

انجام شده است، که در آن از ۱۰ المان میله‌ی به جای ورق استفاده شده است. فواصل بین میله‌ها یکسان و برابر ۱۲۶ میلی‌متر و فاصله‌ی میله‌های ابتدا و انتها از گوشه‌ی قاب نیز نصف مقدار اخیر در نظر گرفته شده است. مساحت مقطع هر میله برابر ۱۹۰ میلی‌متر مربع به دست آمده است. زاویه‌ی میل میله‌ها (α) نیز برابر با ۳۷ درجه محاسبه شده است.

در شکل ۲، منحنی برش پایه در مقابل تغییر مکان بام، که از تحلیل به دست آمده است، به همراه نتایج آزمایش و نتایج حاصل از مدل تحلیلی رضایی و همکاران^[۸] مشاهده می‌شود که مطابق آن تطابق بسیار خوبی میان منحنی‌های به دست آمده از تحلیل غیرخطی مدل نواری و آزمایش مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل حاضر نشان می‌دهد که اولین مفصل خمیری در ستون ایجاد شده و در این حالت برش پایه برابر ۱۴۲ کیلو نیوتن بوده است. با افزایش بار، میله‌های کششی به تدریج وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده و تا مقدار بار برابر با ۲۱۵ کیلو نیوتن، از گسیختگی زود هنگام ستون جلوگیری کرده‌اند. در مجموع، مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل اجزاء محدود و مدل نواری با نتایج آزمایشگاهی، نشان‌دهنده‌ی کارایی و دقت مناسب روش‌های مدل‌سازی و تحلیل انتخاب شده در پژوهش حاضر است.

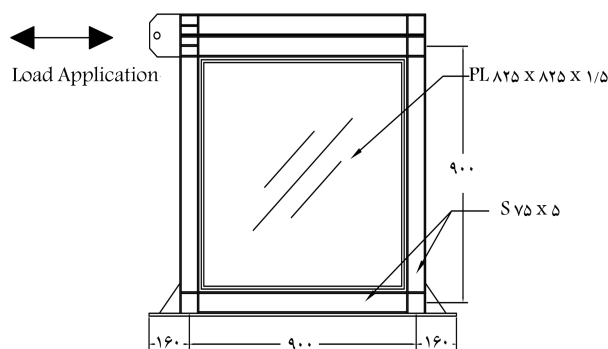
۴. بررسی ضوابط AISC۴۱ در دیوارهای برشی مطالعه شده

در بخش کنونی، به منظور بررسی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی، دو نمونه قاب خمشی ویژه فولادی سه دهانه، شامل ورق‌های فولادی در دهانه‌ی وسط که سیستم باربر جانبی دو ساختمان ۵ و ۱۰ طبقه را تشکیل می‌دهند، ارزیابی شده‌اند. نمونه‌های مذکور، ابتدا براساس ضوابط آیین‌نامه‌ی AISC^[۲۶،۲۸] و سپس براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ASCE۴۱^[۳۰] طراحی و ارزیابی نهایی شده‌اند. مطابق با دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی موجود^[۳۲] دو نوع توزیع بار جانبی به مدل سازه اعمال می‌شود. در پژوهش حاضر، برای توزیع نوع اول از توزیعی مشابه با توزیع بار جانبی در ارتفاع سازه طبق روش استاتیکی معادل، یعنی به نسبت وزن و ارتفاع هر طبقه استفاده شده است. برای توزیع نوع دوم از توزیع یکنواخت استفاده شده است، که در آن بار جانبی متناسب با وزن هر طبقه توزیع شده است. در نهایت، نمونه‌های طراحی شده به روش اجزاء محدود غیرخطی، به‌عنوان روشی دقیق‌تر، تحلیل و اثر ضوابط آیین‌نامه‌ی رفتار آن‌ها ارزیابی شده است.

۱.۴. طراحی مقدماتی نمونه‌های سیستم دیوار برشی فولادی

تمامی قاب‌های مطالعه شده، سه دهانه به طول هر دهانه ۴ متر و ارتفاع هر طبقه ۳ متر داشتند. سیستم باربر جانبی به صورت سیستم دوگانه شامل قاب خمشی فولادی ویژه و دیوار برشی فولادی ویژه در محورهای محیطی ساختمان در نظر گرفته شده و دیوار برشی در دهانه‌ی میانی قاب‌ها قرار داده شده است.

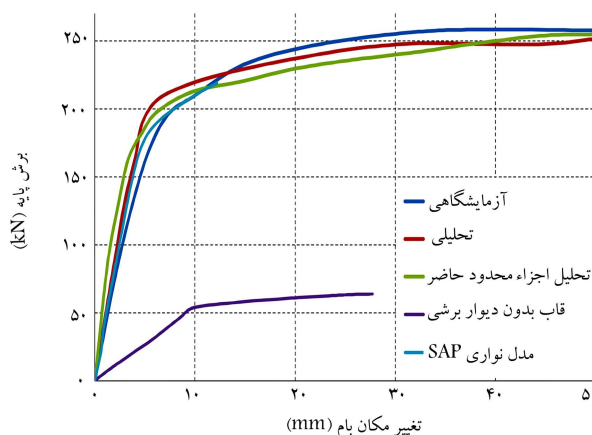
بارگذاری ثقلی قاب‌ها با توجه به ضوابط محبت ششم مقررات ملی ساختمان^[۳۵] و برآورد نیروهای ناشی از زلزله‌ی طرح براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰^[۳۶] و با فرض پهنی با خطر نسبی بسیار زیاد و ساختگاه نوع II انجام شده است. همچنین اعضاء سازه‌ی براساس معیارهای آیین‌نامه‌ی ANSI/AISC۳۴۱



شکل ۱. تصویر و جزئیات نمونه‌ی SPSW۲ آزمایش شده توسط لوبل^[۳۳]

جدول ۱. مشخصات مصالح مصرفی.

| اعضاء پانل دیوار برشی فولادی | تنش تسلیم F_y (MPa) | مدول کشسانی E (GPa) | نسبت پواسون |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| ورق فولادی | ۳۲۰ | ۲۰۰ | ۰/۳ |
| قاب (تیر و ستون) | ۳۸۰ | ۲۰۰ | ۰/۳ |



شکل ۲. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه‌ی SPSW۲.

