



مطالعه رفتار لرزه ای دیوار برشی فولادی با سخت کننده های قائم و مایل

فرید طالبی میلانی، مسعود حسین زاده اصل*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

کلمات کلیدی:

دیواربرشی فولادی

سخت کننده

جذب انرژی

اجزاءمحدود

تحلیل غیرخطی

خلاصه: دیوار برشی فولادی یکی از مناسبترین سیستم‌های رایج جهت تامین مقاومت و پایداری سازه در برابر بارهای جانبی می‌باشد. در این سیستم المان‌های مرزی قائم اطراف دیوار برشی علاوه بر اینکه جزئی از سیستم باربر جانبی محسوب می‌شوند، وظیفه تحمل وزن سازه را هنگام زلزله و پس از زلزله نیز بر عهده دارند و بنابراین در طراحی این سیستم تلاش بر این است که المانهای مرزی پس از تسلیم کامل ورق در حالت الاستیک باقی بمانند. همچنین جهت تامین تنش یکنواخت در ورق جان در طول و ارتفاع دیوار، المان‌های مرزی قائم و افقی باید از صلبیت خمشی بالایی برخوردار باشند. ضوابط آیین نامه‌ای در این مورد گاهی منجر به انتخاب مقاطع غیر اقتصادی در تیر و ستون متصل به دیوار می‌گردد. در این مطالعه جهت کاهش تقاضا در المان‌های مرزی قائم متصل به دیوار و اقتصادی شدن طرح، سخت‌کننده‌های قائم و مایل در داخل دیوار پیش بینی شده است. این سخت‌کننده‌ها تغییر شکل‌های پلاستیک را عمدتاً به دور از ستونها هدایت می‌کنند. جهت بررسی و مقایسه رفتار مدل پیشنهادی، ۳۲ مدل اجزا محدود تحت بارگذاری جابجایی یکنواخت و نیز چرخه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سخت‌کننده‌ها علاوه بر افزایش سختی و مقاومت جانبی سیستم موجب افزایش شکل پذیری سیستم باربر جانبی شده و همچنین سختی خمشی مورد نیاز المان‌های مرزی افقی را کاهش می‌دهد.

۱- مقدمه

و در این دهه از دیوارهای برشی فولادی در چندین ساختمان مهم به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی استفاده شد. این دیوارها که اغلب در آمریکا و ژاپن متداول شده بودند، به صورت تقویت شده بوده و به منظور مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود و یا ساخت ساختمان‌های جدید استفاده می‌شدند. در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ از دیوارهای برشی فولادی تقویت‌نشده در آمریکا و کانادا استفاده گردیده و با مطالعات انجام گرفته بر روی این دیوارها ثابت شد که این دیوارها، علاوه بر قابلیت استهلاک انرژی زیاد، ارزش افزوده‌ی انرژی نیز دارند.

دیوارهای برشی فولادی از جمله سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی هستند که از یک ورق فولادی همراه با قاب پیرامونی تشکیل شده‌اند [۱]. رفتار این نوع سیستم به گونه‌ای است که ابتدا در قسمت‌های میانی ورق فولادی، میدان‌های کششی تشکیل یافته و ورق در این نواحی پلاستیک می‌شود، همراه با پلاستیک شدن ورق که در کل ورق نیز پخش خواهد شد [۲]، در گوشه‌های دیوار نیز تمرکز تنش ایجاد می‌شود. محل گسترش خرابی علاوه بر محل اتصال تیر به ستون می‌توان مربوط به گوشه‌های دیوار باشد که این امر موجب می‌شود که ستون‌ها در محل اتصال به تیر دچار آسیب‌های موضعی شوند و کرنش‌های پلاستیک قابل توجهی در محل چشمه‌ی اتصال ستون مشاهده گردد. تمرکز تنش در گوشه‌های دیوار و گسترش آن به ستون در محل اتصال تیر به ستون می‌تواند انتقال بار ثقیلی از ستون‌ها را تحت تاثیر قرار داده و باعث تهدید پایداری سازه شود. ایده‌ی استفاده از پانل‌های برشی فولادی در دهه‌ی ۱۹۷۰ مطرح گردید

اولین تحقیق جدی بر روی مقاومت پس از کماتش پانل‌های فولادی توسط آقای ونگر [۳] در سال ۱۹۳۱ انجام گرفت. وی براساس آزمایش‌هایی که روی پانل برشی نازک از جنس آلومینیوم انجام داد، تئوری میدان کششی قطری را ارائه کرد. پس از او دانشمندان زیادی همچون باسلر و پرت [۴] بر روی مقاومت حوزه‌ی کشش قطری در تیر ورق‌ها، مطالعه کردند و اثر سختی بال‌ها و سخت‌کننده‌ها را نیز روی مقاومت پانل برشی بررسی کردند. سیستم‌های دیوار برشی فولادی عمدتاً به دو صورت سخت‌شده

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hoseinzadeh.m@gmail.com



و سخت‌نشده مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از سخت‌کننده در این سیستم، علاوه بر بهبود رفتار لرزه‌ای، صرفه‌ی اقتصادی نیز به همراه دارد. در ارتباط با دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده بین سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۷ مطالعات بسیاری صورت گرفته است که نتایج حاصل بیانگر افزایش جذب انرژی و ظرفیت باربری سیستم در استفاده از سخت‌کننده‌ها می‌باشد.

در سال ۲۰۰۴ آستانه اصل و همکارانش [۵] یک قاب دیوار برشی فولادی سه طبقه را مورد آزمایش قرار دادند که در بالاترین قسمت قاب با یک جک، نیروی رفت و برگشتی به نمونه اعمال کرده و منحنی هیستریزس آن را رسم کردند و بعد از آن میدان‌های قطری در دیوار شروع به شکل‌گیری کردند [۶]. در این آزمایش، نمونه توانست ۲۹ تناوب را تحمل کند و حداکثر نیروی برشی نیز به ۵۵۰ تن رسید و نمونه‌ی ساخته شده شکل‌پذیری خوبی از خود نشان داد و تا زوال ۸۰٪ از مقاومت خود گسیخته نشد. نمونه‌ها تا دریافت ۱٪ ارتجاعی باقی‌مانده و بعد از آن میدان‌های قطری در دیوار شروع به شکل‌گیری کردند.

در سال ۲۰۱۳ علوی و ناطقی [۷] آزمایشی بر روی دیوار برشی سخت شده با المان‌های قطری انجام دادند. آن‌ها با ایجاد بازشو دایروی در داخل ورق به نتایج قابل‌توجهی دست یافتند. طبق نتایج ارائه‌شده با ایجاد بازشو دایروی در وسط ورق اگرچه شکل‌پذیری نمونه افزایش یافته ولی در عوض مقاومت برشی کاهش می‌یابد. برای حل این مشکل، آن‌ها سخت‌کننده قطری را پیشنهاد کردند که ضریب شکل‌پذیری نمونه پیشنهادشده برابر ۸ گزارش شده بود که این نشان می‌دهد شکل‌پذیری بالایی داشته‌است.

بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ صبوری و همکاران مطالعه‌های آزمایشگاهی متعددی را بر روی نمونه‌های مختلف دیوار برشی فولادی (بدون سخت‌کننده، با سخت‌کننده و دارای بازشو) انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که سختی و مقاومت برشی پانل‌ها عمدتاً وابسته به عرض مؤثر آن‌ها می‌باشد. همچنین با افزایش عرض بازشوها، سختی و مقاومت نمونه‌های دارای بازشو کاهش یافته و تقویت ورق می‌تواند تا حد زیادی اثر کاهش سختی و مقاومت را در نمونه‌های تقویت شده جبران نماید. و تغییر در فاصله بین لبه‌ی بازشو تا ستون، هیچ تاثیری بر مقاومت برشی ستون ندارد [۸].

در سال ۲۰۱۹ اصغری و همکاران [۹] در مورد افزایش مقاومت برشی و سختی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده متقاطع مطالعه کردند. در این مطالعه، مقاومت برشی و سختی دیوارهای برشی فولادی در پیکربندی‌های مختلف سخت‌کننده‌ها شامل افقی، عمودی و افقی - عمودی با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت روابط نیمه

تجربی در این زمینه ارائه شده‌است. نتایج نشان داد که مقاومت برشی و سختی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده به خوبی توسط روابط پیشنهادی پیش‌بینی شده‌است، اما افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها در بالای یک محدوده خاص تاثیر قابل‌توجهی بر افزایش سختی و مقاومت نخواهد داشت. همچنین نتایج نشان داد که دیوار برشی فولادی نازک و سخت نشده دارای شکل‌پذیری بالایی می‌باشد و ظرفیت تحمل بار جانبی دیوار به دلیل اضافه کردن سخت‌کننده‌ها و محدود کردن جابجایی‌های مختلف و تغییر شکل‌های خارج از صفحه و همچنین سختی سازه افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۲۰ ناصراحمدخان و همکارانش [۱۰] مدل‌های مقاومتی و سختی دیوارهای برشی فولادی با بازشوها را بررسی کردند. این مطالعه به ارزیابی رفتار غیرالاستیک سیستم‌های دیوار برشی فولادی با انواع مختلف بازشوها به منظور افزایش درک و ارائه راهنمایی در طراحی می‌پردازد به طوری که مدل‌های متفاوتی در این تحقیق ساخته و مقایسه شدند و نتیجه گرفته شد که، اندازه و مکان بازشوها می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی داشته باشد. همچنین مشخص شد که داشتن دهانه‌های با اندازه کم‌تر از ۱۵٪، نسبت ابعاد یک، شکل دایره، و واقع شدن در موقعیت مرکز پایین صفحه، ترجیح داده می‌شود.

در سال ۲۰۲۰ مهدوی و همکارانش [۱۱] ضخامت کاهش‌یافته معادل برای دیوارهای برشی ورق فولادی مرکب حاوی یک دهانه دیوار برشی فولادی مطالعه کردند. آن‌ها در این پژوهش، مقاومت بالا و شکل‌پذیری قابل قبولی را برای این سیستم در مقایسه با دیگر سیستم‌های باربر جانبی فراهم کردند. هدف اصلی این مطالعه توسعه مدل‌های عددی دقیق برای تحلیل دیوار برشی فولادی مرکب بازشو دار بود. به طوری که بازشوهای ایجاد شده عملکرد دیوار برشی فولادی را تغییر داده و استحکام و سختی آن را کاهش می‌داد.

در سال ۲۰۲۰ امامیاری و همکارانش [۱۲] در مورد رفتار چرخه‌ای پانل‌های برشی فولادی سوراخ‌دار تقویت‌شده به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. در این پژوهش هفت پانل برشی فولادی با و بدون بازشو دایره‌ای در مرکز پانل‌ها با نسبت قطر به عرض ۲۰٪ و ۳۵٪ با سخت‌کننده‌های افقی و عمودی (توصیه‌شده در آیین‌نامه AISC 341-16) و همچنین سخت‌کننده‌های الماسی شکل تحت بارگذاری سیکلی مورد آزمایش قرار دادند. و پارامترهای لرزه‌ای نمونه‌ها، شامل مقاومت، سختی اولیه، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی، با استفاده از نمودارهای هیستریزس به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها تعیین شدند. و نتیجه گرفتند که سخت‌کننده‌های افقی و عمودی عملکرد

پژوهش بار پیک نمونه‌های مورد مطالعه بالاتر از ۸۷٪ نمونه پایه بود، که امکان‌پذیری قابلیت تعمیر پس از زلزله را فراهم می‌کرد.

در سال ۲۰۲۲ یپینگ و همکاران [۱۷] روشی را جهت مقاوم‌سازی دیوارهای برشی آسیب دیده ارائه کردند که در آن از سخت کننده‌های قطری جهت تقویت دیوار برشی آسیب دیده استفاده شده است. آزمایش‌های تجربی نشان دادند که تغییر شکل باقی مانده‌ی ورق‌های فولادی میانقاب را می‌توان با نصب دنده‌های اضافی همراه با افزایش تنش ورق فولادی حذف نمود. همچنین دنده‌های اضافی می‌توانند عملکرد صفحه پر کننده آسیب‌دیده را تا ۱۷٪ بهبود بخشند. علاوه بر این، فاصله دنده‌ها با تاثیر بر مکانیزم میدان کششی صفحه فولاد پر کننده، بر تغییر شکل ستون مرزی نیز تاثیر می‌گذاشت.

