

مطالعه پارامتریک اثر گسترش ترک بر روی دیوار برشی فولادی

مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی دیوار برشی فولادی و همچنین عملکرد آن در زلزله‌های گذشته مؤید یک سیستم کارا در برابر بارهای جانبی است. این سیستم دارای شکل‌پذیری، سختی و مقاومت بالایی است. هرچند تاکنون مطالعات زیادی بر روی این سیستم انجام شده است، اما همچنان ناشناخته‌های زیادی در خصوص آن وجود دارد. در میان این ناشناخته‌ها، تأثیر ترک بر رفتار سیستم با توجه به تحقیقات کم در این زمینه کاملاً مشهود است که تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی رفتار این سیستم دارد. بنابراین در این مقاله، تأثیر ترک‌های میانی و کناری و گسترش آنها بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ترک‌های میانی ورق فولادی اثر مخرب‌تری نسبت به ترک‌های کناری دارد. ترک‌های میانی با طول زیاد باعث می‌شود که سیستم در ناحیه الاستیک گسیخته شود. همچنین گسترش ترک تأثیر کمی بر سختی الاستیک دارد. علاوه بر آن، ضرایب رفتار دیوار برشی فولادی با وجود ترک ارائه شده است. به‌منظور دستیابی به نمودار بار- تغییرمکان یک مدل پارامتریک ارائه شده که بدون استفاده از مدل‌سازی المان محدود بتوان به نمودار بار- تغییرمکان دست یافت. در این مدل، اثر ترک و همچنین گسترش آن لحاظ خواهد شد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی، ترک، رفتار لرزه‌ای، سختی، مقاومت.

وحید بروجردیان*

استادیار، گروه سازه و زلزله،
دانشگاه علم و صنعت ایران.
پست الکترونیک:
Broujerdian@iust.ac.ir

محسنعلی شایانفر

دانشیار، گروه سازه و زلزله،
دانشگاه علم و صنعت ایران.
پست الکترونیک:
shayanfar@iust.ac.ir

علی قمری

دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه
علم و صنعت ایران.
پست الکترونیک:
aghamari@cmps2.iust.ac.ir

۱- مقدمه

این سیستم مورد توجه بسیاری از طراحان و مجریان دنیا قرار گرفته است. از این‌رو، در سازه‌های متعددی در دنیا مورد استفاده قرار گرفته و استفاده از آن در پروژه‌های عمرانی رو به افزایش است [۳]. نکته حائز اهمیت در خصوص مطالعات انجام شده بر روی این سیستم آن است که در مطالعات آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس و حتی اکثر مدل‌های تمام‌مقیاس در این زمینه از ورق‌های یکپارچه استفاده شده است که با وضعیت موجود در پروژه‌های عملی و اجرایی متفاوت است [۱-۶].

باتوجه به ارتفاع طبقه و عرض ورق‌های موجود و همچنین تکنیک‌های اجرایی، معمولاً از ورق یکپارچه استفاده نخواهد شد. شکل ۱ نمایی از دیوار برشی فولادی اجرا شده‌ای را نشان می‌دهد که از دو ورق مجزا تشکیل شده و به‌وسیله جوش به هم متصل شده‌اند. باتوجه به

از زمانی که دیوار برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم کارا در برابر بارهای جانبی معرفی شد تاکنون، مطالعات عددی و آزمایشگاهی متعددی برای ارزیابی هرچه دقیق‌تر رفتار آن انجام شده است. به‌طورکلی، نتیجه مطالعات را چنین می‌توان جمع‌بندی نمود که این سیستم، علاوه بر اینکه عملکرد مناسبی باتوجه به سختی، مقاومت و شکل‌پذیری بالا در برابر بارهای جانبی دارد، یک سیستم اقتصادی در مقایسه با سایر سیستم‌های لرزه‌بر است [۱ و ۲]. باتوجه به مزایای دیوار برشی فولادی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۲۳، بازنگری ۱۳۹۵/۱۱/۰۹، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

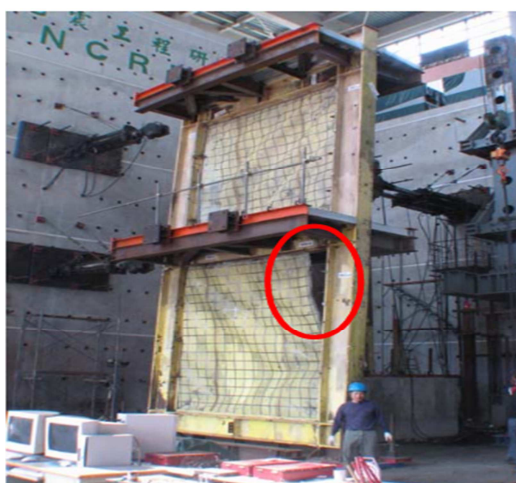
می‌آید که با گسترش آن، امکان گسیختگی کلی نیز وجود خواهد داشت. لذا در این مقاله اثر وجود ترک در ورق فولادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

ضخامت کم ورق‌های فولادی، وجود ترک غیرقابل اجتناب است. نقص هندسی نظیر وجود ترک، عموماً در اثر بارهای رفت‌وبرگشتی، خوردگی، جوشکاری ناقص و غیره به‌وجود



شکل ۱- نمونه اجرایی دیوار برشی فولادی

نشان داد. هرچند اهداف این محققان در راستای ارزیابی ترک و گسترش آن نبود، اما نتیجه نشان داد که گسترش ترک باعث کاهش شدید شکل‌پذیری می‌شود [۸].



شکل ۲- گسترش ترک در مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی دو طبقه [۷]

برمن و برونکا^۲ در سال ۲۰۰۵ اتصال ورق به قاب محیطی در دیوار برشی فولادی را مورد مطالعه قرار دادند. این محققان دو نوع اتصال به قاب محیطی با استفاده از اپوکسی و همچنین استفاده از جوش کامل را که در آن لبه‌های ورق روی هم همپوشانی داشتند و با استفاده از

در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی، وجود ترک و رشد آن در دیوار برشی ظهور پیدا کرده است. در این آزمایش‌ها، هرچند هدف پژوهشگران ارزیابی جوش، ترک و گسترش آن نبوده است؛ اما باتوجه به ماهیت جوش، ترک ناخواسته ایجاد شده و گسترش پیدا می‌کند. در این حالت، آزمایش دیوار را تحت تأثیر قرار خواهد داد. با بررسی این مطالعات می‌توان دریافت که حتی در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی هم ترک به‌وجود می‌آید. تبعاً در شرایط اجرای کارگاهی این وضعیت بسیار وخیم‌تر خواهد بود. لین^۱ رفتار دیوار برشی فولادی را برای تأثیر نوع بارگذاری دینامیکی و استاتیکی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد دیوار برشی فولادی در بارگذاری استاتیکی، سختی اولیه‌ای بیشتر از بارگذاری دینامیکی نشان خواهد داد. اما گسترش ترک ناگهانی در طبقه اول مطابق شکل ۲ در این آزمایش تمام‌مقیاس ایجاد شد [۷].

محققان آلمانی، بررسی رفتار دیوار برشی فولادی را برای ارزیابی قابلیت‌های آن در بهسازی لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در یکی از این آزمایش‌ها، به‌دلیل گسترش ترک، شکل ۳، ورق فولادی، شکل‌پذیری پایین

²- Berman and Bruncau

¹- Lin

و گسترش ترک گسسته^۶ با راستای گسترش وابسته به مراحل تحلیل و بدون نیاز به مش‌بندی مجدد ناحیه نوک ترک^۷ می‌باشد [۱۸-۲۵].

