

تقویت دیوار برشی فولادی پس از ایجاد گشودگی

ابوالفضل عربزاده* (دانشیار)

مهرداد شفیعی علویچه (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (۳۲-۲، شماره ۲/۲، ص. ۱۱۷-۱۲۴، یادداشت شفی)

از جمله مزایای دیوار برشی فولادی، در کنار سرعت و هزینه‌ی ساخت مناسب و همچنین موارد سختی اولیه، مقاومت و شکل‌پذیری بالای آن، امکان تعمیم‌دهی گشودگی در هر محل دلخواه از پانل فولادی است. در این پژوهش ابتدا دیوارهایی با ضخامت ورق، نسبت ابعاد پانل و درصد گشودگی متفاوت در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی و روابطی که در گذشته برای تخمین میزان کاهش سختی و مقاومت ناشی از گشودگی پیشنهاد شده بود، اصلاح شده است. همچنین مشخصات لازم برای المان‌های تقویتی به‌گونه‌ی تعیین شده است که رفتار دیوار با و بدون گشودگی تحت بارگذاری مونوتونیک یکسان و روابطی نیز برای این منظور پیشنهاد شده است. نتایج حاکی از آن است که در صورت تقویت دیوار با روش پیشنهادی، رفتار دیوار و تنش وارده از ورق به قاب در دو حالت یکسان می‌شود و می‌توان از وجود گشودگی صرف‌نظر و دیوار را به روش‌های مرسوم مانند روش نواری مدل‌سازی کرد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی، گشودگی، تحلیل عددی، اجزاء محدود غیرخطی.

arabzade@modares.ac.ir
shafieemehrdad@yahoo.com

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر با بلندتر شدن سازه‌ها و نیاز به سیستم‌های باربر جانبی با سختی بالا، توجه بیشتری به دیوارهای برشی فولادی صورت گرفته است. دیوار برشی فولادی یک سیستم باربر جانبی متشکل از یک صفحه‌ی فولادی عمودی است که به تیرها و ستون‌های اطراف متصل و در یک یا چند دهانه در ارتفاع سازه نصب می‌شود. مطالعات گسترده‌ی که در زمینه‌ی دیوارهای برشی فولادی انجام شده است، نشان از سختی اولیه، مقاومت، شکل‌پذیری، و جذب انرژی بالای این سیستم تحت بار چرخه‌ی دارد که آن را برای مقاومت در برابر بارهای لرزه‌ی مناسب می‌کند. دیوارهای فولادی هم برای طراحی سازه‌های جدید و هم برای بهسازی سازه‌های موجود استفاده می‌شوند. اتصالات تیر و ستون در دیوارهای برشی فولادی می‌تواند ساده و یا خمشی باشند. از آنجا که ضخامت ورق در دیوارهای ذکر شده نسبتاً کوچک است، تحت بارهای جانبی کوچک کماتش می‌کنند؛ اما اساس ایده‌ی دیوار برشی فولادی نازک بهره‌گیری از میدان کشش^۱ قطری است، که پس از کماتش ورق فولادی ایجاد می‌شود و در واقع اصل باربری دیوارهای ذکر شده بعد از کماتش ورق اتفاق می‌افتد. البته دیوارهای برشی فولادی به دو صورت سخت شده و سخت نشده استفاده می‌شوند، که در دیوارهای سخت نشده جذب انرژی به دلیل پدیده‌ی پینچینگ^۲ کمتر خواهد بود، اما مصرف فولاد کمتری نیز خواهد داشت. در مقایسه با مهاربند ضربدری مشاهده می‌شود که در مهاربند، قطر فشاری کماتش می‌کند و باربری خود را از دست

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۶، اصلاحیه ۱/۱۳۹۳، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۱۴.

۲. مروری بر مطالعات انجام شده

می‌دهد، اما در دیوارهای مذکور تمام ورق در باربری مشارکت می‌کند؛ از این رو با یک مصرف فولاد یکسان، سختی و مقاومت آن‌ها تقریباً دو برابر مهاربند ضربدری خواهد بود.^[۱] البته نیروی کششی قابل توجهی از طرف ورق به قاب وارد می‌شود، که می‌تواند در طراحی المان‌های مرزی دیوار در ساختمان‌های کوتاه‌تر تعیین‌کننده باشد.

برای مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است؛ مانند روش مهاربند معادل و یا روش نواری که ورق را با یک سری المان‌های خرابایی جایگزین و رابطه‌ی نیز برای این المان‌ها ارائه می‌کند.^[۲] همچنین در نرم‌افزارهایی که می‌توان در آن‌ها مشخصات مصالح متفاوتی را در جهات مختلف تعریف کرد، استفاده از روش پوسته‌ی ارتوتروپیک مناسب خواهد بود.^[۳]

در مورد اثر گشودگی در رفتار دیوارهای مذکور مطالعات گسترده‌ی صورت گرفته، که بیشتر آن‌ها به نتایج کیفی منتج شده است.

مطالعات در مورد دیوارهای سوراخ‌دار انجام شده نشان می‌دهد که سوراخ‌ها باعث کاهش مقاومت و سختی می‌شوند، ولی توزیع تنش در پانل را یکنواخت‌تر می‌کنند، نیاز شکل‌پذیری المان‌های قاب را کاهش می‌دهند، و می‌توانند در زمانی که فولاد نرم در دسترس نیست، مناسب باشند. میزان کاهش سختی و مقاومت ناشی از سوراخ‌ها را می‌توان با روابط پیشنهاد شده در برخی پژوهش‌ها در این زمینه،^[۴] محاسبه کرد.

در مورد اثر گشودگی مستطیل شکل، یک مطالعه آزمایشگاهی در سال ۱۹۹۲ انجام شده،^[۶] و این نتیجه به دست آمده است که سختی و مقاومت این دیوارها را می توان با نسبت قطر گشودگی به ارتفاع پانل کاهش داد (رابطه ۱):

$$F_o = F(1 - \frac{D}{h}), \quad K_o = K(1 - \frac{D}{h}) \quad (1)$$

که در آن، F_o و K_o مقاومت و سختی دیوار با گشودگی هستند. در مطالعه ای انجام شده ای آلمان محدود دیگری در سال ۲۰۱۲^[۷] نتیجه گرفته شده است که در مورد دیوارهای سخت شده، محل گشودگی اهمیتی ندارد و سختی و مقاومت را می توان با نسبت طول گشودگی به طول دیوار کاهش داد و در دیوارهای سخت نشده، این کاهش متناسب با قطر گشودگی به طول دیوار خواهد بود. البته تأثیر نسبت ابعاد پانل و گشودگی در این روابط مشاهده نشده است، که در این پژوهش پارامترهای مذکور نیز بررسی شده است.