همان‌گونه که قبلاً هم انتظار می‌رفت، مدل اجزاء محدود غیرخطی، رفتار سیستم را اندکی سخت‌تر نشان می‌دهد. در مقابل، مقاومت نهایی سیستم به خوبی پیش‌بینی شده و اختلاف ناچیز بین آن‌ها ناشی از تفاوت در آزمایش چرخه‌ی و تحلیل براساس بارگذاری یکنواخت بوده است. لازم به ذکر است که شکل اولیه‌ی ورق فولادی می‌تواند در سختی اولیه‌ی نمونه‌ی دیوار برشی فولادی تأثیرگذار باشد، زیرا ورق‌های به‌کار رفته در نمونه‌ها، در نتیجه‌ی عملیات ساخت، کاملاً صاف نیستند؛ ولی در مدل اجزاء محدود صاف در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در مدل اجزاء محدود فرض شده است که قاب، شامل تیرها و ستون‌ها، فقط در صفحه‌ی خود تغییر شکل می‌دهد؛ در حالی که در آزمایشگاه جلوگیری از تغییر شکل‌های خارج از صفحه‌ی قاب بسیار مشکل است. این عوامل باعث می‌شوند تا مدل اجزاء محدود از نمونه‌ی آزمایشگاهی سخت‌تر باشد.

۲.۳. تحلیل نمونه‌ی آزمایشگاهی رضایی و همکاران^[۸] با استفاده از مدل نواری و مقایسه‌ی نتایج

تحلیل غیرخطی مدل نواری نمونه‌ی آزمایشگاهی لوبل توسط نرم‌افزار SAP۲۰۰۰

جدول ۲. نتایج طراحی آیین‌نامه‌ی سیستم باربر جانبی ساختمان ۵ طبقه.

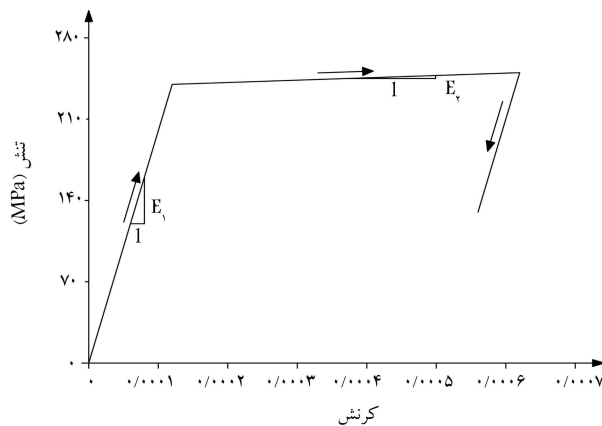
| طبقه | مقاطع ستون‌ها | | مقاطع تیرها | | ضخامت ورق فولادی (mm) |
|-------|---------------|--------|---------------|---------------|-----------------------|
| | میان | گوشه | دهانه‌ی میانی | دهانه‌ی کناری | |
| ۵ | IPB۲۰۰ | IPB۱۶۰ | IPE۲۲۰ | IPE۱۸۰ | ۰٫۷ |
| ۴ | IPB۲۰۰ | IPB۱۶۰ | IPE۲۲۰ | IPE۲۲۰ | ۰٫۷ |
| ۳ | IPB۲۶۰ | IPB۱۶۰ | IPE۲۴۰ | IPE۲۴۰ | ۱٫۳ |
| ۲ و ۱ | IPB۳۰۰ | IPB۱۶۰ | IPE۲۷۰ | IPE۲۴۰ | ۱٫۳ |

جدول ۳. نتایج طراحی آیین‌نامه‌ی سیستم باربر جانبی ساختمان ۱۰ طبقه.

| طبقه | مقاطع ستون‌ها | | مقاطع تیرها | | ضخامت ورق فولادی (mm) |
|-------|---------------|--------|---------------|---------------|-----------------------|
| | میان | گوشه | دهانه‌ی میانی | دهانه‌ی کناری | |
| ۱۰ | BOX۲۰۰×۱۰ | IPB۱۶۰ | IPE۲۲۰ | IPE۲۲۰ | ۰٫۷ |
| ۹ | BOX۲۰۰×۱۰ | IPB۱۶۰ | IPE۲۲۰ | IPE۲۲۰ | ۱ |
| ۸ | BOX۳۰۰×۱۵ | IPB۱۶۰ | IPE۲۴۰ | IPE۲۴۰ | ۱ |
| ۶ و ۷ | BOX۳۰۰×۱۵ | IPB۱۸۰ | IPE۲۷۰ | IPE۲۷۰ | ۱٫۷ |
| ۵ | BOX۴۰۰×۱۵ | IPB۲۰۰ | IPE۳۰۰ | IPE۳۰۰ | ۱٫۷ |
| ۳ و ۴ | BOX۴۰۰×۲۰ | IPB۲۰۰ | IPE۳۰۰ | IPE۳۰۰ | ۲٫۱ |
| ۲ | BOX۴۰۰×۲۰ | IPB۲۰۰ | IPE۳۳۰ | IPE۲۷۰ | ۲٫۱ |
| ۱ | BOX۴۰۰×۲۰ | IPB۲۴۰ | IPE۳۳۰ | IPE۲۷۰ | ۲٫۱ |

جدول ۴. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده در مدل‌ها.

| مشخصه تنش تسلیم (MPa) | E_1 (MPa) | E_2 (MPa) | نسبت پواسون |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| ۲۴۰ | ۲۰۰۰۰۰ | ۲۰۰۰ | ۰٫۳ |



شکل ۳. رابطه‌ی تنش - کرنش مفروض برای مصالح فولادی.

۵. تحلیل پوش‌آور نمونه‌های مطالعه شده

۱.۵. مشخصات مدل‌ها

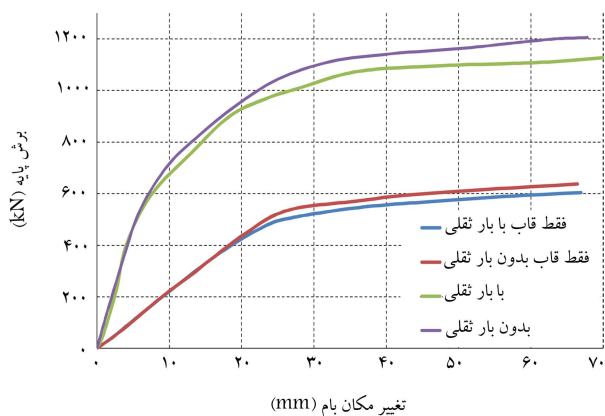
در بخش حاضر، مدل اجزاء محدود و مدل نواری یک طبقه از سازه‌ی ۵ طبقه و مدل ۵ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی و همچنین مدل نواری نمونه‌ی ۱۰ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی به روش استاتیکی غیرخطی تحلیل شده است. رابطه‌ی تنش - کرنش فولاد و مشخصات مصالح مصرفی در شکل ۳ و جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

و ANSI/AISC۳۶۰ و به روش LFRD طراحی شده‌اند. مراحل طراحی بدین صورت بوده است که ابتدا مقاطع اولیه‌ی تیرها و ستون‌های قاب خمشی برای تحمل ۳۰٪ بار جانبی و ضخامت دیوار برشی فولادی برای ۱۰۰٪ بار جانبی محاسبه شدند. سپس ضوابط مربوط به طراحی اجزاء مختلف سیستم دیوار برشی فولادی ویژه مطابق با آیین‌نامه‌ی AISC اعمال و بنابراین مقاطع اعضا (به خصوص ستون‌ها) در چند مرحله با توجه به ضوابط ذکر شده اصلاح شدند.

