

بررسی تأثیر سخت‌کننده لبه‌ای بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر

مسعود پورحسن شهری^۱، علی منصوری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

* قوچان، صندوق پستی ۶۷۳۳۵-۹۴۷۷۱، a.mansouri@qiet.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۰)

چکیده

در دیوار برشی فولادی، ورق نازک فولادی به المان‌های مرزی قاب متصل می‌شود، که این امر موجب افزایش نیروی اعمالی به ستون‌ها و در نتیجه افزایش سطح مقطع این اعضا می‌شود. جداسازی ورق فولادی از ستون‌های اصلی، سبب کاهش نیروهای لرزه‌ای وارده به ستون‌ها می‌شود که این امر از گسترش رفتار غیرخطی در ستون‌ها و فروریزش زود هنگام سازه جلوگیری خواهد کرد. البته این کار، سبب کاهش ظرفیت برشی دیوار نیز می‌گردد که می‌توان آن را با در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های لازم، مانند استفاده از فولاد با مقاومت تسلیم بالا و افزایش ضخامت ورق فولادی، تا حدودی جبران نمود. در این مقاله، رفتار دیوار برشی فولادی متصل به تیر (بدون اتصال به ستون‌ها) تحت بار جانبی، با استفاده از مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود، توسط نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اطمینان از صحت نتیجه‌های مدل عددی، اعتبارسنجی با داده‌های آزمایشگاهی موجود انجام شده است. سپس به بررسی اثر سخت‌کننده لبه‌ای، بر رفتار این نوع دیوار برشی پرداخته شده است. بر پایه نتیجه‌های به دست آمده، در شرایطی که سخت‌کننده مذکور به تیرهای بالا و پایین متصل نباشد، تغییر مقطع آن تأثیر چندانی بر رفتار سیستم و مقدارهای سختی، مقاومت و استهلاک انرژی ندارد. ولی در صورت اتصال سخت‌کننده به تیرها، بهبود قابل توجهی در عملکرد لرزه‌ای دیوار و مقدار مشخصه‌های رفتاری ذکر شده مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که در این حالت، نیروی بیشتری از جانب دیوار به تیرها اعمال خواهد شد که این موضوع می‌بایست در طراحی این اعضا، مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی

دیوار برشی فولادی متصل به تیر، سخت‌کننده لبه‌ای، تحلیل اجزای محدود، سختی، مقاومت جانبی، استهلاک انرژی

Investigation on the influence of edge stiffeners on the seismic behavior of steel plate shear walls connected to frame beams only (SSW-BO)

M. Pourhasan Shahri, A. Mansouri

Abstract

In the steel plate shear wall, the thin steel plate is connected to the boundary elements, Therefore, forces transfer from the panel to the columns and increase the required cross sectional area of the columns. Separating the steel panel from the columns, reduces the seismic demands on the columns and prevent from the premature failure of the columns and the collapse of the entire structure. However, this technic decreases the lateral resistance of the system, therefore in such a case, using high yield steel (HYS) for the panel or utilizing a thicker steel plate may be required. In this paper, the seismic behavior of the steel plate shear walls connected to frame beams only (SSW-BO) is studied through nonlinear finite element analysis by ABAQUS software. After validating the numerical model against available experimental results, the effect of the edge stiffeners on the behavior of SSW-BO is explored. Based on the results, changing the edge stiffener cross section does not influence the seismic behavior, the stiffness, the lateral resistance and the dissipated energy of SSW-BO if the stiffeners are not connected to the top and bottom beams. However, connecting the stiffeners to the beams, drastically improve the seismic behavior and hysteretic characteristics of SSW-BO. It should be noted that, in such a case, greater forces may apply to the beams which should be considered in the seismic design of these members.

Keywords

Steel plate shear wall connected to frame beams only (SSW-BO), Edge stiffener, Finite element analysis, Stiffness, Lateral strength, Dissipated energy

دیوار برشی فولادی (SPSW)^۱ از دهه ۱۹۷۰ میلادی به عنوان سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی مانند زلزله و باد، در ساختمان‌ها به ویژه در ساختمان‌های بلند مورد توجه قرار گرفته است [۱]. سیستم مذکور در دو زلزله شدید نورث‌ریچ آمریکا و کوبه ژاپن و همچنین در پژوهش‌های آزمایشگاهی، رفتار بسیار مناسبی از خود نشان داده است [۲].

ایده جداسازی ورق فولادی از ستون‌ها، به منظور کاهش نیروهای وارده به ستون‌ها مطرح گردیده است و محققین به این نتیجه رسیده‌اند که عدم اتصال ورق فولادی به ستون‌های قاب و اتصال آنها فقط به تیرهای طبقات، نقش مثبتی در تأمین ایمنی ستون‌ها و کوچکتر شدن ابعادشان دارد و در این حالت، ورق فولادی به طور مؤثرتری به کار گرفته می‌شود. از دیگر مزیت‌های این نوع دیوار، می‌توان به جلوگیری از شکست زودرس سازه، پیشگیری از کماتش موضعی ستون‌های قاب و جلوگیری از گسترش رفتار غیرخطی در ستون‌ها اشاره کرد. آنها همچنین دریافتند سیستم دیوار برشی فولادی متصل به تیر (SSW-BO)^۲ علاوه بر دارا بودن سایر مزیت‌های دیوار برشی فولادی و موارد ذکر شده، با امکان تعبیه بازشو و تأمین ملاحظات معماری، امکان استفاده به ویژه در طرح بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود را نیز دارد [۳ و ۴].