برای تسلیم تمام ورق در کرنش لازم است المان های مرزی آن سختی کافی برای تأمین تکیه گاه لازم برای میدان کشش داشته باشند. در پژوهشی در سال ۲۰۰۱^[۸] روابط ۲ به ترتیب برای کمینگی ممان اینرسی لازم ستون ها و تیرها پیشنهاد شده است، که در آیین نامه ای AISC نیز مورد استفاده قرار گرفته است:^[۹]

$$I_c = \frac{0.0030 \gamma t_w h^4}{L}, \quad I_b = \frac{0.003(\Delta t_w) L^4}{h} \quad (2)$$

که در آن، L و h طول و ارتفاع پانل و t_w ضخامت ورق هستند. البته بررسی هایی که در این پژوهش انجام شده است، نشان از نادرست بودن و بیش از حد محافظه کارانه بودن این روابط دارد؛ ضمن اینکه مطالعه ای آلمان محدودی که در سال ۲۰۱۲^[۱۰] در مورد تقویت دیوار با گشودگی با رابطه ای پیشنهادی آیین نامه ای AISC انجام شده، نیز مؤید این مطلب است.

۳. مدل سازی و صحت سنجی مدل

برای مدل سازی از نرم افزار آلمان محدود آباکوس استفاده شده است. دیوارهای مدل شده به صورت یک طبقه و با قاب خمشی بوده و تحت بارگذاری مونوتونیک بررسی شده اند و در واقع اثر لنگر خمشی ناشی از تعداد طبقات و همچنین اثرات مربوط به رفتار چرخشی در نتایج مشاهده نشده است. دیوارها از نوع قاب خمشی بوده و ورق و قاب به صورت یک پارچه^۳ مدل شده اند. تغییر مکان المان مرزی پایین دیوار بسته و بار جانبی به تیر بالایی وارد شده است. منحنی تنش کرنش تعریف شده مربوط به رفتار واقعی فولاد ST۳۷ با تنش تسلیم 2813 kg/cm^2 و تنش نهایی 5414 kg/cm^2 است. مدل کردن خرابی^۴ در این دیوارها نیازمند تعریف منحنی خرابی مربوط به آن فولاد و همچنین استفاده از مش بسیار ریز (در حدود 5 mm) است، از این رو معمولاً بارگذاری تا جایی ادامه پیدا می کند که کرنش خمیری تجمع می (در نرم افزار با PEEQ نشان داده می شود) که در فولاد ایجاد می شود به مقدار بحرانی آن که از روی مدل کردن نمونه آزمایشگاهی تعیین می شود، برسد؛ اما تحت بارگذاری مونوتونیک لازم است جابه جایی های بسیار بزرگی به دیوار وارد شود تا به کرنش بحرانی برسد و از این رو دیوارها تا تغییر مکان نسبی ۵٪ جابه جا شده اند. برای مش بندی دیوارها از المان شل ۴ گرهی با انتگرال گیری کامل (در نرم افزار با S۴ نشان داده می شود) استفاده شده است.

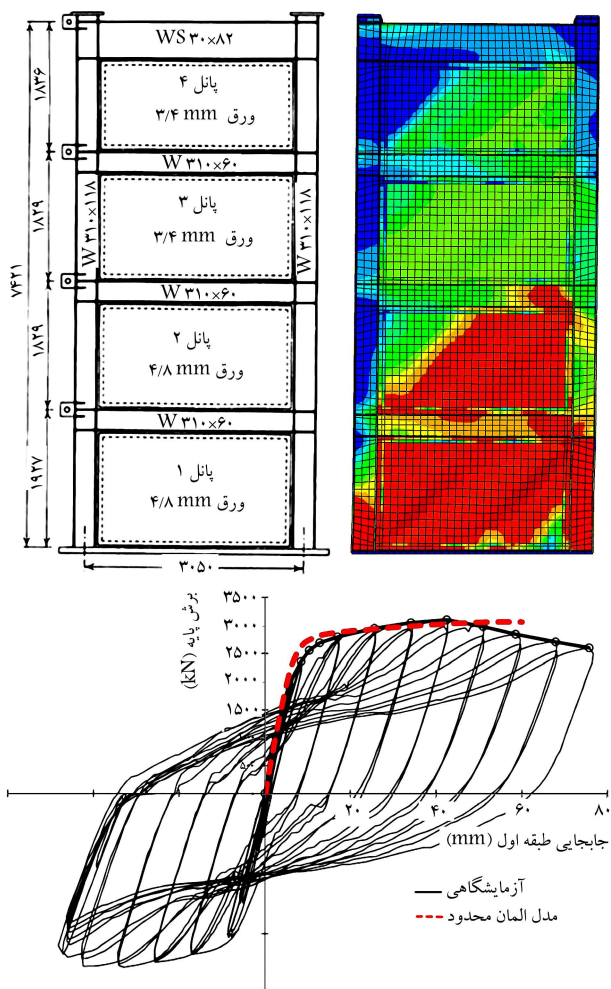
برای مدل کردن نقص اولیه به این ترتیب عمل شده است که ابتدا بر روی دیوارها تحلیل کماتشی انجام شده و از موقعیت تغییر شکل یافته ی گره ها خروجی گرفته شده و ترکیب خطی آن ها به عنوان نقص اولیه برای دیوار تعریف شده است.

از آنجایی که در تحلیل ضمنی^۵ مورد استفاده در این پژوهش در هنگام کماتش ورق واگرایی تحلیل اتفاق می افتد، لازم است از یک ضریب میرایی برای تحلیل استفاده شود که در اینجا پیش فرض نرم افزار (۰/۰۰۰۲) مناسب بوده است.^[۱۱]

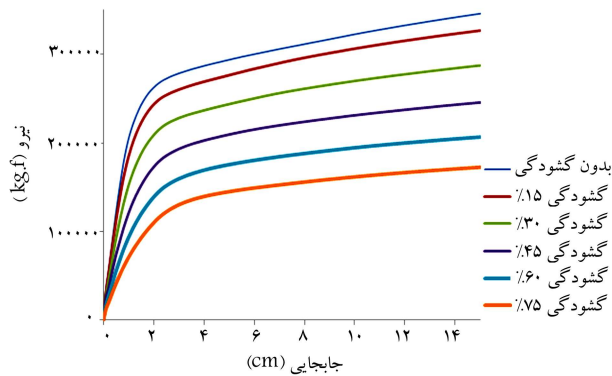
پیش از مدل سازی دیوارها در نرم افزار لازم است ابتدا مدل با نمونه های آزمایشگاهی صحت سنجی شود. برای این منظور ابتدا مدل با نمونه ی آزمایشگاهی دراپور^۶،^[۱۲] مقایسه شده است. ابعاد نمونه و ضخامت ورق ها در شکل ۱ ارائه شده است.

