

بررسی اثر شکل شیار و ورق سخت‌کننده‌ی انتهایی در رفتار دیوار برشی فولادی شیاردار

میلاد خاتمی راد (دانشجوی دکتری)

هاشم شریعتمدار* (دانشیار)

دانشکده‌ی هندی عمران، دانشگاه فردوسی

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دوبی ۲ - ۳۴، شماره ۱/۱، ص. ۵۹-۶۷

دیوار برشی فولادی شیاردار، شیارهای عمودی دارد و هنگامی که تحت بارهای جانبی قرار می‌گیرد، بخش بین شیارهای آن تغییر شکل انحنای دوطرفه می‌دهد و با تشکیل مفصل خمیری خمشی در انتهای شیارها، انرژی ورودی به سازه را مستهلک می‌سازد. در نوشتار حاضر، برای بررسی اثر شکل شیار و نوع سخت‌کننده‌ی انتهایی در رفتار دیوار برشی فولادی شیاردار، تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. پس از مدل کردن دیوار شیاردار در نرم‌افزار مذکور، با استفاده از آزمایش انجام شده توسط کورتس و لیو، راستی‌آزمایی شده است. سپس رفتار لرزه‌یی ۳ مدل با شکل شیارهای متفاوت و ۳ مدل با شکل سخت‌کننده‌های انتهایی متفاوت تحلیل و با یکدیگر مقایسه شده است. منحنی‌های چرخه‌یی، استهلاک انرژی، کمانش خارج از صفحه، سختی اولیه و مقاومت بحث و بررسی شده است. شکل شیار پیشنهادی باعث کاهش سختی اولیه، افزایش مقاومت، افزایش شکل‌پذیری و استهلاک انرژی می‌شود. همچنین شکل سخت‌کننده‌ی انتهایی اثر به‌سزایی در افزایش سختی اولیه و مقاومت دیوار شیاردار دارد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی شیاردار، تحلیل عددی، استهلاک انرژی،

منحنی چرخه‌یی.

miladkhatami@ut.ac.ir
shariatmadar@um.ac.ir

۱. مقدمه

در سال‌های ۱۹۶۹ و ۱۹۷۳^[۱]، دیوار برشی بتنی شیاردار به عنوان سیستم مستهلک‌کننده‌ی انرژی معرفی شده است. دیوار برشی بتنی شیاردار، شیارهایی با فواصل یکسان و در وسط ارتفاع دیوار دارد و شیارها با قطع کامل بتن و آرماتور ایجاد می‌شوند. دیوار برشی بتنی شیاردار، شکل‌پذیری بیشتری را نسبت به دیوار برشی بتنی دارد. در تغییر مکان‌های نسبی کوچک، دیوار به صورت برشی عمل می‌کند و تغییر شکل‌ها را محدود می‌کند. در تغییر مکان‌های نسبی بزرگ، شیارها به صورت مجموعه‌یی از اعضاء خمشی عمل می‌کنند و باعث استهلاک انرژی می‌شوند.

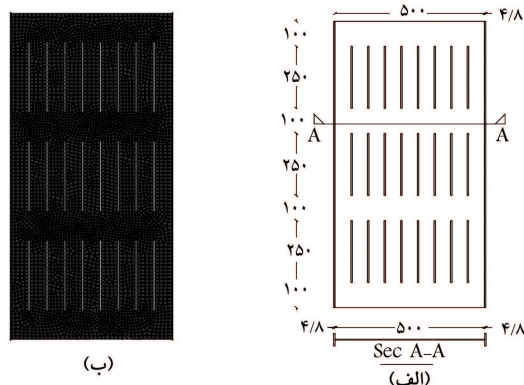
دیوار برشی بتنی شیاردار برای اولین مرتبه در یک ساختمان ۳۶ طبقه در ژاپن و بعد از آن در ده‌ها ساختمان بلند مرتبه استفاده شده است. اگرچه این دیوارها شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند، ولی به علت کاهش مقاومت، تعداد دیوار مورد نیاز افزایش می‌یابد، در نتیجه وزن سازه بیشتر می‌شود و نیروهای جانبی زلزله افزایش می‌یابند. علاوه بر آن، بتن مسلح در برابر تغییر شکل‌های خمیری چرخه‌یی به سرعت تخریب می‌شود. این دو دلیل باعث عدم استفاده از شیار در دیوار برشی بتنی شده است.^[۲]

در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی (۲۰۰۳) بر روی دیوار برشی فولادی شیاردار (دیوار شیاردار)، به بررسی اثر شیار در رفتار دیوار شیاردار بر روی ۴۲ نمونه‌ی * نویسنده مسئول

در سال‌های ۱۹۶۹ و ۱۹۷۳^[۱]، دیوار برشی بتنی شیاردار به عنوان سیستم مستهلک‌کننده‌ی انرژی معرفی شده است. دیوار برشی بتنی شیاردار، شیارهایی با فواصل یکسان و در وسط ارتفاع دیوار دارد و شیارها با قطع کامل بتن و آرماتور ایجاد می‌شوند. دیوار برشی بتنی شیاردار، شکل‌پذیری بیشتری را نسبت به دیوار برشی بتنی دارد. در تغییر مکان‌های نسبی کوچک، دیوار به صورت برشی عمل می‌کند و تغییر شکل‌ها را محدود می‌کند. در تغییر مکان‌های نسبی بزرگ، شیارها به صورت مجموعه‌یی از اعضاء خمشی عمل می‌کنند و باعث استهلاک انرژی می‌شوند.

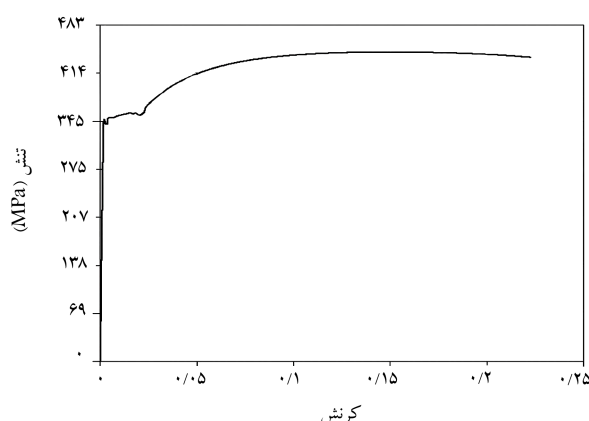
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۲/۸، اصلاحیه ۱۳۹۵/۵/۴، پذیرش ۱۳۹۵/۵/۱۶.

DOI: 10.24200/J30.2018.1323



الف) مشخصات هندسی دیوار شیاردار آزمایش شده توسط کورتس و لیو؛
ب) مدل المان محدود دیوار شیاردار.

شکل ۱. مشخصات هندسی و مدل المان محدود دیوار شیاردار. [۷]



شکل ۲. منحنی تنش - کرنش واقعی، کورتس و لیو. [۷]

شیاردار با ارتفاع ۱۱۵۰، عرض ۵۰۰ و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر و در انتها با دو سخت‌کننده به عرض ۵۰ و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر است. همچنین ۳ ردیف و در هر ردیف ۸ رابط دارد. در شکل ۱، مشخصات هندسی و مدل المان محدود دیوار شیاردار نشان داده شده است.