در روش XFEM، دو تابع جابه‌جایی اضافی به فضای حل اجزای محدود^۸ اضافه شده است. یکی از این توابع، تابع گسسته‌ای^۹ است که نشانگر پرش جابه‌جایی در سطح ترک^{۱۰} می‌باشد. تابع دوم نیز به منظور لحاظ سینگولاریتی نوک ترک خواهد بود. بدین ترتیب، تابع جابه‌جایی به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شود:

$$u = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[u_i + H(x) a_i + \sum_{a=1}^4 F_a(x) b_i^a \right] \quad (1)$$

در این رابطه، $N_i(x)$ تابع شکل عمومی گره^{۱۱}، u_i بردار جابه‌جایی گرهی عمومی^{۱۲} مربوط به بخش پیوسته حل اجزای محدود $H(x)$ تابع مربوط به پرش گسسته در سطح ترک، a_i پارامتر مربوط به بردار درجات آزادی^{۱۳}، $F_a(x)$ تابع الاستیک مجانب نوک ترک و b_i^a نیز پارامتر مربوط به درجات آزادی^{۱۴} خواهد بود. تابع پرش گسسته در سطح ترک، $H(x)$ ، به صورت رابطه (۲) معرفی می‌شود:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن، x یک نمونه نقطه گوس و x^* نقطه‌ای بر روی ترک و نزدیک به نقطه x می‌باشد. توابع مجانب نوک ترک، $F_a(x)$ ، در یک مصالح ایزوتروپ الاستیک به صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شود:

جوش گوشه، ورق فولادی به قاب محیطی ساخته شد، بررسی کردند. وضعیت اتصال پیشنهادی پس از انجام تست، مؤید عملکرد نه‌چندان مناسب آن است. محققان به دستاورد مناسبی برای کنترل ترک دست نیافتند [۹]. خرازی علاوه بر ارائه مدل بار- تغییر مکان برای دیوار برشی فولادی، نمونه اتصال ورق فولادی به قاب محیطی را برای جلوگیری از گسترش ترک پیشنهاد داد. این نمونه در حد پیشنهاد بود و پس از آن مورد ارزیابی محققان قرار نگرفته است [۱۰].

در سال ۲۰۱۵ محققان دانشگاه امیرکبیر و دانشگاه لازیو ایتالیا مطالعاتی را بر روی ورق‌های موج‌دار دارای ترک انجام دادند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که طول اولیه ترک در گسترش آن اهمیت دارد. این محققان اثر نسبت‌های هندسی بر رفتار پس‌کمانشی ورق دارای ترک میانی را بررسی نمودند که ورق تحت اثر برش باشد [۱۱]. از چنین وضعیتی می‌توان در خصوص دیوارهای برشی فولادی نیز استفاده نمود، هرچند رفتار پس‌کمانشی آنها بسیار با هم متفاوت است.

۲- بررسی عددی گسترش ترک و مبانی XFEM

به‌منظور بررسی ترک و گسترش آن از روش‌های عددی پیشرفته مانند مدل ناحیه چسبنده^۳، روش ترک مجازی^۴ و همچنین روش اجزای محدود بسط‌یافته^۵ (XFEM) استفاده می‌شود. محققان مختلفی از مدل ناحیه چسبنده و روش ترک مجازی به‌منظور بررسی ترک و گسترش آن استفاده نموده‌اند [۱۲-۱۷]. روش ناحیه چسبنده و ترک مجازی تنها اجازه گسترش ترک از گوشه المان‌های اجزای محدود را فراهم می‌سازد که در این حالت، نتایج مدل‌سازی به اندازه و شکل ترک حساس خواهد بود. به‌منظور رفع این محدودیت و نقص، محققان روش XFEM را ارائه نمودند که قادر به مدل‌سازی شروع

³- Cohesive Zone Model

⁴- Virtual Crack Closure Technique (VCCT)

⁵- Extended Finite Element Method (XFEM)

⁶- Discrete crack propagation

⁷- Along arbitrary, solution-dependent paths without re-meshing crack-tip field

⁸- Finite element solution space

⁹- Discontinuous function

¹⁰- Displacement jump across the crack surface

¹¹- General nodal shape function

¹²- General nodal displacement

¹³- Product of the enriched degree of freedom vector

¹⁴- Product of the enriched freedom degree

در اطراف نوک ترک و $\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}$ نمایانگر عدم پیوستگی در سطح ترک می‌باشد.

$$F_a(x) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (3)$$

که در آن، (r, θ) دستگاه مختصات قطبی است که مرکز آن در نوک ترک قرار دارد. $\theta = 0$ مماس بر سطح ترک



شکل ۳- گسترش ترک در ورق فولادی [۸]

اثر گسترش ترک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این حالت، سه نوع مقایسه صورت می‌گیرد. ابتدا حالت ترک بدون پدیده گسترش و گسترش یافته مقایسه می‌شود. سپس مدل‌هایی با ترک خمیده منطبق بر ترک واقعی گسترش یافته در دیوار ایجاد شده و تحلیل خواهد شد تا اثر گسترش ترک مشخص گردد. در گام سوم، به مطالعه اثر طول ترک اولیه افقی بر گسترش ترک پرداخته می‌شود. تمام مطالعات به صورت عددی و با استفاده از روش اجزای محدود بسط یافته (XFEM) انجام می‌شود. از آنجا که ماده مینا فولاد بوده و اصولاً یک ماده شکل پذیر محسوب می‌شود، رفتار ترک‌ها به صورت چسبنده و براساس مدل داگدل^{۱۷} مدل سازی شده است. با توجه به ضخامت کم ورق فولادی و رفتار غیرخطی هندسی ناشی از آن، فرمولاسیون کرنش جابه‌جایی و معادلات تعادل براساس پیش فرض تغییر شکل‌های بزرگ مدنظر قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح، از رفتار الاستیک-پلاستیک کامل با سطح تسلیم

روش المان چسبنده^{۱۵} نیز، براساس رفتار چسبندگی المان بوده که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$t = \begin{Bmatrix} t_s \\ t_n \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ss} & & \\ & K_{nn} & \\ & & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K\delta \quad (4)$$

که در آن، t بردار برآیند اسمی تنش^{۱۶} بوده که شامل سه مؤلفه t_s ، t_n و t_t و جابه‌جایی‌های متناظر δ_s ، δ_n و δ_t می‌باشد [۲۶].

۳- روش انجام تحقیق

در این مقاله، اثر ترک بر رفتار دیوار برشی فولادی از چند جنبه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ابتدا دو نوع ترک به صورت ترک میانی و کناری، که در شکل ۴ مشخص شده است؛ بدون لحاظ پدیده گسترش ترک مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهد گرفت. براساس نتایج این قسمت، مشخص خواهد شد که کدام ترک اثر مخرب‌تری دارد. پس از مشخص شدن نوع ترک بحرانی،

¹⁷- Dugdale

¹⁵- Cohesive segment method

¹⁶- Nominal traction stress vector

می‌شود. روند مش‌بندی اجزا به‌نحوی صورت می‌گیرد تا گره‌های المان‌های تیر، ستون و صفحه فولادی بر هم منطبق باشند و برای ایجاد اتصال گیردار، گره‌های واقع در یک نقطه با هم ادغام شدند. همچنین برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی مدل، حالت تغییرشکل یافته متناظر با مود اول کمانش ناشی از تحلیل کمانش الاستیک به نرم‌افزار معرفی و سپس مدل تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح انجام گرفت. این کار برای در نظر گرفتن نقص هندسی^{۲۲} به‌صورت ضریبی از مود اول کمانش الاستیک خواهد بود.

۴-۲- مدل‌های عددی

پس از حصول اطمینان از نتایج المان محدود، مدل‌هایی برای بررسی تأثیر موقعیت اولیه ترک و همچنین گسترش ترک در رفتار دیوار برشی فولادی انتخاب شده است. ضخامت ورق فولادی در تمامی مدل‌ها برابر ۷ میلی‌متر و طول ورق فولادی برابر ۴ متر انتخاب شد. قاب محیطی براساس ضوابط آئین‌نامه AISC طراحی شده، که مشخصات هندسی آن در شکل ۶ آورده شده است. طراحی به‌نحوی انتخاب شده است که شرایط تشکیل میدان کشش قطری در ورق فراهم شود. مشخصات سری اول نمونه‌ها که برای بررسی تأثیر موقعیت ترک طراحی شده است، در جدول ۱ آورده شده است. نام هر مدل از دو حرف و یک عدد تشکیل شده است. حرف اول معرف میانی و یا لبه‌ای بودن ترک است که به ترتیب A و C است. بخش عددی هر مدل نیز معرف طول ترک بر حسب میلی‌متر می‌باشد. به‌عنوان مثال، A-8 دیوار برشی فولادی با ترک میانی به طول ۸ میلی‌متر است. (2a)

۵- بررسی نتایج

۵-۱- مقایسه اثر ترک‌های میانی و کناری

ون‌میسیز^{۱۸} استفاده شده است. همچنین برای تسریع در مدل‌سازی و تحلیل‌ها از ترکیب قابلیت‌های دو نرم‌افزار انسیس^{۱۹} و آباکوس^{۲۰} استفاده شده است. بنابراین مسیر گسترش ترک در آباکوس (با استفاده از المان Solid) تشخیص داده شد. سپس براساس قابلیت APDL در نرم‌افزار انسیس، تمام المان‌ها به‌صورت پوسته‌ای با در نظر گرفتن گسترش ترک منطبق بر مسیر به‌دست آمده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل گردید.