یک مقایسه ی دیگر با نمونه ی صبوری قسمی و سجادی (۱۳۸۹) انجام شده است.^[۱۳] ابعاد ورق در این دیوار $96 \times 141 \times 0.2 \text{ cm}$ بوده و تحت بارگذاری جانبی چرخشی بر روی تیر بالایی قرار گرفته است. برای قاب و ورق از نوع فولاد مختلف با تنش های تسلیم 4149 kg/cm^2 و 1924 kg/cm^2 استفاده شده و اتصال ورق و قاب به کمک یک نبشی و به صورت جوش کامل است. در شکل ۲، منحنی نیرو - تغییر مکان دیوار مذکور با نمونه ی ساخته شده در نرم افزار مقایسه شده است.

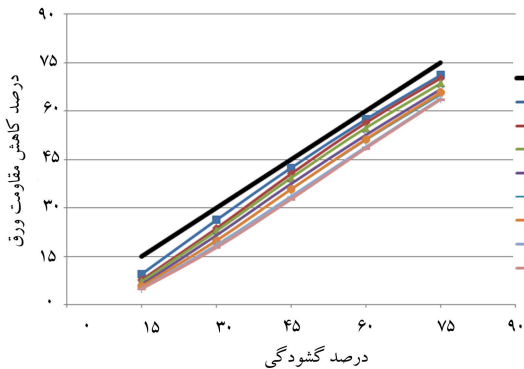
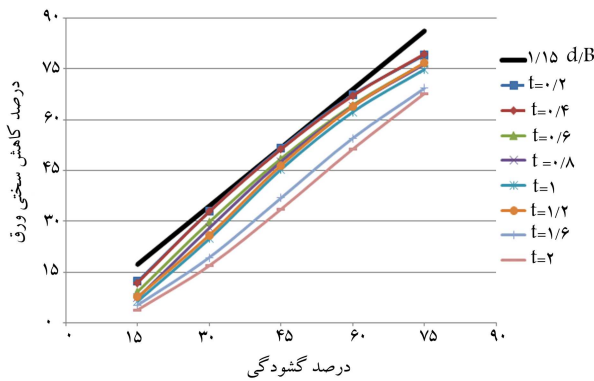
با توجه به مونوتونیک بودن بارگذاری های در این پژوهش، فقط یکسان بودن سختی و مقاومت مدل با نمونه ی آزمایشگاهی کفایت می کند و همان طور که مشاهده می شود، انطباق قابل قبولی بین آن ها وجود دارد.



شکل ۱. مقایسه ی رفتار مدل عددی با نمونه ی آزمایشگاهی دراپور (۱۹۹۷).



شکل ۳. نمودار نیرو - تغییر مکان دیوارهای با ضخامت ۴ میلی متر و درصدهای گشودگی مختلف.

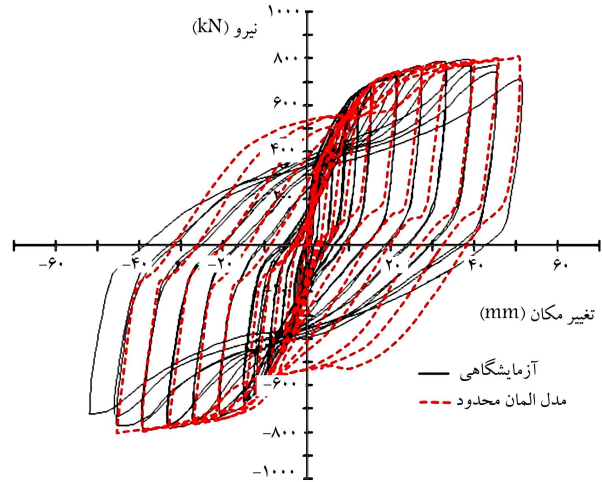
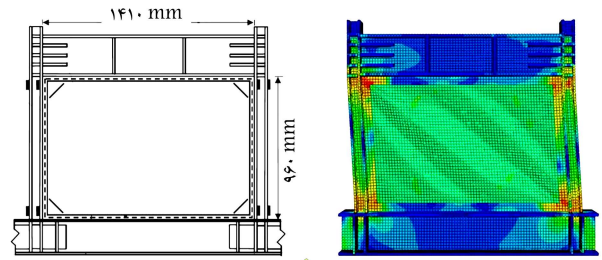


شکل ۴. درصد کاهش سختی و مقاومت ورق‌های با ضخامت‌های مختلف ناشی از گشودگی‌های متفاوت.

مقاومت در ضخامت‌های مختلف یکسان است. از طرفی مشاهده می‌شود که شیب خطوط ذکر شده با شیب خط d/B یعنی نسبت قطر گشودگی به طول پانل، که صبوری و همکاران پیشنهاد داده‌اند، یکسان است؛ ولی این نسبت برای کاهش سختی ورق محافظه‌کارانه نیست و برای این منظور یک ضریب $1/15$ برای آن لازم است.

در گام بعد، این درصد کاهش برای نسبت‌های ابعاد مختلف پانل بررسی شده است. براساس پیشنهاد AISC نسبت طول به ارتفاع پانل می‌تواند بین $0/8$ تا $2/5$ باشد و در اینجا ۵ نسبت ابعاد مختلف در این بازه بررسی شده است. درصد کاهش سختی و مقاومت مربوط به این نمونه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در مورد کاهش سختی ورق، همان



شکل ۲. مقایسه رفتار مدل عددی با نمونه‌ی آزمایشگاهی صبوری قمی (۱۳۸۹).