در این پژوهش رفتار دیوار برشی فولادی همراه با چیدمان خاصی از سخت کننده‌های قائم و مایل مورد بررسی قرار گرفته است و برای مقایسه کارکرد موضوع مورد مطالعه پس از انجام مدلسازی‌های مختلف، رفتار سازه‌های شامل سازه ۳ طبقه و ۵ طبقه با نمونه متعارف دیوار مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور دو مدل مجزا به صورت با سخت کننده و بدون سخت کننده مدلسازی شدند. در مدل پیشنهادی، سخت کننده‌های مایل و قائم به دیوار برشی اضافه گردیده به طوری که سخت کننده طبقه اول به صورت مایل و سخت کننده طبقه دوم و سوم به صورت قائم مدلسازی شده‌اند. همچنین در این مدل پیشنهادی اتصالات تمامی اجزا به صورت جوشی فرض شده است.

۲- مدلسازی و صحت سنجی

جهت بررسی رفتار دیوار برشی فولادی با سخت کننده‌های پیشنهادی از مدل‌های اجزا محدود جهت تحلیل و بررسی استفاده شده است. بدین منظور از نرم افزار ANSYS مورد استفاده قرار گرفته است. نرم افزار ANSYS [۱۸] دسته‌ای از ابزارهای تحلیلی است که از روش اجزای محدود برای مدلسازی و تحلیل در آن استفاده می‌شود. در این پژوهش جهت مدلسازی اجزا دیوار از المان Shell181 استفاده شده است. این المان چهار گرهی بوده و در هر گره دارای ۶ درجه آزادی می‌باشد که برای استفاده در سازه‌هایی با ضخامت نازک تا متوسط مناسب است. به منظور لحاظ کردن تغییر شکل‌های بزرگ، فرض غیرخطی هندسی و به منظور در نظر گرفتن رفتار غیرخطی تنش-کرنش فولاد، رفتار مصالح فولاد به صورت چندخطی در تحلیل در نظر گرفته شده است. برای اینکه نرم افزار قادر باشد

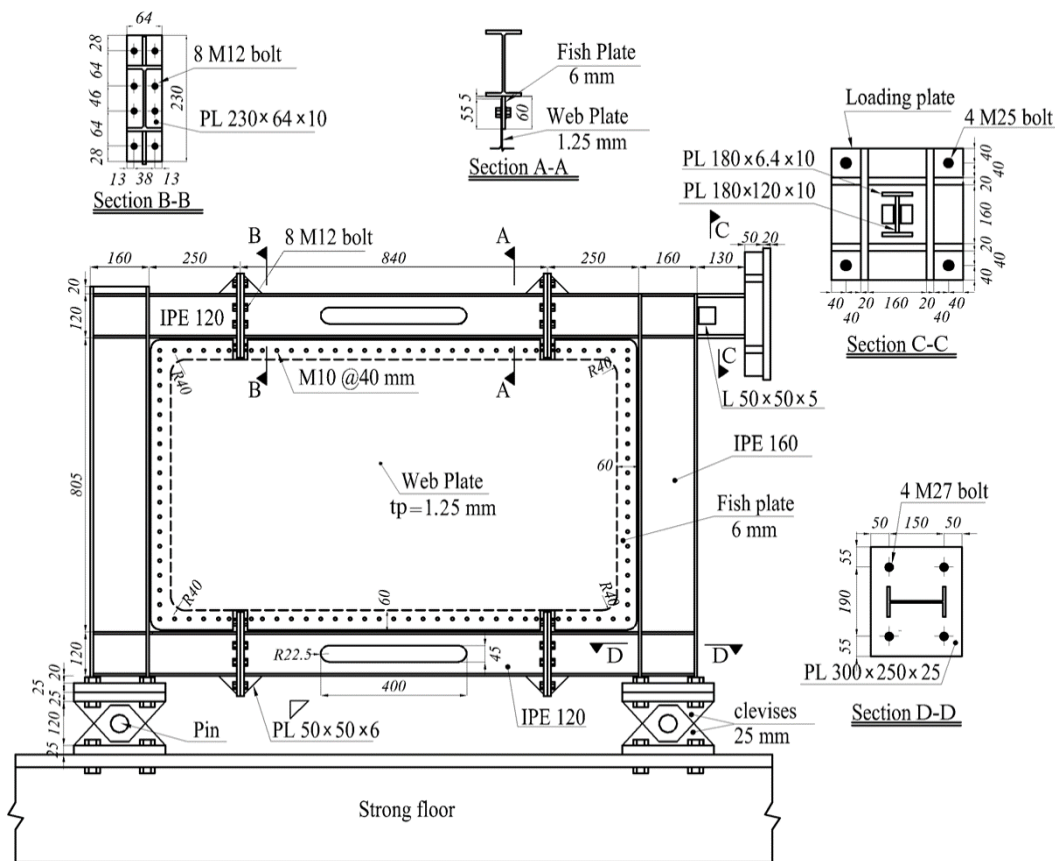
لرزه‌ای پانل برشی را به طور مناسب بهبود می‌بخشد و استفاده از سخت کننده‌های اطراف دهانه در سیستم‌های سازه‌ای با تقاضای شکل‌پذیری بالا توصیه نمی‌شود.

در سال ۲۰۲۰ فرزام پور و همکارانش [۱۳] در مورد بررسی اثرات شرایط مرزی صفحه‌ای پر کننده بر عملکرد کلی دیوارهای برشی فولادی با بازشوهای دایره‌ای مطالعه کردند. و تاثیر ابعاد بازشو بر رفتار دیوارهای برشی ورق فولادی، سختی المان مرزی و اتصال داخلی ورق پرکننده فولادی از نظر محاسباتی مورد ارزیابی قرار دادند. و نتیجه گرفتند که هر گونه افزایش در ابعاد منجر به کاهش مقاومت نهایی، سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی نسبت به ارتفاع موثر دیوار می‌شود.

در سال ۲۰۲۰ بهره‌بر و همکارانش [۱۴] در مورد ارزیابی و پیش‌بینی پاسخ دیوارهای برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین با صفحات جان موج‌دار خمیده و مقاطع تیر کاهش‌یافته مطالعه کردند. در این پژوهش اثربخشی ضخامت صفحه جان، زاویه چین، تعداد چین‌خوردگی‌ها و نسبت ابعاد صفحه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که چگونگی استفاده از مواد فولادی با نقطه تسلیم پایین در بهبود مقاومت، عملکرد پسماند و سختی سیستم تاثیر گذار است.

در سال ۲۰۲۱ حسنی و جوانبخت [۱۵] دیوار برشی فولادی را به عنوان یک سیستم مقاوم جانبی موثر که باید شکل‌پذیری کافی داشته باشد و در عین حال انرژی خود را از صرف حفاظت از اعضای مرزی کند، بررسی کردند و هدف کنترل مکانیزم شکست پنل سوراخ شده با یک مقطع تیر کاهش یافته در جان تیر با تغییرات هندسی مختلف بود. نتایج این پژوهش این بود که مهم‌ترین پارامتر، اندازه‌ی سوراخ شدگی پنل است و اندازه‌های بزرگ شکل‌پذیری را محدود می‌کند و اندازه‌های متوسط نیز منجر به کاهش اندکی در مقاومت برشی می‌شود و مقادیر کوچک هم باعث شکست خواهد شد.

در سال ۲۰۲۲ جیانگ و همکاران [۱۶] در یک پژوهش آزمایشگاهی مدل جدیدی از دیوار برشی ارائه کردند که در آن دیوار برشی از ستون‌های مرزی جدا شده و مابین دیوار و ستون از تیر پیوند استفاده شده است. در مدل پیشنهادی ایشان خرابی به صورت کنترل شده به داخل تیر پیوند و دیوار برشی محدود گردید. در این پژوهش اعضای اصلی مانند ستون‌های قاب و تیرهای نمونه پایه اساسا در طول بارگذاری الاستیک باقی ماندند. و ضریب شکل‌پذیری جابجایی SSF - SDSPSW بزرگ‌تر از ۳/۶۷ بود که نشان‌دهنده عملکرد تغییر شکل خوب سازه می‌باشد. همچنین در این



شکل ۱. مشخصات و ابعاد مدل ML-SPSW3 [۱۹]

Fig. 1. Specifications and dimensions of the model [19]

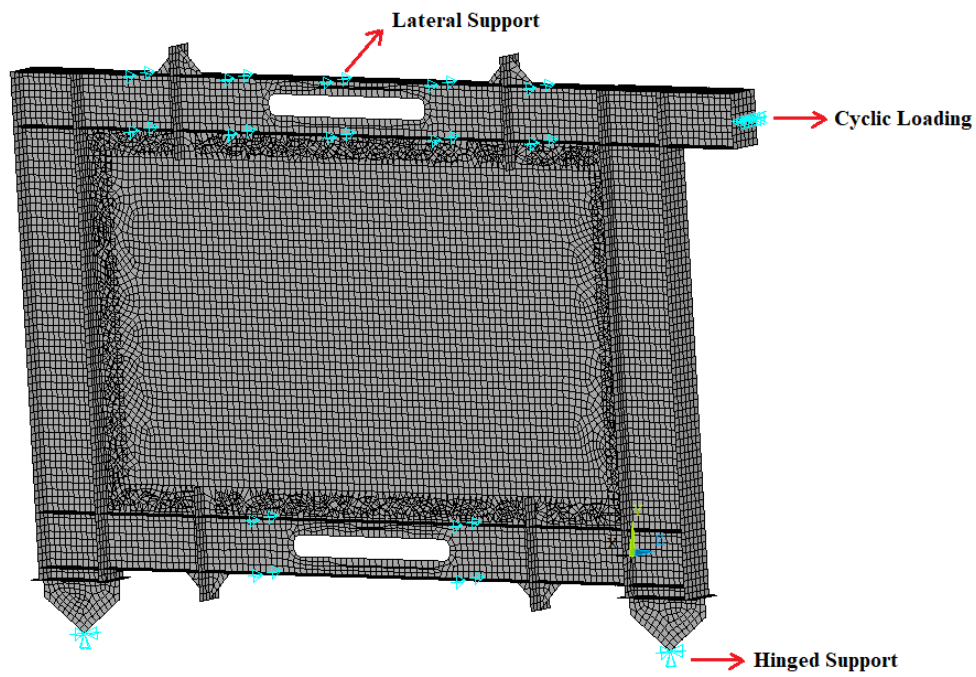
پلاستیک و تغییر شکل‌های نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی و نمودار نیرو – جابجایی هر دو نمونه آزمایشگاهی و عددی در شکل ۴ نمایش داده شده است. همانگونه که مشهود است تطابق بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی وجود دارد.