۴- مطالعه عددی

۴-۱- تصدیق مدل‌سازی عددی

بدین منظور، نتایج مدل آزمایشگاهی مرجع [۴] با نتایج مدل‌سازی المان محدود مقایسه می‌شود. در مدل آزمایشگاهی، بار اعمال‌شده به دو صورت بارهای جانبی رفت‌وبرگشتی در تراز طبقات و بارگذاری ثقلی بر روی ستون‌های تراز آخر اعمال شده است. هندسه دیوار برشی فولادی در شکل ۵ نمایش داده شده است. تنش تسلیم اجزای قاب با هم متفاوت است که برای هر جزء، تنش تسلیم و نمودار تنش کرنش آن از مرجع ذکر شده استخراج گردید و به نرم‌افزار معرفی شد. در گزارش آزمایشگاهی تنها نمودار بار- تغییرمکان طبقه اول منتشر شده است. بنابراین در مقایسه تست آزمایشگاهی و نتایج نرم‌افزار، تنها نمودار بار- تغییرمکان طبقه اول با هم مقایسه خواهد شد. برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و المان محدود، منحنی بار- تغییرمکان از منحنی هیستریزس مدل آزمایشگاهی استخراج گردید که مقایسه آن در شکل ۵ حاکی از دقت بالای مدل‌سازی المان محدود است.

در مدل‌سازی‌های المان محدود، المان پوسته^{۲۱} برای مدل‌سازی تمام اجزای دیوار برشی به‌کار گرفته

18- Von-Misses

19- ANSYS

20- ABAQUS

21- Shell

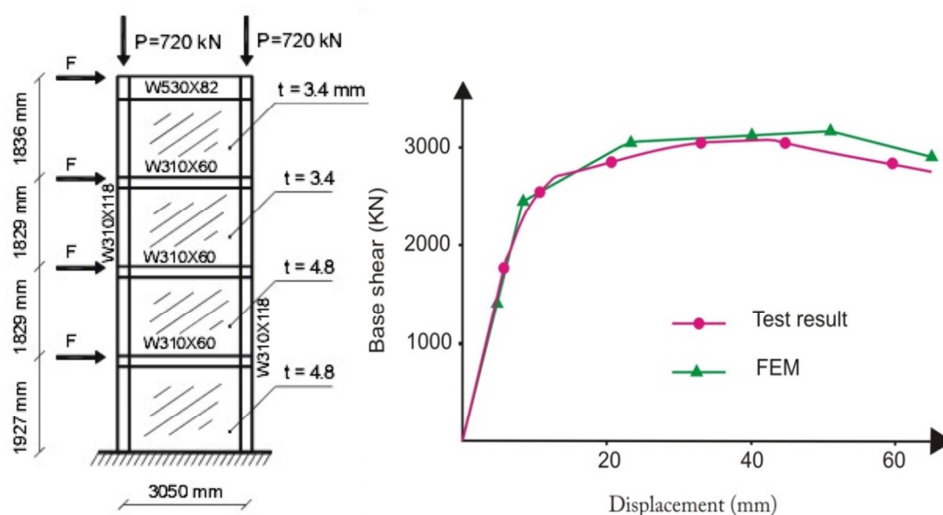
22- Imperfection

اساس، آشکار است که ترک‌های میانی اثر مخرب‌تری نسبت به ترک‌های کناری دارند.

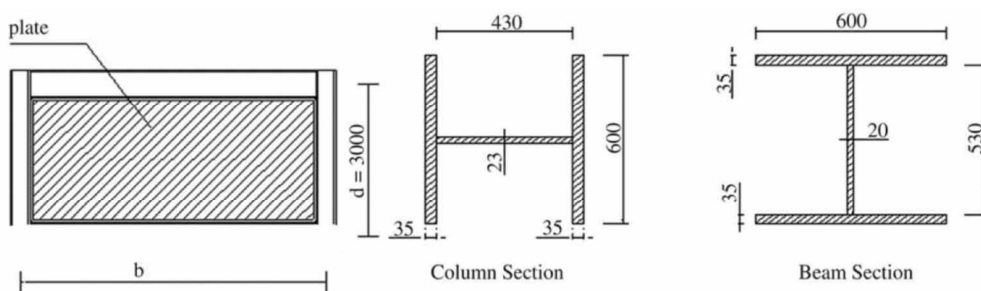
شکل ۷ مقایسه نمودار بار- تغییرمکان دو نوع ترک را به ازای طول‌های مختلف ترک نشان می‌دهد. براین



شکل ۴- معرفی دیوار ترک‌دار



شکل ۵- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی



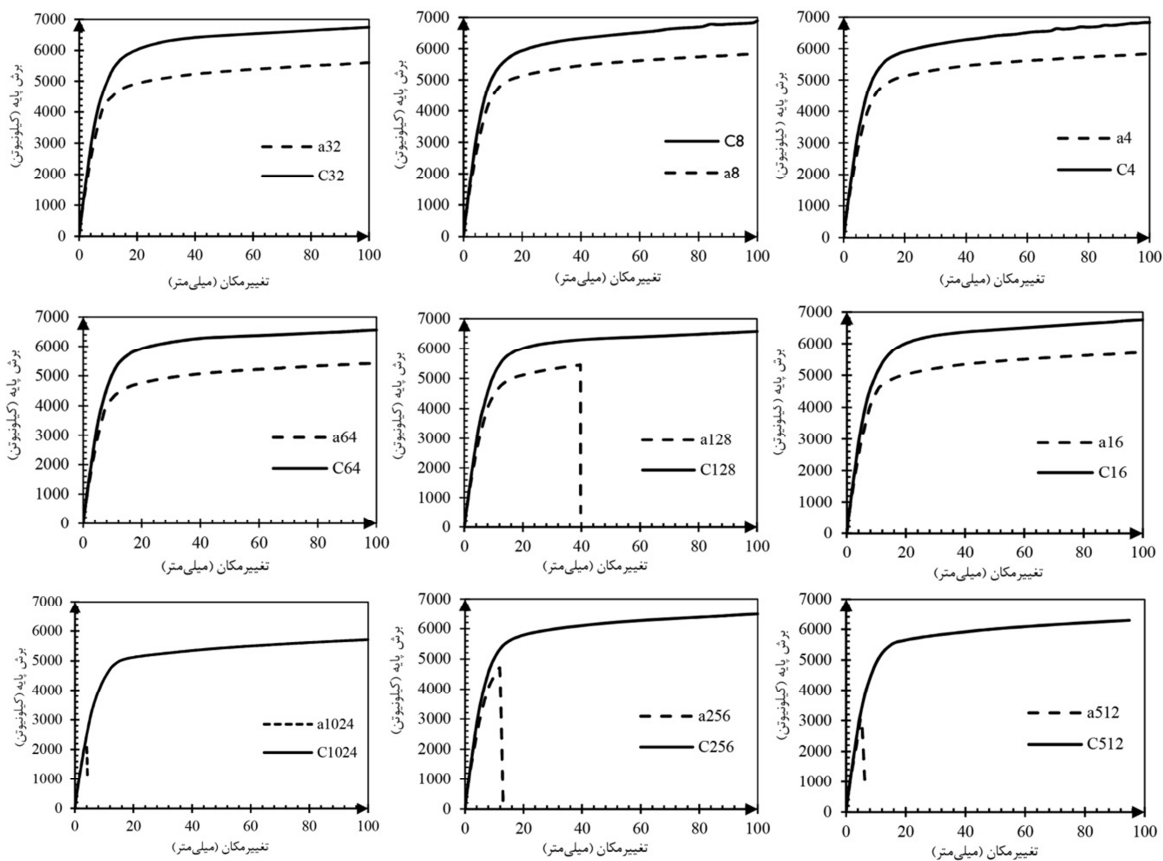
شکل ۶- مشخصات هندسی تیر و ستون

ناحیه الاستیک گسیخته خواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که در مدل‌های با ترک کناری، هرچند افت سختی و مقاومت وجود داشته اما در ناحیه الاستیک در دیوارها گسیختگی رخ نداده است.