۴. اثر گشودگی در رفتار دیوار

از آنجایی که میدان کشش از روی قطر پانل شروع می‌شود و در کل ورق گسترش می‌یابد و دیوار عملاً تحت بار رفت و برگشتی قرار می‌گیرد، قاعدتاً بحرانی‌ترین حالت برای محل گشودگی، در وسط ورق خواهد بود. همچنین هر چه سختی المان‌های مرزی کمتر باشد، تمرکز تنش بر روی قطر بیشتر خواهد بود و از این رو در تمامی مدل‌ها، المان‌های مرزی براساس کمینه‌ی ممان اینرسی پیشنهادی AISC که در قبل اشاره شده است، طراحی شده‌اند. گشودگی‌ها به صورت مربع‌شکل در نظر گرفته شده‌اند، زیرا در مورد گشودگی‌های مستطیلی (با قطر یکسان)، کاهش سختی و مقاومت کمتری حاصل شده است. گشودگی‌ها برای ۵ حالت مختلف با نسبت قطر گشودگی به طول پانل ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد در نظر گرفته شده و در گام اول برای ابعاد پانل $3 \times 4 \text{ m}$ و ۸ ضخامت مختلف، دیوارها تحت بارگذاری مونوتونیک قرار داده شده و کاهش سختی و مقاومت آن‌ها به دست آمده است. برای نمونه، نمودارهای مربوط به ورق با ضخامت ۴ mm در شکل ۳ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تغییر مکان معادل نقطه‌ی تسلیم با بزرگ‌تر شدن گشودگی، افزایش می‌یابد؛ البته این به معنی کاهش شکل‌پذیری دیوار نخواهد بود، چرا که خرابی نیز در این مدل‌ها دیرتر اتفاق می‌افتد. تعیین تأثیر گشودگی در شکل‌پذیری دیوار نیازمند مطالعات بیشتر است.

در شکل ۴، درصد کاهش سختی و مقاومت ورق برای ضخامت‌های ورق مختلف و درصد گشودگی‌های متفاوت ارائه شده است.

از نمودارهای شکل ۴ می‌توان دریافت درصد کاهش سختی و مقاومت ورق‌های با ضخامت کوچک‌تر، بیشتر است؛ همچنین این کاهش به صورت خطی و شیب خطوط برای ضخامت‌های مختلف یکسان است. در واقع، نرخ کاهش سختی و

۵. تقویت دیوار با گشودگی

در اینجا الگویی برای تقویت دیوار با گشودگی ارائه شده است، تا سختی و مقاومتی مشابه دیوار بدون گشودگی داشته باشد. باید توجه داشت استفاده از سخت‌کننده برای تقویت این دیوارها نمی‌تواند راهکار مناسبی باشد، زیرا در صورتی که عملکرد سخت‌کننده‌ها فقط جلوگیری از کمناش ورق باشد، افزایش مقاومتی که به این طریق حاصل می‌شود، ۱۵٪ خواهد بود. مقاومت ورق به ترتیب برای حالت کاملاً سخت شده و ورق نازک مطابق روابط ۴ خواهد بود (با فرض زاویه‌ی ۴۵ درجه برای میدان کشش):

$$F = \left(\frac{\sigma_o}{\sqrt{3}}\right)bt, \quad F = \left(\frac{\sigma_o}{3}\right)bt \quad (4)$$

که نسبت آن‌ها برابر ۱/۱۵ خواهد بود. البته عملاً به دلیل توزیع بهتر تنش در حالت سخت شده و همچنین کمناش ورق پس از تسلیم، افزایش مقاومت حاصل بیش از ۱۵٪ خواهد بود، اما در هر صورت برای گشودگی‌های بزرگ نمی‌توان از این روش استفاده کرد. از طرفی استفاده از سخت‌کننده‌های مایل نیز نتایجی حتی ضعیف‌تر از سخت‌کننده‌های افقی و قائم می‌دهد، چرا که آنچه در تقویت این دیوارها اهمیت دارد، اصلاح میدان کشش در ورق است، که با استفاده از سخت‌کننده‌های مایل حاصل نخواهد شد.

یکی از حالاتی که می‌تواند منجر به رفتار یکسان دیوار با و بدون گشودگی شود، استفاده از المان‌های مرزی در اطراف گشودگی است. البته باید توجه داشت که سختی و مقاومت المان‌های مرزی در مقایسه با سختی و مقاومت کل ناچیز است و نقش آن‌ها یکسان‌کردن میدان کشش در دو حالت است. برای این منظور، برقراری دو شرط برای المان‌های مذکور لازم است:

۱. ممان اینرسی داخلی صفحه‌ی کافی برای تأمین تکیه‌گاه لازم برای تشکیل میدان کشش کامل در ورق؛

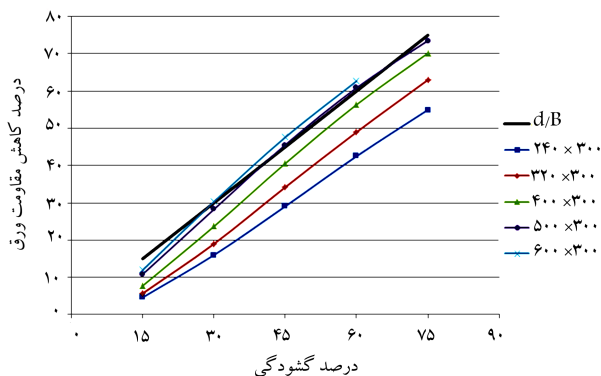
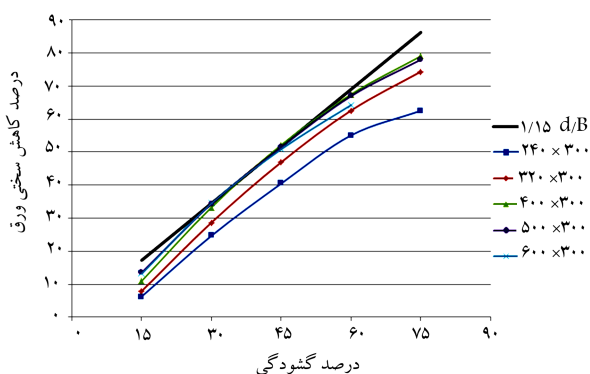
۲. ممان اینرسی خارج صفحه‌ی کافی برای محدودکردن تغییرشکل خارج صفحه‌ی ورق.

در مرحله‌ی اول، ممان اینرسی داخلی صفحه‌ی این المان‌ها بررسی شده است. قاعدتاً این مقدار باید از همان الگویی تبعیت کند که برای کمینگی ممان اینرسی قاب در AISC پیشنهاد داده شده است، اما مقاطع حاصل از این رابطه بیش از حد محافظه‌کارانه هستند و با مقادیر کوچک‌تر نیز می‌توان به نتایج دلخواه رسید. از این رو ابتدا رابطه‌ی ذکر شده به دست آمده است. برای این منظور فرضیاتی برای مدل‌ها در نظر گرفته شده است، از جمله: رفتار خمیری کامل برای فولاد ورق به منظور بکنواخت شدن تنش وارد به المان‌های مرزی، جلوگیری از تغییرشکل قائم تیر برای صرف نظر کردن از اثرات خمش، ارتجاعی فرض کردن ستون‌ها برای جلوگیری از اثرگذاری شکل ستون، و نحوه‌ی تسلیم شدن آن در نتایج.

