

چکیده

استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به بسیاری از سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی به لحاظ عملکردی و نیز اقتصادی مقرون به صرفه است. علی‌رغم مزایای بسیار دیوارهای برشی فولادی، این سیستم به صورت گسترده مورد استفاده قرار نگرفته است. برخی از دلایل کم توجهی شامل عدم شناخت صحیح رفتار سیستم و بزرگی قابل توجه مقاطع ستون‌های اطراف دیوار نسبت به دیوار برشی بتنی می‌باشد. هدف این تحقیق بهبود رفتار سیستم تعریف شده فوق با بهره‌گیری از رفتار برشی ورق و ستون‌های فرعی پیرامون آن و استفاده از ظرفیت حداکثر سیستم است. در این تحقیق ورق و ستون‌های فرعی مانند تیر پیوند در سیستم‌های مهاربند و اگر در نظر گرفته شده است که ورق پرکننده و ستون‌های فرعی پیرامون آن به ترتیب نقش جان و بال تیر پیوند را بازی می‌کنند. بدین منظور نمونه‌های مختلف در نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی و رفتار چرخه‌ای آنها بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این سیستم با رویکرد ذکر شده در قاب‌های فولادی در مقایسه با دیوارهای برشی فولادی باعث افزایش جذب انرژی و سطح زیر منحنی‌های هیستریزس و نیز کاهش پدیده باریک‌شدگی منحنی می‌شود. از جمله دیگر مزایای این سیستم می‌توان به کاهش قابل توجه تقاضا در ستون‌ها، قابلیت انطباق با معماری، منحنی‌های چرخه‌ای پایدار، عدم تأثیر سیستم ارائه شده در رفتار اتصالات تیر به ستون و در نتیجه عدم نیاز به اتصالات خمشی، قابلیت استفاده در ساختمان‌های بلندمرتبه و همچنین قابلیت استفاده در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها اشاره نمود.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه، رفتار چرخه‌ای، باریک‌شدگی، تیر پیوند برشی، بار چرخه‌ای.

بهبود رفتار سیستم دیوار برشی فولادی با رویکرد تیر پیوند

حدیث محمدمرادی (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، h.mohammadmoradi@iuees.ac.ir

بهرخ حسینی هاشمی

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

محمدعلی جعفری صحنه‌سرایی

استادیار، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

۱- مقدمه

سخت‌ترین سیستم‌های مهاربندی، که مهاربند ضربداری می‌باشد، سخت‌تر بوده و با توجه به امکان ایجاد بازشو در آن، کارایی همه سیستم‌های مهاربندی را از این نظر دارا می‌باشد. با وجود تمام مزایایی که این سیستم دارد، سختی خمشی آن به ویژه در ساختمان‌های بلند نسبتاً پایین می‌باشد. از آنجا که لنگر خمشی در این ساختمان‌ها اساساً توسط نیروی محوری ستون‌ها و بازوی مقاوم لنگر خمشی که عرض دیوار است، مهار می‌شود، اگر این سیستم به عنوان تنها سیستم باربر جانبی در هسته ساختمان بکار گرفته شود، سبب ایجاد تغییر مکان‌های جانبی زیاد، افزایش تقاضای لرزه‌ای ستون‌های پیرامونی و در نهایت منجر به استفاده از

دیوارهای برشی فولادی برای مقابله با نیروی زلزله و باد در ساختمان‌ها، به ویژه در ساختمان‌های بلند در چند دهه اخیر مطرح و مورد توجه قرار گرفته است. این پدیده نوین که در جهان به سرعت رو به گسترش می‌باشد در ساخت ساختمان‌های جدید و همچنین تقویت ساختمان‌های موجود به خصوص در کشورهای لرزه‌خیزی همچون آمریکا و ژاپن به کار گرفته شده است.

این سیستم در مقایسه با سیستم‌های مهاربند، به علت داشتن یک ناحیه پیوسته، پایدار و شکل‌پذیر، تحت بارهای چرخه‌ای، دارای نامعینی بسیار بالایی هستند [۱] و از نظر سختی برشی از

جهانپور و همکاران [۸]، مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر روی دو نمونه دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه‌ها، انجام دادند. در هر دو نمونه اتصال تیر به ستون‌های فرعی و اصلی مفصلی بوده و تنها تفاوت دو نمونه در تنش تسلیم ورق پر کننده بوده است. نتایج آزمایشگاهی وقوع پدیده باریک‌شدگی در منحنی‌های چرخه‌ای را نشان داد. همچنین نتایج مطالعات این محققین نشان داد که المان‌های مرزی ورق پر کننده که شامل تیرها و ستون‌های فرعی هستند، توانایی گسترش میدان کششی را داشته و تسلیم در ورق، قبل از قاب، اتفاق می‌افتد.

کلایتون و همکاران [۹]، رفتار دیوار برشی فولادی را با سیستم دیوار برشی فولادی که در آن ورق تنها به تیرها متصلند، مقایسه نمودند. نتایج آنها نشان داد، اگرچه در حالتی که ورق پر کننده تنها به تیرها متصل باشد، برای رسیدن به مقاومت مورد نظر بایستی از ورق ضخیم‌تر استفاده نمود اما حذف اتصال بین ورق پر کننده و ستون‌ها، با کاهش تقاضای تیرها و ستون‌ها، به‌خصوص در سازه‌های بلند، سبب صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف فولاد می‌گردد. به‌علاوه دشواری نصب ورق در سیستم مذکور نسبت به سیستم دیوار برشی متعارف کمتر می‌باشد.

شکسته‌بند و همکاران [۱۰]، در خصوص اثر بازشو بر رفتار دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در لبه مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام دادند. آنها بر روی هشت نمونه آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۶، آزمایش انجام دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد با افزایش سطح بازشو، میزان شکل‌پذیری، جذب انرژی و مقاومت برشی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین مطالعات آنها نشان داد با افزایش ضخامت ورق پر کننده، سختی اولیه و مقاومت برشی سیستم افزایش می‌یابد. اگرچه استفاده از ورق پر کننده با ضخامت بیشتر، باعث افزایش تقاضا در تیرها می‌گردد، اما تأثیر مستقیمی بر ناپایداری ستون‌ها ندارد.

هدف از این تحقیق اصلاح یک سیستم باربر جانبی است که ضمن داشتن ظرفیت اتلاف انرژی مناسب، از ظرفیت مصالح سیستم به شکل بهینه استفاده کند. این سیستم شبیه سیستم دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه است با این تفاوت که مشخصات

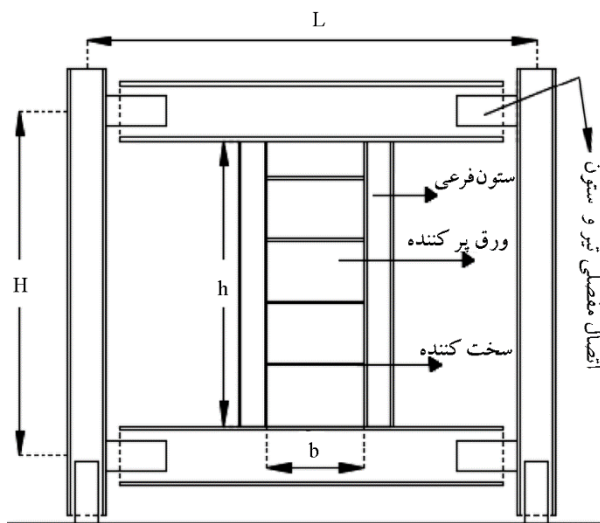
مقاطع بسیار سنگین و غیرمنطقی برای ستون‌ها می‌گردد. در سال ۲۰۰۸، در مقاله‌ای توصیفی که مربوط به نیازهای تحقیقاتی در زمینه دیوار برشی فولادی بود، به معضل بزرگ بودن مقطع ستون‌های کنار دیوار اشاره شد و راه‌حل‌هایی که در مطالعات و آزمایشات محققان قبل ارائه شده بود، مورد بررسی قرار گرفت [۲].