از این نمودارها می‌توان دریافت که علاوه بر اینکه مقاومت و جذب انرژی مدل‌های با ترک میانی، کمتر از مدل‌های با ترک کناری است، ترک‌های میانی باعث گسیختگی دیوار قبل از تغییرمکان نهایی براساس آئین‌نامه می‌شود. با افزایش طول اولیه ترک، دیوار در

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های عددی

مدل	2a (mm)	2a / L _w	نوع ترک	گسترش ترک
A-4	۴	۰/۰۰۱	میانی	No
A-8	۸	۰/۰۰۲	میانی	No
A-16	۱۶	۰/۰۰۴	میانی	No
A-32	۳۲	۰/۰۰۸	میانی	No
A-64	۶۴	۰/۰۱۶	میانی	No
A-128	۱۲۸	۰/۰۳۲	میانی	No
A-256	۲۵۶	۰/۰۶۴	میانی	No
A-512	۵۱۲	۰/۱۲۸	میانی	No
A-1024	۱۰۲۴	۰/۲۵۶	میانی	No
C-4	۴	۰/۰۰۱	کناری	No
C-8	۸	۰/۰۰۲	کناری	No
C-16	۱۶	۰/۰۰۴	کناری	No
C-32	۳۲	۰/۰۰۸	کناری	No
C-64	۶۴	۰/۰۱۶	کناری	No
C-128	۱۲۸	۰/۰۳۲	کناری	No
C-256	۲۵۶	۰/۰۶۴	کناری	No
C-512	۵۱۲	۰/۱۲۸	کناری	No
C-1024	۱۰۲۴	۰/۲۵۶	کناری	No
A8-P	۸	۰/۰۰۲	میانی	Yes
A32-P	۳۲	۰/۰۰۸	میانی	Yes



شکل ۷- نمودار بار- تغییر مکان

گسترش ترک (مدل‌های A8, A32) با هم مقایسه شده است. با مشاهده این منحنی‌ها می‌توان دریافت که در ناحیه غیرخطی گسترش ترک در دیوار رفتاری بین حالت ترک بدون گسترش و حالت شکاف منطبق بر مسیر گسترش ترک را طی می‌کند. این وضعیت در هر دو حالت ترک اولیه با طول ۸ و ۴ میلی‌متر صادق است.

اثر گسترش ترک تأثیر کمی بر سختی الاستیک دارد و تنها باعث کاهش سختی به میزان ۱ تا ۲٪ می‌گردد، اما وجود شکاف منطبق بر مسیر گسترش ترک، سختی را حدود ۷٪ کاهش می‌دهد. این روند کاهش سختی در خصوص مقاومت دیوار مقداری متفاوت است. یعنی گسترش ترک و شکاف منطبق بر مسیر گسترش ترک مقاومت یکسانی نشان می‌دهند و باعث افت مقاومت نهایی دیوار به مقدار ۱۳٪ شده‌اند (جدول ۳).

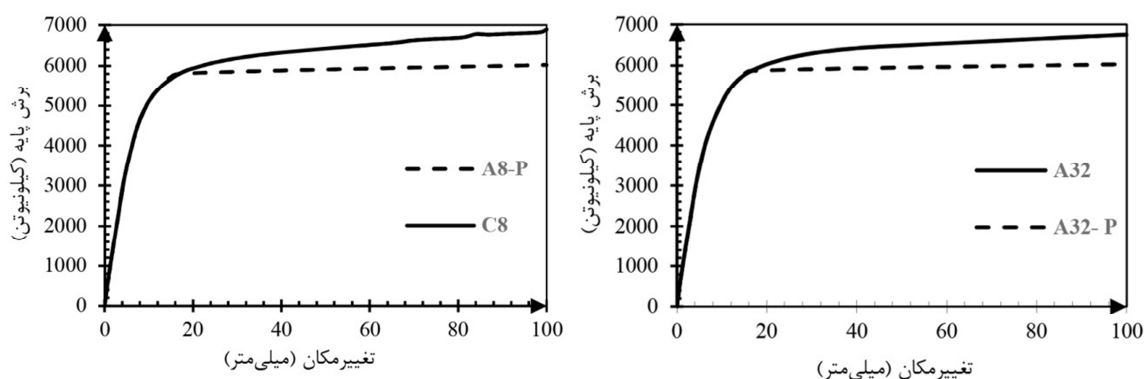
به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر اثر نوع ترک، در حالتی که از گسترش ترک صرف‌نظر شود، نسبت پارامترهای لرزه‌ای دیوار در دو حالت ترک کناری و میانی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که اختلاف نتایج و بحرانی‌بودن ترک‌های میانی در مقایسه با ترک کناری در ترک‌های با طول بیشتر، نمایان‌تر است. دلیل اصلی آن نیز گسیختگی دیوارهای با ترک میانی بلند در ناحیه الاستیک می‌باشد. البته در ترک‌های با طول کوتاه نیز، سختی، مقاومت و جذب انرژی دیوار با ترک کناری بیشتر می‌باشد.

۵-۲- اثر گسترش ترک

در شکل ۸ نمودار بار- تغییرمکان برای بررسی اثر گسترش ترک، چهار مدل دیوارهای با در نظر گرفتن گسترش ترک (مدل‌های A8-P, A32-P)، صرف‌نظر از

جدول ۲- مقایسه دیوار با ترک میانی و کناری

C/a	K	Fu	μ	E
۴	۱/۱۸	۱/۱۸	۱	۱/۱۵
۴	۱/۱۸	۱/۱۸	۱	۱/۱۶
۱۶	۱/۱۸	۱/۱۸	۱	۱/۱۷
۳۲	۱/۲۱	۱/۲۱	۱	۱/۲۵
۶۴	۱/۲۲	۱/۲۲	۱	۱/۲۵
۱۲۸	۱/۲۰	۱/۲۰	۱	۲/۸۹
۲۵۶	۱/۳۷	۱/۳۷	۶/۶۸	۱۳/۰۹
۵۱۲	۲/۰۷	۲/۰۷	۹/۷۲	۴۶/۱۱
۱۰۲۴	۲/۷۱	۲/۷۱	۹/۷۲	۷۸/۲۴



شکل ۸- نمودار بار- تغییرمکان

جدول ۳- مقاومت و جذب انرژی

	A8	A8-D	A8-P	A32	A32-D	A32-P
Fu (KN)	۶۸۹۲/۱۴	۶۰۲۲/۶۷	۶۰۲۲/۶۷	۶۷۴۷/۰۸	۶۰۲۶/۷۱	۶۰۲۷/۷۱
Fu/FU-A8	۱	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۹۸	۰/۸۷	۰/۸۷
K (KN/mm)	۸۱۸/۵۱	۷۵۹/۰۴	۸۱۱/۳۲	۸۱۳/۷۰	۷۵۸/۵۸	۸۰۵/۵۶
K/K-A8	۱	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۹۸
E (KN.m)	۶۰۶/۸۷	۵۳۹/۰۷	۵۶۰/۴۶	۶۰۷/۸۳	۵۳۹/۴۵	۵۶۳/۰۲
E/E-A8	۱	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۹۳