۳- مشخصات مدل پیشنهادی

در این تحقیق جهت بهبود رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی از سخت کننده‌های قائم و مایل استفاده شده است. یک نمونه از دیوار برشی متعارف و دیوار برشی با سخت کننده‌های پیشنهادی در شکل ۵ نشان داده شده است. انتظار می‌رود افزودن سخت کننده‌های نشان داده شده در شکل ۵ بر آرایش جهت گیری میدان‌های کششی حاصل از کمانش خارج از صفحه‌ی ورق دیوار تاثیر گذاشته و در نتیجه مقادیر کرنش‌های پلاستیک را در محل اتصال تیر به ستون کاهش داده و بر تقاضای ایجاد شده در ستون‌ها اثر بگذارند. در شکل ۶ تغییر شکل احتمالی مدل پیشنهادی تحت بار جانبی با دیوار

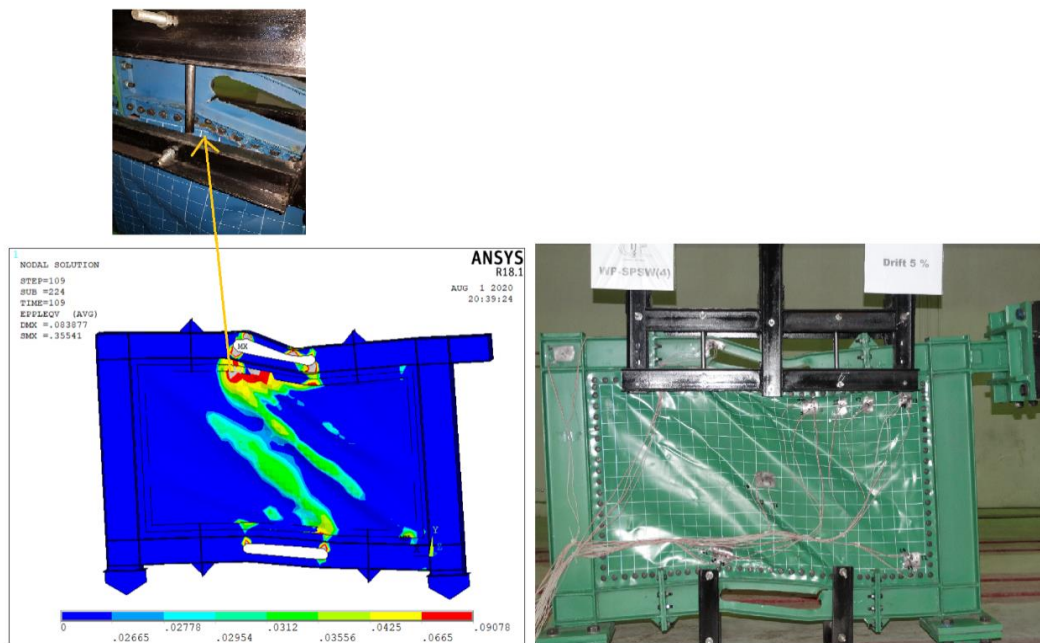
کمانش قطری ورق فولادی را هنگام تحلیل در نظر بگیرد، لازم است تغییر شکل‌های اولیه قبل از اعمال بار جانبی در ورق ایجاد شود. بدین منظور در این پژوهش ابتدا مدهای حرکت خارج از صفحه مدل مورد نظر از طریق انجام آنالیز مودال استخراج گردیده و سپس یک تغییر شکل اولیه بر اساس ترکیبی از مدهای نوسان به سازه و به ویژه به ورق اعمال شده است.

جهت بررسی صحت مدلسازی، از نتایج تحقیق و آزمایش حسین زاده اصل و سیفی [۱۹] استفاده شده است. حسین زاده اصل و سیفی در این تحقیق به مطالعه رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی با المان جذب کننده خرابی پرداختند. از نمونه‌ی ML-SPSW3 به عنوان یکی از نمونه‌ها برای صحت سنجی استفاده شده است. مشخصات و ابعاد نمونه ساخته شده در شکل ۱، همچنین مشخصات نمونه ساخته شده در نرم‌افزار ANSYS در شکل ۲ و شکل ۳ نشان داده شده است. در این تحقیق، نمونه آزمایشگاهی تا دریفت ۵ درصد تحت بار جانبی قرار گرفته و در مدل عددی نیز نمودارهای نیرو تغییر مکان تا دریفت ۵ درصد ترسیم شده‌اند. در شکل ۳ توزیع کرنش



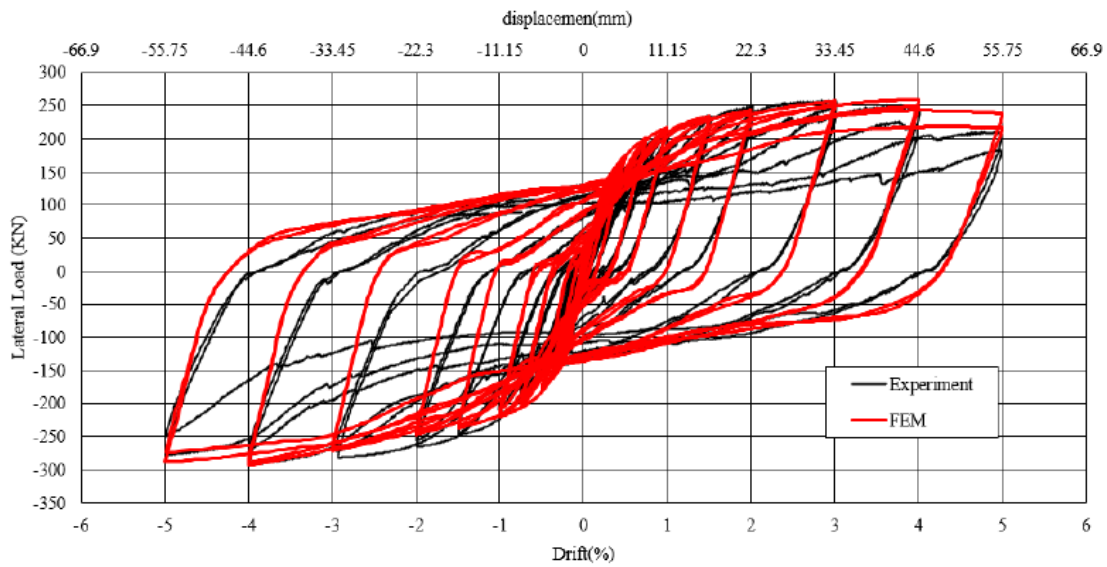
شکل ۲. مدل ساخته شده در نرم افزار ANSYS [۱۹]

Fig. 2. Model made in ANSYS software[19]



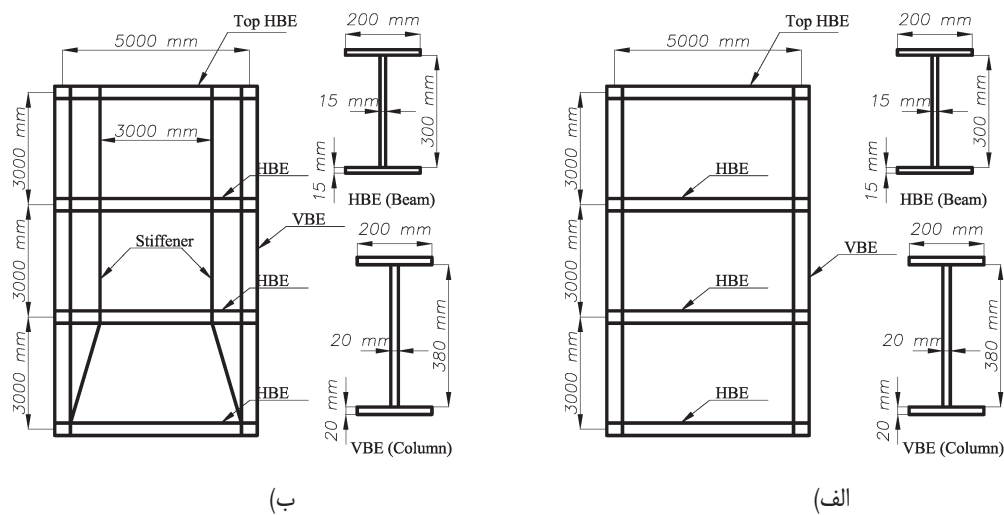
شکل ۳. توزیع کرنش پلاستیک و تغییر شکل در نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی [۱۹]

Fig. 3. Distribution of plastic strain and deformation in laboratory and numerical samples[19]



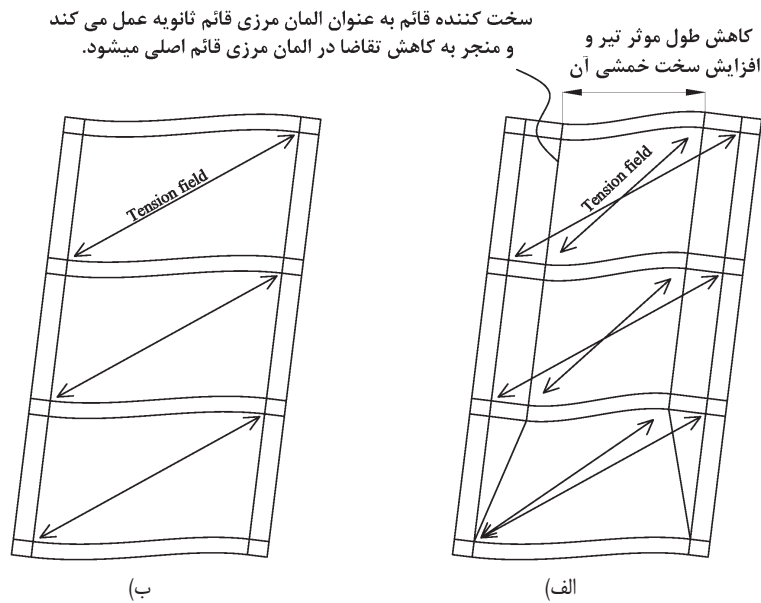
شکل ۴. مقایسه نمودار نیرو - تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی ML-SPSW3 با نمودار حاصل از تحلیل اجزا محدود [۱۹]

Fig. 4. Comparing the force-displacement diagram of the ML-SPSW3 laboratory specimen with the diagram obtained from finite element analysis [19]



شکل ۵. دیوار برشی فولادی الف) نمونه دیوار برشی بدون سخت کننده ب) نمونه دیوار برشی همراه با سخت کننده پیشنهادی

Fig. 5. Steel plate shear wall a) Shear wall sample without stiffener b) Shear wall sample with the proposed stiffener



شکل ۶. تغییر شکل شماتیک دیوار برشی تحت بار جانبی الف) مدل پیشنهادی با سخت کننده ب) مدل دیوار برشی متعارف

Fig. 6. Schematic deformation of shear wall under lateral load a) proposed model with stiffener b) conventional shear wall model

توانست نیروهای کششی دیوار را مهار کنند. در این حالت الگوی تنش کششی در دیوار (در طول المان مرزی) غیر یکنواخت خواهد بود و تنش‌های کششی دیوار عمدتاً در گوشه‌های دیوار (محل اتصال تیر به ستون) متمرکز خواهد شد. به همین جهت یکی از پارامترهای مهم در طراحی دیوارهای برشی فولادی، صلبیت خمشی اعضای افقی و قائم می‌باشد. براساس تحقیقات مونترگری و مدهکار [۲۰] حداقل ممان اینرسی لازم برای ستون و تیر حول محور عمود بر ورق جان به ترتیب از روابط ۱ و ۲ بدست می‌آید.

$$I_c \geq \frac{0.0031 \times t_w \times h^4}{L} \quad (1)$$

$$I_b \geq \frac{0.0031 \times t_w \times L^4}{h} \quad (2)$$

که در روابط فوق طول المان مرزی افقی (تیر) و ارتفاع المان مرزی قائم (ستون) و t_w ضخامت ورق فولادی می‌باشد. در صورتی که تیر مربوطه در طبقات میانی قرار داشته باشد، نیروهای کششی ورق فولادی در

برشی متعارف مقایسه شده‌است. بسته به سختی و هندسه سخت کننده‌ها الگوی میدان‌های کششی که در دیوار ایجاد می‌شود تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. این امر موجب می‌شود یک مسیر انتقال نیروی جدید توسط سخت کننده‌ها ایجاد گردد که بخشی از بار محوری (کشش و فشار) را به موازات ستون‌های اصلی به شالوده منتقل می‌کند. در حقیقت سخت کننده‌ها همانند یک المان مرزی ثانویه عمل می‌کنند و این امر موجب کاهش تقاضا در المان‌های اصلی (ستون‌های لبه دیوار) می‌گردد.

