



بررسی پارامترهای اثر گذار بر رفتار جانبی دیوار برشی مرکب

اسماعیل شاکری، فرهاد بهنام*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ خرداد ۱۳۹۶

بازنگری: ۳۱ تیر ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۲ شهریور ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۲۹ مرداد ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

دیوار برشی مرکب

رفتار غیرخطی

سختی

مقاومت

شکل پذیری

چکیده: در این پژوهش رفتار جانبی غیرخطی دیوارهای برشی فولادی-بتنی مطالعه می‌شود. اثر عواملی مانند ضخامت صفحه فلزی، ضخامت پوشش بتنی، فاصله برش‌گیرها و مقاومت مشخصه بتن بر روی مشخصات رفتار جانبی دیوار برشی مرکب فولادی-بتنی بررسی شده و مقایسه می‌گردد. برای این مطالعه، از تحلیل غیرخطی جانبی با بهره‌گیری از نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) استفاده می‌شود. ابتدا رفتار یک دیوار آزمایشگاهی مدل سازی و صحت‌سنجی می‌گردد. سپس اثر عوامل یاد شده با در نظر گرفتن بازه منطقی تغییرات آن‌ها بررسی شده و تحلیل‌های متعددی انجام می‌شود. نتایج تحلیل حاکی از آن است که از بین سایر متغیرها، ضخامت صفحه فولادی بیشترین تاثیر را بر رفتار جانبی غیرخطی این دیوار دارد. این تحقیق از نظر تعداد متغیرهای مورد بررسی و بازه مقادیر آن‌ها، مدلسازی همه جزییات، و ارائه روند تغییرات مشخصات رفتار جانبی دیوار به صورت تابعی از عوامل فوق، از پژوهش‌های مشابه متمایز است.

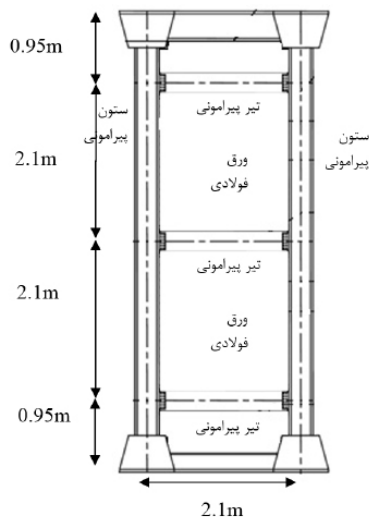
۱- مقدمه

دیوار برشی مرکب، سیستم توسعه یافته‌ای از دیوار برشی فولادی است که در آن از پوشش بتنی به عنوان سخت‌کننده برای جلوگیری از کماتش ورق فولادی، محافظ ورق فولادی در برابر عوامل تهدیدکننده محیطی مانند خوردگی و آتش‌سوزی و همچنین عایق صوت و حرارت استفاده می‌شود. در واقع دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده، در بار جانبی کوچک شروع به کماتش در جهت قطر فشاری می‌کند و عملکرد آن توسط میدان کششی در جهت قطر دیگر تامین می‌گردد. اگرچه مقاومت پس کماتش ورق فولادی اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار دیوار می‌گذارد، ولی اگر بتوان از کماتش کلی ورق جلوگیری نمود و آن را به کماتش موضعی در ناحیه غیر الاستیک محدود کرد، هنوز می‌توان رفتار مناسب تری را نیز انتظار داشت. یکی از راه‌های مناسب برای رسیدن به این هدف، استفاده از پوشش بتنی در یک یا دو طرف ورق فولادی است که همان سیستم مرکب مورد بحث را تشکیل می‌دهد. در این سیستم برای تامین عملکرد مرکب بتن و فولاد از برش‌گیر و برای حفظ انسجام رویه بتنی از آرماتورهای افقی و قائم استفاده می‌شود [۱].

بیشتر تحقیقات گذشته در مورد دیوارهای برشی فولادی بدون رویه بوده

و در مورد دیوارهای برشی مرکب کارهای انجام شده بسیار کمتر است که به ذکر آن‌ها پرداخته می‌شود. یاماگاجی و یامادا، با هدف بررسی مقاومت جانبی انواع مختلف سیستم‌های دیوار برشی هسته مرکزی، دو دیوار برشی فولادی با و بدون پوشش بتنی را مورد آزمایش قرار دادند [۲]. در پژوهش آن‌ها، اگرچه دیوار برشی مرکب نسبت به قاب‌های خمشی مشابه ۳ تا ۷ برابر سخت تر بوده و ۲ تا ۳ برابر مقاومت بیشتری داشت، اما از نظر شکل پذیری تفاوت چندانی را نشان نداد. ژائو و آستانه اصل، مطالعاتی را به صورت تحلیلی و تجربی روی رفتار چرخه‌ای سیستم‌های دیوار برشی مرکب انجام دادند [۳]. سیستم دیوار برشی مرکب مورد مطالعه در کار آن‌ها شامل یک قاب فولادی دربردارنده ورق فولادی که یک طرف آن را رویه بتنی مسلح پوشانده بود می‌باشد. نتایج تجربی نشان داد که وجود رویه بتنی مسلح در یک طرف دیوار برشی فولادی که با بولت متصل شده‌است، از کماتش ورق فولادی جلوگیری می‌کند. همچنین در صورت تعبیه درز بین قاب و رویه بتنی، رفتاری پایدارتر حاصل شده و آسیب کمتری به رویه بتنی وارد می‌شود. حاتمی و رهایی، به بررسی تاثیر عواملی از قبیل نوع اتصال تیر به ستون، اثر فاصله برش‌گیرها و اثر تغییرات ضخامت پوشش بتنی در دیوارهای برشی مرکب در دو حالت با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده پرداختند [۴]. آن‌ها به این منظور نمونه‌های مختلفی از این دیوارها را با

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farhad@cc.iut.ac.ir



شکل ۱. نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب [۳]

Fig. 1. The experimental sample of the composite shear wall

برای مدل‌سازی این دیوار برشی در نرم‌افزار از اطلاعاتی که در جدول ۱ آمده استفاده شده‌است. مشخصات بتن و فولاد مصرفی که در مدل‌سازی دیوار برشی مرکب آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته در جداول ۲ و ۳ آورده شده‌است.