دیوار شیاردار توسط المان پوسته (S4R) در نرم‌افزار ABAQUS مدل شده است. S4R یک المان عمومی ۴ نقطه‌ای دو انحنایی با انتگرال‌گیری کاهش یافته است. هر نقطه ۶ درجه آزادی، ۳ درجه انتقالی (U_x , U_y , U_z) و ۳ درجه دورانی (θ_x , θ_y , θ_z) دارد.

۲.۲. مدل‌سازی مصالح

نمودار تنش - کرنش فولاد تحت بارگذاری رفت و برگشتی و بارگذاری یک‌ساخت ۳ متفاوت است. [۸] در شکل ۲، منحنی تنش - کرنش واقعی در آزمایش کورتس و لیو، [۷] نشان داده شده است. برای سخت‌شوندگی ماده نیز از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی ۴ استفاده شده است. [۹]

۳.۲. مدل‌سازی آسیب ۵ در مصالح

یکی از عوامل زوال مقاومت ۶ در دیوار شیاردار، تمرکز تنش در ابتدا و انتهای شیارها و گسترش ترک است. دو فرایند اصلی، که باعث ایجاد آسیب در فلزات نرم می‌شوند، آسیب شکل‌پذیر ۷ ناشی از جوانه‌زنی ۸، رشد ۹ و به هم پیوستن ۱۰ حفره‌ها

که اثر دیوار در سختی قاب، بیشتر از اثر آن در مقاومت قاب است. در سال ۱۰، ۲۰، [۶] نیز یک مطالعه‌ی عددی بر روی ترکیب بندی رابط‌ها انجام شد و برای بررسی اثر طول رابط‌ها و فاصله‌ی آنها از یکدیگر در رفتار دیوار شیاردار، ۲ نمونه با عنوان نمونه‌های اصلاح شده مدل‌سازی و با نمونه‌ی معمولی (دارای رابط‌ها با طول و فاصله‌ی ثابت) مقایسه شده و نتایج به دست آمده بیانگر این مطلب بوده است که رفتار نمونه با طول متفاوت رابط‌ها، تفاوت چندانی با نمونه‌ی معمولی ندارد؛ در حالی که نمونه با فاصله‌ی متغیر رابط‌ها، نسبت به نمونه‌ی معمولی، رفتار مناسب‌تری از خود بروز می‌دهد.

همچنین در پژوهش دیگری در سال ۱۱، ۲۰، [۷] دو سری آزمایش بر روی دیوار شیاردار (۵ آزمایش) و دیوار شیاردار - قاب (۵ آزمایش) انجام شد. در سری اول مشخصات اساسی دیوار شیاردار و در سری دوم اندرکنش قاب و دیوار شیاردار بررسی شده است. پارامترهای مورد بررسی در سری اول مقاومت، سختی، توزیع تنش و مدهای شکست است. در سری دوم، ممان اینرسی خمشی تیر قاب، ضخامت دیوار، تعداد دیوار در ۱ دهانه و تعداد طبقات بررسی شده است. بیشتر نمونه‌ها تا تغییر مکان نسبی ۵٪ بدون کاهش قابل ملاحظه‌ی مقاومت (تا ۸۰٪ مقاومت نهایی) تغییر شکل دادند و این نتیجه به دست آمد که سختی خمشی تیرها اثر قابل ملاحظه‌ی در سختی اولیه‌ی دیوار - قاب دارد. همچنین افزایش تعداد دیوار در ۱ دهانه اثر قابل توجهی در سختی دیوار - قاب ندارد.

مهم‌ترین تفاوت نمونه‌های مورد بررسی در نوشتارهای اخیر در این است که قاب‌های برشی مورد بررسی توسط کورتس و لیو، [۷] برای تحمل تمام برش پایه‌ی اعمالی به سازه و دیگر قاب‌های برشی مورد بررسی، [۴-۶] فقط برای ۱۰ تا ۲۵ درصد برش پایه طراحی شده است. همچنین نسبت ارتفاع به عرض دیوارهای شیاردار توسط کورتس و لیو، [۷] نزدیک ۲ است، در حالی که دیوارهای شیاردار در دیگر پژوهش‌ها، [۶] نزدیک ۱ بوده و دیوار شیاردار، قسمت عمده‌ی دهانه را اشغال کرده است. با توجه به مطالعات پیشین، هدف اصلی در نوشتار حاضر بررسی عددی اثر شکل شیار و نوع سخت‌کننده‌ی انتهایی در مقاومت، سختی اولیه، و استهلاک انرژی دیوار شیاردار است.

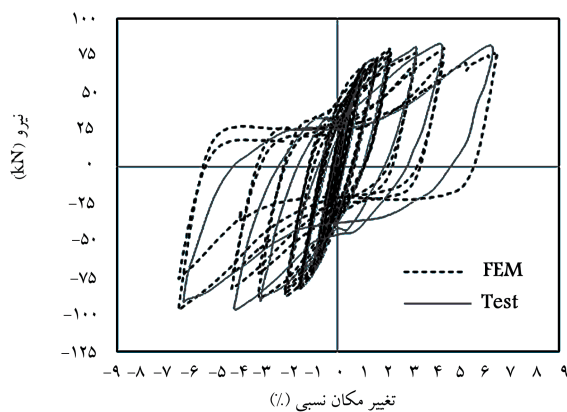
مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS با آزمایش انجام شده توسط کورتس و لیو، [۷] راستی‌آزمایی شده است. بر اساس نتایج نوشتار حاضر، شکل شیار پیشنهادی باعث کاهش سختی اولیه، افزایش مقاومت، و استهلاک انرژی می‌شود. همچنین با توجه به دیگر بررسی‌های انجام شده بر روی عرض ورق سخت‌کننده‌ی انتهایی، [۴] در نوشتار حاضر، اثر نوع سخت‌کننده‌ی انتهایی در رفتار دیوار شیاردار بررسی شده است. نوع سخت‌کننده‌ی انتهایی اثر به‌سزایی در افزایش سختی اولیه، مقاومت و استهلاک انرژی دیوار شیاردار دارد.

۲. ارائه‌ی مدل عددی دیوار شیاردار

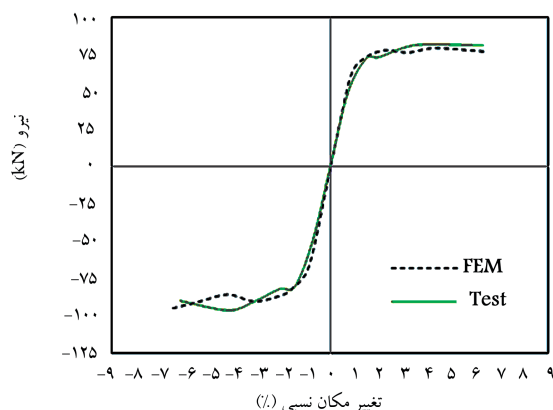
هدف اصلی بخش حاضر، ارائه‌ی مدل عددی قابل اعتماد برای شبیه‌سازی رفتار دیوار شیاردار تحت بارگذاری رفت و برگشتی ۱ است. نتایج مدل عددی با نتایج آزمایش انجام شده، راستی‌آزمایی ۲ می‌شود. بر اساس مدل المان محدود راستی‌آزمایی شده، بررسی‌های تکمیلی بر روی دیوار شیاردار با هندسه‌ی متفاوت انجام شده است.