Xue و Lu [۵ و ۶] در سال ۱۹۹۴ برای اولین بار به منظور کاهش نیروهای وارده به ستون‌ها، ایده جداسازی ورق فولادی از ستون‌ها را مطرح نمودند. آنها چهار حالت مختلف اتصال دیوار برشی فولادی را در یک قاب میانی، تحت بارگذاری جانبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که عدم اتصال ورق فولادی به ستون‌های قاب و اتصال آنها فقط به تیرهای طبقات، نقش قابل توجهی در کاهش نیروی اعمالی به ستون‌ها و در نتیجه کاهش میزان آسیب در این اعضا دارد.

Guo و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۱ به بررسی آزمایشگاهی رفتار دیوار برشی فولادی متصل به تیر، با وجود سخت‌کننده لوله‌ای پرداختند. آنها دو دیوار برشی فولادی در مقیاس یک‌سوم ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. آنها دریافتند وجود سخت‌کننده در لوله‌های آزاد، ظرفیت جذب انرژی را افزایش داده است اما تأثیر آشکاری بر روی ظرفیت حمل بار و شکل‌پذیری اعضا نداشته است.

Shekasteband و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر با ورق فولادی LYS^۳ و HYS^۴ پرداختند. آنها چهار نمونه

دیوار برشی فولادی را مورد آزمایش قرار دادند که دو نمونه از آنها دارای بازشو و دو نمونه دیگر بدون بازشو بود. نمونه‌های دارای بازشو دارای یک سوراخ دایره‌ای به قطر ۱۸۰ میلی متر در وسط صفحه بودند. همچنین، دو نمونه با ورق فولادی HYS و دو نمونه با ورق فولادی LYS ساخته شدند. بر پایه نتیجه‌های آزمایشات، مقاومت حداکثر نمونه با ورق HYS حدود ۷۰ درصد بیشتر از ورق LYS به دست آمد. انرژی اتلاف شده در نمونه‌های کامل و سوراخ دار با ورق HYS نیز به ترتیب ۷۰ و ۲۱ درصد بیشتر از نمونه‌های با ورق LYS بود.

Sadat Kholerdi و Barkhordari [۹] رفتار پس‌کمانشی و مقاومت نهایی دیوارهای برشی فولادی متصل به تیر را با استفاده از روش‌های تحلیلی مدل اندرکنش ورق با قاب (PFI)، مدل نواری و روش عددی (اجزای محدود) مورد پژوهش قرار دادند. آنها سازگاری خوبی بین نتیجه‌های تحلیل اجزای محدود با مدل نواری و روش PFI مشاهده نمودند. نویسندگان این مقاله، در پژوهش دیگری [۱۰] به بررسی تأثیر شکل، ابعاد و موقعیت بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی متصل به تیر پرداختند و روشی برای تخمین سختی و مقاومت دیوار برشی متصل به تیر دارای بازشو، بر پایه استفاده از ضرایب کاهش سختی و مقاومت پیشنهاد نمودند.

در پژوهش حاضر، رفتار دیوارهای برشی متصل به تیر، با استفاده مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نخست صحت‌سنجی مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی Shekasteband و همکارانش [۸] انجام شده است. سپس، با انجام مطالعات پارامتری تأثیر مشخصات سخت‌کننده لوله‌ای، بر رفتار این سیستم بررسی شده است. در این خصوص، اولاً مقطع‌های مختلفی برای سخت‌کننده مذکور در نظر گرفته شده است. ثانیاً رفتار دیوار برشی در دو حالت اتصال سخت‌کننده به تیرهای بالا و پایین و همچنین عدم اتصال، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود و صحت‌سنجی با داده‌های

آزمایشگاهی

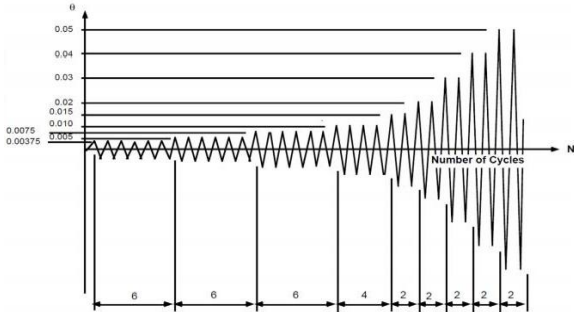
جهت حصول اطمینان از صحت مدل عددی در پیش‌بینی رفتار دیوار برشی فولادی متصل به تیر، نمونه آزمایشگاهی Shekasteband و همکارانش [۸] که یک نمونه دیوار برشی فولادی متصل به تیر، دارای ورق فولادی با مقاومت تسلیم بالا (HYS) و با مشخصات زیر است، توسط نرم افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است و نتیجه‌های بدست آمده از تحلیل، با