برای مدل کردن تیر و ستون و صفحه فلزی در محیط نرم‌افزار Abaqus [۷] از المان دوبعدی Shell استفاده شده‌است. هر جا که امکان‌پذیر باشد، استفاده از این المان به جای المان سه‌بعدی Solid زمان تحلیل را بسیار کاهش می‌دهد. همچنین برای مدل کردن رویه بتنی از المان Solid استفاده شده‌است. استفاده از این المان امکان مدل‌سازی دقیق‌تر تماس با قاب اطراف و مشاهده تغییر شکل واقعی آن را بعد از تحلیل میسر می‌سازد. برای تعریف آرماتورهای درون بتن و بولت‌های برش‌گیر، این اجزا به صورت Wire که یک المان یک‌بعدی است مدل گشته و به بولت‌ها مقطع Beam با امکان خمش و به آرماتورها مقطع Truss فقط با امکان تغییر شکل طولی نسبت داده شده‌است. در بخش مونتاز نرم‌افزار، تیر و ستون‌ها و صفحه فلزی به یکدیگر بسته (Merge) شدند تا به صورت یک‌پارچه عمل نمایند. برای هماهنگ کردن شرایط مرزی مدل ساخته شده در نرم‌افزار با نمونه آزمایشگاهی، در پای ستون‌ها جابه‌جایی در هر سه جهت انتقالی بسته شد و در بالای دیوار جابه‌جایی در راستای افقی در صفحه دیوار آزاد گشت. بارگذاری نمونه به صورت اعمال جابه‌جایی افقی در صفحه دیوار می‌باشد. در شکل ۲ مدل مش‌بندی شده دیوار برشی آزمایشگاهی نشان داده شده‌است. این مدل نهایی است که پس از بررسی کردن همگرایی نتایج تحلیل حرکت جانبی دیوار با ریزتر کردن تدریجی ابعاد المان‌ها به دست آمده‌است. ابعاد تمام المان‌ها در قسمت‌های مختلف دیوار برشی برابر ۱۰۰ میلی‌متر است. تعداد المان رویه بتنی ۱۵۸۴، صفحه فلزی ۸۷۴، تیرها ۷۰۳ و ستون‌ها ۱۵۱۲ می‌باشد.

استفاده از روش المان محدود مدل‌سازی کردند و پس از اعتبارسنجی با یک نمونه دیوار آزمایش شده نتیجه گرفتند که مقاومت برشی دیوار برشی مرکب با ضخامت پوشش بتنی نسبت مستقیم و با فاصله‌ی بین برش‌گیرها نسبت عکس دارد. همچنین رفتار چنین دیواری مستقل از نوع اتصال تیر به ستون است. هاسم و همکاران، در مورد رفتار برشگیرهای دیوارهای برشی مرکب تحت بارگذاری چرخه‌ای مطالعاتی آزمایشگاهی انجام دادند [۵]. برشگیرها به صورت گل میخ و مقاطع I شکل و U شکل تک و مضاعف در نظر گرفته شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ظرفیت باربری برش‌گیرهای ناودانی شکل از دیگر اتصالات کمتر بوده و در مورد برش‌گیرهای متشکل از دو پروفیل I شکل بیشتر از دیگر اتصالات است. ایازی و همکاران مطالعاتی در مورد اثر فاصله بولت‌های برشگیر بر رفتار دیوار برشی مرکب انجام دادند [۶]. آن‌ها برای این منظور یک قاب تک‌دهانه چهارده طبقه را با فاصله بولت‌های مختلف به روش اجزای محدود تحلیل کردند. نتایج نشان داد که محدود کردن حداقل فاصله بین بولت‌ها به حد معینی باعث بهبود رفتار لرزه‌ای می‌شود. حداکثر فاصله نیز براساس جلوگیری از کماتش موضعی زودرس صفحه فولادی تعیین گردید. با مقایسه نتایج در ناحیه الاستیک، مشاهده شد که سختی اولیه با تغییر فاصله بولت‌ها تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد.

بررسی تحقیقات انجام شده به شرح فوق نشان می‌دهد که هنوز سوالات فراوانی در مورد رفتار جانبی دیوارهای برشی مرکب وجود دارد. به ویژه، به منظور توسعه روابط تحلیلی قابل اعتمادتر، لازم است دانسته شود که مشخصات رفتار جانبی چنین دیوارهایی چگونه با تغییر ویژگی‌های سازه‌ای دیوار تغییر می‌نماید. این پژوهش برای پاسخ به همین سوال و به صورت نسبتاً گسترده‌ای انجام شده‌است.

در ادامه، جزییات مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی یک نمونه دیوار آزمایشگاهی به منظور صحت‌سنجی مدل ذکر شده و سپس به تحلیل دیوارهای مورد مطالعه در این تحقیق پرداخته می‌شود.