یکی از روش‌های حل معضل بزرگی مقطع ستون‌ها در سیستم‌های دیوار برشی فولادی، حذف اتصال ورق فولادی و ستون‌ها است. این امر منجر به حذف نیروهای وارد بر ستون‌ها، از سوی ورق پر کننده، (که ناشی از گسترش میدان کششی در ورق پر کننده بعد از کمانش آن می‌باشد) و در نتیجه کاهش تقاضا و ابعاد مقطع ستون‌های پیرامون ورق خواهد شد. این موضوع برای اولین بار در سال ۱۹۹۴، در یک تحقیق عددی در نظر گرفته شد که در آن ورق پر کننده سیستم دیوار برشی تنها به تیرها متصل بودند [۳].

در سال ۲۰۰۱، درایور و همکاران [۴] به‌طور کیفی پیشنهاد دادند که ورق پر کننده دیوار برشی به همراه اعضای مرزی خود با تیرهای واسطه‌ای که در تراز تیرهای اصلی هستند، به اعضای قاب متصل شوند.

در سال ۲۰۰۴، مدل دیگری توسط محرمی و همکاران [۵] پیشنهاد شد که در آن ورق پر کننده به‌جای اتصال به ستون‌های اصلی، به ستون‌های فرعی، برای کمک به تشکیل و گسترش میدان کششی، متصل شوند. گو و همکاران [۶]، مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر روی دیوارهای برشی فولادی که تنها به تیرها متصلند، انجام دادند. نتایج دو نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی نشان داد که این سیستم، شکل‌پذیری و جذب انرژی مناسبی دارد.

پیرموز [۷]، مطالعات عددی در خصوص دیوارهای برشی که تنها به تیرها متصلند، انجام داد. نتایج بررسی‌های عددی او نشان داد که علیرغم حذف اتصال بین پانل و ستون، سیستم هنوز سختی و مقاومت قابل توجهی دارد و با این کار نیازی به استفاده از ستون‌هایی با مقاطع بزرگ (برای مقاومت در برابر نیروهای میدان کششی) نیست. همچنین این روش جایگزینی برای روش‌های کاهش اثر میدان کششی (مانند استفاده از ورق با فولاد کم مقاومت و یا ایجاد سوراخ کاری در ورق) پیشنهاد شد.



شکل (۱): سیستم مورد بررسی.

برشی، مانند ضخامت ورق و مقطع ستون‌های فرعی، بر اساس ضابطه طول تیر پیوند برشی در نظر گرفته شده است. مطابق AISC-341-10، داریم [۱۱]:

$$e < 1.6 \frac{M_p}{V_p} \quad (1)$$

که در آن e ، طول تیر پیوند و M_p و V_p به ترتیب ظرفیت خمشی پلاستیک و ظرفیت برشی پلاستیک تیر پیوند است که در این سیستم e ، ارتفاع پانل برشی است.

مطابق AISC-341-10، استفاده از سخت کننده در تیرهای پیوند با عمق کمتر از ۲۵ اینچ، در یک طرف جان کافی است در غیر این صورت در هر دو طرف از سخت کننده استفاده می شود. فواصل مربوط به سخت کننده‌های تیر پیوند مطابق زیر تعیین می شود:

$$30t_w - \frac{d}{5} \quad \gamma = 0.02 \quad (2)$$

$$52t_w - \frac{d}{5} \quad \gamma = 0.08$$

که در آن t_w ، ضخامت ورق جان و d ، عمق تیر پیوند است.

همچنین با توجه به اینکه جذب انرژی سیستم به عهده پانل برشی است، مقاطع تیر طوری انتخاب می شود که تا موقع تسلیم برشی کامل ورق، مفصل پلاستیک در تیر تشکیل نشود. از این رو داریم:

$$R_k = \frac{2M_{pk}}{L-b} \quad (3)$$

هندسی پانل طوری در نظر گرفته می شود که رفتار آن بر خلاف سیستم مذکور، برشی باشد، در نتیجه جذب انرژی از طریق تشکیل و گسترش میدان کششی صورت نمی گیرد؛ بلکه از طریق تسلیم برشی صورت می گیرد.

۲- معرفی سیستم

در سیستم مورد بررسی در این مطالعه، پانل برشی در وسط دهانه قرار گرفته و اتصالات تیر به ستون مفصلی است. برای اینکه رفتار اتصالات حتی الامکان به رفتار اتصالات مفصلی نزدیک شود، جان تیر با دو ورق به بال ستون متصل شده است. پانل برشی شامل یک ورق و دو ستون فرعی است. ورق پانل، از دو طرف به تیرهای بالا و پایین قاب متصل بوده و در دو سمت کناری آن ستون‌های فرعی قرار می گیرد. رفتار پانل برشی در این سیستم مشابه تیر پیوند در مهاربندهای واگرا می باشد. ورق فولادی و ستون‌های فرعی به ترتیب نقش جان و بال تیر پیوند را ایفا می کنند. همچنین عملکرد سخت کننده‌های افقی در پانل برشی همانند سخت کننده‌های جان در تیرهای پیوند است (شکل ۱). اساس عملکرد این سیستم استفاده بهینه از ظرفیت برشی پانل است. از این رو طراحی به گونه‌ای است که اول تسلیم برشی در ورق اتفاق بیفتد و سپس مفصل پلاستیک در ستون‌های فرعی تشکیل شود و قاب اصلی وارد ناحیه پلاستیک نشود. همچنین مشخصات پانل به گونه‌ای انتخاب می گردد که مقاومت کماتش برشی ورق پرکننده از مقاومت تسلیم برشی آن بیشتر باشد و ورق قبل از تسلیم دچار کماتش برشی نگردد. از آنجاکه در سیستم فوق، برخلاف سیستم دیوار برشی فولادی، ورق به ستون‌های اصلی قاب متصل نیست، نیرویی از طرف ورق به ستون‌های اصلی وارد نمی شود. علاوه بر این پانل برشی تمام سطح قاب را اشغال نمی کند و در این سیستم محدودیت تعبیه باز شو وجود ندارد.

۳- مبانی طراحی سیستم

برای طراحی این سیستم از ضوابط مربوط به طراحی تیر پیوند کمک گرفته شده است. مشخصات فیزیکی پانل

صحیح در تحلیل غیرخطی کمانش، باید نقص اولیه در نظر گرفته شود. برای معرفی نقص اولیه، ترکیبی از مودهای کمانش دیوار برشی در نظر گرفته شد و در مدل اصلی، جابه‌جایی نقاط ۵ مد اول کمانشی، با ضرایب ۱۰، ۸، ۶، ۴، ۲ به ترتیب برای مدهای اول تا پنجم وارد گردید (افزایش مقدار ضرایب تأثیری در نتایج نداشت)، و سپس تحلیل‌های چرخه‌ای انجام گردید.