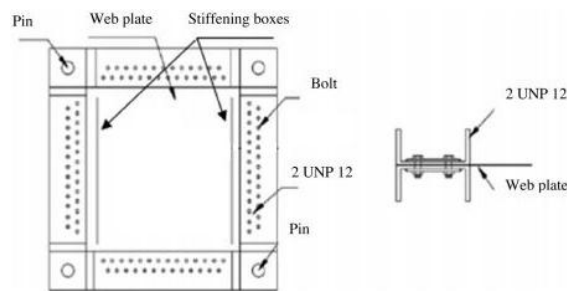
داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

قاب فولادی آزمایش شده، یک طبقه و یک دهانه بوده و به صورت مربع و با طول ضلع ۶۲۰ میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع و طول ورق فولادی نیز به ترتیب ۵۰۰ و ۴۶۰ میلی‌متر می‌باشد. دو عدد قوطی فولادی به ابعاد $۳۰ \times ۲۰ \times ۲$ میلی‌متر در هر طرف ورق فولادی، به عنوان سخت‌کننده قائم در لبه‌ها متصل هستند. فاصله بین سخت‌کننده‌ها تا ستون‌های اصلی ۲۰ میلی‌متر بوده و ارتفاع آنها نیز از بالا و پایین ۲۰ میلی‌متر از ورق فولادی کوتاه‌تر است. اتصال تیرها و ستون‌ها از نوع مفصلی بوده و ضخامت ورق فولادی نیز ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. (شکل (۱) و (۲))

شکل (۳) در برابر بار شبه‌استاتیکی چرخه‌ای قرار گرفته است. همچنین در مدل عددی یک نقص هندسی اولیه^۵، از نوع تغییر شکل و بر مبنای مود اول تحلیل فرکانسی، به اندازه یک میلی‌متر در وسط ورق فولادی لحاظ شده است.

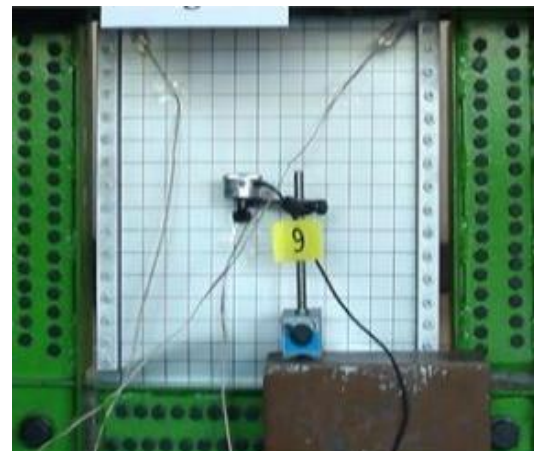


شکل ۳- پروتکل بارگذاری جانبی [۸]

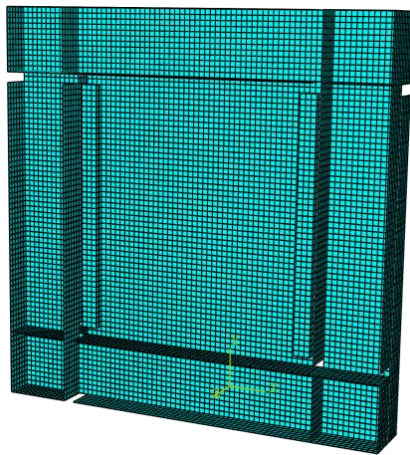


شکل ۱- نمای کلی نمونه آزمایشگاهی [۸]

با توجه به نوع مصالح فولاد، از معیار تسلیم Von-Mises. قانون جریان همبسته و سخت‌شوندگی کینماتیک غیرخطی استفاده شده است. برای کلیه عضوهای قاب از جمله تیرها، ستون‌ها، ورق فولادی و سخت‌کننده‌ها از المان پوسته‌ای (S4R) Shell و به صورت همگن^۶ استفاده شده است. المان مذکور یک المان چهار گرهی، با خاصیت انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و دارای شش درجه آزادی در هر گره می‌باشد. همچنین، شبکه‌بندی بر پایه المان‌های ۱۰×۱۰ میلی‌متر انجام شده است (شکل (۴)). به منظور تعیین اندازه المان‌ها، تحلیل‌های مختلف بر روی مدل‌های با اندازه المان متفاوت انجام شد و اندازه المان به شکلی انتخاب شد که با کوچک‌تر کردن آن تغییر قابل توجهی در نتیجه‌های تحلیل ایجاد نشود.