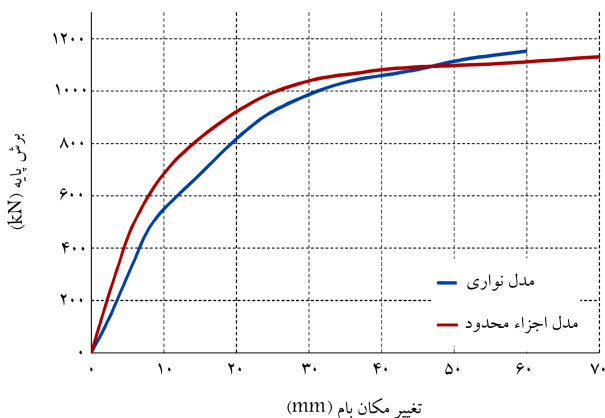
۲.۴. ارزیابی مثال‌های طراحی شده و طراحی نهایی

در بخش حاضر، قاب‌های طراحی شده در بخش ۱.۴، براساس ضوابط دستورالعمل بهسازی ASCE۴۱ ارزیابی و در نهایت اصلاح مقاطع، برای انجام طراحی نهایی به طور هم‌زمان انجام شده است. برای ارزیابی مثال‌های طراحی شده از تحلیل استاتیکی غیرخطی و طبق دستورالعمل از مدل ساده شده (مدل نواری) به جای ورق‌های فولادی استفاده شده است.

نتایج طراحی سیستم باربر جانبی ساختمان‌های ۵ و ۱۰ طبقه به صورت تعیین نیرخ‌های اعضاء قاب خمشی فولادی و ضخامت ورق فولادی به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. با توجه به اصلاحات انجام شده شاید این چنین به نظر برسد که مقاطع طراحی شده بیش از مقدار موردنیاز هستند، در حالی که چنین نیست و ستون‌ها نیازمند چنین مقاطعی هستند، تا سازه بتواند تغییرشکل‌های غیرارتجاعی را قبل از آنکه سیستم در اثر مکانیزم شدن گسیخته شود، تجربه کند. لذا از بخش کنونی نتیجه می‌شود که ستون‌ها نقش مهمی در پایداری و ایجاد بستر مناسب برای ورود رفتار سیستم سازه‌ی به مرحله‌ی غیرخطی دارند و باید به اندازه‌ی کافی قوی طراحی شوند؛ یعنی قوی‌تر از آنچه انتظار می‌رفت.



شکل ۵. منحنی برش پایه - تغییر مکان بام برای دو حالت وجود بارهای ثقلی و عدم وجود بارهای ثقلی برای سازه‌ی ۱ طبقه.

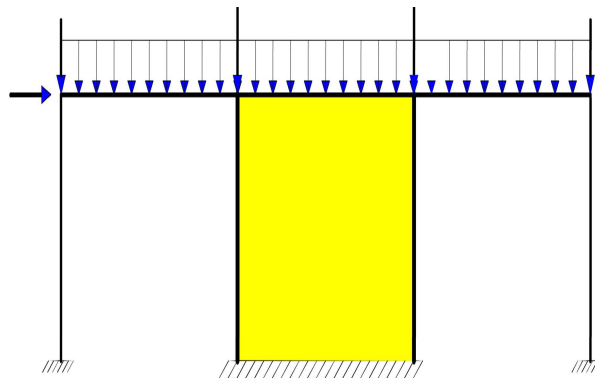


شکل ۶. مقایسه‌ی منحنی‌های برش پایه - تغییر مکان بام به دست آمده از مدل اجزاء محدود و مدل نواری برای سازه‌ی ۱ طبقه.

۲.۲.۵. مدل ۵ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی

بارگذاری جانبی مدل ۵ طبقه براساس الگوی توزیع بار نوع اول و با تغییر مکان هدف 10^4 میلی‌متر است. تحلیل اجزاء محدود سازه‌ی ۵ طبقه نشان می‌دهد که در مرحله‌ی نزدیک به گسیختگی، در پانل‌های طبقات اول تا چهارم، تقریباً در تمام عرض ورق و در ورق طبقه‌ی پنجم نیز در حدود 60% سطح ورق، در قسمت میانی آن، جاری‌شدگی اتفاق افتاده و این به معنی رفتار مطلوب سازه‌ی طراحی شده است. در این حالت، خمیری‌شدگی مقاطع ستون در قسمت پایین ستون‌های طبقه‌ی اول ایجاد شده است. همچنین رفتار مشاهده شده‌ی اولین طبقه، مشابهت زیادی با رفتار مدل ۱ طبقه، به خصوص تا تغییر مکان جانبی حدود 20 میلی‌متر دارد.

در شکل ۷، منحنی‌های بار - تغییر مکان بام سازه‌ی ۵ طبقه در حالت‌های با و بدون در نظر گرفتن بارهای ثقلی آن‌ها مشاهده می‌شود. همچنین منحنی‌های مذکور در حالت فقط قاب خمشی نیز نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که با توجه به رعایت ترتیب بارگذاری ثقلی و جانبی طبق بند ۱.۵، اثر بارهای ثقلی بسیار ناچیز است. سختی و مقاومت نهایی قاب خمشی در اثر وجود ورق فولادی به ترتیب تا حدود $5/7$ و 4 برابر افزایش یافته است. همچنین مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود و نواری نشان می‌دهد که نتایج حاصل از دو مدل مذکور، انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند، به طوری که مقاومت نهایی به دست آمده در تغییر مکان هدف حاصل از دو تحلیل، کمتر از 1% با هم اختلاف دارند، اما سختی حاصل از تحلیل



شکل ۴. شکل شماتیک مدل قاب ۱ طبقه (طبقه‌ی اول از سازه‌ی ۵ طبقه).