در شکل (۳) نتایج تحلیل انجام شده برای صحت‌سنجی با نتایج چرخه‌ای تست و نتایج بارافزون انجام شده در نرم‌افزار اجزای محدود آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج تحلیل اجزای محدود انجام شده، تطابق قابل قبولی با نتایج مربوط به تحقیقات محرمی و همکاران [۵] دارد. اما نتایج عددی و آزمایشگاهی در مراحل اولیه بارگذاری با یکدیگر اختلاف دارند. علت این اختلاف می‌تواند، ساده‌سازی مدل تست شده در نرم‌افزار اجزای محدود، لغزش پیچ‌ها و ورق‌های اتصال و نیز لقی‌های حین آزمایش باشد.

همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در لبه، اگرچه با اضافه نمودن ستون‌های فرعی، معضل استفاده از ستون‌هایی با مقاطع بزرگ را حل کرده‌اند، لیکن رفتار چرخه‌ای این سیستم مشابه دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک بوده و علی‌رغم داشتن منحنی‌های چرخه‌ای پایدار، پدیده باریک‌شدگی در آنها اتفاق می‌افتد و نمودارهای چرخه‌ای S شکل می‌باشند.

با در نظر گرفتن تعادل در پای طبقه k ام (شکل ۲)، می‌توان مقدار نیروی لازم برای ایجاد مکانیسم در قاب این طبقه را به دست آورد:

$$V_{wk} = \frac{2M_{pk}}{H_{kh}} \frac{L}{L-b} \quad (۴)$$

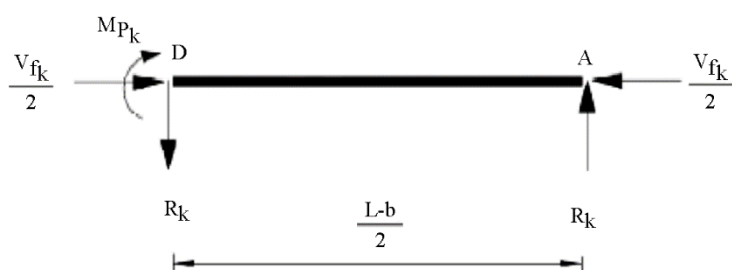
در نهایت حداقل لنگر پلاستیک لازم برای ایجاد مکانیسم هم‌زمان دیوار و تیر در هر طبقه، با صرف نظر کردن از اثرات نیروی محوری موجود در تیر، از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$M_{pk} = \frac{1}{2} V_{wk} H_{kh} \left(1 - \frac{b}{L}\right) \quad (۵)$$

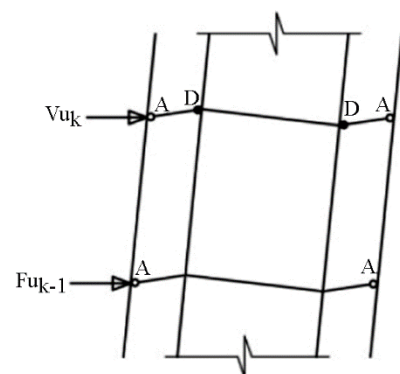
که در آن L، طول دهانه، b عرض پانل، H_k، ارتفاع طبقه k ام، V_{wk} ظرفیت برشی طبقه k ام و M_{pk} حداقل لنگر پلاستیک تیر می‌باشد.

۴- تحلیل عددی سیستم تحت بار چرخه‌ای

استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود می‌تواند روش مناسبی برای بررسی رفتار سیستم معرفی شده و تحلیل رفتار چرخه‌ای آن باشد. از آنجاکه سیستم معرفی شده شبیه به سیستم دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه‌ها می‌باشد، برای صحت‌سنجی مدل‌های اجزای محدود، نمونه بررسی شده در تحقیقات جهانپور و محرمی [۸] در نرم‌افزار آباکوس مدل شد و نتایج آن با نتایج مدل‌سازی نویسنده مقایسه گردید. سختی ورق مسطح تحت نیروهای برشی بالاست. اما در عمل به دلیل جوشکاری، نقص اولیه ناچیزی در آن به وجود می‌آید که سختی برشی ورق را کاهش می‌دهد. برای مدل‌سازی



(ب)



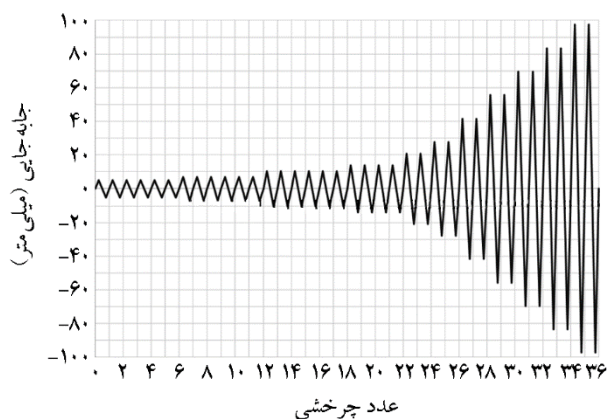
(الف)

شکل (۲): (الف) طبقه k ام قاب و (ب) تعادل در پای طبقه.

جدول (۱): مشخصات مربوط به قاب اصلی در تمامی نمونه‌ها.

h (m)	مقطع تیرها	مقطع ستون‌ها	H (m) فاصله مرکز به مرکز تیرها	L (m) فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها
۲/۵	IPB400	IPB200	۲/۹	۴

در تمامی نمونه‌های اجزای محدود برای لحاظ نمودن اثر بوشینگر، مدل رفتاری فولاد با سخت‌شوندگی سینماتیک در نظر گرفته شده است. همچنین اثرات غیرخطی تغییر شکل‌های بزرگ در تحلیل‌ها لحاظ گردیده است. با انجام تحلیل حساسیت ابعاد مش، ابعاد مناسب المان که دارای خطای کم و سرعت معقول در تحلیل است، تعیین گردید. ابعاد مش در تمامی نمونه‌ها 100×100 میلی‌متر و المان استفاده شده برای تمام اجزا S4R می‌باشد. پروتکل بارگذاری بر اساس مرجع پیشنهادی [۱۲] انتخاب شد. تاریخچه بارگذاری در این مرجع به صورت درصدی از رانش نسبی طبقه، همانند شکل (۴) داده شده است.

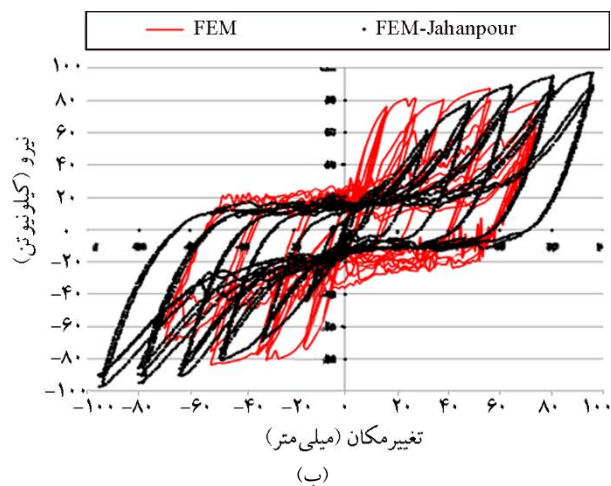
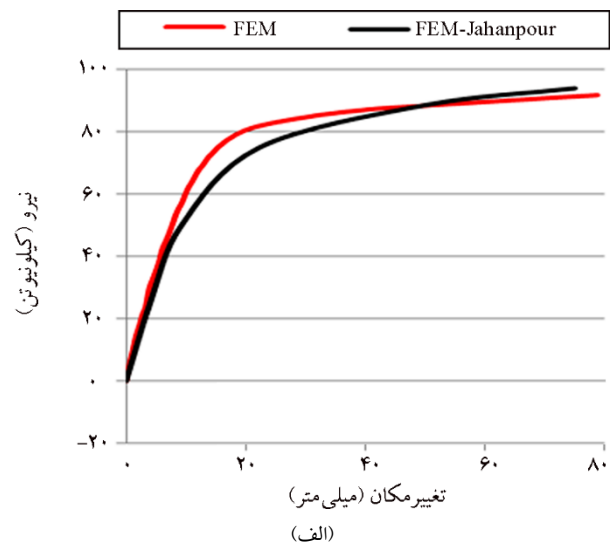


شکل (۴): پروتکل بارگذاری مطابق SAC.