در طراحی دیوارهای برشی فولادی ترجیح داده می‌شود عمده رفتار پلاستیک سیستم از طریق تسلیم ورق جان تحت اثر کشش ناشی از میدان‌های کششی اتفاق بیافتد و اعضای افقی و قائم تا حد امکان در محدوده ارتجاعی باقی بمانند تا باربری ثقلی سیستم مختل نشود. برای توسعه‌ی تغییر شکل‌های غیرارتجاعی در ورق جان، که نقش فیوز را در سیستم باربر جانبی لرزه‌ای بر عهده دارد، لازم است اعضای مرزی افقی (HBE) و قائم (VBE) علاوه بر مقاومت کافی، از صلبیت خمشی بالایی نیز برخوردار باشند. در صورتی که اگر المان‌های مرزی از صلبیت خمشی کافی برخوردار نباشند، تحت اثر نیروی مکش حاصل از میدان کششی وارده از طرف جان دیوار، به سمت داخل دیوار خم خواهند شد و در نتیجه نخواهند

S_2 معادل با ضخامت سخت کننده‌ی ۲ سانتی‌متر، S_3 معادل با ضخامت سخت کننده‌ی ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد. مدل‌هایی که با حرف N شروع می‌شوند (NS) به معنی مدل‌های بدون سخت کننده بوده و مدل‌هایی که با حرف S شروع می‌شوند (S) به معنی مدل‌های سخت شده می‌باشند.

در مدل‌هایی که برای بررسی تاثیر سخت کننده در ضخامت ثابت ورق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند از دو حروف SS برای نامگذاری آن‌ها استفاده شده است.

در مدل‌هایی که در ابتدای نامگذاری آن‌ها از حرف ۳ استفاده شده است در مدل‌ها (3S-t2) به معنی بارگذاری در طبقات می‌باشد.

در ۱۲ مدل آخر جدول ۱، مدل‌هایی با ابعاد مقطع تیر متفاوت در نظر گرفته شده است تا تاثیر تغییر ممان اینرسی مقطع تیر بر رفتار دیوارها بررسی شود. نام گذاری این مدل‌ها به صورت $S-t2-I_1$ انجام گرفته به صورتی که در آن I نشان دهنده‌ی نسبت ممان اینرسی تیر مدل مربوطه به ممان اینرسی تیر مدل $S-t2-I$ می‌باشد.

۳-۲- مقایسه رفتار دیوار با سخت کننده پیشنهادی

جهت بررسی اولیه رفتار دیوار برشی با سخت کننده پیشنهادی، مدل‌های اجزا محدود $SS2-t2$ و $NS2-t2$ که مشخصات کلی آن‌ها قبلاً در جدول ۱ ارائه شده است، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها شامل قاب سه طبقه بوده و مشخصات کلی این مدل‌ها همچنین در شکل ۱ نیز نشان داده شده است. این مدل‌ها مطابق شکل ۷ تحت بارگذاری جانبی از نوع تغییرمکان قرار گرفته اند همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود فرم تغییر شکل‌های اعمال شده به صورت مثلثی بوده به طوری که بررسی اولیه مدل‌ها نشان می‌دهد که مود اول حرکتی این قاب‌ها نیز تقریباً به صورت مثلثی می‌باشد. در این مدل‌ها ضخامت جان دیوارها در هر سه طبقه برابر $t_w = 2 \text{ mm}$ بوده و جهت بررسی مکانیزم خرابی از مقادیر کرنش پلاستیک Von-Mises استفاده شده است. در شکل ۷ مقادیر کرنش پلاستیک در دو مدل با سخت کننده و بدون سخت کننده در دریف ۵ درصد نشان داده شده است. همچنین دو مدل سخت شده و سخت نشده پنج طبقه مطابق شکل ۸ تحت بارگذاری از نوع تغییر مکان قرار گرفته است. که مطابق همین شکل فرم تغییر شکل‌ها برای حالت پنج طبقه نیز فرم تغییر شکل به صورت مثلثی می‌باشد. در این مدل‌ها ضخامت جان دیوارها در هر پنج طبقه برابر $t_w = 1 \text{ mm}$ بوده و مطابق مدل سه طبقه جهت بررسی مکانیزم خرابی از مقادیر کرنش پلاستیک Von-Mises استفاده شده است. در شکل ۸

طبقه فوقانی و تحتانی همدیگر را خنثی کرده و بنابراین مقدار t_w در این حالت برابر اختلاف ضخامت ورق‌های فولادی در بالا و پایین تیر خواهد بود. در روابط فوق، ممان اینرسی لازم برای تیر با توان چهارم طول تیر و ممان اینرسی لازم برای ستون با توان چهارم ارتفاع ستون رابطه‌ی مستقیم دارد، لذا تغییر جزئی در طول تیر یا ارتفاع ستون، به ترتیب تاثیر قابل توجهی روی ممان اینرسی لازم برای تیر و ستون خواهد داشت.

در سازه‌ها عموماً طول دهانه بیشتر از ارتفاع طبقه بوده و در نتیجه حداقل ممان اینرسی لازم تیر، بسیار بیشتر از ممان اینرسی لازم برای ستون می‌باشد [۲۱]. بنابراین در صورت انتخاب مقطع با ممان اینرسی بالا برای تیر، مقطع ستون نیز باید متناسب با آن افزایش یابد که می‌تواند موجب غیر اقتصادی شدن طرح شود. در این پژوهش، وجود سخت کننده‌ها موجب کاهش دهانه موثر تیر شده و در نتیجه می‌توان برای محاسبه حداقل مقدار ممان اینرسی تیر به جای استفاده از کل طول تیر، فاصله‌ی بین دو سخت کننده قائم را مبنا قرار داد. برای نمونه دهانه موثر در شکل ۵-ب برابر ۳ متر می‌باشد.

۳-۱- مدل‌های مورد مطالعه

در مدل پیشنهادی وجود سخت کننده موجب می‌شود که نواحی پلاستیک در ناحیه میانی دیوار متمرکز شود و در نتیجه مقادیر تنش در قسمت‌هایی از دیوار که در مجاورت ستون قرار دارند، به صورت نسبی کاهش یابد. این امر موجب می‌شود در محل اتصال تیر به ستون نیز میزان تقاضا کاهش یابد و در عوض در محل اتصال سخت کننده به تیر تنش‌ها افزایش یافته و مفاصل پلاستیک خمشی تشکیل شود. تشکیل این مفاصل در تیرها به عنوان یک فیوز ثانویه عمل کرده و میزان تقاضا در المان‌های مرزی قائم را کاهش می‌دهد. برای بررسی نتایج ذکر شده مدل‌های متعددی در این پژوهش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. در جدول ۱ مدل‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، همراه با مشخصات ابعادی ارائه شده است.

در کلیه‌ی مدل‌های جدول ۱ عددی که بعد از حرف t نوشته شده است، نشان‌دهنده‌ی ضخامت ورق فولادی می‌باشد، به طوری که t_1 معادل با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، t_2 معادل با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر، t_3 معادل با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر می‌باشد. در کلیه‌ی مدل‌های جدول ۱، عددی که بعد از حرف S نوشته شده است نشان‌دهنده‌ی ضخامت سخت کننده می‌باشد، به طوری که S_1 معادل با ضخامت سخت کننده‌ی ۱/۵ سانتی‌متر،

جدول ۱. مدل‌هایی که در مطالعه‌ی پارامتریک بررسی شده‌اند

Table 1. The models that have been examined in the parametric study

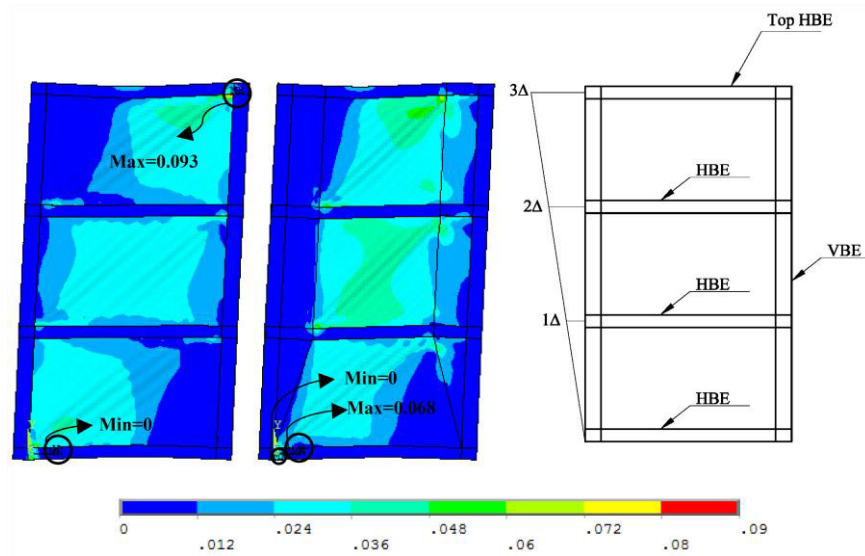
Model (SPSW)	Wall Height (mm)	Wall Length (mm)	Wall thickness (mm)	Beam(No.2) $b_f \times t_f \times h \times t_w$	Column $b_c \times t_c \times h \times t_w$	Stiffener $b_s \times t_s$
S-t1	3000	5000	1	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20
S-t2	3000	5000	2	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20
3S-t2	3000	5000	2	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20
5S-t2	3000	5000	1	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20
S-t3	3000	5000	3	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20
NS-t1	3000	5000	1	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	-
NS-t2	3000	5000	2	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	-
3NS-t2	3000	5000	2	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	-
5NS-t2	3000	5000	1	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	-
NS-t3	3000	5000	3	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	-
SS1-t1	3000	5000	1	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15
SS2-t1	3000	5000	1	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20
SS3-t1	3000	5000	1	200 × 15 × 300 × 15	200 × 15 × 300 × 15	200 × 25
SS1-t2	3000	5000	2	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20 × 400 × 20	200 × 15
SS2-t2	3000	5000	2	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20 × 400 × 20	200 × 20
SS3-t2	3000	5000	2	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20 × 400 × 20	200 × 25
SS1-t3	3000	5000	3	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20 × 400 × 20	200 × 15
SS2-t3	3000	5000	3	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20 × 400 × 20	200 × 20
SS3-t3	3000	5000	3	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20 × 400 × 20	200 × 25
RSS2-t2	3000	5000	2	300 × 15 × 300 × 15	300 × 20 × 400 × 20	200 × 20
S-t2-I _{7.5}	3000	5000	2	400 × 20 × 500 × 20	400 × 20 × 650 × 20	200 × 20
S-t2-I	3000	5000	3	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20 × 400 × 20	200 × 20
S-t2-I _{0.65}	3000	5000	2	200 × 15 × 240 × 10	200 × 20 × 400 × 20	200 × 20
S-t2-I _{0.5}	3000	5000	2	200 × 20 × 200 × 15	200 × 20 × 400 × 20	200 × 20
S-t2-I _{0.3}	3000	5000	2	200 × 15 × 160 × 10	200 × 20 × 400 × 20	200 × 20
S-t2-I _{0.13}	3000	5000	2	200 × 10 × 130 × 10	200 × 20 × 400 × 20	200 × 20
NS-t2-I _{7.5}	3000	5000	2	400 × 20 × 500 × 20	400 × 20 × 650 × 20	-
NS-t3-I	3000	5000	3	200 × 15 × 300 × 15	200 × 20 × 400 × 20	-
NS-t2-I _{0.65}	3000	5000	2	200 × 15 × 240 × 10	200 × 20 × 400 × 20	-
NS-t2-I _{0.5}	3000	5000	2	200 × 20 × 200 × 15	200 × 20 × 400 × 20	-
NS-t2-I _{0.3}	3000	5000	2	200 × 15 × 160 × 10	200 × 20 × 400 × 20	-
NS-t2-I _{0.13}	3000	5000	2	200 × 10 × 130 × 10	200 × 20 × 400 × 20	-