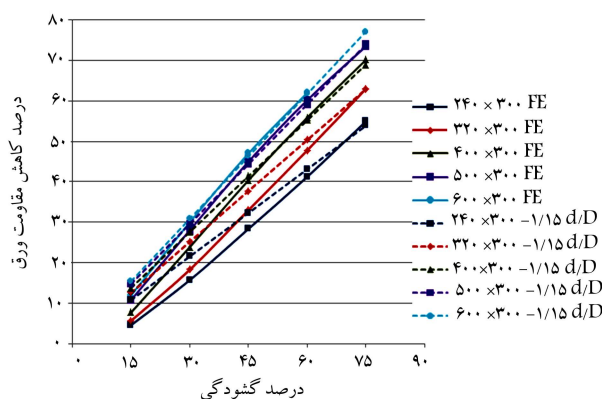
در شکل ۷، اثر تغییر ضخامت ورق در کمینگی ممان اینرسی لازم برای ستون‌ها به منظور تسلیم کامل ورق مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۷، مشابه رابطه‌ی AISC ارتباط خطی بین این دو پارامتر وجود دارد.

در گام بعد کمینگی ممان اینرسی لازم برای ستون‌ها با تغییر در ارتفاع پانل بررسی شده است، به این معنی که برای هر ارتفاع پانل، ممان اینرسی‌های مختلف برای المان مرزی در نظر گرفته شده و کمینگی ممان اینرسی که باعث تسلیم کامل در ورق می‌شود، انتخاب و یک نقطه بر روی نمودار حاصل شده است (شکل ۸).



شکل ۵. درصد کاهش سختی و مقاومت ورق‌های با نسبت ابعاد مختلف ناشی از گشودگی‌های متفاوت.

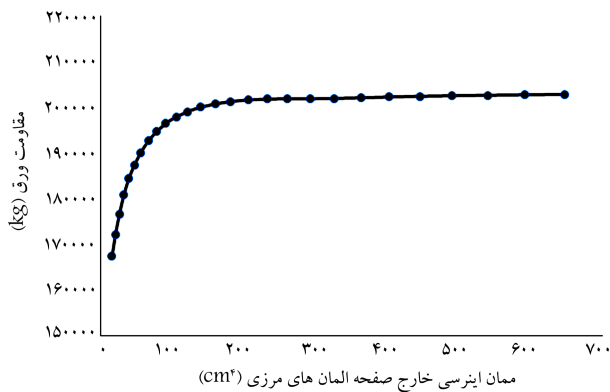


شکل ۶. مقایسه‌ی کاهش مقاومت دیوارهای با نسبت ابعاد مختلف با مقادیر مربوط به رابطه‌ی ۱/۱۵ d/D.

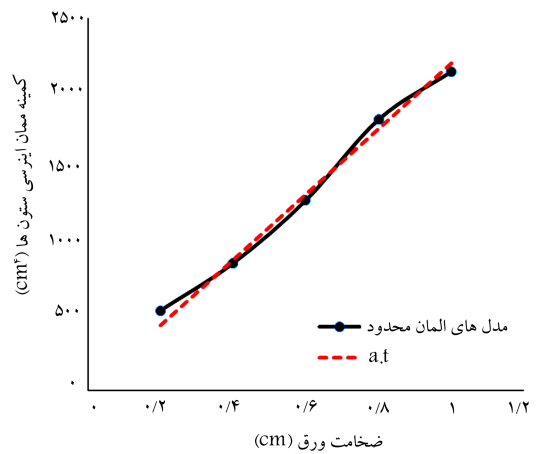
نسبت ۱/۱۵ d/B، که در قبل ذکر شده است، می‌تواند تقریب خوبی باشد؛ ولی برای کاهش مقاومت، این نسبت بیش از حد محافظه‌کارانه خواهد بود. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود، برای نسبت ۱/۱۵ d/D یعنی کاهش با نسبت قطر گشودگی به قطر پانل، هر چند شیب خطوط متفاوت هستند، ولی نتایج دقیق‌تری به دست می‌آید.

پس می‌توان نتیجه گرفت سختی و مقاومت ورق‌های با گشودگی را می‌توان با استفاده از روابط ۳ از روی سختی و مقاومت ورق بدون گشودگی به دست آورد:

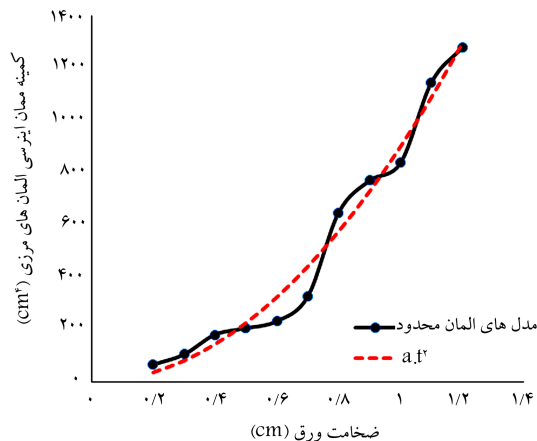
$$F_o = F(1 - 1/15 \frac{d}{D}), \quad K_o = K(1 - 1/15 \frac{d}{B}) \quad (3)$$



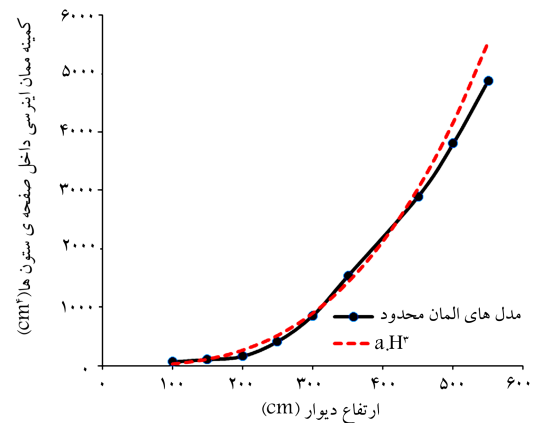
شکل ۱۰. اثر ممان اینرسی خارج صفحه‌ی المان‌های مرزی اطراف گشودگی در مقاومت ورق.



شکل ۷. اثر تغییرات ضخامت ورق در کمینه‌ی ممان اینرسی لازم المان‌های مرزی.



شکل ۱۱. اثر تغییرات ضخامت ورق در کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم برای المان‌های مرزی اطراف گشودگی.



شکل ۸. اثر تغییرات بُعد پانل در کمینه‌ی ممان اینرسی لازم المان‌های مرزی.