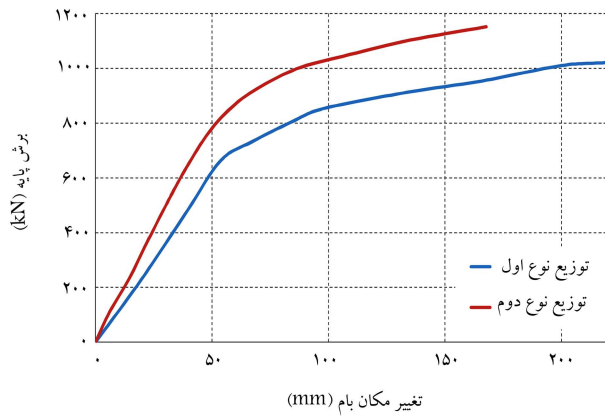
کلیه‌ی گره‌های واقع در تراز پایه در همه‌ی جهات مقید شده و از حرکت خارج از صفحه‌ی گره‌های واقع در ترازهای سقف هر طبقه نیز جلوگیری به عمل آمده است. همچنین دیافراگم همه‌ی طبقات صلب فرض شده و تعداد المان‌های هر پانل در راستای تیر و ستون به ترتیب ۱۵ و ۲۰ عدد در نظر گرفته شده است.

اعمال بار ثقلی زود هنگام روی تیرها باعث بروز کمانش ورق تحت بارهای ثقلی و تغییر شکل‌های ایجاد شده در آن عملاً ادامه‌ی تحلیل را تحت بارهای جانبی دچار واگرایی می‌کند. برای رفع این مشکل از قابلیت تولد المان‌ها در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. بدین ترتیب مدل دیوار برشی فولادی کاملاً ساخته شد و در مرحله‌ی اول بارگذاری که شامل بارهای ثقلی می‌شود، المان‌های ورق غیرفعال شدند و پس از آن در ادامه‌ی حل که بارهای جانبی اعمال می‌شوند، دوباره المان‌های ورق فعال شدند یا به عبارتی متولد شدند که این روش با واقعیت اجرایی چنین قاب‌هایی مطابقت دارد.

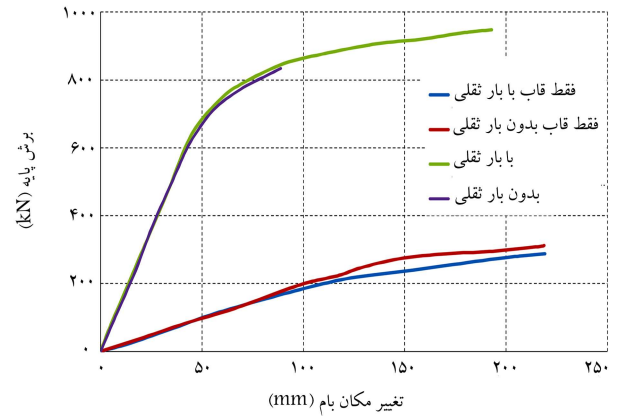
۲.۵. نتایج

۱.۲.۵. مدل یک طبقه‌ی دیوار برشی فولادی

برای مقایسه، ابتدا یک سازه‌ی ۱ طبقه تحلیل شد که ابعاد آن مشابه با ابعاد اعضاء طبقه‌ی اول سازه‌ی ۵ طبقه فرض شده است (شکل ۴). نتایج تحلیل نشان می‌دهد که اولین آثار جاری‌شدگی ورق در برش پایه‌ی حدود 450 کیلو نیوتن رخ داده است. در این حالت تغییر مکان جانبی بام حدود $4/5$ میلی‌متر و بیشینه‌ی تغییر شکل خارج از صفحه‌ی ورق در یکی از گره‌های میانی آن به میزان 20 میلی‌متر بوده است. در شکل ۵، منحنی برش پایه - تغییر مکان بام برای دو حالت وجود و عدم وجود بارهای ثقلی مشاهده می‌شود که مطابق آن تا زمانی که رفتار خطی است، اثر بارهای ثقلی بسیار ناچیز است و منحنی‌ها بر هم منطبق هستند؛ ولی با شروع رفتار غیرخطی اختلاف بین آن‌ها زیاد شده است، به طوری که در تغییر مکان جانبی 60 میلی‌متر، مقاومت نهایی در حالت بدون در نظر گرفتن اثر بارهای قائم، حدود 7% بیشتر بوده است. لیکن مطابق شکل ۵، وجود ورق فولادی در پانل، سختی و مقاومت آن را به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش داده است. در این حالت سختی به میزان دست‌کم $3/75$ برابر و مقاومت نهایی به میزان حدود 2 برابر افزایش یافته است. نتایج حاصل از تحلیل مدل نواری ساده شده‌ی نمونه‌ی قاب ذکر شده در شکل ۶ با نتایج حاصل از تحلیل مدل اجزاء محدود مقایسه شده است. همان‌گونه که مشخص است، تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از دو مدل اشاره شده، به خصوص در پیش‌بینی مقاومت نهایی وجود دارد. ولی همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل اجزاء محدود، سختی دیوار برشی فولادی را حدود 15% بیشتر نشان می‌دهد.



شکل ۹. اثر نوع توزیع بار جانبی روی منحنی برش پایه - تغییر مکان بام برای سازی ۵ طبقه.



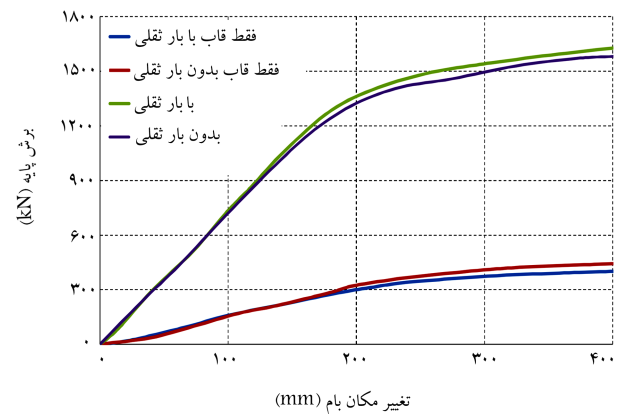
شکل ۷. منحنی برش پایه - تغییر مکان بام برای دو حالت وجود بارهای ثقلی و عدم وجود بارهای ثقلی برای سازی ۵ طبقه.

بار جانبی انتخاب شده از هر یک از دو توزیع به طور جداگانه به سازه‌ها اعمال شدند. سپس رابطه‌ی برش پایه و تغییر مکان بام تا دست کم ۱/۵ برابر تغییر مکان هدف تعریف شده در دستورالعمل مذکور محاسبه شده است. البته ارزیابی سازه در تغییر مکانی مساوی تغییر مکان هدف صورت گرفته است، ولی آگاهی از ادامه‌ی رفتار آن تا ۱/۵ برابر تغییر مکان هدف، مفید و در جهت احتیاط بوده است.