شکل ۲- نمونه آزمایشگاهی [۸]



شکل ۴- نمونه شبکه‌بندی شده در نرم‌افزار

مقطع‌های تیر و ستون 2UNP120 بوده و مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی آنها به ترتیب ۳۴۵ و ۳۶۰ مگاپاسکال می‌باشد. ورق فولادی با مقاومت تسلیم بالا (HYS) نیز به ترتیب دارای مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی ۳۳۸ و ۴۲۳ مگاپاسکال می‌باشد. ضریب کشسانی و نسبت پواسون به ترتیب ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ می‌باشند. نمونه مطابق پروتکل بارگذاری

A3 سخت‌کننده لبه‌ای کلاً حذف شده است تا امکان مقایسه رفتار مدل فاقد سخت‌کننده با مدل مرجع فراهم آید. در مدل‌های A4 و A5 نیز طول سخت‌کننده‌های لبه‌ای ۴۰ میلی‌متر افزایش یافته و به تیرهای بالا و پایین متصل شده است، تا اثر این موضوع نیز مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات مقطع سخت‌کننده در مدل A4 مشابه نمونه مرجع است، لکن در نمونه A5 ضخامت مقطع قوطی مورد استفاده، از دو میلیمتر به پنج میلیمتر افزایش یافته است. لازم به توضیح است در کلیه مدل‌ها، سایر مشخصات هندسی و پارامترهای دیگر نظیر مشخصات مصالح و پروتکل بارگذاری، کاملاً مشابه نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های عددی مورد بررسی

نام مدل	مقطع سخت‌کننده لبه ورق (mm)	اتصال سخت‌کننده به تیرها
A1	۲ BOX ۳۰×۲۰×۲	بدون اتصال
A2	PL ۶۰×۲	بدون اتصال
A3	فاقد سخت‌کننده	فاقد سخت‌کننده
A4	۲ BOX ۳۰×۲۰×۲	متصل
A5	۲ BOX ۳۰×۲۰×۵	متصل

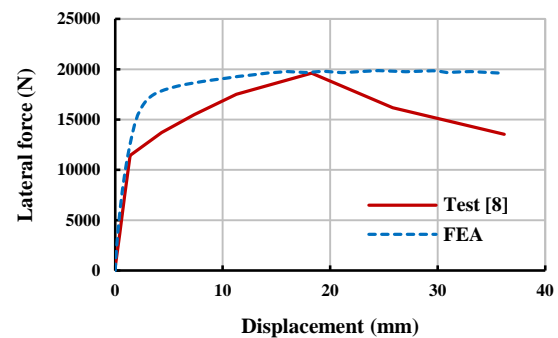
۴- بحث و بررسی نتیجه‌ها

کلیه مدل‌های معرفی شده در بخش ۳ در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شده و تحت بار جانبی تحلیل شدند. پس از آن، مشخصه‌های رفتاری این مدل‌ها شامل سختی اولیه، مقاومت حداکثر و انرژی مستهلک شده (سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان) محاسبه شده و در جدول (۲) ارائه شده‌اند. در ادامه پارامترهای مورد پژوهش، به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

جدول ۲- مشخصه‌های رفتاری نمونه‌های عددی مورد بررسی

نام نمونه	سختی اولیه (kN/mm)	مقاومت حداکثر (kN)	انرژی مستهلک شده (kN.mm)
A1	۵/۱	۱۹/۸۵	۸۳۰/۶
A2	۵	۲۰/۰۱	۸۲۱/۳
A3	۴/۲	۱۹/۴۳	۷۹۸/۱
A4	۵/۵	۳۰/۱	۱۱۷۳/۶
A5	۶/۶۶	۳۵/۹	۱۴۳۷/۱

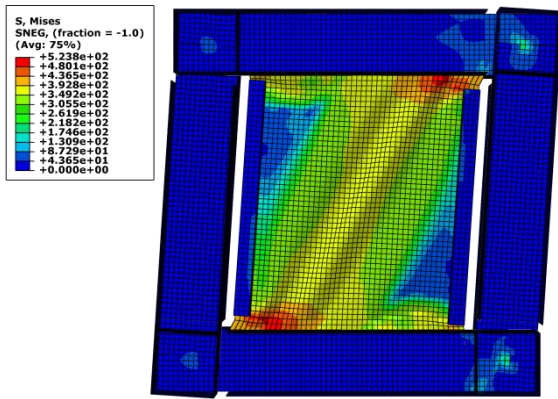
پس از انجام مراحل مدل‌سازی هندسی، تعریف مشخصات مصالح، روی هم‌گذاری قسمت‌های مختلف، تعیین نوع تحلیل و گام‌های آن، تعریف قیدهای در نظر گرفته شده، اعمال شرایط مرزی، بارگذاری و در نهایت شبکه‌بندی، تحلیل صورت پذیرفته و نتیجه آن به صورت منحنی بار-تغییر مکان، با پوش نمودار چرخه‌ای نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود، مقدارهای مقاومت حداکثر و سختی اولیه، در مدل عددی مطابقت خوبی با نتیجه‌های آزمایشگاهی دارند. هرچند افت مقاومت مشاهده شده در نمونه آزمایشگاهی پس از مقاومت حداکثر، در نمودار عددی مشاهده نمی‌شود. علت این امر، عدم مدل‌سازی خسارت در فولاد در مدل عددی می‌باشد. مدل‌سازی خسارت سبب ایجاد مشکل در همگرایی تحلیل مدل عددی و بالارفتن قابل توجه زمان تحلیل می‌شود، لذا در پژوهش حاضر از انجام این کار صرف‌نظر شده است و مقایسه مدل‌های مختلف، بر پایه پارامترهایی که مدل عددی با دقت قابل قبول قادر به پیش‌بینی آنها است، انجام شده است.