۲- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی با نمونه آزمایشگاهی

دیوار آزمایشگاهی ژائو و آستانه اصل [۳] به علت وجود بانک اطلاعات رفتاری آن، مناسب‌ترین گزینه برای مدل‌سازی المان محدود اولیه و تعیین فرضیات مدل‌سازی و ارزیابی دقت می‌باشد. به همین جهت، برای صحت‌سنجی مدل نرم‌افزاری از نمونه فوق استفاده شده که نمای آن در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

جدول ۱. ابعاد اجزاء دیوار برشی مرکب آزمایشگاهی (mm) [۳]

Table. 1. Dimensions of the components of the experimental composite shear wall (mm)

ضخامت صفحه	پوشش بتن			قطر بولت	مقطع تیر	مقطع ستون
	ضخامت	قطر آرماتور	فاصله آرماتور			
۴/۸	۷۶	۱۰	۱۰۰	۱۳	W12×26	W12×120

جدول ۳. مشخصات فولاد مصرفی

Table. 3. Properties of steel

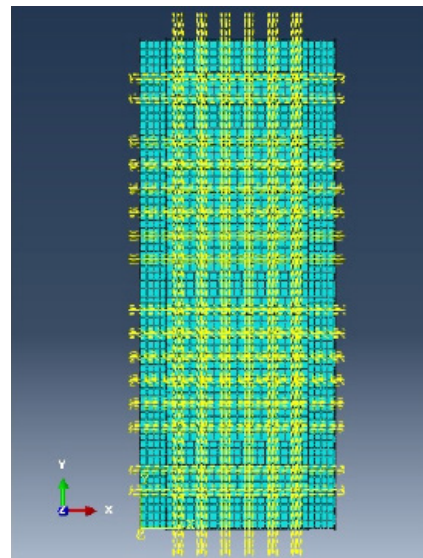
ضریب پواسون	مدول ارتجاعی (N/mm ²)	مقاومت جاری شدن (N/mm ²)	مقاومت نهایی (N/mm ²)	اجزا
۰/۳	۲۰۰۰۰۰	۳۴۵	۵۰۰	تیر و ستون
۰/۳	۱۴۰۰۰۰	۲۴۸	۳۷۰	صفحه فلزی و آرماتور
۰/۳	۲۰۰۰۰۰	۶۲۳	۸۲۳	بولت

جدول ۲. مشخصات بتن مصرفی

Table. 2. Properties of concrete

ضریب پواسون	مدول ارتجاعی (N/mm ²)	مقاومت کششی (N/mm ²)	مقاومت فشاری (N/mm ²)
۰/۱۷	۲۴/۹۰۰	۲/۶	۲۸

در شکل ۳ نمودار برش پایه در مقابل جابه‌جایی بالای دیوار در مدل نرم‌افزاری و منحنی چرخه‌ای حاصل از آزمایش دیوار ارائه شده‌است. اگرچه مقایسه یک منحنی تغییر مکان جانبی با منحنی‌های چرخه‌ای عمل دقیقی به مفهوم مطلق نیست، اما همین بررسی به طور نسبی نشان‌دهنده دقت مناسب مدل نرم‌افزاری است. در مرجع [۸]، جزئیات رفتار بخش‌های مختلف مدل در مراحل مختلف تغییر مکان جانبی به طور مفصل ارائه شده و صحت مدل به اثبات رسیده است. عمده نقاطی که در مدل نرم‌افزاری دچار تغییر شکل‌های خمیری بزرگ و در نتیجه آسیب شدید شده‌اند، المان‌هایی در بال ستون در محل تکیه‌گاه، جان تیرها، محل اتصال صفحه میان قاب فولادی به قاب و المان‌های گوشه رویه بتنی می‌باشند. همچنین کماتش در بال ستون، جان تیرهای تحتانی و فوقانی و صفحه فولادی قاب مشاهده می‌شود که شبیه به نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. در مرحله نهایی رفتاری، ناپایداری و خرابی سیستم در اثر تسلیم کششی نوارهای مورب ورق فولادی و تشکیل مفصل خمیری در پای ستون‌ها و دو انتهای تیرها روی می‌دهد. در اینجا به اختصار، در جدول ۴ به نحوه گسترش آسیب‌ها در نمونه آزمایشگاهی در مقایسه با رفتار غیرخطی مشاهده شده در مدل نرم‌افزاری هم‌زمان با افزایش تغییر مکان جانبی پرداخته شده‌است. توصیف آسیب‌ها در جدول ۴ نشان‌دهنده صحت نسبی مدل اجزا محدود توسعه داده شده در این تحقیق می‌باشد. به این ترتیب از این مدل برای مطالعه پارامتری در ادامه استفاده می‌گردد.



شکل ۲. مدل اجزا محدود دیوار برشی آزمایشگاهی

Fig. 2. Finite element model of the experimental shear wall

کرنشی، در طراحی اعضای پیرامون دیوار از مقاومت حاصل از رابطه ۱ با احتساب ضرایب افزایشی که معمولاً مقدار آن را به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش می دهند استفاده می گردد.

با توجه به تحقیقات پیشین و با قضاوت مهندسی به نظر می رسد که عواملی شامل ضخامت صفحه فولادی، ضخامت پوشش بتنی، مقاومت فشاری بتن و فاصله برش گیرها بر رفتار جانبی دیوار برشی مرکب تاثیرگذار باشند. البته نوع اتصال ورق به تیر و ستون پیرامونی هم می تواند اثراتی را در بر داشته باشد که در مطالعه جداگانه ای بررسی خواهد شد. در این مطالعه اتصال ورق به تیر و ستون به صورت نقطه ای در محل گره های اجزای محدود، یعنی عملاً به صورت پیوسته، در نظر گرفته شده است. برای بررسی پارامتری رفتار جانبی دیوار با توجه به مقادیر رایج، برای صفحه فلزی ۹ ضخامت به مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ میلی متر، برای ضخامت رویه بتنی ۵ مقدار ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۵ میلی متر، برای فاصله برش گیرها ۵ مقدار ۱۵۰، ۳۰۰، ۴۵۰، ۶۰۰ و ۷۵۰ میلی متر و برای مقاومت مشخصه بتن نیز ۵ مقدار ۱۴، ۲۱، ۲۵، ۲۸ و ۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. این مدل ها تحت بارگذاری استاتیکی فزاینده غیر خطی قرار گرفتند. در تمام مدل ها بارگذاری به صورت جابه جایی جانبی به بالای دیوار اعمال شده و حداکثر آن در بیشترین حالت ممکن برابر ۵۰۰ میلی متر می باشد. این جابجایی حداکثر با توجه به ارتفاع دیوار، یک جابجایی نسبی برابر حدود هشت درصد را نشان می دهد. البته در بسیاری حالات در تغییرمکان های بسیار کوچکتری سیستم ناپایدار شده است. ابعاد کلی دیوار و نحوه و چیدمان المان بندی آن مشابه دیوار آزمایشگاهی بند ۲ بوده و سایر مشخصاتی که در بالا ذکر نشده مشابه جداول ۱ تا ۳ می باشد.