۳-۵- مدل پارامتریک دیوار برشی فولادی

ورق دیوار برشی فولادی لاغر، معمولاً تحت اثر بارهای کم کمانش می‌کند و این کمانش معمولاً قبل از تسلیم آن آغاز می‌شود. تنش کمانش برشی الاستیک براساس تئوری کلاسیک برپایه تحقیقات باسلر^{۲۳} [۵] برابر است با:

$$\tau_{cr} = \frac{K_v \pi^2 E}{12(1-\theta^2)} \quad (۵)$$

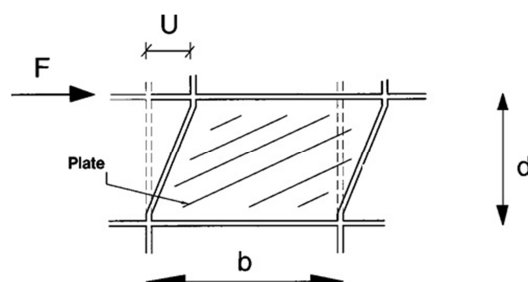
$$\begin{cases} K_v = 5.34 + \frac{4}{(d/b)^2} & \frac{d}{b} \leq 1 \\ K_v = 4 + \frac{5.34}{(d/b)^2} & \frac{d}{b} > 1 \end{cases} \quad (۶)$$

که در این رابطه، σ_T معادل تنشی است که ورق فولادی تسلیم می‌شود، E و G به ترتیب مدول الاستیسیته و مدول برشی هستند و θ نیز زاویه تنش‌های میدان کشش قطری است. اگر یک المان را از ورق جان دیوار برشی فولادی نمایش دهیم، وضعیت تنش‌های ورق فولادی قبل و بعد از کمانش مطابق شکل ۱۰ است.

مقدار تنش‌های ایجاد شده که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، به صورت زیر می‌باشد:

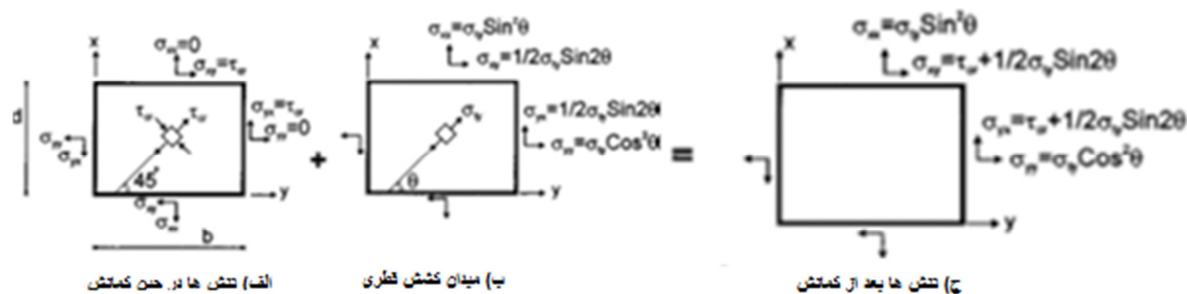
$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_y \cdot \sin^2 \theta \\ \sigma_{yy} &= \sigma_y \cdot \cos^2 \theta \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yx} = \tau_{cr} + 0.5 \sigma_y \cdot \sin 2\theta \end{aligned} \quad (۷)$$

تحلیل دیوار برشی فولادی به روش المان محدود پیچیده و زمان‌بر است، حال آنکه اثر ترک بر این پیچیدگی افزوده خواهد شد. لذا ارائه یک مدل برای دستیابی به نمودار بار- تغییرمکان بدون مدل‌سازی المان محدود، مخصوصاً برای اهداف مقاوم‌سازی ضروری است. برای دستیابی به نمودار بار- تغییرمکان دیوار برشی فولادی حاوی ترک از ایده اصلاح طول ورق استفاده می‌شود. در این ایده، ابتدا نمودار بار- تغییرمکان دیوار بدون در نظر گرفتن ترک در ناحیه الاستیک محاسبه خواهد شد. پس از آن، اثر رشد و گسترش ترک با اصلاح طول ورق فولادی لحاظ خواهد شد. در صورتی که، یک دیوار برشی فولادی به عنوان یک طبقه مجزا در نظر گرفته شود، شکل ۹، برای دستیابی به دیاگرام بار- تغییرمکان برشی آن با توجه به تئوری ارائه شده، می‌توان ورق فولادی و قاب را از یکدیگر تفکیک نموده و دیاگرام مذکور را برای هر کدام به دست آورد و سپس با جمع آثار آنها دیاگرام را رسم کرد.



شکل ۹- فرض قاب مجزا

23- Basler



شکل ۱۰- وضعیت تنش‌های دیوار برشی فولادی

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود نقطه C حد کمانش و نقطه D حد جاری شدن ورق را نشان می‌دهد. که برای سادگی به جای خط OCD خط OD جایگزین می‌شود. پژوهشگران نشان داده‌اند که اثر چنین جایگزینی ناچیز است [۲۷].

معادله خط OC (مربوط به قبل از کمانش) و خط CD (مربوط به پس از کمانش) به ترتیب براساس روابط (۹- الف) و (۹- ب) خواهد بود:

$$F_w = \frac{Ebt}{2d(1+\nu)} U_w \quad (۹- الف)$$

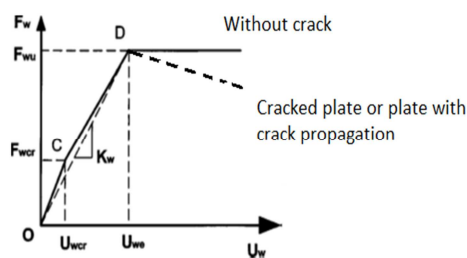
$$F_w = \frac{Ebt}{2(1+\nu)d} U_w - \tau_{cr} bt \left(1 - \frac{1+\nu}{2} \sin^2 2\theta\right) \quad (۹- ب)$$

در صورت وجود ترک در ورق، میدان تنش در نوک ترک با رابطه (۱۰) بیان می‌شود. میدان تنش در نوک ترک برای هر سه نوع تنش در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

تغییرمکان ورق در هنگام جاری شدن (U_{we}) یا به عبارت دیگر، تغییرمکان حد الاستیک ورق برابر است با:

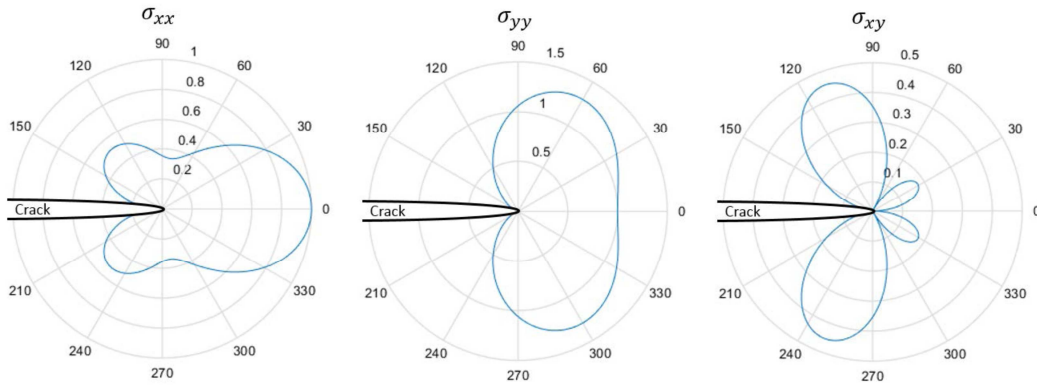
$$U_{we} = \left(\frac{\tau_{cr}}{G} + \frac{2\sigma_t}{E \sin 2\theta} \right) d \quad (۸)$$

در این رابطه، G مدول برشی ورق است. همچنین نیروی برشی ورق در هنگام کمانش برابر $F_{wcr} = \tau_{cr} \cdot b \cdot t$ است. تغییرمکان متناظر با نیروی برشی کمانش ورق، باتوجه به رفتار برشی خالص آن را می‌توان از رابطه $U_{wcr} = 2 \frac{F_{wcr}}{E} (1 + \nu)$ به دست آورد. با در دست داشتن نیرو و تغییرمکان برشی ورق و همچنین نیروی کمانش آن، دیاگرام نیرو- تغییرمکان برشی ورق مطابق شکل ۱۱ قابل دستیابی است.