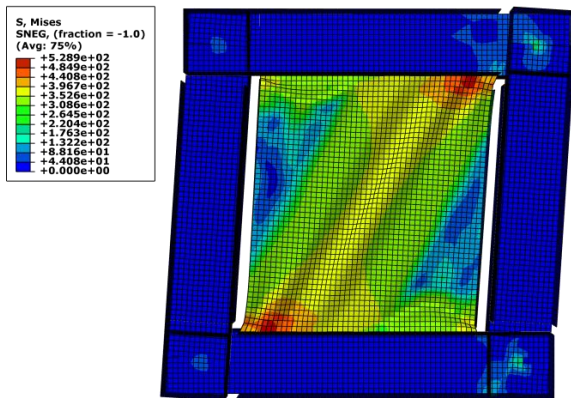
شکل ۵- منحنی بار-تغییر مکان مدل عددی (FEA) در مقایسه با پوش نمودار چرخه‌ای نمونه آزمایشگاهی

۳- مشخصات نمونه‌های عددی

به منظور بررسی تأثیر نوع و شکل سخت‌کننده لبه‌ای، بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، پنج مدل با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند. مدل A1 مدل مرجع و منطبق بر نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. در این مدل، مطابق نمونه آزمایشگاهی سخت‌کننده به تیر اتصال ندارد و از بالا و پایین ۲۰ میلی‌متر با آن فاصله دارد (طول سخت‌کننده ۴۶۰ میلی‌متر است). در مدل A2 تأثیر تغییر مقطع سخت‌کننده لبه‌ای در حالتی که مشابه مدل مرجع به تیرها اتصال ندارد، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل در دو لبه ورق از یک تسمه فولادی، عمود بر ورق دیوار استفاده شده است. در مدل



شکل ۷- توزیع تنش فون-مایسز (MPa) در مدل مرجع (A1)



شکل ۸- توزیع تنش فون-مایسز (MPa) در مدل دارای سخت‌کننده (A2) تسمه

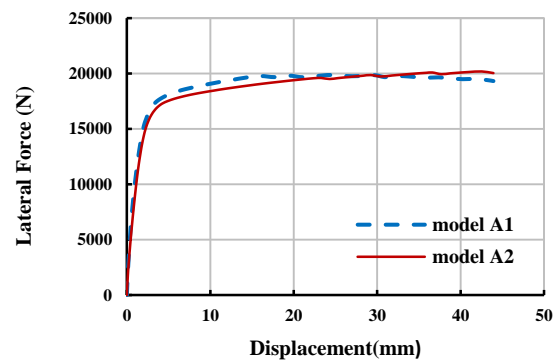
اشاره شده ندارند. مقایسه منحنی بار-تغییر مکان مدل‌های A1 و A3 در شکل (۹) انجام شده است و مشخصه‌های رفتاری آنها در جدول (۲) ارائه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حذف سخت‌کننده، سبب کاهش ۱۷ درصدی سختی اولیه و کاهش جزئی مقاومت حداکثر و انرژی مستهلک شده، شده است. لذا چنین به نظر می‌رسد که وجود سخت‌کننده قائم لبه‌ای، تأثیر زیادی در پارامترهای رفتاری نمونه و شکل کلی منحنی بار-تغییر مکان ندارد.

توزیع تنش فون-مایسز در مدل A3 در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این مدل نیز عمل میدان کشش به خوبی فعال شده است و تنها تفاوتی که در رفتار این نمونه با نمونه دارای سخت‌کننده (A1) مشاهده می‌شود، کماتش موضعی لبه‌های قائم ورق، در نمونه فاقد سخت‌کننده می‌باشد، که این موضوع نشان‌دهنده نقش مؤثر سخت‌کننده لبه‌ای در رفتار دیوار برشی فولادی متصل به تیر می‌باشد.

۴-۱- تأثیر تغییر مقطع سخت‌کننده لبه‌ای در حالت عدم اتصال به تیر

در این بخش، مدل A2 با مدل مرجع A1 مقایسه شده است و تأثیر تغییر مقطع سخت‌کننده لبه‌ای، در حالتی که سخت‌کننده به تیر اتصال ندارد، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در مدل A2 در هر سمت ورق به جای دو عدد قوطی، یک تسمه فولادی به ابعاد مقطع 60×2 میلی‌متر عمود بر صفحه فولادی در نظر گرفته شده است.

نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌های A1 و A2 در شکل (۶) و مشخصه‌های رفتاری این مدل‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود منحنی‌های بار-تغییر مکان تا حد زیادی منطبق بر یکدیگر بوده و مقدارهای مشخصه‌های رفتاری، بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند.