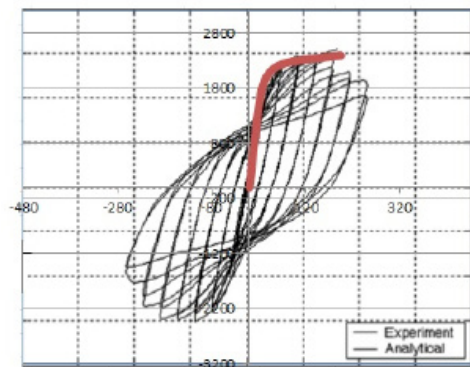
۳-۲- نتایج تحلیل

۳-۲-۱- اثر ضخامت ورق فولادی

طبق توضیحات بند ۳-۱، برای پارامتر ضخامت صفحه فلزی ۹ مقدار مختلف در نظر گرفته شد. در شکل ۴ تاثیر این پارامتر روی منحنی رفتار جانبی سیستم شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، ضخامت رویه بتنی ۷۵ میلی متر، فاصله برش گیرها ۳۰۰ میلی متر و مقاومت مشخصه بتن ۲۸ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. اثر تغییرات مقادیر پارامترهای اخیر در بندهای بعدی بررسی شده است.

طبق جدول ۴، ناپایداری سیستم مورد بررسی در اثر تسلیم کششی ورق دیوار در امتدادهای مورب و تشکیل مفصل خمیری در پای ستون ها و دو انتهای تیرها روی می دهد. بروز این پدیده باعث واگرایی عددی در نقطه انتهایی نمودارهای فوق می گردد. در شکل ۴ در همان ابتدا (در نیروی جانبی حدود ۲۰۰ kN) طبق شکل فوق ترک خوردگی بتن رویه در امتداد مورب کششی روی داده و مقداری از سختی جانبی دیوار کاسته می شود. در بار جانبی بسیار بزرگتری (از حدود ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلونیوتن، بسته به مورد)، نوارهای مورب کششی و فشاری ورق فولادی به حد تسلیم خود رسیده و در

نکته دیگر در شکل ۳ مشاهده شدن افت مقاومت در نمونه آزمایشگاهی می باشد. این افت مقاومت در چرخه های نظیر تغییر شکل های بزرگ و به علت کماتش موضعی دیوار در ناحیه غیرارتجاعی روی می دهد. در این تحقیق سه عامل سختی اولیه، مقاومت جانبی حداکثر و شکل پذیری دیوار مورد مطالعه قرار گرفته اند. برای این کار از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. نقطه پایان تحلیل، لحظه واگرایی عددی به علت بروز ناپایداری در مدل سازه ناشی از کماتش غیرخطی بوده است. بدیهی است که تحلیل تا این نقطه برای بررسی سه عامل فوق کافی بوده و افت مقاومت در آزمایش چرخه ای تاثیری بر مقادیر سختی اولیه و مقاومت نهایی و شکل پذیری محاسبه و مقایسه شده تا نقطه شروع افت مقاومت ندارد.



شکل ۳. منحنی برش پایه- جابه جایی بالای دیوار در مدل های نرم افزاری و آزمایشگاهی [۳ و ۸]

Fig. 3. Base shear versus top displacement curve in both software and experimental models

۳- مطالعه پارامتری

۳-۱- اطلاعات پارامترها

هنگامی که از رویه بتنی برای جلوگیری از کماتش ورق فولادی استفاده می شود، مقاومت برشی دیوار به بیشترین مقدار آن یعنی مقاومت برشی تسلیم، V_y ، خواهد رسید که مقدار آن از رابطه ۱ به دست می آید:

$$V_y = 0.55 t_w I_w F_y \quad (1)$$

در رابطه ۱، t_w و I_w به ترتیب ضخامت و بعد افقی (طول) دیوار در پلان بوده و F_y مقاومت تسلیم فولاد می باشد. می توان نشان داد که در صورت کماتش قطری دیوار، مقاومت برشی آن به حدود دوسوم مقدار فوق کاهش خواهد یافت. چون دیوار برشی فیوز لرزه ای سیستم در نظر گرفته می شود، خود لازم است برای نیروهای ناشی از تحلیل سازه طراحی شده و سایر اعضا، شامل تیرها و ستونها و اتصالات اطراف آن، برای مقاومت برشی دیوار طراحی گردند. برای رعایت محافظه کاری و با احتساب سخت شونده گی

جانبی ۲۳۰۰ تا ۲۶۰۰ کیلونیوتن) و به صفر رسیدن تقریبی آن در نقطه اخیر می‌باشد. نکته جالب در شکل فوق کاهش شکل پذیری سیستم با افزایش ضخامت ورق فولادی است. علت این امر پیشی گرفتن تدریجی تشکیل مفاصل تیر و ستون بر تسلیم کششی و فشاری ورق و مکانیزم شدن سریع سیستم پس از تسلیم ورق است.