شکل ۱۱- دیاگرام بار- تغییرمکان برشی ورق

$$\begin{aligned} \sigma_{xx(r,\theta)} &= \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{KII}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{yy(r,\theta)} &= \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{KII}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{xy(r,\theta)} &= \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{KII}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (۱۰)$$



شکل ۱۲- وضعیت تنش‌ها در نوک ترک

شده است، قابل محاسبه است [۲۸]. در این رابطه a طول اولیه ترک و w طول ورق فولادی است.

ضریب شدت تنش ترکیب مودها (KI و KII) از رابطه (۱۱) که برای ورق تحت اثر کشش و برش محاسبه

$$KI = 1.12 \frac{P}{tW} \sqrt{\pi a} - 0.231 \left(\frac{a}{W}\right) + 10.55 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.39 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (11)$$

$$KII = 4.886 \frac{P}{tW} \sqrt{\pi a} - 11.383 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 28.198 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 38.563 \left(\frac{a}{W}\right)^4 + 20.555 \left(\frac{a}{W}\right)^5$$

در دیوار برشی فولادی، گسترش ترک وقتی آغاز می‌شود که رابطه (۱۱) برقرار شود. هنگام گسترش ترک مقدار انرژی باید صرف ایجاد منطقه پلاستیک جدید در نوک ترک شود. به عبارت دیگر، با رسیدن G_I به G_{Ic} ترک شروع به گسترش می‌کند. G_{Ic} جز خواص ماده است.

چنانچه ترک خوردن ورق دیوار برشی فولادی ترکیبی از مودهای گسیختگی باشد، نرخ انرژی رها شده از جمع نرخ انرژی رها شده هر مود G_i حاصل می‌شود. نرخ رها شدن انرژی در هر مود براساس میدان تنش نوک ورق نیز قابل محاسبه است. به عبارت دیگر،

$$G_{II} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^2 \quad \text{و} \quad G_I = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2$$

است. برای ترک

$$D_{prop} = \frac{G}{G_c} = \left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^\beta + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^\gamma + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIc}}\right)^\eta = 1 \quad (12)$$

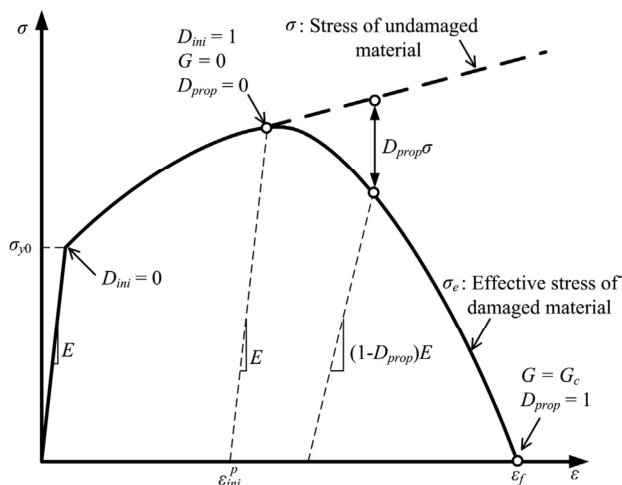
$$G_c = \int_0^{w_1} \sigma_e dw \quad (13)$$

$$D_{prop} = \frac{l_c (\mathcal{E}_{eq}^p - \mathcal{E}_{eq,ini}^p)}{w_1} \quad (14)$$

$$\sigma_e = (1 - D_{prop}) \sigma \quad (15)$$

که در این رابطه \mathcal{E}_{eq}^p و $\mathcal{E}_{eq,ini}^p$ به ترتیب کرنش پلاستیک معادل و کرنش پلاستیک در شروع گسیختگی ($D_{prop} = 0$ و $D_{ini} = 1$) مطابق شکل ۱۳ است.

در این روابط عرض ترک w_1 وقتی که D_{prop} به مقدار واحد می‌رسد، σ_e تنش موثر گسیختگی مصالح است که در شکل ۱۳ توصیف شده است. برای ورق دیوار برشی فولادی که تحت اثر تنش نرمال و تنش برشی است $\beta = \gamma = \eta = 1$. همچنین تنش موثر را می‌توان از رابطه (۱۵) محاسبه نمود:



شکل ۱۳- نمودار گسیختگی مصالح

$$\theta_0 = \mp \left[155.5^\circ \frac{K_{II}}{K_I + K_{II}} \right] - 83.4^\circ \left[\frac{K_{II}}{K_I + K_{II}} \right]^2 \quad (16)$$

براساس معیار ریچارد که با استفاده از تعداد زیادی مدل‌های آزمایشگاهی تست شده، به دست آمده است [۲۸]، زاویه رشد ترک برابر است با:

تنش کمانش در ورق فولادی با وجود ترک براساس

معیار شوکلا [۲۹] برابر است با:

$$\tau_{cr} = \frac{K_{Ic} K_{IIc}}{\sqrt{\pi a} \sqrt{K_{IIc}^2 \sin^2(2\theta) - K_{Ic}^2 \sin^2(2\theta) + K_{Ic}^2}} \quad (17)$$

تنش تسلیم باشد، ورق تسلیم شده و بیشتر انرژی ورق صرف میدان تسلیم نوک ترک می‌شود. براساس معیار ون میسر ورق زمانی تسلیم می‌شود که رابطه زیر برقرار شود:

بنابراین اگر شدت تنش‌ها از تنش تسلیم حاصل شده براساس معیار ون میسر کمتر شود، گسترش ترک به صورت الاستیک ایجاد می‌شود و اگر تنش‌های بیشتر از

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2) = 2F_y^2 \quad (18)$$

در هنگام تسلیم شدن ورق با در نظر گرفتن کمانش و جایگذاری مقادیر تنش‌ها، داریم:

$$3\tau_{cr}^2 + 3\tau_{cr} \sigma_t \sin 2\theta + \sigma_t^2 - F_y^2 = 0 \quad (20)$$

بنابراین مقدار تنش معادل تسلیم ورق برابر است با:

باتوجه به اینکه ضخامت ورق فولادی کم است، بنابراین وضعیت تنش‌ها به صورت تنش صفحه‌ای بوده و تنش‌های $\sigma_z = \sigma_{yz} = \sigma_{xz}$ برابر صفر است. بنابراین با در نظر داشتن $\sigma_{xy} = \tau_{xy}$ رابطه (۱۸) را می‌توان به صورت زیر ساده نمود:

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 3\tau_{xy}^2 = F_y^2 \quad (19)$$

$$\sigma_t = 1.5\tau_{cr} \sin 2\theta \pm \sqrt{(1.5\tau_{cr} \sin 2\theta)^2 - (3\tau_{cr}^2 - F_y^2)} \quad (21)$$

همچنین شروع تغییرمکان پلاستیک برشی ورق، Δ_{wp} از مساوی قراردادن کار نیروی برشی و انرژی کرنشی ورق U ، به دست می‌آید. محاسبه Δ_{wp} با در نظر گرفتن اثر میدان کشش قطری برابر است با:

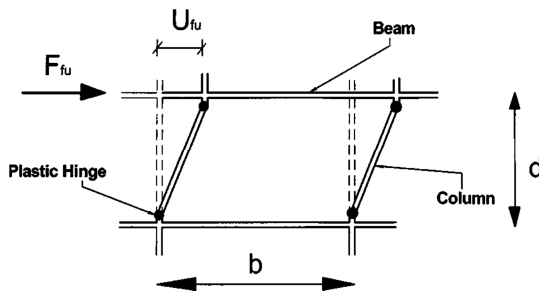
$$U = \iiint \left[\frac{1}{2E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\nu\sigma_x\sigma_y) + \frac{1}{2G} \tau_{xy}^2 \right] d_x d_y d_z \quad (23)$$

با جایگذاری زاویه θ برابر زاویه میدان کشش قطری α و همچنین انتگرال گیری از رابطه (۲۳)، انرژی کرنشی برابر است با:

$$U = \left[\frac{1}{2E} (\sigma_t^2 \cos^4 \alpha + \sigma_t^2 \sin^4 \alpha - 2\nu\sigma_t^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha) + \frac{1+\nu}{4E} \sigma_t^2 \sin^2 \alpha \right] b d t \quad (24)$$

$$\Delta_{wp} = \frac{0.65 \sigma_t}{E} \times \frac{3 + \sin^2 2\alpha}{\sin 2\alpha} d \quad (26)$$

برای دستیابی به دیاگرام نیرو-تغییرمکان برشی قاب، با فرض اتصال صلب تیر به ستون و رفتار الاستیک و پلاستیک کامل برای قاب می‌توان دیاگرام شکل ۱۴ را با استفاده از معادلات (۲۷) تا (۲۹) به دست آورد.