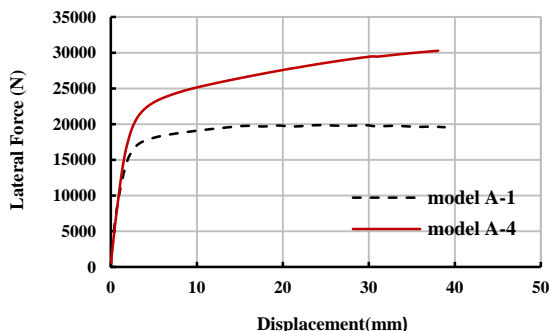
شکل ۶- اثر تغییر مقطع سخت‌کننده بر منحنی بار-تغییر مکان در حالت عدم اتصال به تیر

کانتور تنش فون-مایسز مدل‌های A1 و A2 نیز به ترتیب در شکل (۷) و (۸) ارائه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر دو مدل باربری جانبی دیوار، با استفاده از عمل میدان کشش در ورق انجام شده است. همچنین، توزیع تنش در ورق در دو مدل بسیار شبیه به یکدیگر بوده و مقدارهای حداکثر تنش ایجاد شده نیز، نزدیک به یکدیگر می‌باشند. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که تغییر شکل مقطع سخت‌کننده قائم لبه‌ای از قوطی به تسمه، در حالت عدم اتصال سخت‌کننده به تیرها، تأثیر چندانی بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر ندارد.

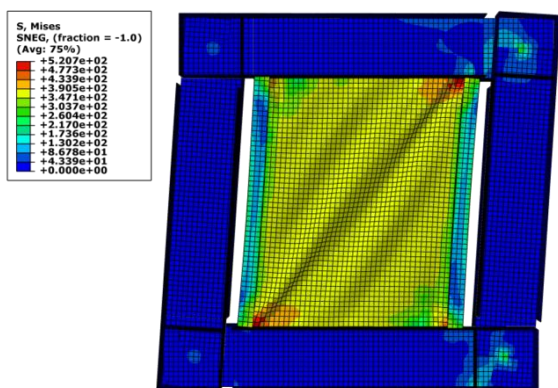
۴-۲- تأثیر حذف سخت‌کننده قائم لبه‌ای

در این بخش مدل A3 که فاقد سخت‌کننده قائم لبه‌ای است با مدل مرجع A1 مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است این دو نمونه، هیچ‌گونه تفاوت هندسی و ساختاری با یکدیگر به جز در مورد

بررسی توزیع تنش فون-مایسز در مدل A4 (شکل ۱۲)) نشان می‌دهد که در این حالت، وجود سخت‌کننده‌های متصل به تیرها، نوعی سیستم خریابی در دیوار برشی فولادی ایجاد می‌کند و سخت‌کننده‌ها با تحمل نیروی محوری، سبب افزایش ظرفیت باربری سیستم می‌شوند. همچنین، مشاهده می‌شود مشابه حالات قبل، تمرکز تنش در گوشه‌های ورق وجود دارد و عمل میدان کشش و استفاده از ظرفیت پس‌کمانش ورق، همچنان در افزایش ظرفیت باری موثر است.



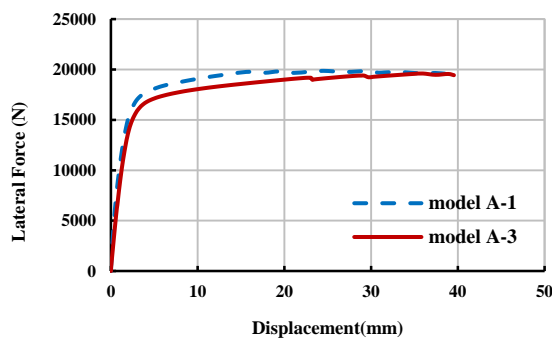
شکل ۱۱- اثر اتصال سخت‌کننده به تیرها بر منحنی بار-تغییر مکان



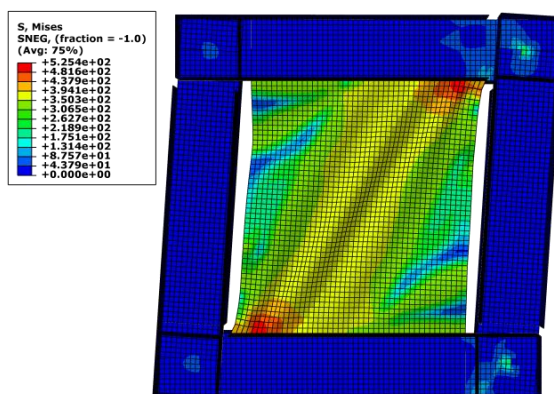
شکل ۱۲- توزیع تنش فون-مایسز (MPa) در مدل دارای سخت‌کننده متصل به تیرها (A4)