لازم به ذکر است که شکل‌پذیری به صورت ضریب حاصل از تقسیم تغییرمکان نهایی بر تغییرمکان تسلیم سیستم تعریف می‌گردد. در شکل ۴ با افزایش ۶ برابری ضخامت ورق فولادی، سختی جانبی تقریباً دو و نیم برابر شده ولی مقاومت جانبی تنها در حدود ۱۵٪ افزایش نشان می‌دهد. هم‌چنین ضریب شکل‌پذیری از ۹ به ۴ و نیم کاهش می‌یابد.

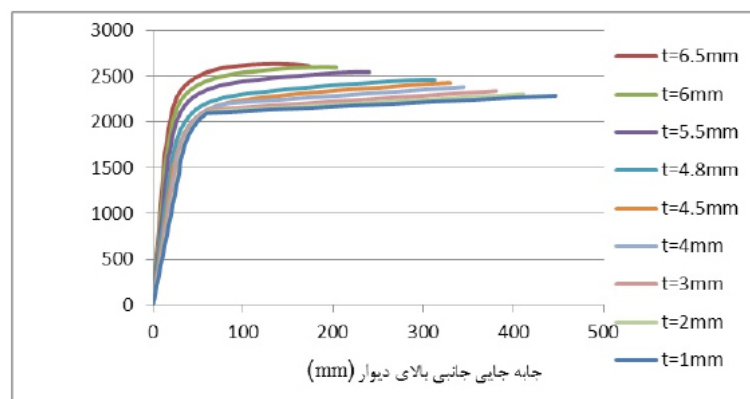
امتداد فشاری چون یک طرف دیوار بدون رویه است بین برش‌گیرها دچار کماتش موضعی خمیری نیز می‌گردند. از اینجا به بعد عملاً قاب به تنهایی باید بار جانبی را تحمل نماید چون نوارهای فشاری بتن نیز لاغر بوده و به سرعت از دور خارج می‌شوند. البته در عمل بین رویه بتنی و قاب درزی پیش بینی شده‌است که باعث می‌شود اصولاً بتن فشاری در رفتار جانبی سیستم پس از تسلیم ورق نقش چندانی ایفا ننماید.

در نقطه انتهایی منحنی‌های فوق با تشکیل کامل مفصل خمیری در پای ستون‌ها و دو انتهای تیرها سیستم ناپایدار شده و تحلیل واگرا می‌گردد (شکل ۵). شاهد این موضوع کاهش تدریجی سختی جانبی بین نقطه تسلیم ورق فولادی (در بار جانبی ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلونیوتن) تا نقطه انتهایی (در بار

جدول ۴. مقایسه نحوه گسترش آسیب‌ها در مدل اجزا محدود و نمونه آزمایشگاهی

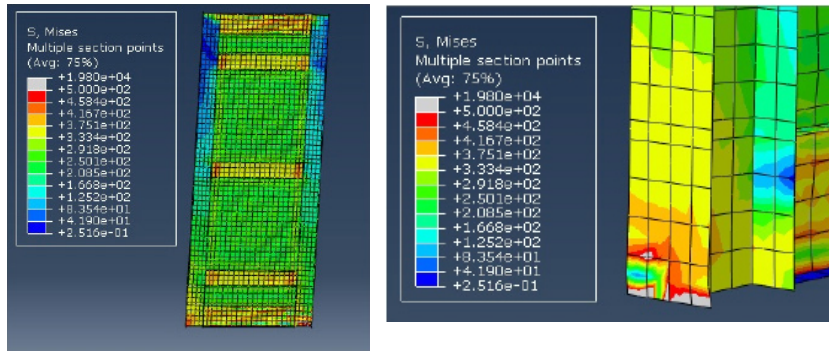
Table 4. Comparison of damage propagation in the finite element model and the experimental sample

میزان جابه‌جایی (mm)	نحوه آسیب در مدل آزمایشگاهی	نحوه آسیب در مدل المان محدود
۳۶	تسلیم فولاد در جان تیرهای تحتانی و میانی	تسلیم فولاد در جان تیرهای تحتانی و میانی
۱۰۸	کمانش در صفحه فلزی و خطوط تسلیم قطری در نزدیکی اتصالات	کمانش قطری در صفحه میان قاب
۲۱۶	ایجاد ترک‌های بزرگ و ترک خوردن بتن در گوشه‌ها	رسیدن به تنش نهایی و ترک خوردن بتن در گوشه قاب
۲۶۲	کمانش موضعی در بال ستون‌ها، ایجاد مفصل پلاستیک در پای آن و شکستگی در جان تمامی تیرها	کمانش در بال ستون‌ها، رسیدن تنش به حد نهایی در پای ستون و ایجاد مفصل پلاستیک در دو انتهای تیرها



شکل ۴. برش پایه بر حسب جابه‌جایی جانبی دیوار برای ضخامت‌های مختلف صفحه فولادی

Fig. 4. Base shear with respect to the top lateral displacement of the wall for different thicknesses of the steel plate

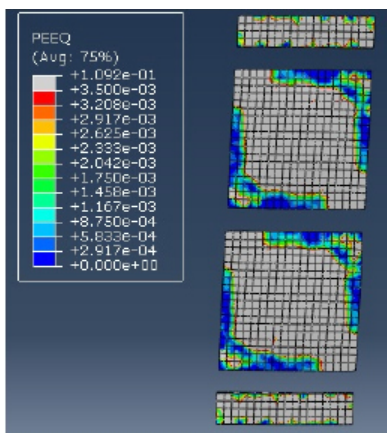


شکل ۵. تشکیل مفصل خمیری در پای ستون ها و دو انتهای تیرها

Fig. 5. Plastic hinge formation at the base of the columns and the two ends of the beams

با افزایش ۲/۵ برابری ضخامت رویه بتنی در تحلیل‌های فوق، افزایش مقاومت جانبی تنها در حدود ۱۲٪ و قابل اغماض بوده است. همچنین افزایش ضخامت رویه بر ظرفیت شکل‌پذیری سیستم نیز تقریباً بی‌تأثیر بوده است. در تایید بحث بند فوق، این موضوع نشان می‌دهد که شکل‌پذیری سیستم عمدتاً تحت تأثیر نحوه رفتار خمیری ورق فولادی می‌باشد که جزئیات آن در بند ۳-۲-۱ ذکر گردید.