۱.۲. مشخصات مدل

کورتس و لیو، [۷] دیوار شیاردار را با مقیاس ۱ به ۳ ساختند و آزمایش کردند. دیوار

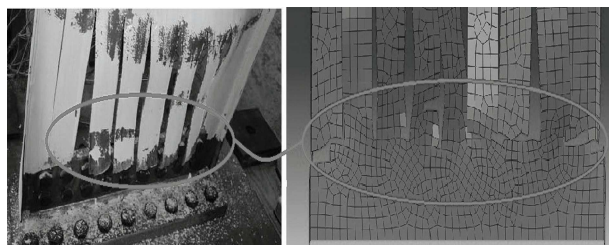


الف) منحنی چرخه‌ی مدل‌های عددی و آزمایش؛



ب) پوش منحنی چرخه‌ی مدل‌های عددی و آزمایش.

شکل ۴. منحنی چرخه‌ی و پوش منحنی چرخه‌ی مدل‌های عددی و آزمایش.



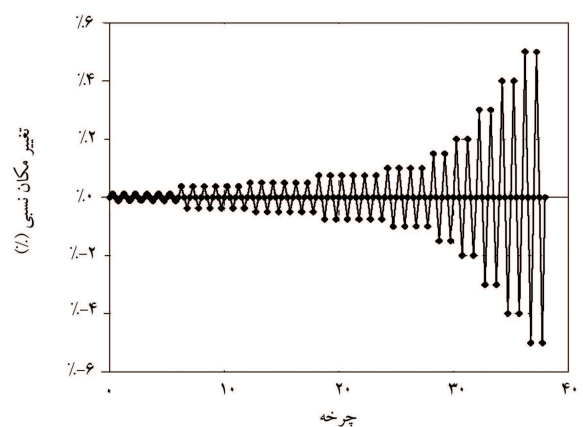
شکل ۵. مد شکست دیوار شیاردار.

۳. راستی‌آزمایی تحلیل عددی

برای راستی‌آزمایی مدل تهیه شده در نرم‌افزار ABAQUS، آزمایش انجام شده‌ی کورتس و لیو،^[۷] انتخاب شده است.

۱.۳. آزمایش انجام شده توسط کورتس و لیو (۲۰۱۱)^[۷]

در شکل ۱، مشخصات هندسی دیوار شیاردار در نوشتار کورتس و لیو،^[۷] و مدل المان محدود آن نشان داده شده است. پس از مدل کردن دیوار شیاردار در نرم‌افزار ABAQUS، خصوصیات ماده، نواقص اولیه، شرایط مرزی و الگوی بارگذاری به مدل اختصاص داده شده است. در شکل ۴، منحنی چرخه‌ی^{۱۷} و پوش^{۱۸} حاصل از مدل المان محدود و نتیجه‌ی آزمایش و در شکل ۵، مد شکست دیوار شیاردار نشان داده شده است.



شکل ۳. الگوی بارگذاری توسط کورتس و لیو.^[۷]

و آسیب برشی^{۱۱} ناشی از تجمع مرز برشی^{۱۲} است. برای مدل‌سازی آسیب در نرم‌افزار ABAQUS باید هر دو آسیب شکل‌پذیر و برشی به درستی مدل شوند. برای این منظور، با انجام آزمایش بر روی مصالح مورد نظر، داده‌های لازم به دست می‌آیند.^[۱۸ و ۱۹]

۴.۲. مدل‌سازی کمانش خارج از صفحه و نواقص اولیه در مدل

با توجه به اینکه یکی از عوامل اصلی زوال مقاومت دیوار شیاردار، کمانش خارج از صفحه^{۱۳} است.^[۲] باید بتوان به درستی آن را مدل کرد. سختی اولیه و مقاومت دیوار شیاردار تحت بارهای جانبی درون صفحه‌ی بسیار زیاد است، ولی نواقص اولیه^{۱۴} باعث کاهش قابل ملاحظه‌ی در سختی اولیه و مقاومت می‌شود. برای این منظور باید ابتدا آنالیز کمانش توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام شود. در نوشتار حاضر، پس از انجام آنالیز کمانش به روش Eigenvalue، با تغییر در فایل ورودی^{۱۵} نرم‌افزار، ترکیبی از تمام تغییر شکل‌های حاصل از مدهای کمانش خطی با اعمال ضرایب کوچک به عنوان مدل هندسی اولیه‌ی دیوار شیاردار در تحلیل کمانش غیرخطی به کار می‌رود. این عمل در واقع به مفهوم ایجاد نواقص اولیه در مدل اولیه است، که مدل‌سازی را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند.^[۱۱]

۵.۲. الگوی بارگذاری

به علت آسیب و صدمه‌های گسترش یافته در دیوار شیاردار، باید از بارگذاری رفت و برگشتی استفاده کرد.^[۱۲] برای آنکه بتوان نتایج آزمایش‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد، آیین نامه‌ی ۲۴ - ATC، الگوهای استاندارد بارگذاری را معرفی کرده است.^[۱۳] در نوشتار حاضر، از الگوی بارگذاری شکل ۳ استفاده شده است.

۶.۲. بررسی حساسیت مش‌بندی^{۱۶}

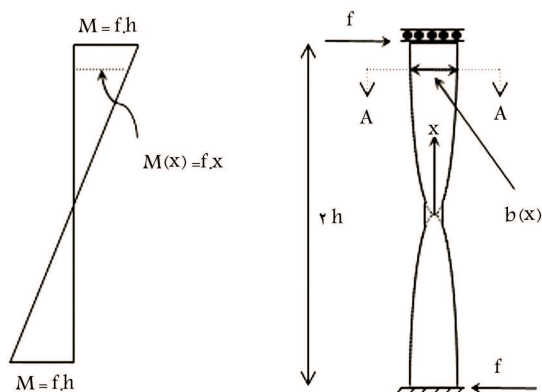
مرحله‌ی مش‌بندی، مهم‌ترین بخش در مدل‌سازی المان محدود است، که عمده‌ی هزینه، زمان و حجم کار را به خود اختصاص می‌دهد. مش‌بندی اصولی و صحیح، تضمین‌کننده‌ی دقت نتایج حاصل است. در نوشتار حاضر، دیوار شیاردار با سایزهای مختلف مش‌بندی شده و پس از انجام تحلیل با نرم‌افزار، نتایج حاصل مقایسه و اندازه‌ی ۵ میلی‌متر برای مش‌بندی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مقایسه‌ی مقاومت بیشینه‌ی دیوار شیاردار در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی.

مدل عددی	مدل آزمایشگاهی
مقاومت بیشینه (KN) ۷۹٫۵	۸۱٫۷۶
تفاوت (%) -۲٫۷	-

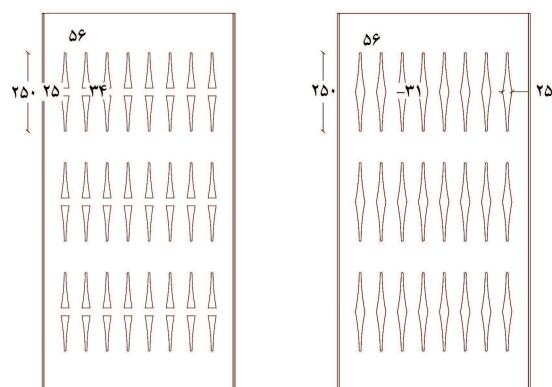
جدول ۲. مقایسه‌ی سختی اولیه‌ی دیوار شیاردار در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی.