برای نمونه، در شکل ۹، اثر نوع توزیع بار جانبی در منحنی برش پایه - تغییر مکان بام برای سازی ۵ طبقه مشاهده می‌شود که مطابق آن توزیع نوع دوم که یک توزیع یکنواخت است، سختی و مقاومت سیستم دیوار برشی فولادی سازه‌های بررسی شده را بیشتر نشان می‌دهد. در حالت توزیع نوع دوم، سختی سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب در حدود ۳ و ۳۸ درصد و مقاومت نهایی سیستم به ترتیب حدود ۲۱ و ۲۳ درصد بیشتر از توزیع نوع اول به دست آمده است. بدین ترتیب می‌توان چنین نتیجه گرفت که الگوی توزیع بار جانبی، در منحنی‌های برش پایه - تغییر مکان اثر قابل ملاحظه‌ی دارد و باید به آن توجه داشت. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که ارزیابی سازه‌های بررسی شده با توزیع نوع اول، محافظه‌کارانه‌تر است.

۶. اثر بازشو در دیوارهای برشی فولادی

در بخش حاضر، به منظور بررسی آثار وجود بازشو در رفتار سیستم‌های شامل دیوارهای برشی فولادی، یک بازشوی مستطیل شکل تعبیه شده در وسط پانل و قاب‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با وجود آن آنالیز استاتیکی غیرخطی شدند. لازم به ذکر است مرکز پانل، بحرانی‌ترین مکان برای قرار دادن بازشو محسوب می‌شود، زیرا مرکز پانل از دیوار برشی فولادی در واقع مؤثرترین قسمت در تشکیل عمل میدان کشش ورق است. بدیهی است که مدل‌های ساده شده، توانایی شبیه‌سازی چنین سیستمی را ندارند و بنابراین تمامی آنالیزهای بخش حاضر با به کارگیری روش اجزاء محدود انجام شده است. برای شبکه‌بندی اجزاء محدود مدل موردنظر باید به این نکته توجه کرد که ابعاد المان‌های اطراف بازشو، باید کوچک‌تر از قسمت‌های دیگر باشند، زیرا در نواحی مذکور، تمرکز تنش زیادی به خصوص در گوشه‌های بازشو وجود دارد. به عنوان نمونه، نمای کلی بازشو در دیوار برشی فولادی برای قاب ۱ طبقه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در مدل اخیر، برای یک بازشو به ابعاد 900×1000 میلی‌متر از ۱۵، ۳۰ و ۴۵ المان در لبه‌های بازشو استفاده شده و



شکل ۸. منحنی برش پایه - تغییر مکان بام برای دو حالت وجود بارهای ثقلی و عدم وجود بارهای ثقلی برای سازی ۱۰ طبقه (مدل نواری).

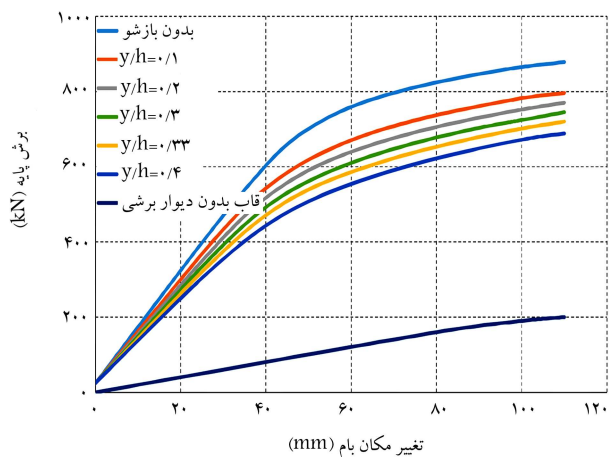
مدل اجزاء محدود ورق، حدود ۱۲٪ بیشتر از سختی حاصل از تحلیل مدل نواری بوده است.

۳.۲.۵ مدل ۱۰ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی

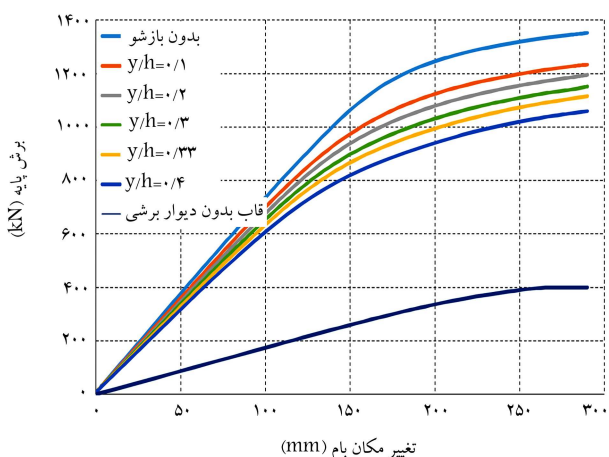
بارگذاری جانبی مدل ۱۰ طبقه نیز همانند مدل ۵ طبقه براساس الگوی توزیع بار جانبی نوع اول و با تغییر مکان هدف ۲۸۲ میلی‌متر بوده است. در شکل ۸، منحنی‌های برش پایه - تغییر مکان بام سازی ۱۰ طبقه حاصل از مدل نواری در حالت‌های با در نظر گرفتن بارهای ثقلی و بدون در نظر گرفتن آن‌ها و نیز منحنی‌های مربوط به حالت سیستم قاب خمشی (بدون دیوار برشی) نشان داده شده‌اند. مشابه مدل ۵ طبقه مشاهده می‌شود که اثر بارهای ثقلی بسیار ناچیز است. در مدل ۱۰ طبقه، سختی و مقاومت نهایی قاب خمشی در اثر وجود ورق فولادی به ترتیب تا حدود ۴/۵ و ۴ برابر افزایش یافته است. لازم به ذکر است تحلیل مدل نواری در مدت زمان به مراتب کمتری نسبت به مدل اجزاء محدود قابل انجام است که این موضوع مزیت بزرگ مدل نواری را برای تحلیل ساختمان‌های بلند با دیوار برشی فولادی نشان می‌دهد.

۳.۵ اثر نوع توزیع بار جانبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی

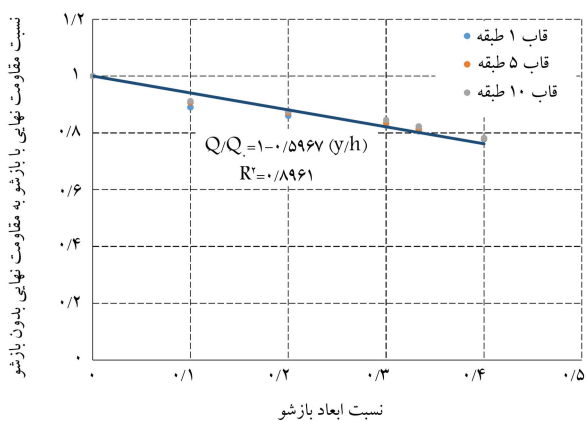
همان‌گونه که در بخش ۴ اشاره شد، در پژوهش حاضر مطابق با دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود، دو نوع توزیع بار جانبی به مدل سازه اعمال شده است.