موارد موجب غیر اقتصادی شدن طرح شود. در مدل پیشنهادی، با قرار دادن سخت کننده‌های قائم، طول آزاد تیر کاهش می‌یابد و می‌توان در رابطه‌ی ۲ به جای فاصله‌ی بین ستون‌ها، فاصله‌ی بین سخت کننده‌ها را جایگزین طول تیر در روابط ۱ و ۲ کرد و بدین ترتیب ممان اینرسی لازم برای تیر، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

شکل ۷ کرنش پلاستیک Von-Mises را در مدل های 3NS-t2 (بدون سخت کننده) و 3S-t2 (با سخت کننده) تحت دررفت ۵ درصد و در شکل ۸ کرنش پلاستیک Von-Mises را در مدل های 5NS-t2

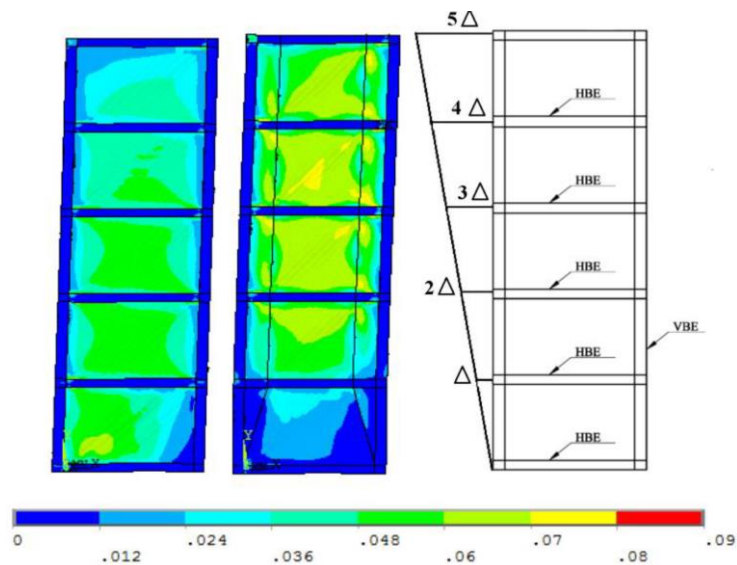
مقادیر کرنش پلاستیک در دو مدل با سخت کننده و بدون سخت کننده در دررفت ۴ درصد نشان داده شده است.

طبق AISC-341 [۲۲]، جهت ایجاد تنش یکنواخت در کل ورق و همچنین تسلیم یکنواخت آن، ممان اینرسی تیر و ستون باید چنان انتخاب شود که روابط ۱ و ۲ ارضا شوند. در این روابط، L فاصله مرکز تا مرکز بین دو ستون می‌باشد با توجه به رابطه‌ی ۲ مقدار ممان اینرسی لازم برای تیر با توان چهارم L رابطه مستقیم دارد و با افزایش طول دهانه ممان اینرسی نیز مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. این موضوع ممکن است در برخی



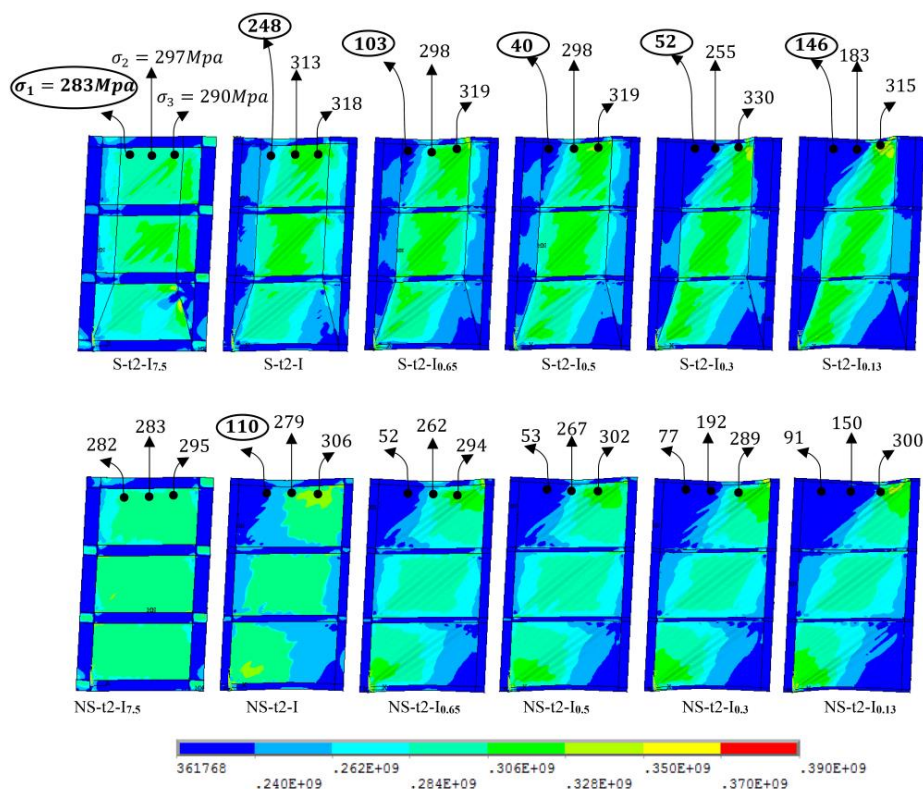
شکل ۷. مقادیر کرنش پلاستیک در دو مدل با سخت کننده (3S-t2) و بدون سخت کننده (3NS-t2) در دریفت ۵ درصد

Fig. 7. Plastic strain values in two models with stiffener (3S-t2) and without stiffener (3NS-t2) in 5% drift



شکل ۸. مقادیر کرنش پلاستیک در دو مدل با سخت کننده (5S-t2) و بدون سخت کننده (5NS-t2) در دریفت ۴ درصد

Fig. 8. Plastic strain values in two models with stiffener (5S-t2) and without stiffener (5NS-t2) in 4% drift



شکل ۹. توزیع تنش در نمونه ها در جابجایی مثلثی

Fig. 9. Stress distribution in samples in triangular displacement

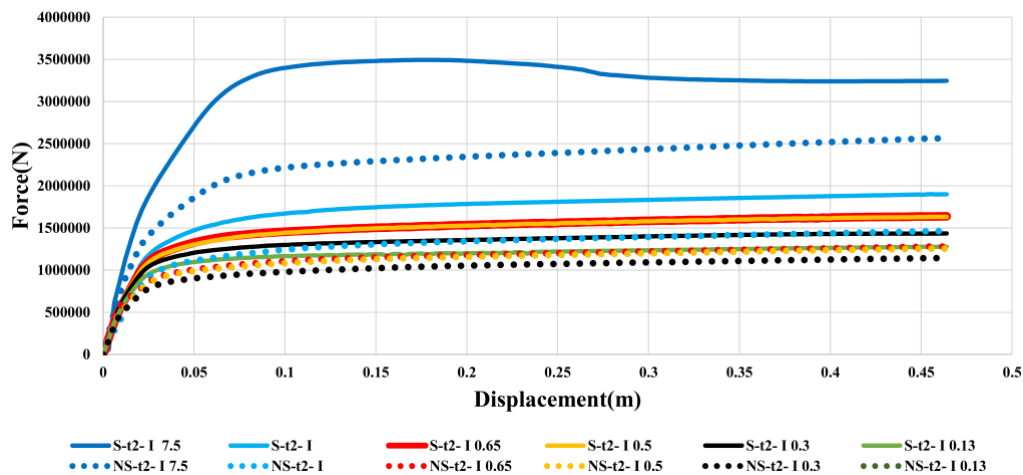
می‌باید به همین جهت با توجه به مدلسازی‌های انجام شده در این قسمت که مشخصات هر دو مدل سخت شده و سخت نشده در جدول ۱ آورده شده است، مدل‌های (S-t2-I_{0.65}، S-t2-I_{0.5}، S-t2-I_{0.3}، S-t2-I_{0.13})، (S-t2-I_{7.5}، S-t2) که به صورت جابجایی مثلثی اعمال شده در طبقات مدل‌های پیشنهادی بوده و همچنین مدل‌های بدون سخت کننده آن‌ها که شامل (NS-t2-I_{0.65}، NS-t2-I_{0.5}، NS-t2-I_{0.3}، NS-t2-I_{0.13})، (NS-t2-I_{7.5}، NS-t2) که به صورت جابجایی مثلثی اعمال شده در طبقات مدل‌های بدون سخت کننده می‌باشند. در این قسمت، ممان اینرسی المان مرزی افقی به ترتیب (۱۰٪، ۳۰٪، ۵۰٪، ۶۵٪ و ۷/۵ برابر) ممان اینرسی مدل S-t2 که طول تیر در این مدل سه متر فرض شده است، می‌باشد.

با توجه به شکل ۹ که نشان‌دهنده یکنواختی توزیع تنش و نمودار تغییر مکان نمونه‌ها می‌باشد، دیده می‌شود که وقتی طول تیر را کاهش می‌دهیم، ورق فولادی به طوری یکنواخت و به صورت کامل به تسلیم نمی‌رسد، در صورتی که بنا به گفته‌ی AISC-341 [۲۳] ورق فولادی می‌بایست به صورت کامل تسلیم شود. به منظور بررسی دقیق‌تر میزان یکنواختی تنش، در شکل ۹ مقدار تنش‌ها در سه نقطه و در نزدیکی تیر

(بدون سخت کننده) و S-t2-5 (با سخت کننده) تحت دریافت ۴ درصد نشان می‌دهد. در مدل‌های بدون سخت کننده تیر طبقه آخر ضابطه حداقل ممان اینرسی (رابطه ۲) را تامین نمی‌کنند و از سختی کافی برخوردار نیست. در حالی که در مدل‌های با سخت کننده در صورتی که در رابطه ۲ به جای متغیر L فاصله بین سخت کننده‌ها قرار داده شود، این رابطه تامین می‌شود. در هر دو مدل مطابق شکل ۷ و ۸ جابجایی با توزیع مثلثی اعمال شده است. با توجه به شکل ۷ و ۸ در مدل بدون سخت کننده در طبقه آخر (که تیر ضوابط آیین نامه را تامین نکرده است) کرنش‌ها یکنواخت نبوده و تمرکز کرنش‌های پلاستیک نیز در نزدیکی ستون قابل توجه می‌باشد. در حالی که در مدل با سخت کننده کرنش‌های پلاستیک در نزدیکی ستون‌ها کاهش یافته و در قسمت‌های میانی دیوار توزیع شده است. در این مدل مابین سخت کننده‌ها توزیع کرنش‌های پلاستیک در طبقه آخر یکنواختی بیشتری نسبت به مدل بدون سخت کننده دارد.

۳-۳- تاثیر کاهش ممان اینرسی تیر بر رفتار دیوارها

با کاهش ممان اینرسی تیرها و عدم تامین تکیه‌گاه کافی از طرف تیر، یکنواختی تنش در دیوار کاهش یافته و تمرکز تنش در گوشه‌ها افزایش



شکل ۱۰. مقادیر کرنش پلاستیک در دو مدل با سخت کننده (S-t2) و بدون سخت کننده (NS-t2) در دررفت ۴ درصد

Fig. 10. Plastic strain values in two models with stiffener (S-t2) and without stiffener (NS-t2) in 4% drift

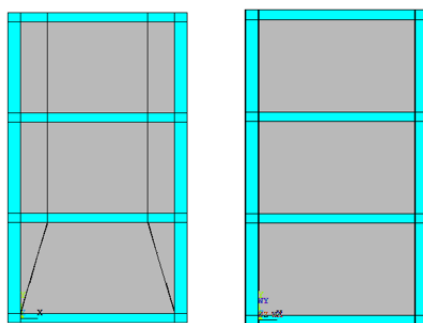
می‌شود با افزودن سخت کننده گرچه مقاومت اولیه بالایی ایجاد می‌گردد ولی در ادامه بارگذاری دچار افت مقاومت می‌شود. این افت مقاومت مربوط به کمانش سخت کننده‌ها می‌باشد. توجه شود که در این مدل با وجود افزایش مقاومت تیر و ستون، ابعاد سخت کننده‌ها تغییری نکرده است.