نمودار چرخه‌ای و کانتورهای تنش فون میسر در نمونه اصلی (Main)، در شکل (۵) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از ظرفیت ورق پانل به‌طور کامل استفاده شده است و درحالی‌که تیر و ستون در حالت الاستیک هستند، تنش تقریباً در تمام نقاط ورق پانل به تنش تسلیم رسیده‌اند.

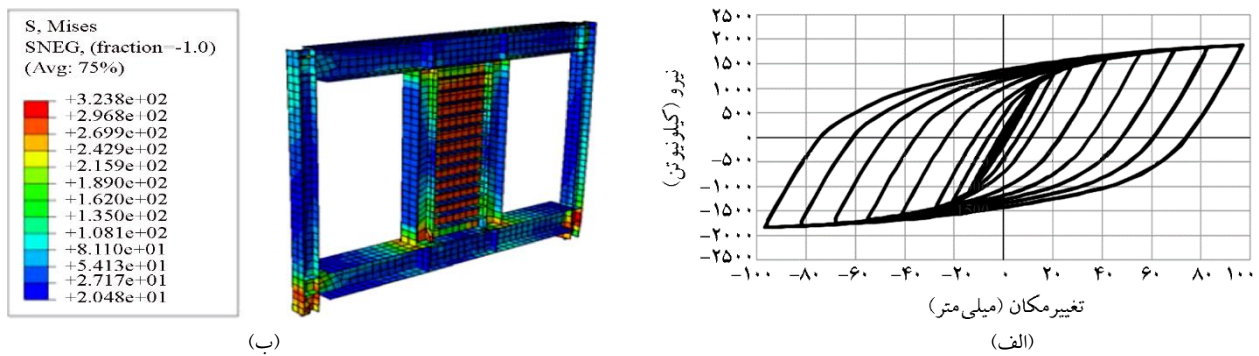
۴-۱- تأثیر ضخامت پانل بر رفتار چرخه‌ای سیستم

برای بررسی تأثیر ضخامت ورق پانل بر رفتار چرخه‌ای سیستم نمونه‌های مختلف (گروه T)، در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس



شکل (۳): صحت‌سنجی (الف) منحنی بارافزون، (ب) منحنی چرخه‌ای، با نتایج جهانپور و همکاران [۸].

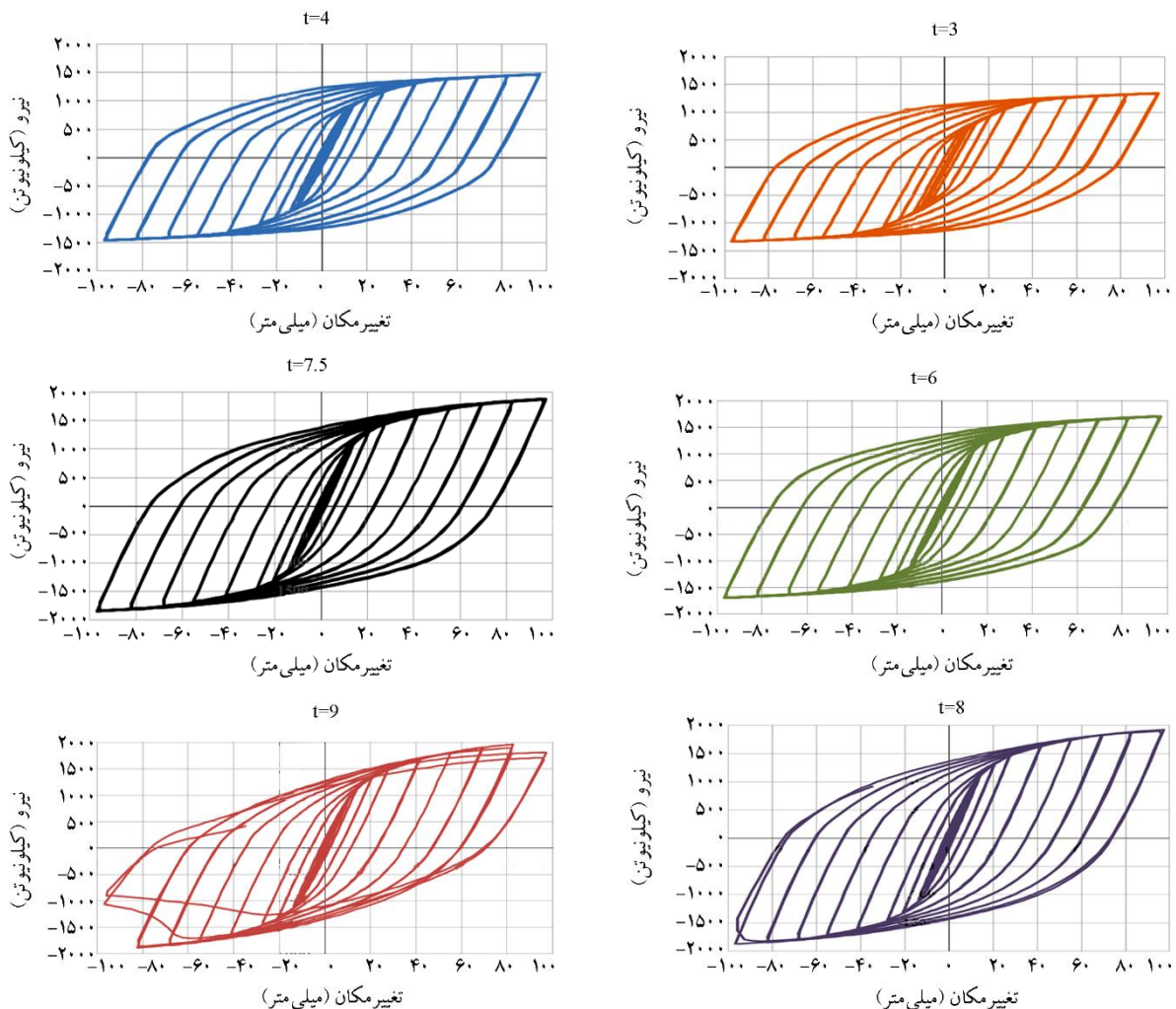
در مرحله بعد، نمونه‌هایی با مقیاس واقعی در نرم‌افزار اجزای محدود ساخته شد و رفتار چرخه‌ای آن مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مورد مطالعه در سه گروه مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر مورد بررسی در سه گروه A، T و B به ترتیب ضخامت ورق، فاصله سخت‌کننده‌ها و نسبت عرض به ارتفاع پانل می‌باشد. مشخصات هندسی قاب اصلی که در تمامی نمونه‌ها یکسان است، در جدول (۱) آورده شده است. همچنین ضخامت ورق پانل و فاصله سخت‌کننده‌ها در نمونه اصلی به ترتیب $7/5$ میلی‌متر و 180 میلی‌متر است که این مشخصات با استفاده از روابط قسمت قبل تعیین شده است. مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد در تمامی نمونه‌ها به ترتیب برابر 200000 ، 300 و 400 نیوتن بر میلی‌متر مربع در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): (الف) منحنی چرخه‌ای مربوط به نمونه Main و (ب) تنش‌های فون میسز مربوط به نمونه Main در گام آخر بارگذاری.