اطراف گشودگی به منظور محدود کردن تغییر شکل خارج صفحه‌ی ورق بررسی شده است. در اینجا پرسش مطرح این است که این تغییر شکل باید به چه مقداری محدود شود؟ همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش ممان اینرسی خارج صفحه‌ی المان‌های مرزی، ابتدا مقاومت ورق نیز افزایش یافته و پس از آن ثابت شده است.

بنابراین لازم است تغییر شکل خارج صفحه‌ی ورق به مقدار معادل با اولین نقطه‌ی که از آن پس مقاومت ثابت می‌ماند، محدود شود.

باید توجه داشت از آنجا که لازم است تمام پارامترهای مؤثر را ثابت در نظر گرفت و فقط یکی از آن‌ها تغییر داده شود، نمی‌توان در این مرحله از هر دو المان‌های مرزی افقی و قائم در مدل‌ها استفاده کرد، چرا که پارامتری که برای یکی ثابت است، برای دیگری متغیر خواهد بود. همچنین المان‌های مذکور، ممان اینرسی داخل صفحه‌ی کافی برای تسلیم کامل ورق داشته‌اند، تا تنشی که به المان مرزی وارد می‌شود یکنواخت باشد. در شکل ۱۱، تغییرات کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم برای المان‌های مرزی با تغییرات در ضخامت ورق مشاهده می‌شود.

می‌توان گفت ممان اینرسی لازم با توان دوم ضخامت ورق ارتباط دارد. در مرحله‌ی بعد، تأثیر تغییر در بُعد گشودگی در ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم بررسی شده است، که شکل ۱۲ حاصل شده است.

مشاهده می‌شود که ارتباط خطی بین این پارامتر و ضخامت ورق وجود دارد.

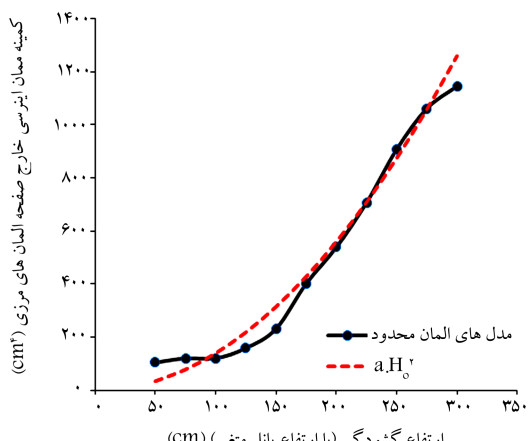
شکل ۹. اثر تغییرات بُعد عمود در المان مرزی بر کمینه‌ی ممان اینرسی لازم.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمینه‌ی ممان اینرسی لازم با توان سوم طول المان مرزی ارتباط دارد. برخلاف آنچه در رابطه‌ی پیشنهادی AISC آمده است، ارتباطی بین ممان اینرسی لازم و بُعد پانل عمود بر المان مرزی وجود ندارد (شکل ۹). از این رو می‌توان رابطه‌ی ۵ را برای کمینه‌ی ممان اینرسی لازم المان‌های مرزی به‌منظور تسلیم کامل ورق پیشنهاد داد:

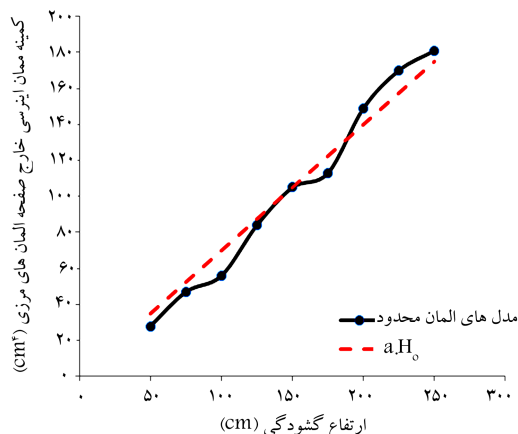
$$I_{in\ plane(\min)} = 0.70012 \times t \times d^3 \quad (5)$$

البته به‌نظر می‌رسد که تنش تسلیم ورق نیز در نتایج تأثیرگذار باشد، که نیازمند مطالعات بیشتر است. باید توجه داشت که اثر این پارامتر باید به‌صورت یک ضریب بی بُعد (برای مثال نسبت تنش تسلیم ورق به قاب) در رابطه وارد شود.

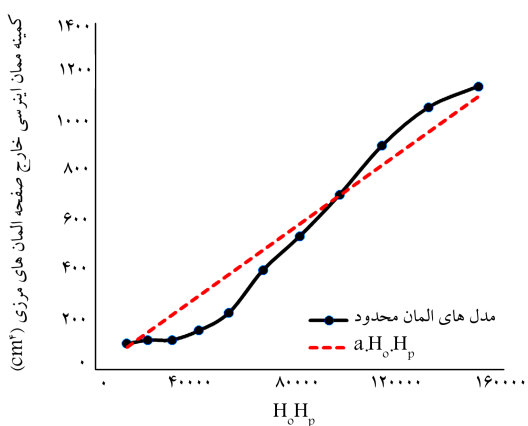
در مرحله‌ی بعد کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم برای المان‌های مرزی



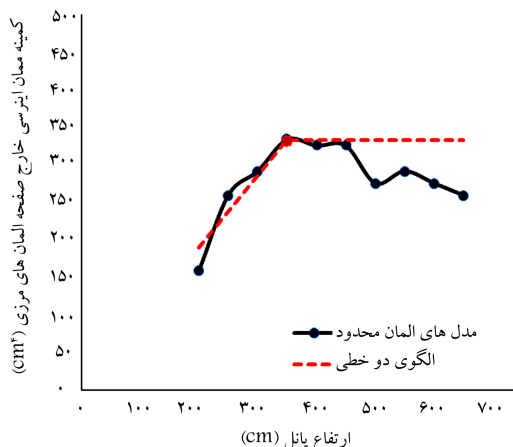
شکل ۱۴. اثر تغییرات ارتفاع گشودگی (با ارتفاع پانل متغیر) در کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم برای المان‌های مرزی اطراف گشودگی.



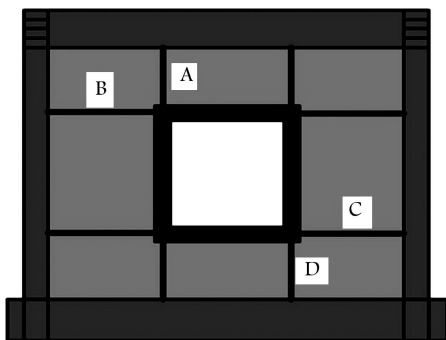
شکل ۱۲. اثر تغییرات ارتفاع گشودگی در کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم برای المان‌های مرزی اطراف گشودگی.