۴- مطالعه پارامترهای مدل پیشنهادی

یکی از پارامترهای مهم در سختی نسبی اجزای مرزی نسبت به دیوار و مکانیزم خرابی دیوارها، ضخامت جان دیوار و ضخامت نسبی سخت کننده‌ها می‌باشد لذا برای مطالعه‌ی تاثیر ضخامت سخت کننده‌ها بر رفتار دیوارهای برشی سخت شده، برای اینکه مقایسه‌ای از عملکرد دیوار برشی سخت شده انجام شود، دیوار برشی را در سه ضخامت سخت کننده‌ی (۱/۵ سانتی‌متر، ۲ سانتی‌متر، ۲/۵ سانتی‌متر) مورد مطالعه قرار داده شده است. جهت دور کردن کرنش‌های پلاستیک از ستون‌ها، تاثیر تضعیف مقطع تیر در فاصله‌ی بین سخت کننده‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۱۱ تیرهای مورد استفاده در مدل‌های متعارف دیوار برشی فولادی نشان داده شده‌اند و مطابق شکل ۱۲ تیرهایی که در حد فاصل سخت کننده‌های قائم (تیرهای شماره ۵ در شکل ۱۲) عرض بال تیرها کاهش داده شده‌اند، نشان داده شده است و این کاهش به منظور هدایت بخشی از خرابی‌ها به داخل تیر و الاستیک ماندن ستون‌ها صورت گرفته است.

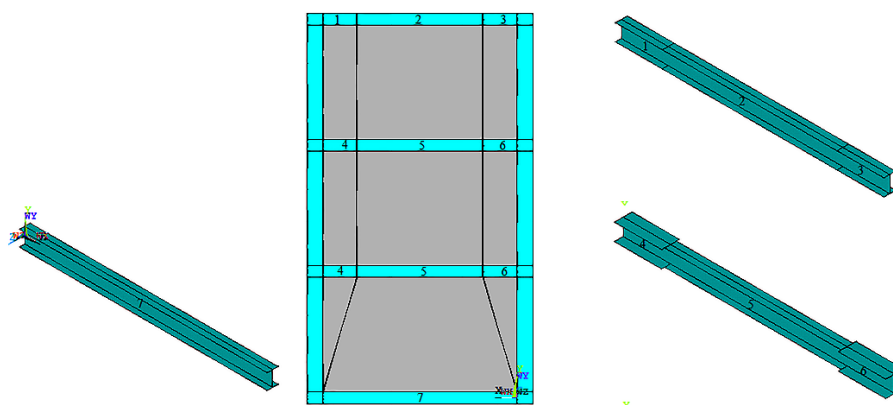
بالایی نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود در مدل S-t2- $I_{0.65}$ ، یکنواختی توزیع تنش و کرنش از بین رفته است به طوری که میزان تنش از عدد ۲۸۳ مگاپاسکال به اندازه‌ی تقریباً ۶۳٪ کاهش پیدا کرده و به عدد ۱۰۳ مگاپاسکال رسیده است. که این کاهش بیانگر از بین رفتن میزان یکنواختی تنش می‌باشد. با توجه به شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که در مدل سخت شده‌ی S-t2-I نسبت به مدل NS-t2-I مقدار تنش ۵۵٪ برابر شده است که این نشان می‌دهد، با اضافه کردن سخت کننده قائم در مدل پیشنهاد شده میزان توزیع تنش‌ها یکنواخت شده و همچنین ورق‌ها به تسلیم کامل می‌رسند.

در شکل ۱۰ نمودار نیرو تغییر مکان مدل‌های (S-t2- $I_{0.13}$, S-t2- $I_{0.3}$, S-t2- $I_{0.5}$, S-t2-I, S-t2- $I_{7.5}$ ، سخت نشده‌ی نظیر آن‌ها (NS-t2- $I_{0.13}$, NS-t2- $I_{0.3}$, NS-t2- $I_{0.5}$, NS-t2-I, NS-t2- $I_{7.5}$, NS-t2- $I_{0.65}$) ترسیم شده‌اند. در این نمودار مدل‌های بدون سخت کننده به صورت نقطه چین و مدل‌های با سخت کننده به صورت توپر و با رنگ متناظر با مدل بدون سخت کننده ترسیم شده‌اند. مقایسه نمودارهای توپر با نمودارهای متناظر (همرنگ) نقطه چین نشان می‌دهد در تمامی مدل‌ها افزودن سخت کننده با نرخ تقریباً یکسانی موجب افزایش مقاومت شده است. مقدار این افزایش به صورت تقریبی برابر ۲۵ درصد می‌باشد. در مدل S-t2- $I_{7.5}$ ابعاد تیرها و ستون‌های مرزی نسبت به مدل‌های دیگر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در این مدل مشاهده



شکل ۱۱. تیر مورد استفاده در طبقات دیوار برشی فولادی در مدل‌های متعارف

Fig. 11. The beam used in steel plate shear wall floors in conventional models



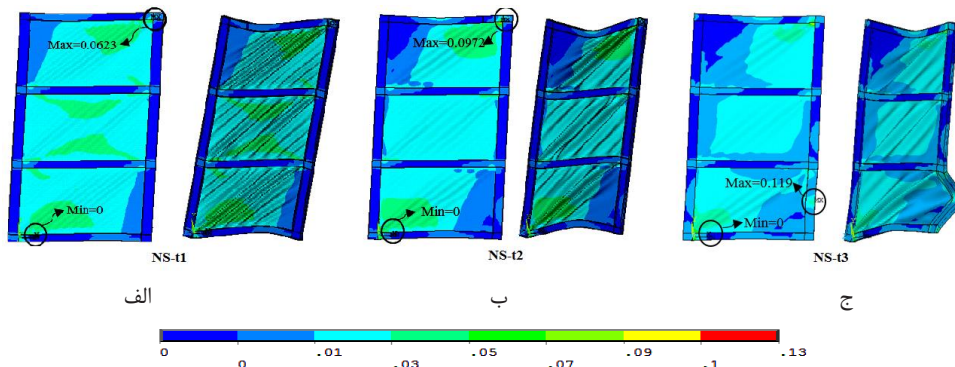
شکل ۱۲. تیرهای مورد استفاده در طبقات دیوار برشی فولادی در مدل RSS2-t2

Fig. 12. Beams used in steel shear wall floors in RSS2-t2 model

اتصال تیر به ستون به داخل دهانه و محل اتصال سخت کننده به تیر منتقل گردد. بنابراین وجود سخت کننده‌ها موجب کاهش تقاضا در ستون‌ها گشته و در نتیجه موجب انتقال بخشی از خرابی به قسمت‌های میانی تیر و مابین سخت کننده‌ها شده است. این موضوع می‌تواند کمک کند تا ستون‌ها تا حد امکان در حد الاستیک باقی بمانند و بتوانند به باربری ثقیلی ادامه دهند. نکته قابل توجه در این مقایسه کمانش ستون طبقه اول در مدل بدون سخت کننده NS-t3 در شکل ۱۳ می‌باشد. در این مدل ضخامت ورق برابر ۳ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به نیروی فشاری ایجاد شده در ستون طبقه اول، این ستون دچار کمانش خارج از صفحه گردیده ولی در مدل متناظر آن، یعنی مدل S-t3 چنین رفتاری مشاهده نشد که این نشان از کاهش تقاضا

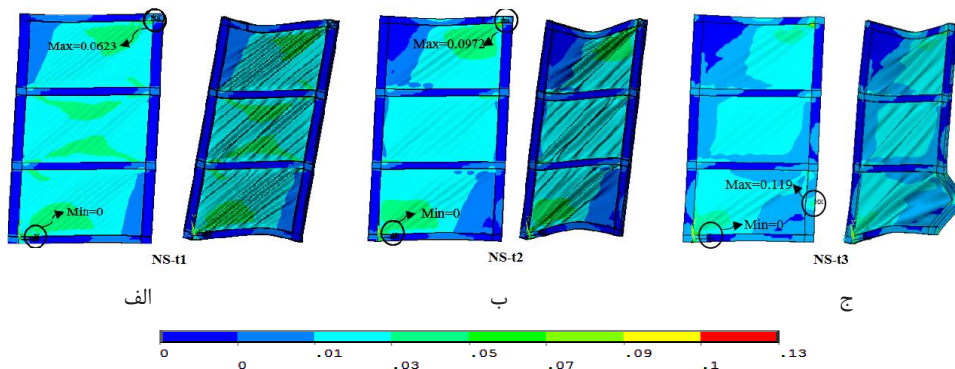
۴-۱ بررسی تاثیر ضخامت ورق بر رفتار دیوار برشی فولادی در ضخامت ثابت سخت کننده

در این بررسی ابتدا مدل‌های NS-t1، NS-t2، NS-t3 از جدول ۱ مورد مطالعه قرار گرفته و در ادامه مدل‌های سخت شده‌ی نظیر هر کدام یعنی مدل‌های S-t1، S-t2، S-t3 مورد بررسی واقع شدند. لازم به ذکر است که حالت سخت شده‌ی مدل‌های مذکور با ضخامت سخت کننده ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ توزیع کرنش پلاستیک مدل‌های بدون سخت کننده و با سخت کننده تحت جابجایی جانبی ۴۷ سانتی‌متر (معادل ۵ درصد دریفت جانبی) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن سخت کننده‌ها موجب شده است کرنش پلاستیک از محل



شکل ۱۳. توزیع کرنش پلاستیک در حالت بدون بزرگنمایی و با بزرگنمایی ۵ برابر تحت جابجایی ۴۷ سانتی متر در تراز طبقه بام (الف) مدل NS-t1 (ب) مدل NS-t2 (ج) مدل NS-t3

Fig. 13. Distribution of plastic strain without magnification and with 5 times magnification under a displacement of 47 cm at the level of the roof floor a) NS-t1 model b) NS-t2 model c) NS-t3 model



شکل ۱۴. توزیع کرنش پلاستیک در حالت بدون بزرگنمایی و با بزرگنمایی ۵ برابر تحت جابجایی ۴۷ سانتی متر در طبقه بام (الف) مدل S-t1 (ب) مدل S-t2 (ج) مدل S-t3

Fig. 14. Distribution of plastic strain without magnification and with 5 times magnification under a displacement of 47 cm in the roof floor a) Model S-t1 b) Model S-t2 c) Model S-t3

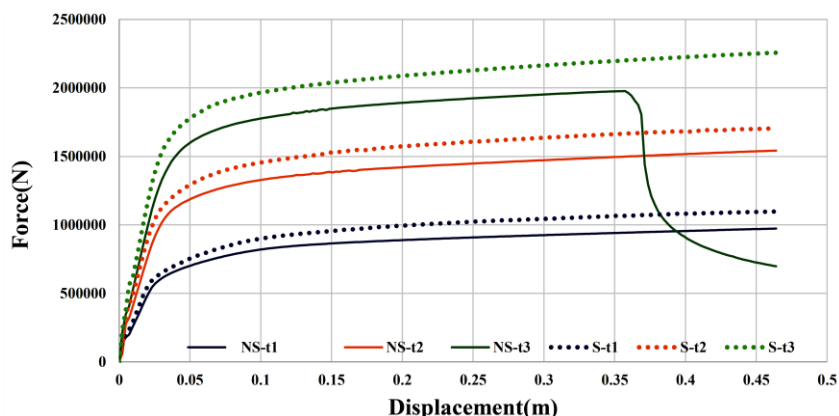
در ستون طبقه اول می‌باشد. مقایسه‌ی نمونه‌های با سخت کننده و بدون سخت کننده نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که از سخت کننده استفاده شده است، حداکثر کرنش پلاستیک ایجاد شده در مدل نسبت به مدل های بدون سخت کننده کاهش قابل توجهی داشته است. برای مثال در نمونه NS-t2 کرنش پلاستیک حداکثر ۰/۰۹۷۲ می‌باشد که این عدد در مدل متناظر آن با سخت کننده، تحت شرایط یکسان به ۰/۰۶۹ رسیده است که نشاندهنده کاهش ۳۰ درصدی در مدل مورد نظر می‌باشد.