سخت‌کننده‌های ورق پانل ۱۰ میلی‌متر و فواصل آنها حدود ۱۸۰ میلی‌متر است. لازم به ذکر است که نمونه T7.5 همان نمونه Main است. در شکل (۶) نمودارهای چرخه‌ای مربوط به نمونه‌های T3 (ضخامت ورق پانل ۳ میلی‌متر) تا T9 (ضخامت ورق پانل ۹ میلی‌متر) آورده شده است.

مدل‌سازی شد. مشخصات مربوط به تمام نمونه‌های گروه T، یکسان بوده و تنها پارامتر متغیر در نمونه‌های مربوط به این گروه، ضخامت ورق پانل است. عرض ورق پانل در نمونه‌های مربوط به این گروه ۸۰۰ میلی‌متر و مقطع ستون‌های فرعی IPB260 است، همچنین ضخامت



شکل (۶): نمودارهای چرخه‌ای مربوط به گروه T برای ضخامت ورق پانل ۳، ۴، ۵، ۷، ۸ و ۹ میلی‌متر.

مشاهده می‌شود. افزایش ضخامت ورق از ۷/۵ میلی‌متر به ۹ میلی‌متر، موجب افزایش مقاومت نهایی سیستم از ۱۸۷۷ کیلونیوتن به ۱۹۵۶ کیلونیوتن (حدود ۴ درصد) افزایش یابد که این میزان، مقدار قابل ملاحظه‌ای نیست. به عبارت دیگر، اساس طراحی نمونه اصلی داشتن مقاومت و جذب انرژی حداکثر و همچنین منحنی‌های چرخه‌ای پایدار است.

جدول (۲): مقاومت نهایی نمونه‌های گروه T.

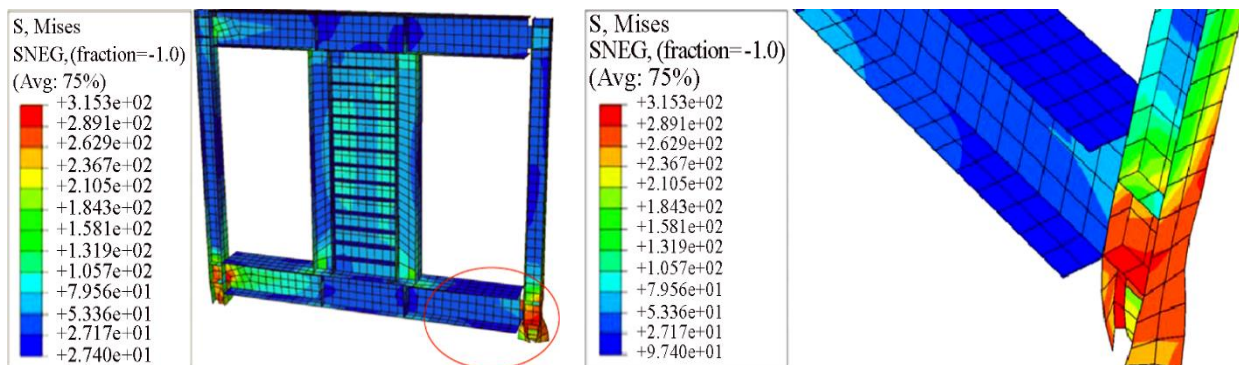
نمونه	مقاومت نهایی (kN)	نسبت مقاومت نهایی نمونه نسبت به نمونه T3 (درصد)
T3	۱۳۴۲	۱
T4	۱۴۶۹	۱/۰۹
T6	۱۷۱۱	۱/۲۷
T7.5 (Main)	۱۸۷۷	۱/۴
T8	۱۹۲۶	۱/۴۳
T9	۱۹۵۶	۱/۴۶

۴-۲- تأثیر فواصل سخت‌کننده‌های عرضی پانل بر رفتار چرخه‌ای سیستم

در نمونه‌های گروه A، پارامتر متغیر فاصله سخت‌کننده‌های عرضی بوده و ضخامت ورق پانل در تمامی نمونه‌های این گروه ۷/۵ میلی‌متر است. عرض ورق پانل، مقطع ستون‌های فرعی و ضخامت سخت‌کننده‌های عرضی پانل در این گروه، مشابه گروه T است. نمودارهای چرخه‌ای مربوط به تحلیل نمونه‌های این گروه در شکل (۸) آورده شده است. فواصل سخت‌کننده در نمونه‌های

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمودارهای چرخه‌ای مربوط به گروه T، دوکی شکل بوده و برخلاف سیستم دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک و دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در لبه‌ها پدیده باریک‌شدگی در این نمودارها اتفاق نیفتاده است. از این‌رو سیستم مورد بررسی جذب انرژی بیشتری نسبت به دیوارهای برشی فولادی دارند. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت ورق پانل، مقاومت نهایی، سطح زیر نمودار و در نتیجه جذب انرژی سیستم افزایش می‌یابد. با مقایسه نمودارهای مربوط به نمونه‌های T7.5 و T9، ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت ورق پانل از ۷/۵ میلی‌متر به ۹ میلی‌متر مقاومت نهایی افزایش قابل ملاحظه‌ای ندارد.

همان‌طور که در نمودارهای چرخه‌ای شکل (۶) ملاحظه می‌شود، نمونه T9، در سیکل‌های آخر بارگذاری (سیکل ۳۵) با کاهش ناگهانی مقاومت روبرو است. علت این امر آن است که حالت بهینه طراحی سیستم با مشخصات قاب ذکر شده در جدول (۱)، پانل با ضخامت ورق ۷/۵ میلی‌متر است و از آنجا که جذب انرژی سیستم به عهده پانل برشی است، افزایش ضخامت ورق باعث می‌شود از ظرفیت پانل به‌طور کامل استفاده نشود و قبل از اینکه ورق به‌طور کامل در برش تسلیم شود، خرابی در پای ستون رخ می‌دهد. در شکل (۷) کانتورهای تنش‌های فون میسز، مربوط به نمونه T9، در گام آخر بارگذاری آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بال‌های ستون‌های قاب، در سیکل‌های آخر بارگذاری دچار کماتش موضعی شده و تحمل بار بیشتر ندارد. در جدول (۲) مقاومت نهایی مربوط به نمونه‌های این گروه



شکل (۷): کانتورهای تنش فون میسز در نمونه T9.