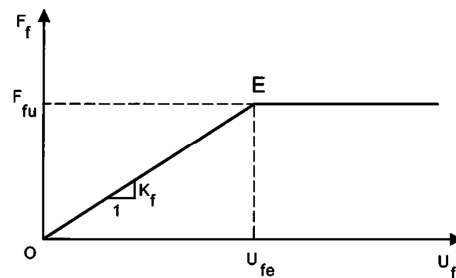


ب) ساده‌سازی قاب پس از تشکیل مفاصل پلاستیک در ستون

با در نظر گرفتن ضریب پواسون برابر 0.3 و همچنین به کمک روابط مثلثاتی، رابطه فوق به صورت زیر ساده می‌شود:

$$U = \frac{1.3 \sigma_t^2}{8E} (3 + \sin^2 2\alpha) b d t \quad (25)$$

کار نیروی خارجی ورق برابر $W = F_W \Delta_{wp}$ است. با مساوی قرار کار خارجی و انرژی کرنشی، تغییرمکان برشی Δ_{wp} به صورت زیر محاسبه می‌شود:



الف) دیاگرام تغییر مکان برشی قاب

شکل ۱۴- دستیابی به نمودار بار-تغییرمکان قاب خالی

بر اساس اصول تحلیل سازه‌ها $\rho = \frac{I_{bd}}{4I_{cd}}$ است که در آن I_{bd} و I_{cd} به ترتیب برابر ممان اینرسی ستون و تیر است. در این رابطه، ارتفاع قاب برابر ارتفاع خالص ستون یا همان ارتفاع ورق در نظر گرفته می‌شود. نیروی برش قاب پس از تشکیل مفصل پلاستیک در

برای قاب خمشی در ناحیه الاستیک، سختی برابر است با:

$$K_f = \frac{24Ec}{d^3} \times \frac{12\rho + 1}{12\rho + 4} \quad (27)$$

به جای تأثیر مستقیم اثر گسترش ترک، مقدار طول اصلاح شده را جایگزین می‌کنیم. اگر فرض کنیم طول ورق ترک‌دار برابر b_2 باشد، که در آن b_1 طول ترک گسترش یافته است، لذا $b_2 = b - b_1$ است. بنابراین مقاومت

ورق ترک‌دار برابر است با:

$$F_{w2} = (\tau_{cr} + 0.5\sigma_t \sin 2\alpha) b_2 t \quad (29)$$

بنابراین نمودار بار-تغییر مکان دیوار برشی فولادی

به صورت شکل (۱۵) قابل ترسیم است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر ترک و گسترش آن در دیوار برشی فولادی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به صورت خلاصه در زیر دسته‌بندی شده است:

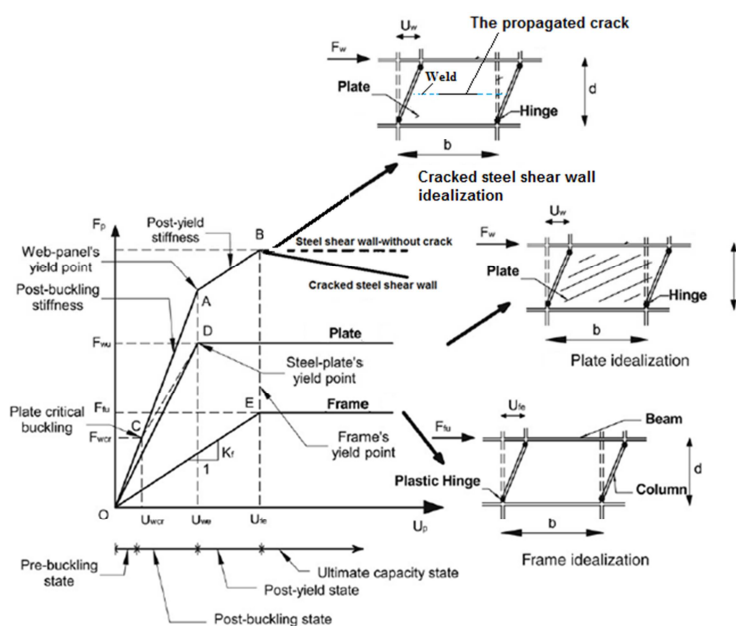
ستون‌ها، F_f ، به‌عنوان ظرفیت برشی یا نیروی برشی نهایی معرفی می‌شود. تغییر مکان Δ_f متناسب با تغییر مکان حدالاستیک (شروع تغییر مکان پلاستیک) قاب بوده و برابر است با:

$$\Delta_f = \frac{M_p d^2}{6E I_c} \quad (28)$$

$$F_f = \frac{4M_{fu}}{d} \quad (29)$$

بنابراین با در دست داشتن معادلات (۲۶)، (۲۹) و

(۲۲) نمودار بار-تغییر مکان دیوار برشی فولادی در ناحیه الاستیک ترسیم می‌شود. برای ترسیم بار-تغییر مکان در ناحیه پلاستیک اثر گسترش ترک لحاظ می‌شود که براساس معادلات (۱۰) تا (۱۷) به‌دست آمده است. برای اصلاح طول ورق b ، در روابط بار-تغییر مکان ورق،



شکل ۱۵- نمودار بار-تغییر مکان دیوار برشی فولادی ترک‌دار

- ۱- ترکی را نمی‌توان به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی شکل‌پذیر در نظر گرفت.
- ۲- برخلاف نوع ترک‌های میانی، در دیوارهای با ترک کناری، در هیچ‌یک از مدل‌ها تا تغییر مکان نهایی گسیختگی رخ نمی‌دهد. بنابراین چنین می‌توان استنباط نمود که ترک‌های میانی بحرانی‌تر از ترک‌های کناری است.

- ۱- در ترک‌های میانی با طول بیش از ۱۲۵ میلی‌متر، دیوار به‌طور ناگهانی دچار گسیختگی می‌شود که مقدار جذب انرژی آن در ناحیه غیرخطی بسیار کم است، اما در ترک‌های بیش از ۵۱۲ میلی‌متر، دیوار بدون آنکه وارد فاز غیرخطی شود، گسیخته شده است. این بدان معنا است که دیوار با چنین

منجر به کاهش جذب انرژی به میزان ۱۸٪ نسبت به دیوار بدون ترک می‌شود که در مقایسه با ترک‌های میانی بسیار کم می‌باشد.

۶- با بررسی منحنی‌های بار- تغییرمکان می‌توان دریافت که در ناحیه غیرخطی گسترش ترک در دیوار، رفتاری بین حالت ترک بدون گسترش و حالت شکاف منطبق بر مسیر گسترش ترک را طی می‌کند. این وضعیت در هر دو حالت ترک اولیه با طول ۴ و ۸ میلی‌متر صادق است.

۷- اثر گسترش ترک تأثیر کمی بر سختی الاستیک دارد و تنها باعث کاهش سختی به میزان ۱ تا ۲٪ می‌گردد؛ اما وجود شکاف منطبق بر مسیر گسترش ترک، سختی را حدود ۷٪ کاهش می‌دهد. این روند کاهش سختی در خصوص مقاومت دیوار مقداری متفاوت است. یعنی گسترش ترک و شکاف منطبق بر مسیر گسترش ترک مقاومت یکسانی نشان می‌دهند و باعث افت مقاومت نهایی دیوار به مقدار ۱۳٪ شده‌اند.