نمودار بار- جابجایی مدل‌های فوق در شکل ۱۵ ترسیم شده‌اند. در این نمودار محور قائم بار جانبی کل وارد بر سازه و محور افقی جابجایی بام (طبقه در ستون طبقه اول می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش ضخامت ورق جان مقاومت جانبی نیز افزایش می‌یابد. در نمودار مربوط به مدل NS-t3 افت مقاومت قابل توجه در جابجایی ۰/۳۵ متر مشاهده می‌شود که مربوط به کمایش ستون در این مدل می‌باشد.

در مدل NS-t1 و NS-t3 نسبت به مدل NS-t2 مقاومت دیوار برشی فولادی به ترتیب به اندازه‌ی ۵۸/۷۰٪ کاهش و ۳۲٪ افزایش یافته است و از مقایسه‌ی مدل های NS-t1 و NS-t2 و NS-t3 با مدل های سخت شده‌ی خود یعنی S-t1 و S-t2 و S-t3 در شرایط یکسان و با توجه به نمودار شکل ۱۵ نتیجه می‌شود که با اضافه کردن سخت کننده به ترتیب،

در ستون طبقه اول می‌باشد. مقایسه‌ی نمونه‌های با سخت کننده و بدون سخت کننده نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که از سخت کننده استفاده شده است، حداکثر کرنش پلاستیک ایجاد شده در مدل نسبت به مدل های بدون سخت کننده کاهش قابل توجهی داشته است. برای مثال در نمونه NS-t2 کرنش پلاستیک حداکثر ۰/۰۹۷۲ می‌باشد که این عدد در مدل متناظر آن با سخت کننده، تحت شرایط یکسان به ۰/۰۶۹ رسیده است که نشاندهنده کاهش ۳۰ درصدی در مدل مورد نظر می‌باشد.

نمودار بار- جابجایی مدل‌های فوق در شکل ۱۵ ترسیم شده‌اند. در این نمودار محور قائم بار جانبی کل وارد بر سازه و محور افقی جابجایی بام (طبقه



شکل ۱۵. نمودار بار جانبی کل سازه - جابجایی طبقه بام

Fig. 15. Lateral load diagram of the entire structure - displacement of the roof floor

کننده مایل در طبقه اول دچار کماتش موضعی شده است. تعیین حداقل ضخامت لازم برای سخت کننده با توجه به پیچیده بودن روابط حاکم برای کماتش آن‌ها، باید از طریق بررسی مدل اجزا محدود و سعی و خطا تعیین شود.

۳-۴- مقایسه رفتار نمونه با سخت کننده و بدون سخت کننده تحت بارگذاری چرخه‌ای

تجمیع کرنش‌های پلاستیک در چرخه‌ها بر رفتار لرزه‌ای سازه تاثیر گذار است. جهت بررسی دقیق‌تر مدل پیشنهادی، رفتار چرخه‌ای مدل‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور رفتار مدل‌های S-t2 و NS-t2 از جدول ۱ تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است. مدل S-t2 مشابه مدل NS-t2 می باشد با این تفاوت که در آن سخت کننده اضافه گردیده است. الگوی بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده در شکل ۱۸ نشان داده شده است. هر دو مدل در نهایت در چرخه آخر تحت دررفت نهایی برابر با ۴ درصد، معادل با ۳۷ سانتی‌متر جابجایی طبقه‌ی بام () قرار گرفته اند. نمودار نیرو- تغییرمکان هر دو مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.

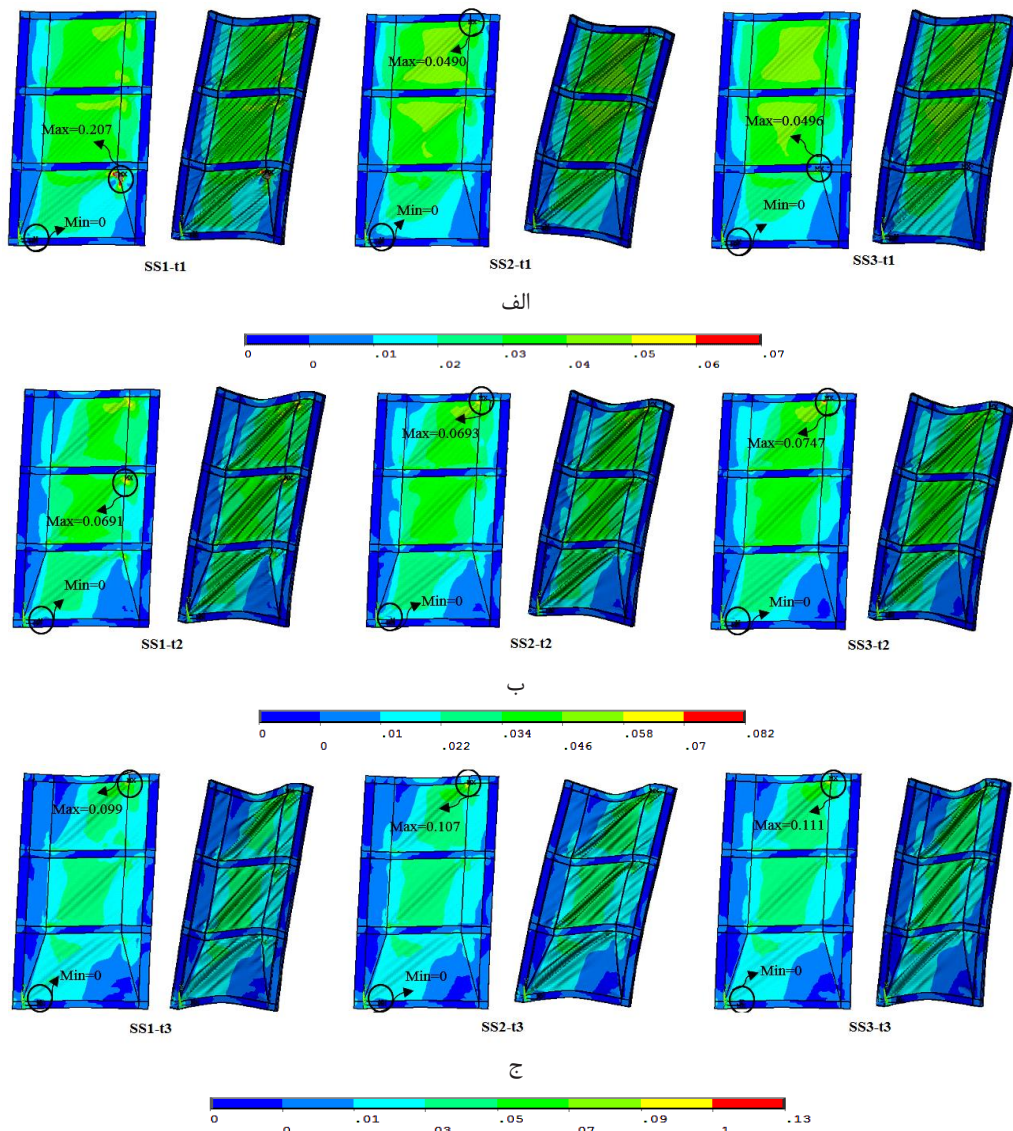
در نمودارهای هیستریزس سطح زیر نمودار، بیانگر میزان انرژی جذب شده بوده که با توجه به نمودارهای بدست آمده در شکل ۱۹ مقدار انرژی جذب شده تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای در مدل سخت شده، $1.06 \times 10^6 \text{ N.m}$ و مقدار انرژی جذب شده در مدل بدون سخت کننده، $5.65 \times 10^6 \text{ N.m}$ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با اضافه کردن سخت کننده، میزان انرژی

۱۲/۸۴٪ و ۱۰/۶۳٪ و ۱۱/۳۳٪ (قبل خرابی) در مدل‌ها افزایش مقاومت ایجاد شده است.

۴-۲- بررسی تاثیر ضخامت سخت کننده

در شکل ۱۶ توزیع کرنش پلاستیک در مدل‌های SS1~3-t1، SS1~3-t2 و SS1~3-t3 تحت جابجایی جانبی ۴۷ سانتی‌متر (معادل ۵ درصد دررفت جانبی) نمایش داده شده است. مشخصات مدل‌های فوق در جدول ۱ ارائه شده است. در مدل‌های فوق از سه ضخامت متفاوت ۱/۵ سانتی‌متر، ۲ سانتی‌متر، ۲/۵ سانتی‌متر برای سخت کننده‌ها استفاده شده است.

در نمودار شکل ۱۷ نیز نمودار بار-جابجایی این مدل‌ها ترسیم شده است. همچنین در جدول ۲ میزان افزایش در مقاومت جانبی مدل‌ها مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با توجه به جدول ۲ نتیجه می‌شود که افزودن سخت کننده‌ها حدوداً موجب افزایش ۱۰ درصدی مقاومت جانبی مدل‌ها شده است. ولی تغییر ضخامت سخت کننده تاثیر زیادی در میزان مقاومت جانبی دیوار برشی فولادی ندارد و در حقیقت وجود سخت کننده با تغییر مکانیزم شکست دیوار موجب افزایش مقاومت ۱۰ درصدی دیوار گشته ولی سطح مقطع و ضخامت آن تاثیر مستقیم بر مقاومت جانبی دیوار ندارد. بنابراین به لحاظ اقتصادی می‌توان حداقل ضخامت لازم را مورد استفاده قرار داد. در صورتی که ضخامت سخت کننده‌ها از یک حدی کمتر باشد، احتمال کماتش در سخت کننده‌ها وجود خواهد داشت. برای نمونه در مدل SS1-t1 سخت



شکل ۱۶. توزیع کرنش پلاستیک نمونه‌های مورد مطالعه در حالت بدون بزرگنمایی و با بزرگنمایی ۵ برابر تحت جابجایی ۴۷ سانتی متر طبقه بام (الف) ضخامت ورق ۱ میلی‌متر (ب) ضخامت ورق ۲ میلی‌متر (ج) ضخامت ورق ۳ میلی‌متر

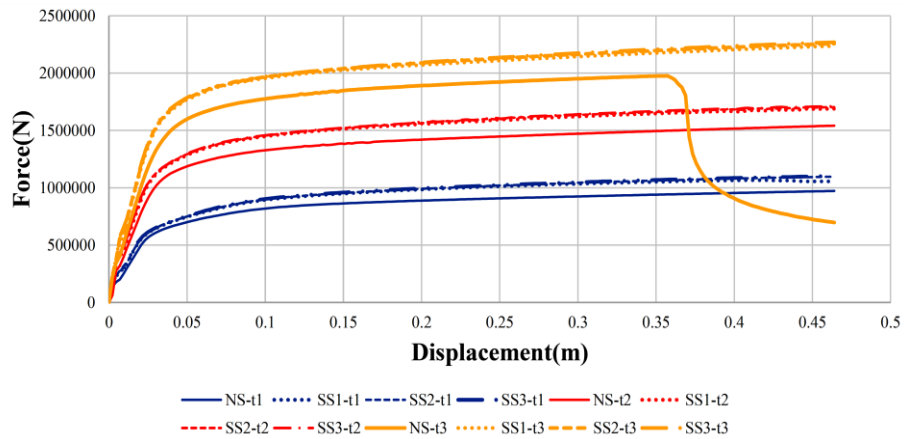
Fig. 16. Plastic strain distribution of the studied samples without magnification and with 5 times magnification under displacement of 47 cm roof floor a) sheet thickness 1 mm b) sheet thickness 2 mm c) sheet thickness 3 mm

۵- بررسی و تحلیل نتایج

در این پژوهش جهت کاهش حداقل ممان اینرسی لازم برای تیرها در دیوارهای برشی فولادی، از سخت کننده های قائم و مایل استفاده شده است. به طوری که با قرار دادن سخت کننده‌های پیشنهادی، ممان اینرسی حداقل لازم برای تیرها کاهش می‌یابد. جهت بررسی رفتار دیوار برشی با

جذب شده تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای به اندازه‌ی ۵۱/۳۳٪ افزایش یافته و با توجه به نمودار شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که با اضافه کردن سخت کننده‌های پیشنهادی اثر فشردگی نمودار چرخه‌ای^۱ کاهش یافته است.