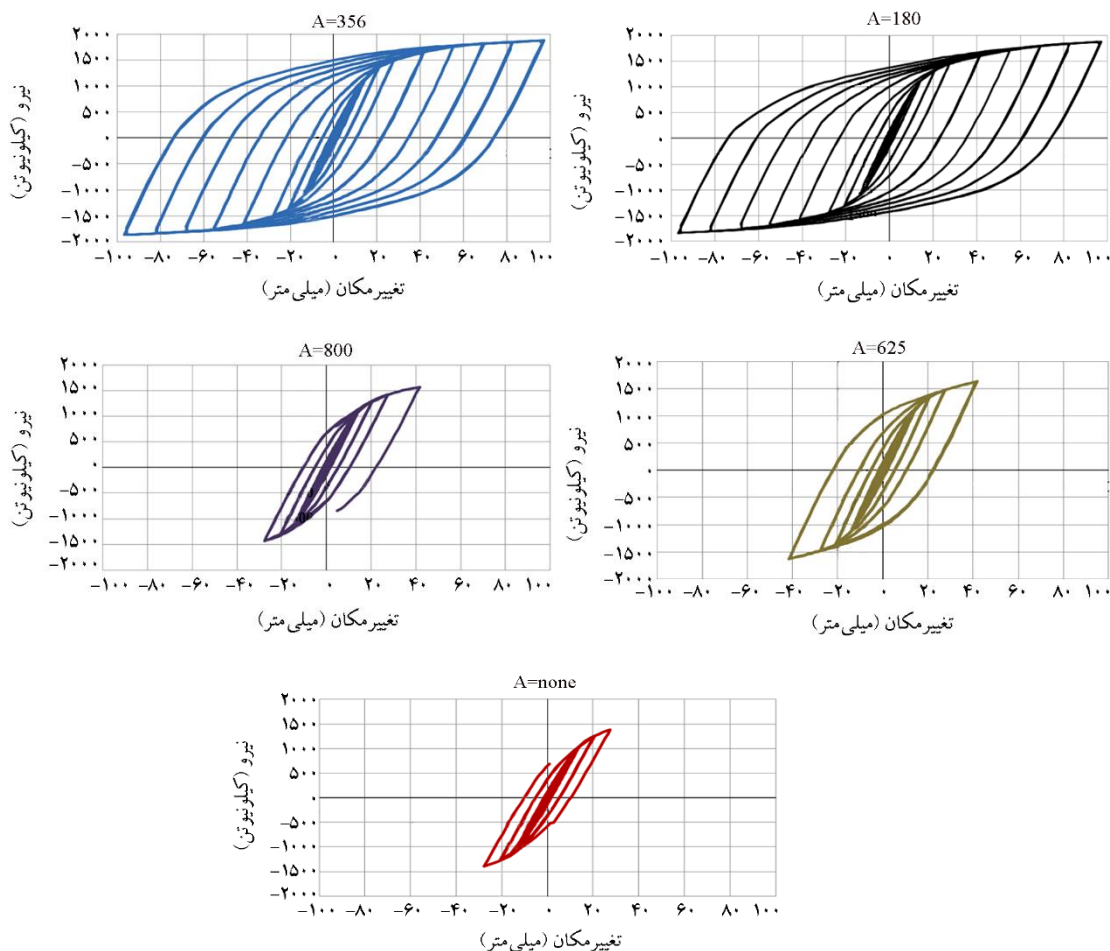
ناپایداری جانبی پانل برشی، ادامه بارگذاری میسر نمی‌باشد. در جدول (۳)، تأثیر فاصله سخت‌کننده‌ها بر مقاومت نهایی سیستم ملاحظه می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزودن سخت‌کننده به سیستم می‌تواند باعث افزایش مقاومت نهایی سیستم تا ۳۵ درصد نیز گردد.

جدول (۳): مقاومت نهایی نمونه‌های گروه A.

نمونه	مقاومت نهایی (kN)	نسبت مقاومت نهایی نمونه نسبت به نمونه A-None (درصد)
A-NONE	۱۳۸۹	۱
A800	۱۵۶۹	۱/۱۳
A600	۱۶۳۵	۱/۱۸
A325	۱۸۷۹	۱/۳۵
A180 (Main)	۱۸۷۸	۱/۳۵

A800، A600، A325، A180 به ترتیب ۱۸۰، ۳۲۵، ۶۰۰، ۸۰۰ میلی‌متر بوده و نمونه A-none، بدون سخت‌کننده است. نمونه A180 همان نمونه Main، می‌باشد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش فاصله سخت‌کننده‌ها از ۱۸۰ میلی‌متر به ۳۵۶ میلی‌متر تأثیر چندانی بر مقاومت نهایی سیستم و جذب انرژی ندارد، با توجه به ضوابط مربوط به سخت‌کننده‌ها در تیر پیوند، حداکثر فاصله سخت‌کننده‌ها باید ۱۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود، اما همان‌طور که در نتایج فوق ملاحظه می‌گردد افزایش این فاصله تا دو برابر ضابطه آیین‌نامه تأثیری بر نتایج ندارد. از طرف دیگر در سه نمونه بعدی، تحلیل در تغییر شکل‌های جانبی کمتر از ۴۰ میلی‌متر متوقف شد. به عبارت دیگر در نمونه‌هایی با فاصله سخت‌کننده ۶۲۵ و ۸۰۰ میلی‌متر و همچنین در نمونه بدون سخت‌کننده، به دلیل کماتش خارج از صفحه ورق و



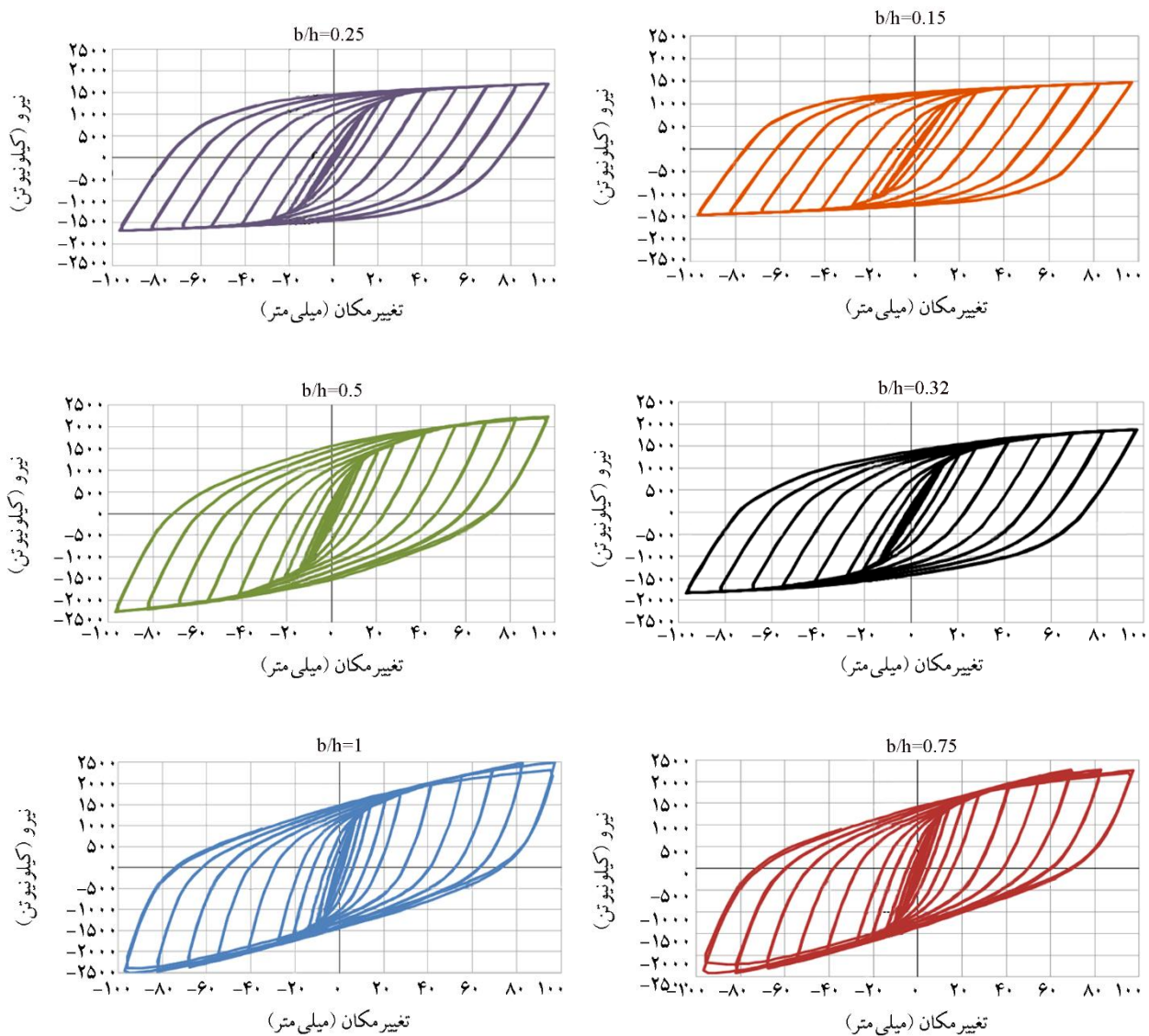
شکل (۸): نمودارهای چرخه‌ای مربوط به گروه A برای سخت‌کننده به فواصل ۱۸۰، ۳۲۵، ۶۲۵ و ۸۰۰ میلی‌متر و بدون سخت‌کننده.