۳- نتایج نشان می‌دهد که وجود ترک با طول اولیه کم، تأثیر بسیار ناچیزی بر سختی و مقاومت دارد؛ اما در ترک‌های با طول زیاد، تقریباً بیش از ۱۲۸ میلی‌متر، هر دو پارامتر، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای نشان می‌دهند.

۴- با افزایش طول ترک، جذب انرژی سیستم بشدت کاهش می‌یابد. با توجه به ضرورت جذب انرژی در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا، در صورت وجود ترک با طول بیش از ۱۰٪ طول ورق دیوار، نمی‌توان دیوار را به‌عنوان سیستم باربر لرزه‌ای مناسب در نظر گرفت، زیرا رفتار آن محدود به ناحیه الاستیک خواهد شد.

۵- وجود ترک کناری باعث کاهش سختی و مقاومت می‌شود، اما تا طولی برابر با ۲۵٪ طول دیوار، تأثیر چندانی بر ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت ندارد. همچنین کاهش جزئی ضریب رفتار، ناشی از وجود ترک کناری مشاهده می‌شود. ترک کناری با طول ۱۰۲۴ میلی‌متر

مراجع

- [1] Guz, A.N., & Dyshel, M.S. (2004). "Stability and residual strength of panels with straight and curved cracks", *Theoretical and applied fracture mechanics*, 41(1), 95-101.
- [2] Paik, J.K. (2008). "Residual ultimate strength of steel plates with longitudinal cracks under axial compression-experiments", *Ocean engineering*, 35(17), 1775-1783.
- [3] Paik, J.K. (2009). "Residual ultimate strength of steel plates with longitudinal cracks under axial compression-nonlinear finite element method investigations", *Ocean Engineering*, 36(3), 266-276.
- [4] Brighenti, R. (2010). "Influence of a central straight crack on the buckling behaviour of thin plates under tension, compression or shear loading", *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 6(1), 73-87.
- [5] Alinia, M.M., Hosseinzadeh, S.A.A., & Habashi, H.R. (2007). "Numerical modelling for buckling analysis of cracked shear panels", *Thin-Walled Structures*, 45(12), 1058-1067.
- [6] Alinia, M.M., Hosseinzadeh, S.A.A., & Habashi, H.R. (2007). "Influence of central cracks on buckling and post-buckling behaviour of shear panels", *Thin-Walled Structures*, 45(4), 422-431.
- [7] Lin, C.H., Tsai, K.C., Lin, Y.C., Wang, K.J., Qu, B., & Bruneau, M. (2007). "Full scale steel plate shear wall: NCEE/MCEER phase I tests", In *Proceeding of the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Ontario, Canada*, 26-29.
- [8] Guendel, M., Hoffmeister, B., & Feldmann M. (2011). "Experimental and numerical investigations on Steel Shear Walls for seismic Retrofitting", *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN*.

- [9] Berman, J.W., & Bruneau, M. (2005). "Experimental investigation of light-gauge steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering*, 131(2), 259-267.
- [10] Kharrazi, M. (2005). "Fish plate behavior on Steel plate shear wall", *Canadian journal of civil engineering*, 96-108.
- [11] Yaghoubsahi, M., Alinia, M.M., Testa, G., & Bonora, N. (2015). "On the postbuckling of flawed shear panels considering crack growth effect", *Thin-Walled Structures*, 97, 186-198.
- [12] Siegmund, T. (2004). "A numerical study of transient fatigue crack growth by use of an irreversible cohesive zone model", *International Journal of Fatigue*, 26(9), 929-939.
- [13] Roe, K. L., & Siegmund, T. (2003). "An irreversible cohesive zone model for interface fatigue crack growth simulation", *Engineering fracture mechanics*, 70(2), 209-232.
- [14] Bouvard, J.L., Chaboche, J.L., Feyel, F., & Gallerneau, F. (2009). "A cohesive zone model for fatigue and creep-fatigue crack growth in single crystal superalloys", *International Journal of Fatigue*, 31(5), 868-879.
- [15] Liu, P.F., Hou, S.J., Chu, J.K., Hu, X.Y., Zhou, C.L., Liu, Y.L., & Yan, L. (2011). "Finite element analysis of postbuckling and delamination of composite laminates using virtual crack closure technique", *Composite Structures*, 93(6), 1549-1560.
- [16] Fawaz, S.A. (1998). "Application of the virtual crack closure technique to calculate stress intensity factors for through cracks with an elliptical crack front", *Engineering Fracture Mechanics*, 59(3), 327-342.
- [17] Servetti, G., & Zhang, X. (2009). "Predicting fatigue crack growth rate in a welded butt joint: The role of effective R ratio in accounting for residual stress effect", *Engineering Fracture Mechanics*, 76(11), 1589-1602.
- [18] Belytschko, T., & Black, T. (1999). "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing", *International journal for numerical methods in engineering*, 45(5), 601-620.
- [19] Belytschko, T., Chen, H., Xu, J., & Zi, G. (2003). "Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity and a new discontinuous enrichment", *International journal for numerical methods in engineering*, 58(12), 1873-1905.
- [20] Dolbow, J.O.H.N., & Belytschko, T. (1999). "A finite element method for crack growth without remeshing", *International journal for numerical methods in engineering*, 46(1), 131-150.
- [21] Moës, N., & Belytschko, T. (2002). "Extended finite element method for cohesive crack growth", *Engineering fracture mechanics*, 69(7), 813-833.
- [22] Sukumar, N., Moës, N., Moran, B., & Belytschko, T. (2000). "Extended finite element method for three-dimensional crack modelling", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48(11), 1549-1570.
- [23] Sukumar, N., Huang, Z.Y., Prévost, J.H., & Suo, Z. (2004). "Partition of unity enrichment for bimaterial interface cracks", *International journal for numerical methods in engineering*, 59(8), 1075-1102.
- [24] Giner, E., Sukumar, N., Tarancon, J.E., & Fuenmayor, F.J. (2009). "An Abaqus implementation of the extended finite element method", *Engineering fracture mechanics*, 76(3), 347-368.
- [25] Campilho, R.D.S.G., Banea, M.D., Chaves, F.J.P., & Da Silva, L.F.M. (2011). "EXTENDED Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I", *Computational Materials Science*, 50(4), 1543-1549.
- [26] Hibbit, M. A. Karlsson & Sorensen. (2012). ABAQUS User's Manual
- [27] Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E., & Kharrazi, M.H. (2005). "Shear analysis and design of ductile steel plate walls", *Journal of Structural Engineering*, 131(6), 878-889.
- [28] Richard, H.A., Fulland, M., Sander, M. (2004). Theoretical Crack Path Prediction, *Blackwell Publishing*.
- [29] Shukla, A. (2005). Practical fracture mechanics in design (2nd ed.). New York, NY: *Marcel Dekker*.

V. Broujerdian *

Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering, Iran University of
Science and Technology.

e-mail: broujerdian@iust.ac.ir

M. A. Shayanfar

Associate Professor,
Department of Civil
Engineering, Iran University of
Science and Technology.

e-mail: shayanfar@iust.ac.ir

A. Ghamari

PhD candidate, Department of
Civil Engineering, Iran
University of Science and
Technology.

e-mail: aghamari@cmps2.iust.ac.ir

Parametric Study of Crack Growth Effect on Steel Plate Shear Wall

Experimental and numerical study have carried out on behavior of Steel Plate Shear Wall (SPSW) and also, its good performance during past earthquakes have been testified a capable system against lateral load. The system have high ductility, stiffness and strength under seismic loading during a sever earthquake. Although, enormous studies have been performed till now, there are several unknown problems about this system. Effect of crack on SPSW behavior is obviously one of the important between the unknowns that have considerable effect on the behavior of SPSW. Therefore, in this study the effect of crack on SPSW is investigated. Results indicated that central crack is more critical than edge cracks. The results show that long central cracks cause the system fails in a brittle manner. In addition, a model have been proposed to obtain load-displacement curve without finite element modeling. On the proposed model the crack and its propagation is consider.

Keywords: Steel shear wall, Crack, Seismic behavior, Response modification factor, Extended finite element method.

*Corresponding author