شکل ۷ نمایشی از توزیع کرنش‌های اصلی در رویه بتنی در مراحل انتهایی رفتاری آن را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر آن است که چگونه کرنش‌های اصلی فشاری در امتداد قطری رویه توسعه یافته و در گوشه‌ها به علت تمرکز تنش به اوج خود رسیده و از ظرفیت مفروض ۰/۰۳۵ نیز فراتر رفته‌اند.



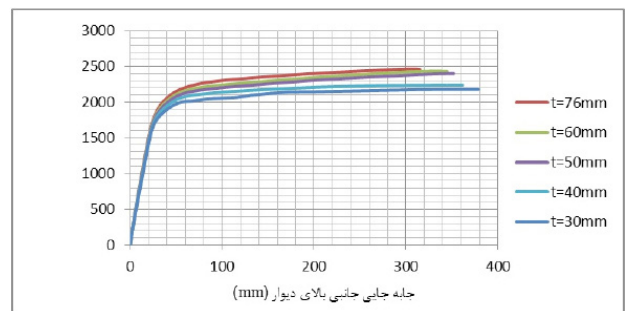
شکل ۷. توزیع کرنش‌های اصلی در رویه بتنی

Fig. 7. Distribution of principal strains in the concrete

۳-۲-۲- اثر ضخامت رویه بتنی

طبق بند ۳-۱ برای ضخامت رویه بتنی ۵ مقدار مختلف در نظر گرفته شده‌است. شکل ۶ اثر تغییرات ضخامت رویه بتنی را بر رفتار جانبی دیوار برشی مرکب نشان می‌دهد. در این شکل، ضخامت ورق فولادی ۴/۸ میلی‌متر، فاصله برشگیرها ۳۰۰ میلی‌متر و مقاومت مشخصه بتن ۲۸ مگاپاسکال در نظر گرفته شده‌است. طبق شکل ۴، ضخامت فرض شده برای ورق فولادی متناظر با مشخصات متوسطی از نظر سختی، مقاومت و شکل‌پذیری برای سیستم می‌باشد.

منحنی‌های شکل ۶ دلیل روشن دیگری بر صحت بحث و استدلال انجام شده در زیر شکل ۴ می‌باشند. طبق شکل ۶، افزایش ضخامت رویه بتنی تأثیر ملموسی بر سختی جانبی سیستم ندارد. این موضوع نشان می‌دهد که پس از ترک خوردن بتن کششی در مراحل اولیه، سختی جانبی سیستم عملاً توسط ورق فولادی تامین می‌شود و نقش بتن فشاری (به ویژه اگر بین بتن رویه و قاب درزی موجود باشد) در این بین ناچیز است. پس از تسلیم ورق فولادی در کشش، رویه بتنی ضخیم‌تر اندکی تسلیم فشاری ورق و کماتش غیر ارتجاعی آن را به تعویق انداخته و باعث افزایش نسبی مقاومت جانبی سیستم می‌شود.



شکل ۶. برش پایه بر حسب جابه‌جایی جانبی بالای دیوار برای ضخامت‌های مختلف بتن

Fig. 6. Base shear with respect to the top lateral displacement of the wall for different concrete thicknesses

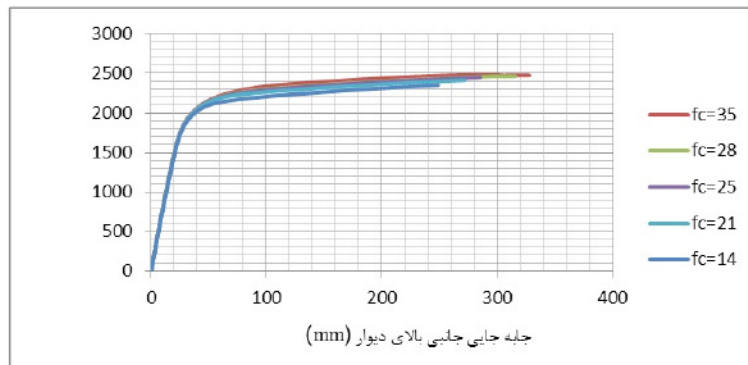
کششی ورق فولادی اند که رفتار سیستم را تعیین می نمایند. اندک تاثیری که مقاومت فشاری بیشتر بتن بر افزایش مقاومت جانبی و شکل پذیری سیستم داشته به علت دیرتر خرد شدن بتن فشاری و جذب اندکی بیشتر از نیروی جانبی توسط بتن فشاری بوده است. این موضوع در شکل ۹ با ارائه توزیع کرنش های اصلی رویه بتنی با دو مقاومت فشاری مختلف در تغییرمکان جانبی یکسان به طور مشهودتری نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل دیده می شود، در تغییرمکانی برابر ۲۵۰ میلی متر، کرنش اصلی فشاری در گوشه های رویه بتنی با مقاومت فشاری کمتر، از ۰/۰۰۳۵ فراتر رفته و به ۰/۰۰۳۸ رسیده در حالی که در رویه بتنی با مقاومت بیشتر، حداکثر آن ۰/۰۰۰۲۹ می باشد.