۳-۴- تأثیر نسبت عرض به ارتفاع پانل بر رفتار چرخه‌ای سیستم

برای بررسی تأثیر عرض به ارتفاع پانل، با ثابت نگه داشتن ارتفاع پانل عرض آن تغییر داده شده است. مشخصات نمونه‌های این گروه نیز همانند گروه T می‌باشد. ضخامت ورق پانل در نمونه‌های این گروه ۷/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی تأثیر پارامتر عرض به ارتفاع پانل، نمونه‌های مختلفی در نرم‌افزار تحلیل و بررسی شد. نسبت عرض به ارتفاع (b/h) در نمونه‌های B15، B25، B32، B50، B75 و B100 به ترتیب برابر ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۲، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ است. در اینجا منظور از

عرض پانل و ارتفاع پانل، به ترتیب عرض و ارتفاع ورق پانل برشی است. نمونه B32 همان نمونه Main است. در شکل (۹) نتایج مربوط به تحلیل اجزای محدود، نمونه‌های گروه B آورده شده است.

جدول (۴) مقاومت نهایی نمونه‌های گروه B، و تأثیر فاصله سخت‌کننده‌ها بر رفتار سیستم را نشان می‌دهد. در نمونه B100، نسبت (b/h)، حدود سه برابر نمونه اصلی (Main) B32 و مقدار مقاومت آن حدود ۱/۳۴ برابر آن نمونه می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش نسبت b/h تا حدود سه برابر، مقاومت نهایی حدود ۳۴ درصد افزایش می‌یابد.



شکل (۹): نمودارهای چرخه‌ای مربوط به گروه B برای b/h با مقادیر ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۲، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱.

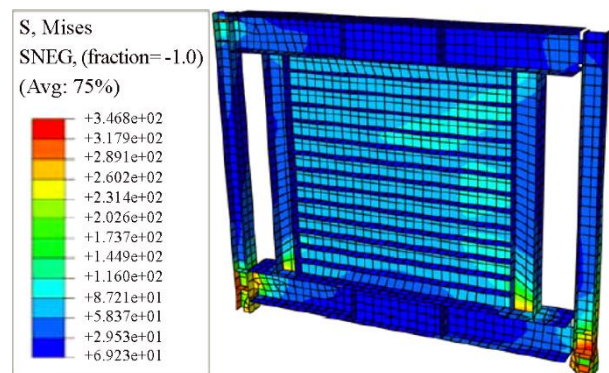
جدول (۴): مقاومت نهایی نمونه‌های گروه B.

نمونه	b/h	مقاومت نهایی (kN)	نسبت مقاومت نهایی نمونه نسبت به نمونه T3 (درصد)
B15	۰/۱۵	۱۴۷۰	۱
B25	۰/۲۵	۱۷۰۰	۱/۱۶
B32 (Main)	۰/۳۲	۱۸۷۸	۱/۲۸
B50	۰/۵	۲۲۶۱	۱/۵۵
B75	۰/۷۵	۲۴۰۹	۱/۶۴
B100	۱	۲۵۱۳	۱/۷۰

توسط محققین صورت گرفته است و راهکارهای متعددی برای آن پیشنهاد شده است که از جمله این راهکارها می‌توان به استفاده از فولاد با مقاومت تسلیم پایین برای دیوار، استفاده از ستون‌هایی با مقاطع مرکب (مقاطع پر شده با بتن)، استفاده از دیوارهای برشی که تنها به تیرها متصلند، و جداسازی سیستم باربر ثقلی و جانبی با به کارگیری ستون‌های فرعی می‌باشد. در این مطالعه رفتار چرخه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی با رویکرد تیر پیوند بررسی شده است و هدف معرفی یک سیستم جایگزین برای دیوارهای برشی فولادی است. طراحی این سیستم به گونه‌ای انجام شده است که جذب انرژی در آن از طریق تسلیم برشی ورق صورت می‌گیرد. این در حالی است که در سیستم‌های دیوار برشی فولادی جذب انرژی از طریق مقاومت پس‌کمانشی صورت می‌پذیرد. در مطالعه رفتار این سیستم تأثیر برخی پارامترها از جمله ضخامت ورق پانل، فاصله سخت‌کننده‌ها و نسبت طول دهانه به ارتفاع پانل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان داد که افزایش ضخامت ورق، افزایش نسبت عرض به ارتفاع پانل و نیز کاهش فاصله سخت‌کننده‌ها، باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی و نیز مقاومت سیستم می‌شود که این در صورتی است که سایر اجزای سیستم از جمله ستون‌های اصلی، برای ظرفیت کامل پانل طراحی شده باشند.

افزایش ضخامت ورق بر ظرفیت نهایی سیستم تأثیر گذار است و باعث افزایش آن می‌شود. اما از آنجاکه طراحی نمونه اصلی (Main) (T7.5) بر پایه استفاده حداکثر از ظرفیت ورق و سپس ستون‌های فرعی است، بنابراین استفاده از ورق پرکننده با ضخامتی بیش از نمونه اصلی تأثیر چندانی بر ظرفیت سیستم ندارد. افزودن سخت‌کننده به سیستم می‌تواند باعث افزایش مقاومت نهایی سیستم تا حدود ۳۵ درصد گردد. همچنین افزایش فاصله سخت‌کننده‌ها به میزان حدود دو برابر مقدار مجاز ضوابط مربوط به سخت‌کننده‌های تیر پیوند برشی، تأثیری در رفتار چرخه‌ای این سیستم ندارد. از طرف دیگر افزایش فاصله سخت‌کننده‌ها، بیش از مقدار ذکر شده باعث ناپایداری جانبی سیستم می‌شود و باعث می‌گردد از ظرفیت پانل به‌طور کامل استفاده نشود.

در شکل (۱۰) کانتورهای تنش مربوط به نمونه B100، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، قبل از اینکه از ظرفیت پانل به‌طور کامل استفاده شود، مقدار تنش در پای ستون‌های فرعی به حد تسلیم رسیده است؛ این در حالی است که در گام آخر بارگذاری، حداکثر مقدار تنش فون‌میسز در ورق کمتر از نصف تنش تسلیم می‌باشد. علت امر این است که طراحی این نمونه از ضوابط مربوط به تیر پیوند برشی تبعیت نمی‌کند، و قبل از اینکه تسلیم برشی در ورق پانل رخ دهد سیستم به حداکثر ظرفیت خود می‌رسد.