شکل ۱۲. اثر بازشوهای مختلف از نظر اندازه در منحنی برش پایه - تغییر مکان جانبی قاب ۵ طبقه.



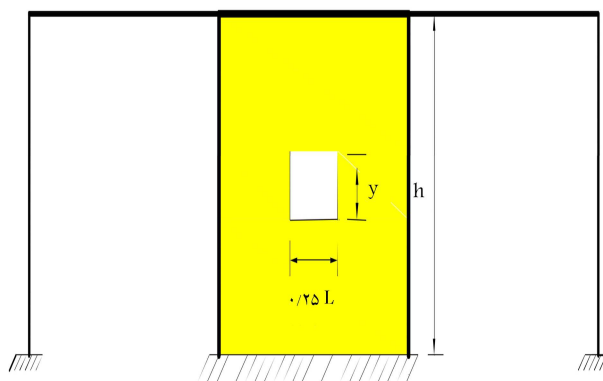
شکل ۱۳. اثر بازشوهای مختلف از نظر اندازه در منحنی برش پایه - تغییر مکان جانبی قاب ۱۰ طبقه.



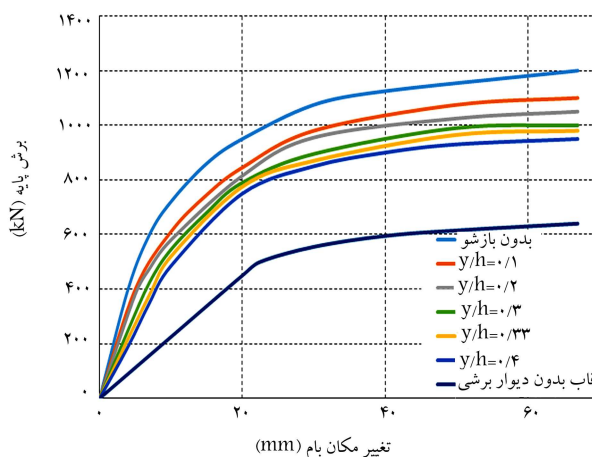
شکل ۱۴. اثر نسبت‌های مختلف ابعاد بازشو در مقاومت نهایی قاب‌ها.

قاب‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب برابر ۲۵، ۳۹ و ۱۶ درصد محاسبه شده است.

باید دقت کرد که در گوشه‌های تیز بازشو، تمرکز تنش شدیدی به وجود می‌آید؛ به طوری که به عنوان نمونه، برای مدل ۱ طبقه در برش پایه حدود ۴۰۰ کیلو نیوتن،



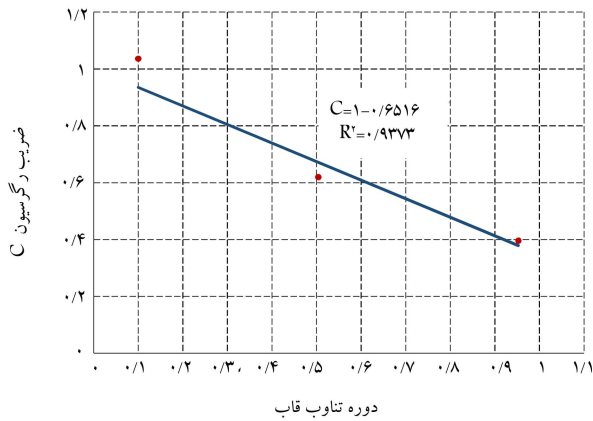
شکل ۱۵. نمای کلی دیوار برشی فولادی با بازشو.



شکل ۱۶. اثر بازشوهای مختلف از نظر اندازه در منحنی برش پایه - تغییر مکان جانبی قاب ۱ طبقه.

منحنی برش پایه - تغییر مکان برای هر کدام به دست آمده است. ملاحظه شد که زیاد کردن المان‌ها در لبه‌های بازشو از تعداد ۱۵ المان به بعد، تأثیری در منحنی برش پایه - تغییر مکان نمی‌گذارد.

اثر بازشوهای مختلف از نظر اندازه در رفتار جانبی قاب‌های مطالعه شده با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی بررسی و تحلیل شده است (شکل‌های ۱۱ الی ۱۳). لازم به ذکر است در تمام موارد، طول بازشو مساوی با ۲۵٪ طول دهانه در نظر گرفته شده و نسبت y/h نشان دهنده‌ی نسبت ارتفاع بازشو به ارتفاع طبقه است. همچنین دو حد بالا و پایین آن، یعنی زمانی که بازشو وجود نداشته باشد و حالتی که فقط قاب خمشی وجود داشته باشد، برای مقایسه در شکل‌های اخیر نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش ابعاد بازشو، سختی و مقاومت نهایی قاب‌های مطالعه شده کاهش یافته است. روند تغییرات سختی و مقاومت نهایی برای مدل‌های مختلف در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، کاهش سختی و مقاومت، رابطه‌ی تقریباً خطی با نسبت ابعاد بازشو دارند. همچنین درصد کاهش مقاومت نهایی برای قاب‌های مختلف، تقریباً مقادیر یکسانی دارد؛ در حالی که درصد کاهش سختی با افزایش تعداد طبقات کاهش یافته است، که این مسئله ناشی از افزایش سهم سختی ستون‌ها نسبت به دیوار، با افزایش تعداد طبقات است. بیشترین میزان کاهش مقاومت نهایی برای مدل‌هایی با ابعاد بازشوی $1/2 \times 1$ و به میزان ۲۲٪ به دست آمده است. همچنین بیشترین میزان کاهش سختی در مدل‌های با ابعاد بازشوی $1/2 \times 1$ برای



شکل ۱۶. تغییرات ضریب رگرسیون C بر حسب دوره تناوب قاب‌های مورد مطالعه.