شکل ۱۵. رابطه‌ی حاصل ضرب ارتفاع پانل در ارتفاع گشودگی با کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم برای المان‌های مرزی اطراف گشودگی.



شکل ۱۳. اثر تغییرات ارتفاع پانل در کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم برای المان‌های مرزی اطراف گشودگی و الگوی دو خطی.



شکل ۱۶. الگوی مناسب برای تقویت دیوار با گشودگی.

با افزایش بُعد پانل افزایش می‌یابد و پس از آن فقط به تعداد آن‌ها اضافه می‌شود. بنابراین می‌توان رابطه‌ی ۶ را برای کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی لازم برای المان‌های مرزی (با شرط ذکرشده‌ی قبلی) پیشنهاد کرد:

$$I_{out\ of\ plane(\min)} = 0.7013 \times t^2 \times d_o \times d_p \quad (6)$$

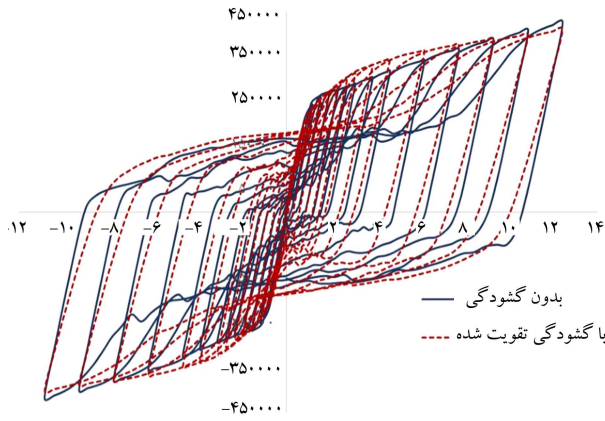
لازم به ذکر است که برای المان‌های مرزی اطراف گشودگی، برقراری هر دو رابطه‌ی ممان اینرسی داخل صفحه و خارج صفحه لازم است؛ ولی برای سخت‌کننده‌های

پارامتر دیگری که در نتایج تأثیرگذار است، تغییر در بُعد پانل است. با تغییر در ارتفاع پانل و به دست آوردن کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌ی المان‌های مرزی قائم، که باعث تسلیم کامل ورق شود، شکل ۱۳ حاصل شده است.

از شکل ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع پانل تا مقداری مشخص، ممان اینرسی لازم نیز افزایش می‌یابد، و پس از آن ثابت می‌ماند و حتی کاهش می‌یابد. از طرفی در صورتی که ارتفاع زیر پانل بالای گشودگی ثابت گرفته شود و ارتفاع پانل و گشودگی با هم افزایش داده شود، شکل ۱۴ برای ممان اینرسی لازم حاصل می‌شود.

مشاهده می‌شود که این پارامتر با توان دوم ارتفاع گشودگی ارتباط دارد. در واقع همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، ارتباط ممان اینرسی لازم با ضرب ارتفاع گشودگی در ارتفاع پانل تقریباً خطی خواهد بود.

بنابراین می‌توان نمودار شکل ۱۵ را به صورت دوخطی در نظر گرفت. به این معنی که تا زمانی که براساس شکل ۱۶ برای المان‌های مرزی قائم رابطه‌ی $A \leq B$ و برای المان‌های مرزی افقی رابطه‌ی $C \leq D$ برقرار باشد، ارتباط خطی بین ممان اینرسی لازم و بُعد پانل وجود دارد و پس از آن افزایش در بُعد پانل بی‌تأثیر خواهد بود. به این دلیل که نیروی خارج از صفحه‌ی بی که به المان‌های مرزی وارد می‌شود، به دلیل تغییر شکل ناشی از چین‌خوردگی ورق است و اندازه‌ی این چین‌خوردگی‌ها تا جایی



شکل ۱۸. مقایسه‌ی منحنی نیرو- جابه‌جایی دیوارهای بدون گشودگی و با گشودگی تقویت‌شده تحت بارگذاری چرخه‌یی.

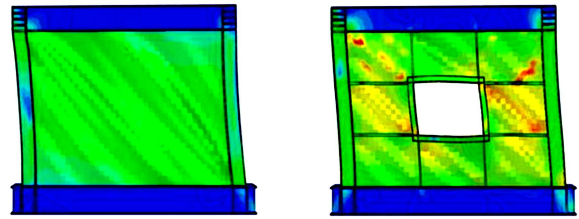
معنا که بیشینه‌ی نیروی وارده از ورق به المان‌های مرزی (در زمان تشکیل میدان کشش کامل و تسلیم ورق) در بارگذاری‌های مختلف مقدار تقریباً ثابتی می‌تواند داشته باشد.

در شکل ۱۸، منحنی نیرو - جابه‌جایی دیوارهای شکل ۱۷ تحت بارگذاری چرخه‌یی بررسی شده است. الگوی بارگذاری بر مبنای پروتکل بارگذاری ۲۴-ATC انتخاب شده است، با این توضیح که هر دامنه‌ی جابه‌جایی تنها یک مرتبه اعمال می‌شود. جابه‌جایی تسلیم موردنیاز برای تعیین دامنه‌ی بارگذاری در این روش با دوخطی‌کردن منحنی حاصل از بارگذاری یکنوا تعیین می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، انطباق نسبی بین نمودار دو دیوار وجود دارد و هر چند سختی دیوار با گشودگی تقویت‌شده پس از چند سیکل بارگذاری کمی نسبت به دیوار بدون گشودگی کاهش نشان می‌دهد (به دلیل تغییرشکل خارج صفحه‌ی بیشتر ورق در محل گشودگی)، انرژی مستهلک‌شده در این حالت به دلیل بینچینگ کمتر نمودار، بیشتر (در این بارگذاری خاص حدود ۲۰٪ بیشتر) است.