مدل عددی	مدل آزمایشگاهی
سختی اولیه (KN/mm) ۶٫۳	۵٫۸
تفاوت (%) ۷٫۹	-



الف) تصویر یک رابط از دیوار شیاردار؛ ب) توزیع لنگر در طول یک رابط.

شکل ۶. تصویر و توزیع لنگر در طول رابط.



الف) SSW-۲؛ ب) SSW-۳.

شکل ۷. دیوار با شکل شیار پیشنهاد شده.

معیار راستی آزمایی سختی اولیه^{۱۹}، مقدار مقاومت در تغییر مکان‌های نسبی مختلف، و مقدار مقاومت بیشینه بر اساس منحنی‌های چرخه‌یی و مد شکست دیوار شیاردار است. بر اساس شکل‌های ۴ و ۵ و جدول‌های ۱ و ۲، مدل عددی تهیه شده به خوبی گسترش ترک و ایجاد آسیب، زوال مقاومت، سختی اولیه و مقاومت را نشان می‌دهند.

بر اساس جدول ۱، اختلاف سختی اولیه‌ی مدل آزمایشگاهی و عددی ۲٫۷٪ و بر اساس جدول ۲، اختلاف مقاومت بیشینه‌ی مدل آزمایشگاهی و عددی ۷٫۹٪ بوده است، که نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب مدل عددی است. همچنین بر اساس شکل ۴، مقادیر مقاومت مدل‌های آزمایشگاهی و عددی در تغییر مکان‌های نسبی مختلف با یکدیگر تطابق مناسبی دارند.

۴. بررسی اثر شکل شیار در رفتار دیوار شیاردار

تمرکز تنش در ابتدا و انتهای شیار و گسترش ترک باعث زوال مقاومت در دیوار شیاردار می‌شود. با کاهش تمرکز در این نواحی و گسترش توزیع تنش و کرنش در ارتفاع رابط‌ها^{۲۰}، می‌توان زوال مقاومت را کاهش داد. رابط نشان داده شده در شکل ۶ - الف و توزیع لنگر آن در شکل ۶ - ب را در نظر بگیرید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، توزیع لنگر در طول المان مذکور به صورت خطی است. در هر مقطع دلخواه مانند مقطع A-A، اساس مقطع خمیری ($Z(x)$) و مقدار تنش نرمال در تیر بیرونی مقطع قبل از تسلیم ($\sigma(x)$)، با استفاده از روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه خواهد بود.

$$Z(x) = \frac{tb^2(x)}{4} \quad (1)$$

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{Z(x)} = \frac{4fx}{tb^2(x)} \quad (2)$$

هر چه توزیع تنش در طول یک المان سازه‌یی یکنواخت‌تر باشد و تمرکز تنش در آن کمتر مشاهده شود، توانایی آن برای استهلاک انرژی^{۲۱} بیشتر خواهد بود. برای لینک مورد نظر در صورتی که هدف، ایجاد تنش یکنواخت در طول عضو حین بارگذاری باشد، باید مقدار تنش $\sigma(x)$ ، در طول بارگذاری مستقل از مقدار x باشد؛ بنابراین اگر مقدار عرض مقطع ($b(x)$) ضریبی از ریشه‌ی دوم x باشد، آنگاه روابط ۳ و ۴ را خواهیم داشت.

$$b(x) = 2a\sqrt{x} \quad (3)$$

$$\sigma(x) = \frac{4fx}{4ta^2x} = \frac{f}{ta^2} \quad (4)$$

لازم به ذکر است که ضریب a ، بدون بُعد نیست و بُعد آن، ریشه‌ی دوم واحد طول است، که در محاسبات باید به این موضوع دقت شود. با توجه به ثابت بودن مقدار t و a برای یک رابط، رابطه‌ی ۴ نشان می‌دهد که اگر مقدار عرض مقطع ($b(x)$)، ضریبی از ریشه‌ی دوم x باشد، مقدار $\sigma(x)$ مستقل از x خواهد بود؛ بنابراین با قرار دادن مقدار تنش تسلیم (σ_y) در رابطه‌ی ۴ می‌توان مقدار بار متناظر با تسلیم بیرونی‌ترین تار یک رابط را محاسبه کرد.

همچنین، این هندسه با توجه به رابطه‌ی ۴، رشد تسلیم در کل مقطع و به طور هم‌زمان در طول المان را تضمین می‌کند. البته لازم به ذکر است تمام محاسبات ذکر شده و نتایج به دست آمده بر این فرض استوار است که رفتار لینک مورد بررسی، مشابه تیر اولیه برنولی است و دو سر رابط، گیردار فرض شود. با توجه به موارد ذکر شده، در شکل (۱ - الف) دیوار با شکل شیار معمولی (SSW - ۱) و در شکل ۷، دو دیوار با شکل شیار پیشنهاد شده^{۲۲} نشان داده شده است. هدف از شکل شیار پیشنهادی، کاهش تمرکز تنش در ابتدا و انتهای شیارها و توزیع مناسب‌تر تنش و کرنش در ارتفاع رابط‌هاست. در شکل ۸، منحنی چرخه‌یی نمونه‌های ۱ - SSW و ۲ - SSW و در شکل ۹، منحنی چرخه‌یی نمونه‌های ۱ - SSW و ۳ - SSW نشان داده شده است.

جدول ۳. مقایسه‌ی سختی اولیه‌ی نمونه‌های ۱ - SSW و ۲ - SSW.

SSW - ۲	۱
۵/۹۸	۶/۳ (KN/mm) سختی اولیه
-	-۵/۱ (%) تفاوت

جدول ۴. مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌های ۱ - SSW و ۲ - SSW در تغییر مکان‌های نسبی مختلف.

تغییر مکان نسبی (%)	مقاومت (KN)		تغییر مکان نسبی (%)
	SSW-۲	SSW - ۱	
-۲/۲۵	۶۵/۹۹	۶۷/۵۱	۱
۲/۸۰	۷۶/۶۴	۷۲/۴۹	۱/۵
۲/۸۰	۸۱/۸۱	۷۹/۴۹	۲
۹/۶۰	۸۴/۷۶	۷۶/۵۹	۳
۸/۰۰	۸۴/۹۹	۷۸/۱۷	۴
۱۵/۸۰	۸۰/۳۸	۶۷/۶۴	۵
۱۴/۲۰	۹۰/۲۱	۷۷/۴۱	۶

جدول ۵. مقایسه‌ی سختی اولیه‌ی نمونه‌های ۱ - SSW و ۳ - SSW.

SSW - ۳	SSW - ۱
۷/۲۷	۶/۳ (KN/mm) سختی اولیه
-	۱۳/۳۴ (%) تفاوت

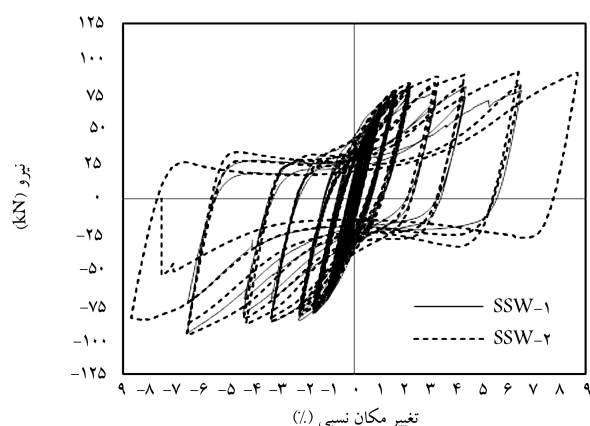
جدول ۶. مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌های ۱ - SSW و ۳ - SSW در تغییر مکان‌های نسبی مختلف.