از روش اجزاء محدود و کاربرد المان‌های نواری معادل ساخته و سپس اثر عوامل مختلفی، مانند: بار ثقلی، الگوی توزیع بار جانبی، نوع مدل (اجزاء محدود یا نواری معادل) و وجود بازشو در پانل دیوار مطالعه شد. از مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان به این موارد اشاره کرد:

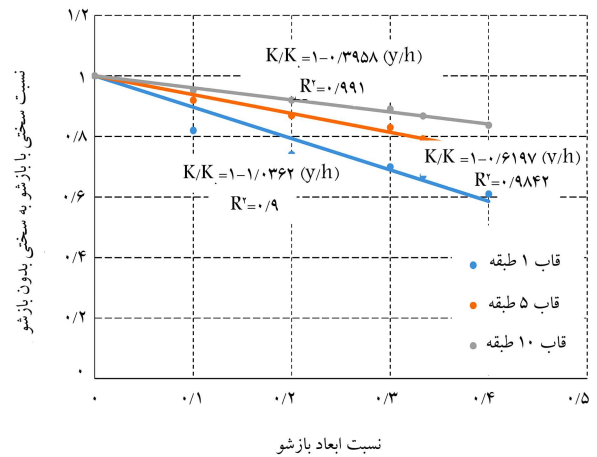
۱. نتایج نشان می‌دهند که در همه‌ی نمونه‌های تحلیل شده که براساس ضوابط آیین‌نامه‌ی طراحی شده‌اند، اولین مفاصل خمیری در ستون‌ها ایجاد شده‌اند. بر این اساس می‌توان گفت که ضوابط ارائه شده در آیین‌نامه در ارتباط با کمینه‌ی سختی و مقاومت ستون‌ها، به‌خصوص در ساختمان‌های بلند، دست‌پایین و بسیار کمتر از مقادیری است که واقعاً مورد نیاز است. بنابراین باید مطالعات بیشتری در مورد کفایت ضوابط مذکور در ساختمان‌های مختلف صورت گیرد و در صورت نیاز، به نحو مناسبی اصلاح شوند.

۲. تأثیر اعمال بارهای ثقلی متعارف در منحنی رفتاری سیستم دیوار برشی فولادی ناچیز است، به طوری که در حالت نهایی رفتاری، بیشینه‌ی ۷٪ اختلاف در مقاومت نهایی در دو حالت با و بدون حضور بارهای ثقلی مشاهده شد.

۳. الگوی بارگذاری جانبی در رفتار جانبی سیستم‌های مطالعه شده بسیار مؤثر است. نمونه‌های تحلیل شده با الگوی بار یکنواخت، سختی و مقاومت نهایی نمونه‌ها را به ترتیب حدود ۳۸٪ و ۲۳٪ بیشتر نشان دادند. بنابراین استفاده از الگوی بار روش استاتیکی معادل در جهت اطمینان است و توصیه می‌شود.

۴. تحلیل اجزاء محدود سازه‌های مطالعه شده نشان می‌دهد که در مرحله‌ی نزدیک به گسیختگی، در پانل‌های طبقات (به جز طبقه‌ی آخر) تقریباً در تمام عرض ورق، جاری شدن اتفاق افتاده و در ورق طبقه‌ی آخر نیز بخش قابل توجهی از سطح ورق، در قسمت میانی آن تسلیم شده است، که به معنای رفتار مطلوب سازه‌ی طراحی شده است. در این حالت، خمیری‌شدگی مقاطع ستون در قسمت پایین ستون‌های طبقه‌ی اول ایجاد شده است.

۵. استفاده از مدل ساده شده‌ی نواری برای تحلیل غیرخطی دیوارهای برشی فولادی، اگرچه ممکن است اندکی محافظه‌کارانه باشد، ولی بسیار مناسب است و رفتار یک‌طرفه‌ی سیستم را در حالت‌های مختلف به خوبی نشان می‌دهد. اهمیت این موضوع به ویژه در ساختمان‌های بلند روشن‌تر می‌شود، جایی که به علت افزایش بیش از حد درجه‌های آزادی، استفاده از مدل ورق با افزایش قابل توجه هزینه‌ی محاسبات توأم می‌شود.



شکل ۱۵. اثر نسبت‌های مختلف ابعاد بازشو در سختی قاب‌ها.

در همه‌ی موارد بازشوهای مختلف، مقدار تنش در بخش بسیار کوچکی از گوشه‌های بازشو از تنش حد جاری شدن ورق عبور کرده است. این در حالی است که ورق دیوار مذکور در برش پایه‌ی ۴۵۰ کیلونیوتن تسلیم شده است. لذا نتیجه گرفته می‌شود که وجود بازشوها بدون سخت‌کننده در دیوارهای برشی فولادی می‌تواند مقاومت تسلیم دیوارهای برشی فولادی را بسیار کاهش دهند.

تغییرات نسبت مقاومت نهایی مدل با بازشو به سختی مدل بدون بازشو برای هر سه قاب بررسی شده را می‌توان از طریق رابطه‌ی ۲ تخمین زد:

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 - 0.5967 \left(\frac{y}{h} \right) \quad (2)$$

که در آن، Q مقاومت نهایی مدل با بازشو و Q_0 مقاومت نهایی مدل بدون بازشو، y ارتفاع بازشو و h ارتفاع دیوار برشی فولادی است. پراکندگی نتایج در مورد نسبت سختی مدل با بازشو به سختی مدل بدون بازشو بیشتر از نتایج مربوط به نسبت مقاومت نهایی است. با وجود این، تغییرات نسبت ذکر شده را می‌توان برای هر یک از قاب‌های آنالیز شده با یک رابطه‌ی خطی مطابق رابطه‌ی ۳ بیان کرد:

$$\frac{K}{K_0} = 1 - C \left(\frac{y}{h} \right) \quad (3)$$

که در آن، K سختی مدل با بازشو، K_0 سختی مدل بدون بازشو، y ارتفاع بازشو، h ارتفاع دیوار برشی فولادی و C ضریبی رگرسیون خطی است که براساس دوره‌ی تناوب مود اول قاب و با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود. رابطه‌ی میان ضریب C و دوره‌ی تناوب قاب‌ها در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود.

$$C = 1 - 0.6516T \quad (4)$$

که در آن، T دوره‌ی تناوب مود اول قاب است. با استفاده از روابط نیمه‌تحلیلی ۲ الی ۴ می‌توان با دقت مناسبی میزان کاهش مقاومت نهایی و سختی ناشی از ایجاد بازشو در دیوار برشی فولادی، برای سیستم‌های دوگانه‌ی قاب خمشی ویژه به همراه دیوار برشی فولادی ویژه را تخمین زد.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار جانبی قاب‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با دیوار برشی فولادی بررسی شده است. بدین منظور ابتدا مدل‌های تحلیلی دقیق و ساده شده با استفاده

حالی است که میزان کاهش سختی قاب‌ها با افزایش تعداد طبقات کاهش یافته است، به گونه‌ایی که کمترین میزان کاهش سختی برای قاب ۱۰ طبقه به دست آمده است.

۸. درنهایت، در پژوهش حاضر روابطی نیمه تحلیلی برای اصلاح سختی و مقاومت نهایی سیستم‌های شامل دیوار دارای بازشو براساس نسبت ارتفاع بازشو به ارتفاع دیوار ارائه شده است.