۴-۴- تأثیر افزایش ابعاد مقطع سخت‌کننده‌های لبه‌ای در حالت متصل به تیرها

در این بخش به بررسی تأثیر افزایش ابعاد مقطع سخت‌کننده‌های قائم لبه‌ای، در حالت متصل به تیرها، بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر پرداخته شده است. بدین منظور در مدل A5 از سخت‌کننده قوطی با مقطع $30 \times 20 \times 5$ BOX ۲ استفاده شده است. سایر مشخصات این مدل مشابه مدل A4



شکل ۹- اثر حذف سخت‌کننده قائم بر منحنی بار-تغییر مکان

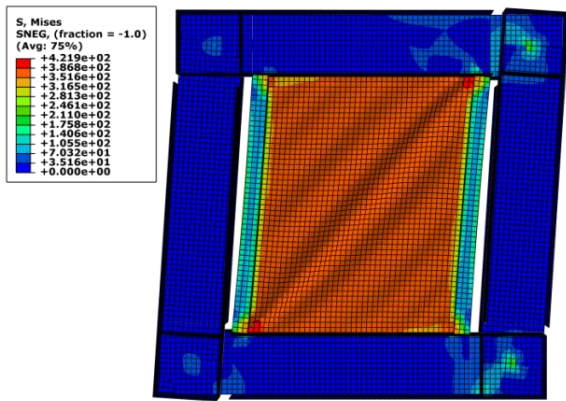


شکل ۱۰- توزیع تنش فون-مایسز (MPa) در مدل فاقد سخت‌کننده (A3)

۳-۴- تأثیر اتصال سخت‌کننده قائم لبه‌ای به تیرها

در این بخش تاثیر اتصال سخت‌کننده‌های لبه‌ای به تیرهای بالا و پایین بررسی می‌گردد. در مدل A4 طول سخت‌کننده لبه‌ای معادل ۵۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است و فاصله ۲۰ میلیمتری بین انتهای سخت‌کننده و تیرها حذف شده است. مقطع سخت‌کننده و سایر مشخصات این مدل، مشابه مدل مرجع می‌باشد. بررسی تأثیر اتصال سخت‌کننده به تیرها، با مقایسه نتایج‌های مدل‌های A1 و A4 انجام می‌شود. مقایسه منحنی بار-تغییر مکان مدل‌های مذکور در شکل (۱۱) انجام شده است و مشخصه‌های رفتاری آنها در جدول (۲) ارائه شده است.

همانطور که در جدول (۲) و شکل (۱۱) مشخص است اتصال سخت‌کننده به تیرها، سبب افزایش ظرفیت جانبی دیوار در حدود ۳۰ درصد شده است. همچنین، انرژی جذب‌شده توسط سیستم نیز حدود ۲۸ درصد افزایش داشته است، لیکن تأثیر آن بر سختی اولیه دیوار کمتر از مقاومت و انرژی مستهلک‌شده بوده است.



شکل ۱۴- توزیع تنش فون-مایسز (MPa) در مدل دارای سخت کننده متصل به تیرها با مقطع بزرگتر (A5)

به تیرهای بالا و پایین می‌باشد. مهمترین نتیجه‌های به دست آمده در ادامه ارائه می‌شوند. شایان ذکر است که نتیجه‌های کمی، بر پایه الگوسازی اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS به دست آمده‌اند و برای نمونه‌های مورد بررسی، برقرار می‌باشند.

۱- در حالتی که سخت کننده لبه‌ای به تیرهای بالا و پایین اتصال ندارد، تغییر مقطع آن از قوطی به تسمه تاثیر چندانی بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر و مشخصه‌های لرزه‌ای آن ندارد.

۲- وجود سخت کننده قائم لبه‌ای بدون اتصال به تیرهای بالا و پایین، تاثیر چندانی در تغییر مشخصه‌های رفتاری نمونه شامل سختی، مقاومت و استهلاک انرژی و شکل کلی منحنی بار- تغییر مکان ندارد. لکن سخت کننده لبه‌ای از کماتش موضعی لبه‌های آزاد ورق جلوگیری می‌کند.

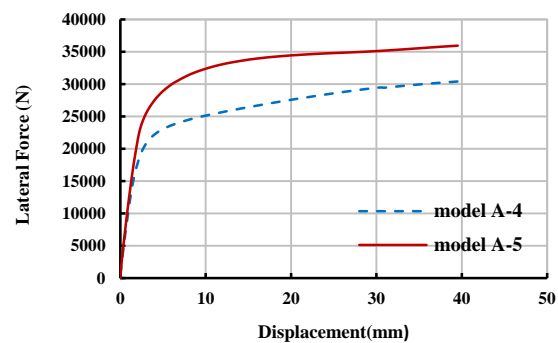
۳- اتصال سخت کننده به تیرهای بالا و پایین، سبب بهبود قابل توجه عملکرد لرزه‌ای سیستم و افزایش سختی، مقاومت جانبی و استهلاک انرژی گردید. در این حالت مجموعه ورق و سخت کننده‌ها با بهره‌گیری از یک مکانیزم خرابایی در تحمل بار جانبی مشارکت می‌کنند. شایان ذکر است که این امر می‌تواند سبب اعمال نیروی بیشتری به تیرها گردد که این موضوع می‌بایست در طراحی این اعضا لحاظ شود.