۳-۲-۳- اثر مقاومت فشاری بتن رویه

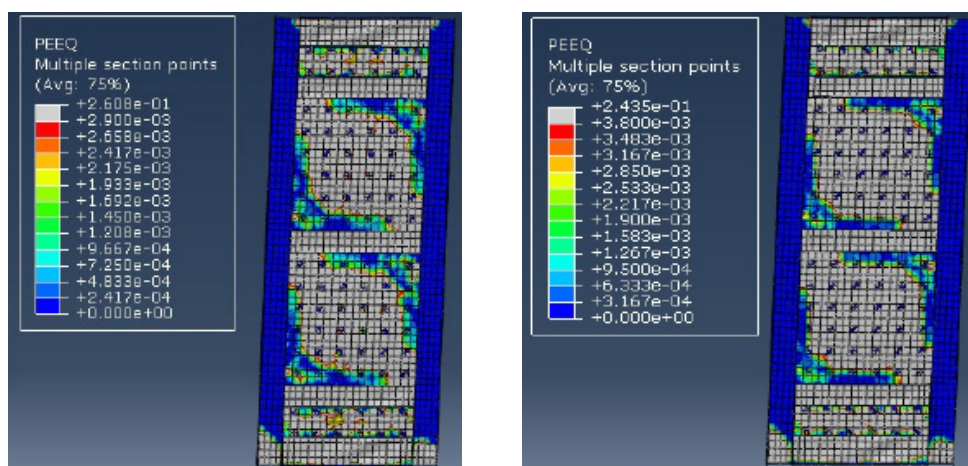
برای مقاومت فشاری بتن رویه طبق بند ۳-۱ پنج مقدار مختلف در نظر گرفته شده است که اثر آن بر رفتار جانبی سیستم در شکل ۸ دیده می شود. در این شکل، ضخامت ورق فولادی ۴/۸ میلیمتر، ضخامت رویه بتنی ۷۵ میلی متر و فاصله برشگیرها ۳۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است.

با توجه به رفتار دیوار که در بندهای ۳-۲-۱ و ۳-۲-۲ مشاهده و بحث گردید، منحنی های شکل ۸ کاملاً قابل انتظار می باشند. این منحنیها نشان میدهند که وجود بتن رویه عملاً تنها باعث میشود که تسلیم کششی و فشاری ورق فولادی تقریباً به صورت همزمان انجام گیرد و پس از آن (در صورتیکه ورق دیوار بیش از حد ضخیم نباشد، شکل ۴)، این نوارهای



شکل ۸. برش پایه بر حسب جابه جایی جانبی بالای دیوار به ازای مقادیر مختلف مقاومت فشاری بتن رویه

Fig. 8. Base shear with respect to the top lateral displacement of the wall for different compressive strengths of the concrete



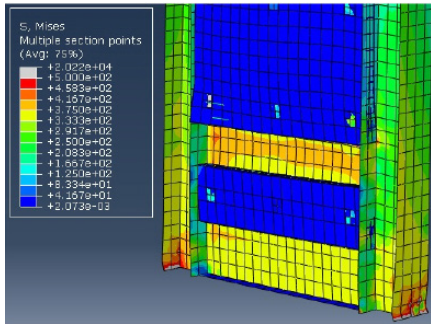
شکل ۹. توزیع کرنش های اصلی در رویه بتنی در تغییرمکان جانبی برابر ۲۵۰ mm. (الف) بتن با مقاومت ۳۵ و (ب) با مقاومت ۱۴ مگاپاسکال

Fig. 9. Distribution of principal strains in the concrete at a lateral displacement of 250 mm. Top figure ($f_c=35\text{Mpa}$); bottom figure ($f_c=14\text{Mpa}$)

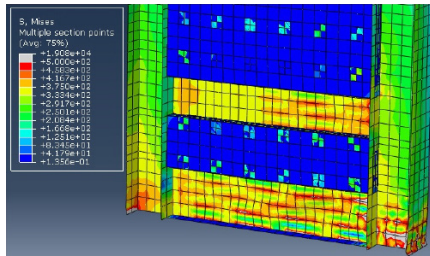
۳-۲-۴- اثر فاصله بین برش گیرها

طبق بند ۳-۱، برای فاصله بین برش گیرها با توجه به ابعاد دیوار و مقادیر متداول، ۵ مقدار مختلف در نظر گرفته شده است و تاثیر این پارامتر روی رفتار جانبی سیستم طبق شکل ۱۰ می باشد. در این شکل، ضخامت ورق فولادی ۴/۸ میلیمتر، ضخامت رویه بتنی ۷۵ میلی متر و مقاومت فشاری بتن رویه ۲۸ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

این مطلب قابل انتظار است که اثر وجود برش گیرها از هنگام تسلیم ورق فولادی اهمیت پیدا کند، یعنی زمانی که لازم است این برش گیرها از جدا شدن ورق از بتن و کماتش جانبی کلی آن جلوگیری نمایند. در این حالت هرچه فاصله بین برش گیرها کمتر باشد کماتش موضعی ورق تدریجی تر و دیرتر روی خواهد داد و در نتیجه مقاومت جانبی سیستم تا حدودی افزایش می یابد. از سوی دیگر، تحمل نیروی جانبی بزرگتر توسط سیستم باعث می شود که تشکیل مفصل خمیری در دو انتهای تیرها و ستون ها هم پس از تسلیم کششی ورق فولادی جلو بیفتد. این پدیده تا حدی باعث جلو افتادن ناپایداری سیستم و کاسته شدن از شکل پذیری آن خواهد شد. منحنی های شکل ۱۰ به خوبی این موضوع را تایید می کنند.