1 Pinching



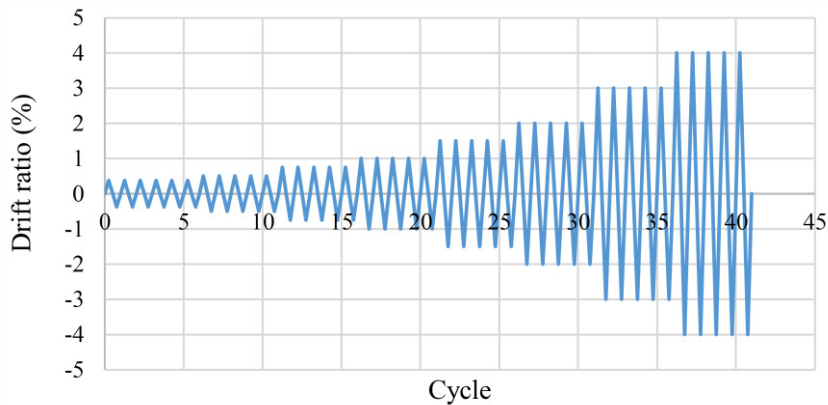
شکل ۱۷. نمودار بار جانبی کل سازه - جابجایی طبقه بام

Fig. 17. Lateral load diagram of the entire structure - displacement of the roof floor

جدول ۲. بررسی میزان افزایش مقاومت در انواع نمونه‌ها در دریفت ۳/۷ درصد

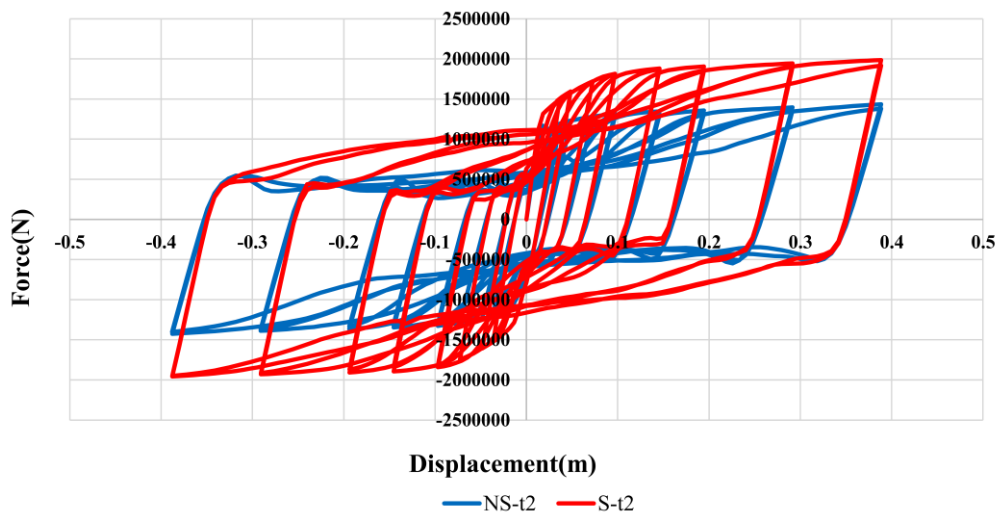
Table 2. Investigating the amount of resistance increase in all types of samples in 3.7% drift

Model	Lateral Strength (kN)	Increase after the addition of stiffener(%)
NS-t1	939.4863	-
SS1-t1	1049.994	+11.76%
SS2-t1	1062.664	+13.1%
SS3-t1	1067.076	+13.5%
NS-t2	1491.118	-
SS1-t2	1639.854	+9.97%
SS2-t2	1657.621	+11.1%
SS3-t2	1661.354	+11.4%
NS-t3	1968.090	-
SS1-t3	2171.477	%10.33
SS2-t3	2186.688	+11.1%
SS3-t3	2202.775	+11.9%



شکل ۱۸. بار گذاری اعمال شده بر روی نمونه‌ها

Fig. 18. Load applied on samples



شکل ۱۹. رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها

Fig. 19. Cyclic behavior of samples

برای نمونه درمدل بدون سخت کننده NS-t3 مشاهده گردید که تحت اثر نیروی فشاری ایجاد شده در ستون طبقه اول، این ستون دچار کمانش خارج از صفحه شده در حالی که در مدل متناظر آن با سخت کننده پیشنهادی، مدل S-t3، چنین رفتاری مشاهده نشد که نشان از کاهش تقاضا در ستون‌های طبقه‌ی اول را دارد.

۲- مقایسه‌ی نمونه‌های با سخت کننده و بدون سخت کننده نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که از سخت کننده استفاده شده است، حداکثر

سخت کننده‌های پیشنهادی، مدل‌های اجزا محدود با ابعاد مختلف ساخته شده و رفتار آن‌ها تحت بارگذاری جانبی با دیوارهای برشی بدون سخت کننده مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج تحلیل و مقایسه مدل‌ها به شرح زیر می باشد.

۱- در نمونه‌های با سخت کننده (S-t1 و S-t2 و S-t3) وجود سخت کننده‌ها موجب کاهش تقاضا در ستون‌ها گشته و در نتیجه موجب انتقال بخشی از خرابی به قسمت‌های میانی تیر و مابین سخت کننده‌ها می‌شود.

- US-Japan Partnership for Advanced Steel Structures, US-Japan Workshop on Seismic Fracture Issues in Steel Structures, 2000.
- [7] E. Alavi, F. Nateghi, Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation, *Journal of Constructional Steel Research*, 89 (2013) 9-20.
- [8] A. Astanteh-Asl, Seismic behavior and design of steel shear walls, Structural Steel Educational Council Moraga, CA, 2001.
- [9] M. Jalilzadeh Afshari, A. Asghari, M. Gholhaki, Shear strength and stiffness enhancement of cross-stiffened steel plate shear walls, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11(2) (2019) 179-193.
- [10] N.A. Khan, G. Srivastava, Models for strength and stiffness of steel plate shear walls with openings, in: *Structures*, Elsevier, 2020, pp. 2096-2113.
- [11] M. Meghdadian, N. Gharaei-Moghaddam, A. Arabshahi, N. Mahdavi, M. Ghalehnovi, Proposition of an equivalent reduced thickness for composite steel plate shear walls containing an opening, *Journal of Constructional Steel Research*, 168 (2020) 105985.
- [12] A. Emamyari, M.R. Sheidaii, A. Kookalanifar, H. Showkati, N. Akbarzadeh, Experimental study on cyclic behavior of stiffened perforated steel shear panels, in: *Structures*, Elsevier, 2020, pp. 2400-2410.
- [13] N. Paslar, A. Farzampour, F. Hatami, Investigation of the infill plate boundary condition effects on the overall performance of the steel plate shear walls with circular openings, in: *Structures*, Elsevier, 2020, pp. 824-836.
- [14] M. Bahrebar, J.B. Lim, G.C. Clifton, T. Zirakian, A. Shahmohammadi, M. Hajsadeghi, Response assessment and prediction of low yield point steel plate shear walls with curved corrugated web plates and reduced beam sections, in: *Structures*, Elsevier, 2020, pp. 1729-1745.
- [15] F. Hassani, Z. Javanbakht, Effect of geometrical variations on the failure mechanisms of perforated steel plate shear Walls—a parametric study towards a new design, *Thin-Walled Structures*, 159 (2021) 107244.
- [16] Z.-Q. Jiang, T. Yan, A.-L. Zhang, L. Su, C.-J. Shen, کرنش پلاستیک ایجاد شده در مدل نسبت به مدل های بدون سخت کننده کاهش قابل توجهی داشته است. برای مثال در نمونه NS-t2 کرنش پلاستیک حداکثر ۰/۰۹۷۲ می باشد که این عدد در مدل متناظر آن با سخت کننده، تحت شرایط یکسان به ۰/۰۶۹ رسیده است که نشان دهنده کاهش ۳۰ درصدی در مدل مورد نظر می باشد.
- ۳- در دیوارهای برشی فولادی جهت ایجاد تنش یکنواخت در کل ورق و همچنین تسلیم یکنواخت آن، محدودیت هایی برای ممان اینرسی تیر و ستون در آیین نامه های مختلف از جمله AISC قرار داده شده است و همین امر گاهی مواقع موجب غیر اقتصادی شدن طرح می شود به طوری که مقاطع نسبتاً بزرگی برای تیر و ستون لازم می شود. در مدل پیشنهادی با توجه به قرار دادن سخت کننده ها، طول موثر تیر کاهش می یابد به طوری که نتایج نشان می دهد جهت محاسبه ممان اینرسی حداقل لازم برای تیر می توان در روابط به جای کل طول دهانه، از طول آزاد بین سخت کننده ها استفاده شود که در این صورت مقدار ممان اینرسی لازم برای تیرها کاهش می باشد.
- ۴- در نمودارهای هیستریزس مقدار انرژی جذب شده در مدل های S-t2 و NS-t2 که تحت اثر بارگذاری چرخه ای قرار گرفته بودند، بررسی شدند و نتایج نشان داد که در مدل سخت شده S2-t2 مقدار انرژی جذب شده در این حالت برابر $1.06 \times 10^6 N.m$ و $1.55 \times 10^6 N.m$ مقدار انرژی جذب شده در مدل بدون سخت کننده NS-t2، برابر با $1.06 \times 10^6 N.m$ می باشد.

منابع

- [1] M. Azhari, Rasoul Mirghaderi, Design of steel structures, Arkan Danesh, 2018 (in persian).
- [2] H. Valizadeh, H. Veladi, B.F. Azar, M.R. Sheidaii, The cyclic behavior of Butterfly-shaped Link Steel Plate Shear Walls with and without Buckling-restrainers, in: *Structures*, Elsevier, 2020, pp. 607-625.
- [3] H. Wagner, Flat sheet metal girders with very thin metal web. Part I: general theories and assumptions, 1931.
- [4] K. Basler, Strength of plate girders in shear, *Journal of the Structural Division*, 87(7) (1961) 151-180.
- [5] Q. Zhao, A. Astanteh-Asl, Cyclic behavior of an innovative steel shear wall system, in: *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada, 2004.
- [6] A. Astanteh-Asl, Steel plate shear walls, in: *Proceedings*,

- with reduced web section beams, *Journal of Building Engineering*, 46 (2022) 103797.
- [20] C.J. Montgomery, M. Medhekar, A.S. Lubell, H.G. Prion, C.E. Ventura, M. Rezai, Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading, *Journal of Structural Engineering*, 127(8) (2001) 973-975.
- [21] Guidelines for Seismic Improvement of Existing Buildings, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (in persian).
- [22] S.C. Manual, American institute of steel construction, Inc., Thirteenth Edition, First Print, (2005).
- Experimental research on special steel frame with stiffened double steel plate shear wall, *Journal of Constructional Steel Research*, 189 (2022) 107067.
- [17] Y. Du, Y. Shao, L. Zhong, Repairing damaged steel plate shear wall with additional ribs, in: *Structures*, Elsevier, 2022, pp. 222-234.
- [18] A. Khaware, K. Srikanth, V.K. Gupta, Numerical simulation of free surface flows using overset mesh, in: *Offshore Technology Conference Asia*, OnePetro, 2018.
- [19] A. Seifiasl, M.H. Asl, Experimental and numerical study on the seismic behavior of steel plate shear wall

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Taleshi Milani, M. Hoseinzadeh Asl, Study of Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls with Vertical and Inclined Stiffeners, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(7) (2023) 1379-1398.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21557.7761](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21557.7761)