شکل (۱۰): کانتورهای تنش فون‌میسز در نمونه B100.

۵- نتیجه‌گیری

سیستم‌های دیوار برشی فولادی علیرغم مزایای متعددی که دارند، دارای کاستی‌هایی هستند. یکی از این موارد، لزوم به کارگیری ستون‌هایی با ابعاد بزرگ در دهانه‌هایی است که از این سیستم استفاده می‌شود. برای حل این مسئله، مطالعات مختلفی

- Shear Walls*. Research Project No. 1-4679, The Building and Housing Research Centre.
6. Guo, L., Rong, Q., Ma, X., and Zhang, S. (2011) Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only. *International Journal of Steel Structures*, **11**(4), 467-479.
 7. Pirmoz, A. (2012) Beam-attached steel plate shear walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(12), 879-895.
 8. Jahanpour, A., Johnson, J., and Moharrami, H. (2012) Seismic behavior of semi-supported steel shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, **74**, 118-133.
 9. Clayton, P.M., Berman, J.W., and Lowes, L.N. (2015) Seismic performance of self-centering steel plate shear walls with beam-only-connected web plates. *Journal of Construction Steel Research*, **106**, 198-208.
 10. Shekastehband, B., Azarakhsh, A.A., and Pavir, A. (2017) Behavior of semi-supported steel shear walls: Experimental and numerical simulations. *Engineering Structures*, **135**, 161-176.
 11. ANSI/AISC 341-10. (2005) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*.
 12. Venture, S.J. (1997) *Protocol for Fabrication, Inspection, Testing, and Documentation of Beam-Column Connection Tests and Other Experimental Specimens*. Rep. No. SAC/BD-97, 2.
- افزایش نسبت b/h باعث افزایش مقاومت نهایی سیستم خواهد شد. این افزایش تا حدود سه برابر نمونه اصلی موجب افزایش مقاومت نهایی تا ۳۴ درصد گردید. از طرف دیگر نتایج نشان داد برای مقادیر b/h بزرگتر از ۰/۵، افزایش این نسبت تأثیر قابل توجهی بر مقاومت نهایی ندارد. با افزایش نسبت b/h از ۰/۵ به ۱، مقاومت نهایی حدود ۱۱ درصد افزایش یافت.
- در نهایت با توجه به تحلیل چرخه‌ای نمونه‌های مختلف از این سیستم و بررسی پارامترهای مختلف، به نظر می‌رسد این سیستم در مقایسه با سیستم دیوار برشی فولادی رفتار بهتری دارد، به‌علاوه به دلیل عدم اتصال پانل برشی به ستون‌های اصلی قاب نیاز به استفاده از ستون‌هایی با ابعاد بزرگ نیست. همچنین از دیگر مزایای این سیستم می‌توان به قابلیت تعیبه بازشو در آن، قابلیت استفاده در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها و نیز عدم تأثیر سیستم در نوع اتصالات قاب اشاره نمود.
- ### مراجع
1. Tromposch, E.W. and Kulak, G.L. (1987) *Cyclic and Static Behaviour of Thin Panel Steel Plate Shear Walls*. Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Structural Engineering Report No. 145, 158p.
 2. Berman, J., Lowes, L., Okazaki, T., Bruneau, M., Tsai, K., Driver, R.G., Sabelli, R., and Moore, W.P. (2008) *Research Needs and Future Directions for Steel Plate Shear Walls*. ASCE.
 3. Xue, M. and Lu, L-W. (1994) Interaction of steel shear panels with surrounding frame members. *Proceedings of the Structural Stability Research Council Annual Technical Session*, Bethlehem, PA, 339-354.
 4. Driver, R.G., Gilbert, G.Y., Behbahanifard, M.R., and Hussain, M.A. (2001) Recent development and future directions in steel plate shear wall research. *Proceeding of North American Steel Construction Conference*, Ft. Lauderdale, FL.
 5. Moharrami, H., Habibnejad, A., Mazrouei, A., and Alizadeh, H. (2005) *Semi-Supported Thin Steel*

Improvement of Steel Shear Wall Behavior Based on Link Beam Approach

Hadis Mohammad Moradi^{1*}, Behrokh Hosseini Hashemi², and Mohammad Ali Jafari³

1. Ph.D. Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: h.mohammadmoradi@iiees.ac.ir
2. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

In seismic-prone countries like Japan, structures are designed against earthquakes and reinforced concrete shear walls, steel shear walls or steel bracing are usually used as seismic resistant elements. However, their hysteretic characteristics in plastic region, ductility and capacity of energy absorption are not always good. The use of steel plate shear wall systems (SPSW) is more advantageous than many lateral load resistant systems considering performance and economy. The steel plates are so strong and ductile, and their weight is so light that they are suitable as a material of shear wall. Despite the many advantages of steel shear walls, this system is not widely used. Some of the underlying reasons include a lack of understanding of the behavior of the system and the significant size of the columns around the wall compared to the concrete shear wall. Over the last two decades, the semi-supported steel shear wall at the edges (SSSW) has been introduced as an alternative to the traditional shape of the steel plate shear wall system. In this system, the infill steel plate is not attached to the main frame columns and instead is attached to the secondary columns. Removing the connection of the steel plate to the main columns will reduce the demand for the peripheral columns, thereby reducing their size of cross section. However, due to buckling of the steel plate, the phenomenon of pinching still exists in hysteresis curves. This reduces the area under the hysteresis curves and consequently, reduces the energy dissipation in the system.

The aim of this study is to improve the behavior of the above defined system by utilizing shear behavior of the plate and secondary columns around it and utilizing the maximum system capacity. In this research, plate and secondary columns are considered as shear link beam in eccentrically bracing frame (EBF) systems, with plate and secondary columns playing the role of web and flanges of shear link beam, respectively. In this system, a shear panel consisting of infill steel plate, perpendicular stiffeners and secondary columns is positioned in the midspan of the steel frame with simple connections. Unlike the conventional steel plate shear wall system and the semi-supported steel shear wall system at the edges, the buckling of the steel plate is prevented and the energy dissipation is due to the shear failure mechanism.

In this study, the effect of infill steel plate thickness, distance of perpendicular stiffeners and ratio of shear panel width to height on system behavior is investigated. For this purpose, different samples are modeled in the nonlinear finite element software and their cyclic behaviors have been studied. The results showed that the increase of steel plate thickness and ratio of shear panel width to its height has been lead to an increase in the ultimate capacity of system and area under the hysteresis curves. Adding stiffeners can increase the shear strength of the system up to 35%. In addition, increasing the distance of the stiffeners by up to 2 times the value specified for short-link beams has no effect on the system hysteresis behavior. The results also showed that the use of this system in steel frames compared to conventional steel plate shear walls increases the energy dissipation and area under hysteresis curves and reduces the pinching phenomenon in hysteresis curves. Other benefits of the system include a significant reduction in column demand, adaptability to architecture, stable cyclic curves, and no impact of the proposed system on the behavior of beam-to-column connections and thus no need for rigid connections, usability in High-rise buildings as well as usability in the seismic rehabilitation and retrofit of existing buildings.

Keywords: Semi-Supported Steel Plate Shear Walls, Hysteresis Behavior, Pinching, Shear Link Beam, Cyclic Loading.