تغییر مکان نسبی (%)	مقاومت (KN)		تغییر مکان نسبی (%)
	SSW-۳	SSW - ۱	
۱۱	۷۶/۱۹	۶۷/۵۱	۱
۹/۴۰	۸۰/۰۵	۷۲/۴۹	۱/۵
۳/۷۰	۷۹/۹۳	۷۲/۴۹	۲
۱۷/۲۰	۹۲/۴۶	۷۶/۵۹	۳
۱۹/۷۰	۹۷/۳۹	۷۸/۱۷	۴
۲۶/۸۰	۹۲/۳۶	۶۷/۶۴	۵
۲۲/۷۰	۱۰۰/۱۴	۷۷/۴۱	۶

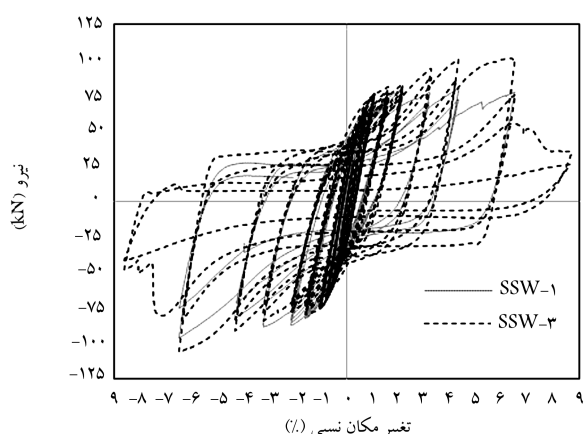
۵. بررسی اثر ورق سخت‌کننده‌ی انتهایی^{۲۴} در رفتار دیوار

شیاردار

کمانش خارج از صفحه از دیگر عوامل زوال مقاومت است، که می‌تواند برای رابط‌ها یا کل دیوار اتفاق افتد. برای آنکه مفصل خمیری در ابتدا و انتهای شیارها گسترش



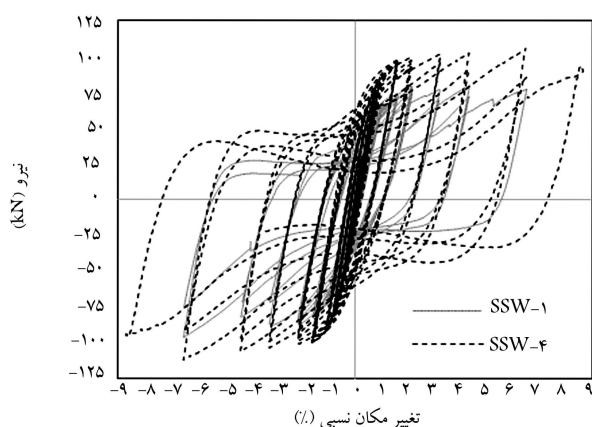
شکل ۸. منحنی چرخه‌یی نمونه‌های ۱ - SSW و ۲ - SSW.



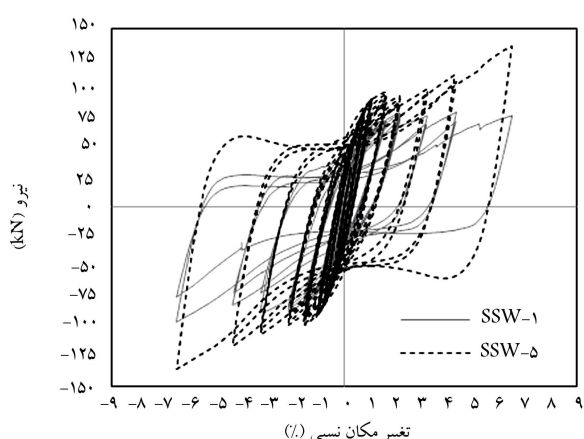
شکل ۹. منحنی چرخه‌یی نمونه‌های ۱ - SSW و ۳ - SSW.

با بررسی منحنی‌های چرخه‌یی در شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان مشاهده کرد در تغییر مکان نسبی ۲/۵٪ کمانش خارج از صفحه آغاز می‌شود. همچنین دیوار شیاردار ۲ - SSW تا تغییر مکان نسبی ۸٪ بدون افت مقاومت تغییر شکل می‌دهد، در حالی که دیوارهای دیگر بعد از تغییر مکان نسبی ۶٪ افت مقاومت (مقاومت کمتر از ۸٪ مقاومت نهایی) دارند.

در جدول‌های ۳ و ۴، مقادیر سختی اولیه و مقاومت نمونه‌های ۱ - SSW و ۲ - SSW با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی اولیه‌ی دیوار به میزان ۵/۱٪ کاهش یافته است. همچنین در ابتدا، مقاومت دیوار ۲/۲۵٪ کاهش و سپس تا ۱۵/۸٪ افزایش یافته و ۲ - SSW تا تغییر مکان نسبی ۸٪ به خوبی از خود مقاومت نشان داده است. در جدول‌های ۵ و ۶، مقادیر سختی اولیه و مقاومت نمونه‌های ۱ - SSW و ۳ - SSW با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی اولیه‌ی دیوار به میزان ۱۳/۳۴٪ و مقاومت دیوار تا ۲۶/۸٪ افزایش یافته است. در شکل ۱۰، مدمکانشی^{۲۳} اول دیوار ۱ - SSW، ۲ - SSW و ۳ - SSW با روش Eigenvalue نشان داده شده است. طبق بررسی‌های انجام شده توسط هیتاکا و ماتسوی^[۴] و کورتس و لیو^[۷] مشخصات ابعادی ورق و تعداد شیارها، در مقاومت، سختی اولیه، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی دیوار شیاردار اثر دارد. با بررسی نتایج جدول‌های ۳ الی ۶ و شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که شکل شیار نیز در مقاومت، سختی اولیه، شکل‌پذیری، و استهلاک انرژی دیوار شیاردار اثر دارد.



شکل ۱۲. منحنی چرخه‌یی نمونه‌های SSW - ۴ و SSW - ۱.



شکل ۱۳. منحنی چرخه‌یی نمونه‌های SSW - ۵ و SSW - ۱.



الف) نمونه SSW-۴، Eigenvalue=۸۰۷ kN
ب) نمونه SSW-۵، Eigenvalue=۹۱۵ kN

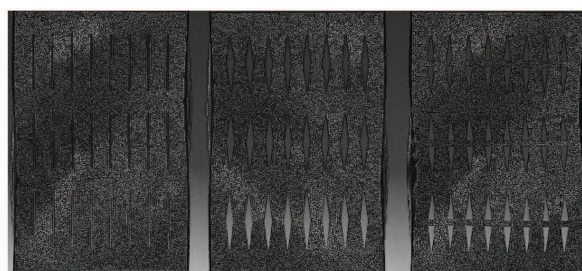
شکل ۱۴. مد کمانشی اول دیوار SSW - ۴ و SSW - ۵.

جدول ۷. مقایسه‌ی سختی اولیه‌ی نمونه‌های SSW - ۴ و SSW - ۱.