۴- افزایش ۲/۱۷ برابری مساحت سخت کننده قائم متصل به تیرها، به ترتیب سبب ۲۱٪، ۱۹٪ و ۲۲٪ افزایش در سختی اولیه، مقاومت جانبی و انرژی مستهلک شده گردید. بنابراین، در این حالت، مقطع لحاظ شده برای سخت کننده صرفاً نقش جلوگیری از کماتش موضعی لبه‌های ورق را ندارد و مستقیماً در مشخصه‌های رفتاری نمونه نیز تاثیرگذار است.

در نظر گرفته شده است. مساحت سخت کننده در مدل A5، ۲/۱۷ برابر مدل A4 می‌باشد.

شکل (۱۳) منحنی‌های بار-تغییر مکان مدل‌های A4 و A5 را نشان می‌دهد و مشخصه‌های رفتاری نمونه‌ها هم در جدول (۲) ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ابعاد سخت کننده در مدل A5 به ترتیب سبب ۲۱٪، ۱۹٪ و ۲۲٪ افزایش در سختی اولیه، مقاومت جانبی و انرژی مستهلک شده نسبت به نمونه A4 شده است. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، در صورت اتصال سخت کننده به تیرها، ایجاد تنش‌های محوری در این عضو به همراه ایجاد عمل میدان کشش در ورق، با یک مکانیزم خرابایی، سبب افزایش ظرفیت باربری سیستم می‌شود، لذا افزایش ابعاد مقطع سخت کننده منجر به بهبود قابل توجه مشخصه‌های لرزه‌ای سیستم شده است. شایان ذکر است که این امر می‌تواند سبب افزایش نیروی اعمالی به تیر شود و در صورتی که تیر برای این نیرو طراحی نشده باشد، سبب ایجاد آسیب در این عضو شود.

افزایش ابعاد سخت کننده، با توجه به شکل (۱۴) سبب توزیع تنش یکنواخت‌تری در مدل A5 نسبت به مدل A4 شده است. در این حالت، تمرکز تنش کمتری در گوشه‌های ورق فولادی مشاهده می‌شود. در این حالت با وجود افزایش قابل توجه ظرفیت باربری، حداکثر تنش ایجاد شده در ورق فولادی حدود ۲۰٪ کاهش یافته است. بنابراین، در این حالت از ظرفیت باربری جانبی ورق فولادی استفاده بهینه‌تری شده است.



شکل ۱۳- اثر تغییر مقطع سخت کننده بر منحنی بار-تغییر مکان در حالت متصل به تیرها

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر، با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. تمرکز تحقیق بر روی مشخصات و اتصال سخت کننده‌های لبه‌ای

of the Seventeenth Czech and Slovak International Conference on Steel Structures and Bridge, pp. 152-160.

- [6] Xue, M. and Lu, L.W. (1994), "Influence of steel shear wall panels with surrounding frame members", In: Proceedings of SSRC Annual Technical Session, pp. 339-354.
- [7] 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, Vol. 11, pp. 467-479.
- [8] Shekasteband, B., Azaraxsh, A. and Showkati H. (2017), "Experimental and numerical study on seismic behavior of LYS and HYS steel plate shear walls connected to frame beams only", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 17, pp. 154-168.

[۹] سادات خلردی، س.ا. و برخورداری، م.ع. (۱۳۹۳)، "تأثیر فولاد نرم و تغییرات ضخامت ورق در رفتار پس کمانشی و مقاومت نهایی دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، جلد ۱۵، ص. ۲۹-۳۸.

[۱۰] پورحسن شهری، م. و منصور، ع. (۱۳۹۷)، "بررسی تأثیر شکل، ابعاد و موقعیت بازشو بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی متصل به تیر"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، (پذیرفته شده).
Doi:10.22065/JSC.2019.145514.1653

افزایش ابعاد سخت‌کننده در این حالت همچنین، سبب توزیع یکنواخت‌تر تنش در ورق فولادی شده است و میزان تمرکز تنش در گوشه‌های ورق را کاهش داد.

۷- مراجع

- [۱] صبوری قمی، س. (۱۳۸۰)، "سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی: مقدمه ای بر دیوارهای برشی فولادی"، انتشارات انگیزه.
- [2] Astaneh-Asl, A. (2001), "Seismic behavior and design of steel shear walls", Steel Tips, Structural Steel Educational Council, Technical Information and Product Service.
- [3] Jahanpour, A., Moharrami, H. and Aghakoochak, A. (2011), "Evaluation of ultimate capacity of semi-supported steel shear walls", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, pp. 1022-1030.
- [4] 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 Constructional Steel Research, Vol. 106, NO. 1, pp. 198-208.
- [5] Xue, M. and Lu, L.W. (1994), "Monotonic and cyclic behavior of in-filled steel shear panels", In: Proceedings

پی نوشت

- ¹ Steel plate shear wall
- ² Steel plate shear wall connected to frame beams only
- ³ Low yield strength
- ⁴ High yield strength
- ⁵ Imperfection
- ⁶ Homogeneous