۶. ایجاد بازشو در ورق‌های فولادی سختی و مقاومت سیستم را کاهش می‌دهد. نتایج تحلیل قاب‌های بررسی شده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت سطح بازشو به سطح ورق، سختی و مقاومت سیستم به صورت خطی کاهش یافته است.

۷. با افزایش تعداد طبقات، کاهش مقاومت نهایی تغییرات چندانی نکرده و این در

پانوشتها

1. steel plate shear wall (SPSW)
2. Thorburn
3. Timler & Kulak
4. Roberts
5. Driver
6. Elgaaly
7. Berman & Bruneau
8. Vian & Bruneau
9. Pellegrino
10. Muthukumar & Manoj
11. Wang
12. Mu-Wang Wei
13. Rezayibana
14. ANSYS
15. arc-length
16. Lubell

منابع (References)

1. 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, Canada (1983).
2. 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, Canada, (1983).
3. Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. "Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels", *Thin Walled Structures*, **12**(2), pp. 145-162 (1991).
4. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and et al. "Cyclic test of four-story steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**(2), pp. 112-120 (1998).
5. Driver, R.G., Kulak, G.L., Elwi, A.E. and et al. "FE and simplified models of steel plate shear wall", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**(2), pp. 121-130 (1998).
6. Elgaaly, M. "Post-buckling behavior of thin steel plates using computational models", *Advances in Engineering Software*, **31**(8-9), pp. 511-517 (2000).

7. Astaneh-Asl, A. "Seismic behavior and design of steel shear walls", Steel TIPS Report, Structural Steel Educational Council, University of California, Berkeley (2001).
8. Rezaei, M., Ventura, C.E. and Prion, H.G.L. "Simplified and detailed finite element models of steel plate shear walls", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada* (2004).
9. Behbahani, M.R., Grondin, G.Y. and Elwi, A.E. "Analysis of steel plate shear walls using explicit finite element method", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada* (2004).
10. Berman, J.W. and Bruneau, M. "Plastic design and testing of light-gauge steel plate shear walls", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada* (2004).
11. Berman, J.W. and Bruneau, M. "Plastic analysis and design of steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **129**(11), pp. 1448-1456 (2003).
12. Lin, C.H., Tsai, K.C., Lin, Y.C. and et al. "Full scale steel plate shear wall: NCRREE/MCEER phase I tests", *Proceedings of the 9th Conference on Earthquake Engineering, Canada* (2007).
13. Vian, D. and Bruneau, M. "Steel plate shear walls for seismic design and retrofit of building structures", Technical Report MCEER-05-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York (2005).
14. Purba, R. and Bruneau, M. "Finite-element investigation and design recommendations for perforated steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **135**(11), pp. 1367-1376 (2009).
15. Gholhaki, M. and Sabouri-Ghomi, S. "Effect of ductility factor on force modification factor of thin steel plate shear walls", *Journal of Structure & Steel*, **5**(5), pp. 52-63 (In Persian) (2009).
16. Pellegrino, C., Maiorana, E. and Modena C. "Linear and Non-linear behaviour of steel plates with circular and rectangular holes under shear loading", *Thin-Wall Structures*, **47**(6-7), pp. 607-616 (2009).
17. Masood, M. and Ahmed, I. "Behavior of shear wall with base opening", *Jordan Journal of Civil Engineering*, **6**(2), pp. 255-266 (2012).
18. Akbari Lar, Z., Keyhani, A., Haji Kazemi, H. and et al. "Investigating the effects of using stiffeners in steel shear

- walls with quadrant opening”, *Proceedings of 8th National Congress on Civil Engineering*, Babol, Iran (2014).
19. Garmiri, R. and Hadidi, A. “Effect of shape and size of the opening with and without stiffeners located at the center of panel on the seismic behavior of steel shear wall”, *Proceedings of 8th National Congress on Civil Engineering*, Babol, Iran (2014)
 20. Muthukumar, G. and Manoj, K. “Influence of opening locations on the structural response of shear wall”, *Journal of Nonlinear Dynamics*, **2014**(6), pp. 2229-2239 (2014).
 21. Kiashemshaki, M.H., Bahrami, M. and Memarpour, M.M. “Investigating the seismic behavior of steel shear walls with circular opening”, *Proceedings of the 2ed National Conference on Earthquake*, Qazvin, Iran (2015).
 22. Wang, M., Weiguo, Y. and Shi, Y.J. “Seismic behavior of steel plate shear wall structures with construction details”, *J. Constr. Steel Res*, **107**, pp. 194-210 (2015).
 23. Barkhordari, M.A., Hosseinzadeh, A.A. and Seddighi M. “Evaluation of the behavior of steel plate shear wall with stiffened opening”, *Sharif Journal Civil Engineering*, **32-2**(2.1), pp. 79-89 (2016).
 24. Wei, M.-W., Richard Liew, J.Y.R. and Fu, X.-Y. “Panel action of novel partially connected buckling-restrained steel plate shear walls”, *J. Constr. Steel Res*, **128**, pp. 483-497 (2017).
 25. Rezaibana, B. “Damping of steel shear wall in direct displacement based-design”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, **7** (2), (In Persian) (2020). doi: 10.22065./JSCE.2019.144103.1632
 26. Hossenzadeh, A.A., Kazemi, A., Barkhordari, M.A. and et al. “Nonlinear behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only under Various Loading conditions”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, **7**(2), (In Persian) (2020). doi: 10.22065./JSCE.2019.145512.1652.
 27. ANSYS, Release 10.0 Documentation for ANSYS, United States (2005).
 28. AISC, “Seismic provisions for structural steel buildings, ANSI/AISC 341-05, American institute of steel construction, Inc”, Chicago (2005).
 29. AISC, “Specification for structural steel buildings”, ANSI/AISC 360-05, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago (2005).
 30. ASCE/SEI 41, “Seismic rehabilitation of existing buildings”, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia (2007).
 31. SAP2000, Analysis References, Computer and Structures Inc., Berkeley, California (2004).
 32. Rezaei, M. “Seismic behavior of steel plate shear walls by shake table testing”, Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, Canada (1999).
 33. Lubell, A.S. “Performance of unstiffened steel plate shear walls under cyclic quasi-static loading”, Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, Canada (1997).
 34. Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, “Instruction for seismic rehabilitation of existing buildings”, Office of Deputy for Strategic Supervision, Department of Technical Affairs (2014).
 35. Iranian National Building Code, Part 6th, “Design loads for buildings”, (In Persian) (2013).
 36. Iranian Building Codes And Standards, “Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings”, Standard No.2800, 4th Edition (In Persian) (2014).