SSW - ۴	SSW - ۱	
۸/۱۳	۶/۳	سختی اولیه (KN/mm)
-	۲۲/۵۱	تفاوت (%)

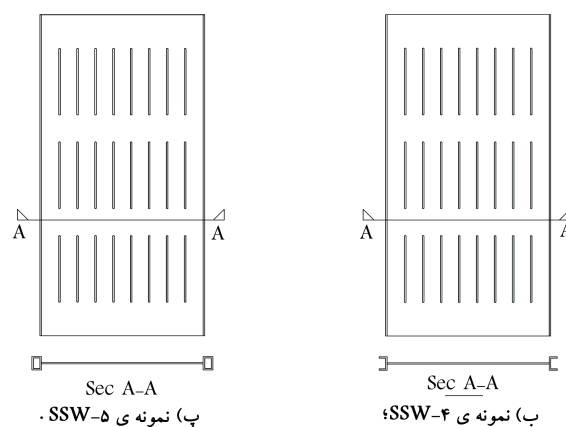
یابد، باید کمانش خارج از صفحه‌ی دیوار شیاردار را کنترل کرد. یکی از راه‌های کاهش کمانش خارج از صفحه، استفاده از ورق سخت‌کننده‌ی انتهایی است.^[۵] هیتاکا و ماتسوی (۲۰۰۳)،^[۲] اثر عرض سخت‌کننده‌ی انتهایی را در سختی اولیه، مقاومت و شکل منحنی چرخه‌یی بررسی کرده‌اند. عرض سخت‌کننده‌ی انتهایی باعث افزایش اندک در مقدار سختی اولیه و مقاومت می‌شود و شکل منحنی چرخه‌یی را بهبود می‌دهد. در نوشتار حاضر، به جای افزایش عرض سخت‌کننده‌ی انتهایی، اثر نوع سخت‌کننده‌ی انتهایی بررسی شده است. در شکل (۱-الف) دیوار شیاردار با سخت‌کننده‌ی انتهایی ورق و در شکل ۱۱، دو دیوار شیاردار با سخت‌کننده‌ی انتهایی متفاوت برای بررسی اثر نوع سخت‌کننده‌ی انتهایی در رفتار دیوار شیاردار نشان داده شده است. در شکل ۱۲، منحنی چرخه‌یی نمونه‌های SSW - ۴ و SSW - ۱ و در شکل ۱۳، منحنی چرخه‌یی نمونه‌های SSW - ۵ و SSW - ۱ نشان داده شده است.

با بررسی منحنی‌های چرخه‌یی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان مشاهده کرد که در تغییر مکان نسبی ۲/۵٪ کمانش خارج از صفحه آغاز می‌شود. در جدول‌های ۷ و ۸، مقادیر سختی اولیه و مقاومت نمونه‌های SSW - ۴ و SSW - ۱ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی اولیه‌ی دیوار به میزان ۲۲/۵۱٪ و مقاومت دیوار تا ۲۶/۸٪ افزایش یافته است. در جدول‌های ۹ و ۱۰، مقادیر سختی اولیه و مقاومت نمونه‌های SSW - ۱ و SSW - ۵ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی اولیه‌ی دیوار به میزان ۲۸/۵٪ و مقاومت دیوار تا ۴۱/۴٪ افزایش یافته است. در شکل ۱۴، مد کمانشی اول در نمونه‌های SSW - ۴ و SSW - ۵ به روش Eigenvalue نشان داده شده است.



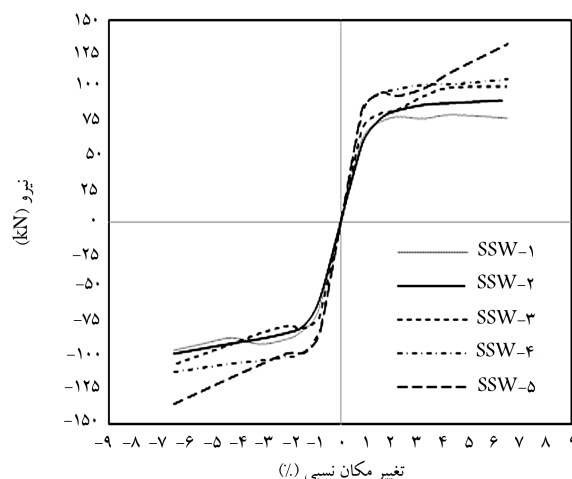
الف) نمونه SSW-۱، Eigenvalue=۵/۸ kN
ب) نمونه SSW-۲، Eigenvalue=۵/۳۵ kN
ج) نمونه SSW-۳، Eigenvalue=۶/۵۱ kN

شکل ۱۵. مد کمانشی اول دیوارهای SSW - ۱، SSW - ۲ و SSW - ۳.

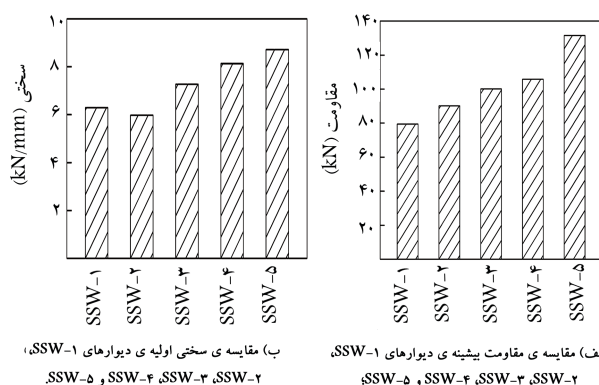


ب) نمونه SSW-۴، Sec A-A
پ) نمونه SSW-۵، Sec A-A

شکل ۱۱. دیوار شیاردار با سخت‌کننده‌ی انتهایی متفاوت.

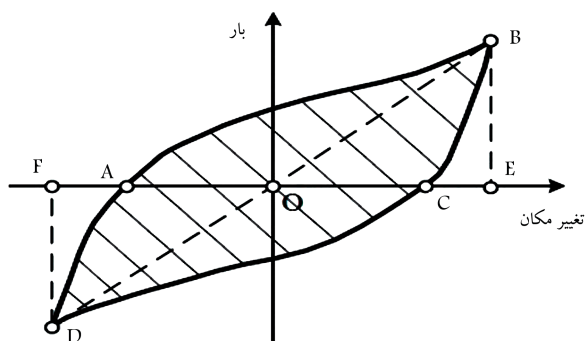


شکل ۱۵. مقایسه‌ی پوش منحنی چرخه‌ی دیوارهای ۱-SSW، ۲-SSW، ۳-SSW، ۴-SSW و ۵-SSW.



الف) مقایسه‌ی مقاومت بیشینه‌ی دیوارهای ۱-SSW، ۲-SSW، ۳-SSW، ۴-SSW و ۵-SSW. ب) مقایسه‌ی سختی اولیه‌ی دیوارهای ۱-SSW، ۲-SSW، ۳-SSW، ۴-SSW و ۵-SSW.

شکل ۱۶. مقایسه‌ی سختی اولیه و مقاومت بیشینه‌ی دیوارهای شیاردار.