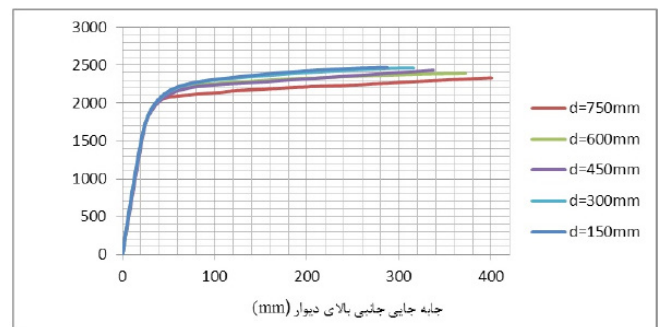
الف



ب

شکل ۱۱. توزیع تنش ون مایسز در تیرها و ستونها در تغییر مکان جانبی ۲۵۰ میلی متر. (الف) فاصله برش گیرها ۷۵۰ و (ب) ۱۵۰ میلی متر می باشد

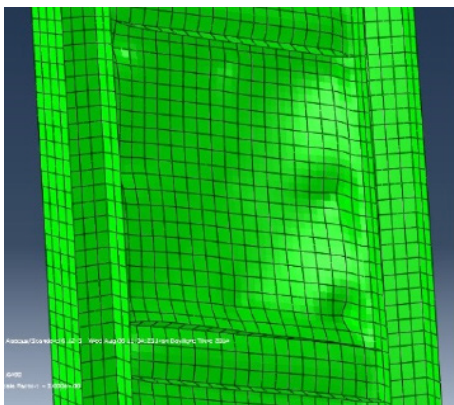
Fig. 11. Distribution of Von Mises stress in beams and columns at a lateral displacement of 250 mm. Top figure: shear stud spacing of 750 mm; bottom figure: shear stud spacing of 150 mm



شکل ۱۰. برش پایه بر حسب جابه جایی جانبی بالای دیوار برای فواصل مختلف برش گیرها

Fig. 10. Base shear with respect to the top lateral displacement of the wall for different shear studs spacing

هم چنین شکل ۱۱ نشان می دهد که چگونه وقتی فاصله بین برش گیرها کمتر است در تغییر مکان یکسان سطح تنش بزرگتری در تیرها و ستونها موجود می باشد. طبق شکل ۱۰، وقتی فاصله بین برش گیرها ۴۵۰ mm یا بیشتر باشد، نوارهای فشاری در ناحیه ارتجاعی دچار کماتش شده و بر ظرفیت نهایی سیستم تقریباً بی تاثیر خواهند بود. این موضوع در شکل ۱۲ برای فاصله ۷۵۰ mm در تغییر مکان جانبی برابر با ۵۰ mm نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نمای دیوار در تغییر مکان جانبی برابر با ۵۰ mm وقتی فاصله برش گیرها ۷۵۰ mm می باشد

Fig. 12. Wall view at a lateral displacement of 50 mm with a shear stud spacing of 750 mm

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار جانبی دیوار برشی مرکب با تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. اثر چهار پارامتر مختلف شامل ضخامت ورق فولادی، ضخامت و مقاومت فشاری رویه بتنی، و فاصله بین برش گیرها روی رفتار جانبی دیوار با استفاده از چندین مقدار مختلف برای پارامترهای فوق مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

۱. سختی جانبی دیوار برشی مرکب عملاً فقط به ضخامت صفحه فلزی بستگی دارد و مستقل از دیگر پارامترها است. با افزایش ۶ برابری ضخامت ورق فولادی، سختی جانبی در حدود دو و نیم برابر افزایش می یابد.
۲. تاثیر ضخامت ورق فولادی روی مقاومت جانبی و شکل پذیری دیوار برشی مرکب بیشتر از سایر پارامترها است بطوریکه با افزایش ۶ برابری ضخامت ورق فولادی، مقاومت جانبی در حدود ۱۵٪ افزایش یافته و شکل پذیری دیوار تقریباً نصف می شود. این در حالی است که افزایش دو و نیم برابری ضخامت رویه بتنی، مقاومت جانبی را تنها در حدود ۱۲٪ افزایش داده و بر ظرفیت شکل پذیری سیستم تقریباً بی تاثیر بوده است. همچنین، مقاومت فشاری بتن رویه بر مقاومت جانبی و شکل پذیری سیستم تقریباً بدون اثر بوده و افزایش فاصله بین برش گیرها به کاهش نسبی مقاومت جانبی و افزایش اندک شکل پذیری آن منجر خواهد شد.
۳. در مورد دیوار مورد مطالعه، ضخامت رویه بتنی بیش از ۴۵ mm، مقاومت فشاری بتن رویه بیش از ۲۵ MPa و وجود فاصله بیشتر از ۴۵۰ میلی متر بین برش گیرها تاثیر چندانی روی مقاومت جانبی دیوار نخواهد داشت.

مراجع

- [1] M. Azhari, S.R. Mirghaderi, DESIGN OF STEEL STRUCTURES (LRFD-ASD), published by arkan-danesh, Volume 4: Seismic Design, 2013. (in Persian).
- [2] T. Yamakaji, M. Yamada, Resisting Characteristics of Hybrid Center Core Shear Wall Systems, Steel Profile, 30 (2000) 30.
- [3] Q. Zhao, A. Astaneh-Asl, Seismic behavior of composite shear wall systems and application of smart structures technology, Steel Structures, 7 (2007) 69-75.
- [4] F. Hatami, A. Rahaei, Behavior of composite shear walls under seismic loading, Journal of Sharif University of Technology, No. 46, pp 21-31. (2009).
- [5] M. Husem, S. Pul, E. Yozgat, S.E. Gorkem, Fracture of connections between steel and reinforced concrete shear walls under the cyclic loading, Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering, 36(C1) (2012) 97.
- [6] A. Ayazi, H. Ahmadi, S. Shafaei, The effects of bolt spacing on composite shear wall behavior, World Academy of Science Engineering and Technology, 6 (2012) 10-27.
- [7] D. Systèmes, Abaqus analysis user's manual, Simulia Corp. Providence, RI, USA, (2013).
- [8] F. Behnamfar, E. Shakeri, A. Makhdoumi, A macromodel substitute for simple prediction of the lateral behaviour of composite shear walls, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 51(3):115-126, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

E. Shakeri, F. Behnamfar, A Survey on Parameters Affecting the Lateral Behavior of Composite Shear Walls, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 67-76.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13025.5313