۷. نتیجه‌گیری

- در منحنی‌های نیرو - تغییرمکان دیوارهای با گشودگی مشاهده می‌شود که تغییرمکان معادل نقطه‌ی تسلیم (Δ_y) با افزایش درصد گشودگی افزایش و با افزایش ضخامت ورق کاهش پیدا می‌کند.
- کاهش سختی و مقاومت رابطه‌ی خطی با درصد گشودگی دارند و نرخ این کاهش در ضخامت‌های مختلف یکسان است، اما درصد این کاهش نسبت عکس با ضخامت ورق دارد.
- مقاومت و سختی دیوار با گشودگی را می‌توان به صورت محافظه‌کارانه با این روابط پیشنهادی (روابط ۳) از روی مقاومت و سختی دیوار بدون گشودگی به‌دست آورد.
- بهترین روش برای تقویت دیوارهای با گشودگی استفاده از المان‌های مرزی در اطراف گشودگی و سخت‌کننده‌هایی در امتداد المان‌های مذکور است. برای یکسان‌شدن توزیع تنش در ورق، قبل و بعد از ایجاد گشودگی، دو رابطه برای کمینه‌ی ممان اینرسی داخل صفحه و خارج صفحه‌ی لازم این المان‌ها به‌دست آمده است، که البته برای سخت‌کننده‌هایی که در مجاورت گشودگی نیستند،



شکل ۱۷. مقایسه‌ی رفتار دیوار بدون گشودگی و دیوار نمونه با گشودگی تقویت‌شده با روابط پیشنهادی.

در راستای این المان‌ها به دلیل نیروی تقریباً یکسانی که از دو طرف به آن‌ها وارد می‌شود، فقط برقراری رابطه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه‌کافی خواهد بود. در شکل ۱۷، رفتار یک دیوار نمونه با گشودگی که با این روابط تقویت شده است، با دیوار بدون گشودگی مقایسه شده است.

مطابق شکل ۱۷، بین نمودار پوش دو دیوار انطباق کامل وجود دارد. البته باید توجه داشت که با افزایش ممان اینرسی المان‌های مرزی، سختی و مقاومت افزایش چندانی نخواهد داشت، چرا که ورق تقریباً به بیشینه‌ی ظرفیت خود رسیده است. مقادیری که از این روابط برای ممان اینرسی لازم به‌دست می‌آیند، به مقدار قابل توجهی کمتر از روابط پیشنهادی AISC خواهد بود. این تذکر لازم است در صورتی که گشودگی چسبیده به المان‌های مرزی نباشد، محل آن مهم نیست و با روابط قبل می‌توان به رفتار دیوار بدون گشودگی رسید، ولی در غیر این صورت حتی با المان‌های مرزی سخت‌تر نیز نمی‌توان کاهش مقاومت را جبران کرد.

۶. رفتار دیوار تحت بارگذاری چرخه‌یی

پرسش مطرح در اینجا این است که آیا می‌توان در صورت یکسان‌بودن منحنی پوش در دیوارهای بدون گشودگی و با گشودگی تقویت‌شده نتیجه گرفت که انرژی مستهلک‌شده‌ی دو دیوار تحت بار چرخه‌یی نیز یکسان خواهد بود؟ در واقع، چنین نتیجه‌گیری به سادگی ممکن نیست، چرا که آنچه در بارگذاری چرخه‌یی این دیوارها اهمیت پیدا می‌کند، بحث بینچینگ یا له‌شدگی نمودارهاست، که می‌تواند انرژی جذب‌شده را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. البته باید توجه داشت روابطی که در اینجا به‌دست آمده است، بر این ایده استوار است که میدان کشش ایجادشده در ورق قبل و بعد از ایجاد گشودگی یکسان شود و میزان کمینه‌ی مشخصات هندسی المان‌های مرزی به گونه‌یی تعیین شود که تکیه‌گاه کافی برای رسیدن ورق به بیشینه‌ی ظرفیتش تأمین شود، که این مسئله وابستگی چندانی به نوع بارگذاری نخواهد داشت، بدین

۵. از آنجایی که رفتار دیوار و نیز تنش‌های که ورق به قاب وارد می‌کند، قبل و بعد از ایجاد گشودگی یکسان است، می‌توان گفت به شرطی که گشودگی به روش ذکر شده تقویت شود، می‌توان در تحلیل سازه از وجود گشودگی صرف نظر و دیوار را با روش‌های مرسوم مثل روش نواری مدل‌سازی کرد. البته باید توجه داشت که نتایج به دست آمده براساس بارگذاری مونوتونیک حاصل شده است و رفتار دیوار تحت بارگذاری چرخه‌یی می‌تواند متفاوت باشد و نیازمند بررسی بیشتر است.

تأمین کمینه‌ی ممان اینرسی خارج صفحه کفایت می‌کند (رابطه ۵ و ۶). که در آن‌ها، مقدار d_p تا زمانی افزایش پیدا می‌کند که براساس شکل ۱۶ برای المان‌های مرزی قائم رابطه‌ی $A \leq B$ و برای المان‌های مرزی افقی رابطه‌ی $C \leq D$ برقرار باشد؛ مقدار d_p برای مقادیر بزرگ‌تر ثابت فرض می‌شود. استفاده از ممان اینرسی‌های بزرگ‌تر، افزایش چندانی در سختی و مقاومت ایجاد نخواهد کرد.

پانوشته‌ها

1. tension field
2. Pinching
3. merge
4. damage
5. implicit
6. Driver

منابع (References)

1. Sabouri, S., *Lateral Load Resisting Systems an Introduction to Steel Shear Walls (SSW)*, Anquizeh Publishing (2002).
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, Edmonton, AB (1983).
3. Rezai, M. "Seismic behaviour of steel plate shear walls by shake table testing", Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada (1999).
4. Bruneau, M., Berman, J., Lopez-Garcia, D. and Vian, D. "Steel plate shear wall buildings: Design requierments and research", *Engineering Journal, AISC*, **41**(3), pp. 95-106 (2005).
5. Chan, R., Albermani, F. and Kitipornchai, S. "Stiffness and strength of perforated steel plate shearwall", *Procedia Engineering*, **14**, pp. 675-679 (2011).
6. Roberts, T. and Sabouri-Ghomi, S. "Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels", *Thin-Walled Structures*, **14**(2), pp. 139-152 (1992).
7. Sabouri-Ghomi, S. and et al., "Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening", *Journal of Constructional Steel Research*, **79**, pp. 91-100 (2012).
8. Montgomery, C.J. and Medhekar, M. "Discussion on unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic load case", *Journal of Structural Engineerin, ASCE*, **127**(8), pp. 973-973 (2001).
9. Sabelli, R. and Bruneau, M., *Design Guide 20: Steel Plate Shear Walls*, American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, IL, USA (2007).
10. Hosseinzadeh, S. and Tehranizadeh, M. "Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **77**, pp. 180-192 (2012).
11. Abaqus 6.10 Analysis User's Manual.
12. Driver, R.G. "Seismic behavior of steel plate shear walls", Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB (1997).
13. Sabouri-Ghomi, S. and Sajjadi, S.R.A. "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, **75**, pp. 152-159 (2012).