شکل ۱۷. روش محاسبه‌ی ضریب استهلاک انرژی. [۱۸]

بالایی و پایینی منحنی چرخه‌ی و $S_{(OBE)}$ و $S_{(ODF)}$ مساحت نواحی مثلثی نشان داده شده در شکل ۱۷ هستند.

$$E_P = \frac{S_{(ABC+CAD)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (5)$$

در شکل ۱۸، ضریب استهلاک انرژی و در شکل ۱۹، استهلاک انرژی نهایی برای دیوارهای ۱-SSW، ۲-SSW، ۳-SSW، ۴-SSW و ۵-SSW نشان داده شده است. طبق شکل ۱۸، ضریب استهلاک انرژی با افزایش Δ_{EF} افزایش

جدول ۸. مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌های ۱-SSW و ۴-SSW در تغییر مکان‌های نسبی مختلف.

تغییر مکان نسبی (%)	مقاومت (KN)	
	SSW-۴	SSW-۱
۱	۶۷٫۵۱	۸۷٫۵۸
۱٫۵	۷۲٫۴۹	۹۷٫۰۹
۲	۷۲٫۴۹	۹۹٫۴۷
۳	۷۶٫۵۹	۱۰۱٫۸۳
۴	۷۸٫۱۷	۱۰۲٫۵۸
۵	۶۷٫۶۴	۹۲٫۳۲
۶	۷۷٫۴۱	۱۰۵٫۸۰

جدول ۹. مقایسه‌ی سختی اولیه‌ی نمونه‌های ۱-SSW و ۵-SSW.

SSW-۴	SSW-۱
۸٫۷۱	۶٫۳
-	۵۰٫۲۸

جدول ۱۰. مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌های ۱-SSW و ۵-SSW در تغییر مکان‌های نسبی مختلف.

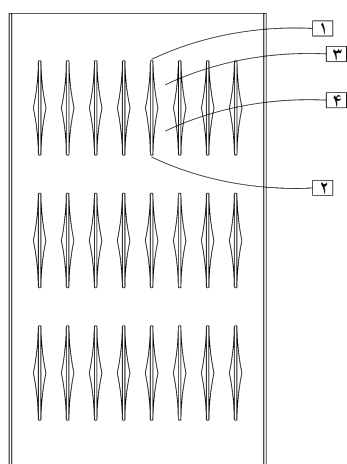
تغییر مکان نسبی (%)	مقاومت (KN)	
	SSW-۵	SSW-۱
۱	۶۷٫۵۱	۹۰٫۹۹
۱٫۵	۷۲٫۴۹	۹۶٫۵۱
۲	۷۲٫۴۹	۹۳٫۰۵
۳	۷۶٫۵۹	۹۹٫۳۷
۴	۷۸٫۱۷	۱۱۰٫۸۲
۵	۶۷٫۶۴	۱۱۵٫۳۵
۶	۷۷٫۴۱	۱۳۱٫۶۰

۶. مقایسه‌ی پوش منحنی‌های چرخه‌ی، سختی اولیه و مقاومت بیشینه‌ی دیوارهای شیاردار

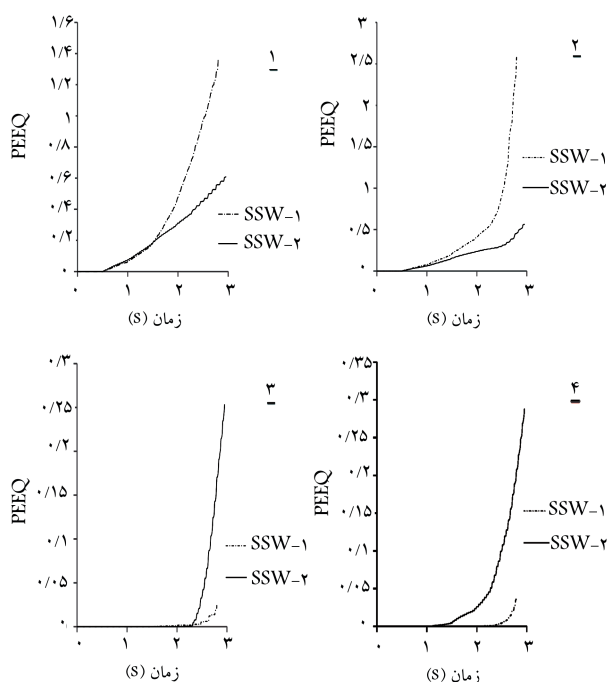
بر اساس منحنی‌های چرخه‌ی، در شکل ۱۵، پوش منحنی‌های چرخه‌ی و در شکل ۱۶، مقاومت بیشینه و سختی اولیه‌ی ۵ دیوار با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل شیار و سخت‌کننده‌ی انتهایی در سختی اولیه و مقاومت بیشینه تأثیر دارد.

۷. مقایسه‌ی ظرفیت استهلاک انرژی

به علت کماتش خارج از صفحه در دیوار فولادی، لاغزشوندگی^{۲۵} در منحنی چرخه‌ی دیوار اتفاق می‌افتد، که در ظرفیت استهلاک انرژی^{۲۶} تأثیر می‌گذارد. ضریب استهلاک انرژی، پارامتری برای نشان دادن میزان استهلاک انرژی است. روش محاسبه‌ی آن بر اساس مرجع^[۱۸] و طبق رابطه‌ی ۵ است $S_{(ABC)}$ و $S_{(CDA)}$ مساحت نیمه‌ی



شکل ۲۰. محل به دست آوردن کرنش خمیری معادل.

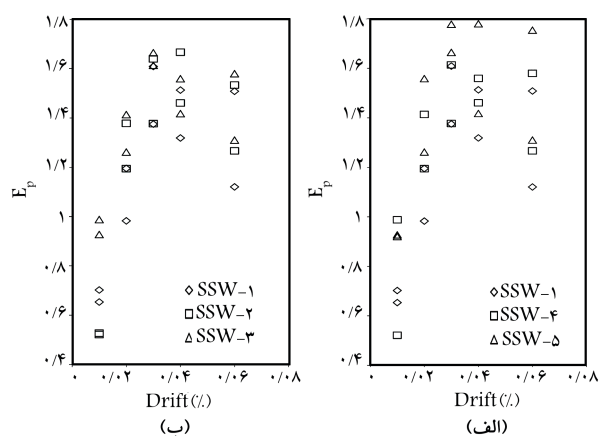


شکل ۲۱. توزیع کرنش خمیری معادل در نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴.

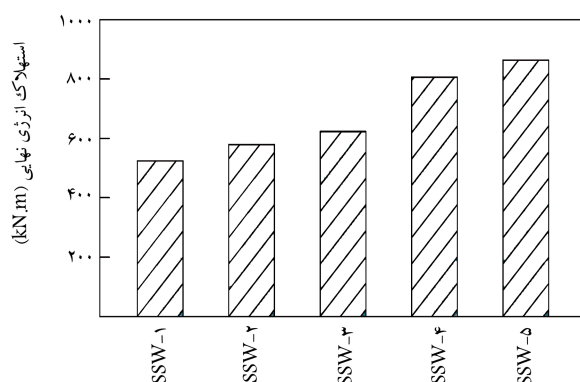
۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. مقدار $PEEQ$ در ابتدا و انتهای شیار در دیوار $SSW - 1$ بسیار بیشتر از $SSW - 2$ است، که نشان دهندهی تمرکز تنش در ابتدا و انتهای شیار و تمایل به شکست در این نواحی در دیوار $SSW - 1$ است. همچنین مقدار $PEEQ$ در داخل رابطها در دیوار $SSW - 2$ بیشتر از دیوار $SSW - 1$ است، که نشان دهندهی اثر شکل شیار در توزیع یکنواخت تر کرنش در رابطهاست. با مقایسهی مقادیر $PEEQ$ در دیوار $SSW - 2$ نسبت به دیوار $SSW - 1$ ، توزیع یکنواخت کرنش مشاهده می‌شود.

۹. نتیجه گیری

پس از راستی‌آزمایی مدل عددی با نتیجهی آزمایش انجام شده توسط کورتس و همکاران^[۷]، دو نوع دیوار شیاردار با جزئیات متفاوت جهت بررسی اثر شکل شیار



الف) مقایسهی ضرب استهلاک انرژی دیوارهای $SSW - 1$ ، $SSW - 2$ و $SSW - 3$ ؛
ب) مقایسهی ضرب استهلاک انرژی دیوارهای $SSW - 1$ ، $SSW - 4$ و $SSW - 5$.
شکل ۱۸. مقایسه ضرب استهلاک انرژی دیوارهای شیاردار.



شکل ۱۹. مقایسهی استهلاک انرژی نهایی دیوارهای $SSW - 1$ ، $SSW - 2$ ، $SSW - 3$ و $SSW - 4$ ، $SSW - 5$.

می‌یابد، همچنین ظرفیت استهلاک انرژی با تکرار چرخهی بارگذاری در تغییر مکان یکسان کاهش می‌یابد. براساس شکل ۱۹، تغییر در شکل شیار و ورق سخت‌کنندهی انتهایی، در ظرفیت استهلاک انرژی تأثیرگذار است.

۸. مقایسهی توزیع کرنش خمیری معادل^{۲۷} در رابطها

تمایل به شکست با پارامتر کرنش خمیری معادل ($PEEQ$) پیش‌بینی می‌شود. $PEEQ$ براساس رابطه ۶ به دست می‌آید.^[۹]

$$PEEQ = \dot{\epsilon}^p|_0 + \int_0^{\dot{\epsilon}^p} \dot{\epsilon}^p dt \quad (6)$$

که در آن، $\dot{\epsilon}^p|_0$ نرخ کرنش خمیری معادل اولیه^{۲۸} و $\dot{\epsilon}^p$ نرخ کرنش خمیری معادل^{۲۹} است، که براساس رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$\dot{\epsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^p : \dot{\epsilon}^p} \quad (7)$$

که در آن، $\dot{\epsilon}^p$ نرخ جریان خمیری معادل^{۳۰} است. در دیوارهای شیاردار ۱ و $SSW - 2$ در محل‌های نشان داده شده در شکل ۲۰، کرنش خمیری معادل نشان داده شده است. نوع شیار در توزیع کرنش خمیری معادل^{۳۱} و تمایل به شکست دیوار شیاردار تأثیر می‌گذارد. در شکل ۲۱، توزیع کرنش خمیری معادل در نقاط ۱،

پیشنهادی در دیوار ۳ - SSW، باعث افزایش سختی اولیه‌ی دیوار شیاردار به میزان ۱۳/۳۴٪ و افزایش مقاومت به میزان ۲۶/۸٪ شده است. همچنین شکل شیار باعث گسترش توزیع تنش در رابط و افزایش شکل‌پذیری و استهلاک انرژی شده است.

-- نوع سخت‌کننده‌ی انتهایی تأثیر به‌سزایی در کاهش کماتش خارج از صفحه‌ی دیوار داشته و در دیوار ۴ - SSW باعث افزایش سختی اولیه به میزان ۲۲/۵۱٪ و افزایش مقاومت به میزان ۲۶/۸۰٪ و در دیوار ۵ - SSW باعث افزایش سختی اولیه به میزان ۲۸/۵٪ و افزایش مقاومت به میزان ۴۱/۴٪ شده است.

و سخت‌کننده‌ی انتهایی پیشنهاد، مدل‌سازی، تحلیل و بررسی شده است. مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی: سختی اولیه، مقاومت، مد شکست و انرژی مستهلک شده بوده و این نتایج به دست آمده‌اند:

-- با توجه به نتایج به دست آمده در نوشتار حاضر، شکل شیار و شکل سخت‌کننده‌ی انتهایی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در رفتار دیوار شیاردار هستند.

-- شکل شیار پیشنهاد شده در دیوار ۲ - SSW، باعث کاهش در سختی اولیه‌ی دیوار شیاردار به میزان ۵/۱٪، افزایش مقاومت به میزان ۱۵/۸٪ و شکل شیار

پانویس‌ها

1. cyclic loading
2. verification
3. monotonic loading
4. combined hardening model
5. damage
6. strength degradation
7. ductile damage
8. nucleation
9. growth
10. coalescence
11. shear damage
12. shear band localization
13. out of plane buckle
14. initial defect
15. input file
16. mesh sensitivity
17. hysteresis curve
18. envelope curve
19. initial stiffness
20. links
21. energy dissipation
22. proposed slit shape
23. buckling mode
24. edge stiffener
25. pinching phenomenon
26. energy dissipation capacity
27. equivalent plastic strain
28. equivalent plastic strain initial rate
29. equivalent plastic strain rate
30. equivalent plastic flow rate
31. equivalent plastic strain distribution

منابع (References)

1. Muto, K. "Earthquake resistant design of 36-storied Kasumigaseki building", *4th World Conf. on Earthquake Engrg.*, Santiago, Chile, pp. 16-33 (1969).
2. Muto, K., Ohmori, N. and Takahashi, T. "A study on reinforced concrete slitted shear walls for high-rise buildings", *5th World Conf. on Earthquake Engrg.*, Rome, Italy (1973).

3. Martinez-Rueda, J.E. "On the evolution of energy dissipation devices for seismic design Earthquake Spectra", *J. of the Earthquake Engrg. Research Inst., EERI*, **18**(2), pp. 309-346 (2002).
4. Hitaka, T. and Matsui, C. "Experimental study on steel shear wall with slits", *J. of Struct. Engrg., ASCE*, **129**(5), pp. 586-595 (2003).
5. Hitaka, T., Matsui, C. and Sakai, J. "Cyclic tests on steel and concrete-filled tube frames with slit walls", *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, **36**(6), pp. 707-727 (2007).
6. Jacobsen, A., Hitaka, T. and Nakashima, M. "Online test of building frame with slit-wall dampers capable of condition assessment", *J. of Constr. Steel Res.*, **66**(11), pp. 1320-1329 (2010).
7. Cortes, G. and Liu, J. "Experimental evaluation of steel slit panel-frames for seismic resistance", *J. of Constr. Steel Res.*, **67**(2), pp. 181-191 (2011).
8. Shi, Y.J., Wang, M. and Wang, Y.Q. "Experimental and constitutive model study of structural steel under cyclic loading", *J. Constr. Steel Res.*, **67**(8), pp. 1185-1197 (2011).
9. *ABAQUS, Analysis User's Manual*. Version 6.14, USA: Inc., Dassault Systemes (2014).
10. Hooputra, H., Gese, H., Dell, H. and Werner, H. "A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions", *Inter. J. of Crashworthiness*, **9**(5), pp. 449-464 (2004).
11. Meng, W., Weiguo, Y., Yongjiu, S. and Jian, X. "Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials", *J. of Constr. Steel Res.*, **107**, pp. 194-210 (2015).
12. Krawinkler, H. "Loading histories for cyclic Tests in support of performance assesment of structural components", Dept. of civil and Environ. Engrg., Stanford Uni., Stanford, CA (2009).
13. ATC-24., *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures for Buildings*, Report No. ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA (1992).