



ارزیابی و بهبود رفتار دیوارهای برشی صفحه فولادی با استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی - بتنی

هادی زرین طلا^۱، احمد ملکی^{۲*}، محمد علی لطف الهی یقین^۳

۱. دانشجوی دکترای مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

۳. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

* رایانامه نویسنده مسئول: A.maleki@iau-maragheh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

چکیده

دیوارهای برشی فولادی در ساختمان‌های مختلف به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برتری ویژه این نوع دیوارها، قابلیت شکل‌پذیری مناسب، سختی اولیه بالا و قدرت استهلاک انرژی زیاد است و لیکن دیوار برشی فولادی به علت هندسه خاص خود، دچار کماتش در محدوده ارتجاعی می‌شود. برای جلوگیری از کماتش ورق فولادی در دیوارهای برشی فولادی دو راه‌حل کلی وجود دارد استفاده از سخت‌کننده‌های فلزی و یا بهره‌گرفتن از پوشش بتنی که از طریق برشگیرها به ورق فولادی متصل می‌شود. براین اساس، در تحقیق حاضر به ارائه راهکاری به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی مرکب نوین فولادی - بتنی پرداخته شده است. با استفاده از روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS، به بررسی تأثیر مشخصات هندسی سخت‌کننده‌های فولادی بر عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی مرکب نوین فولادی - بتنی پرداخته شده است. پس از مدل‌سازی دیوار برشی کامپوزیتی فولادی - بتنی و درستی آزمایشی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، اثر پارامترهایی مانند تعداد سخت‌کننده‌ها، نوع چیدمان شامل عمودی، افقی، مورب و ترکیبی، روی بیشترین ظرفیت باربری دیوار برشی مرکب، شکل‌پذیری، استهلاک انرژی، توزیع تنش و حالت‌های خرابی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی T شکل و چگونگی چیدمان آنها تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری دیوارهای برشی کامپوزیت فولادی - بتنی دارد. استفاده از سخت‌کننده‌های مورب ظرفیت دیوارهای برشی فولادی را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد. استفاده از سخت‌کننده‌های قطری T شکل فولادی در دیوارهای برشی کامپوزیت نسبت به دیوار برشی کامپوزیت بدون سخت‌کننده فولادی، باعث کاهش چشمگیر در آسیب سخت‌کننده بتنی و همچنین باعث افزایش ضریب شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت و استهلاک انرژی به ترتیب حدود ۲۶، ۱۲۴ و ۱۸ درصد می‌شود.

کلمات کلیدی: دیوار برشی کامپوزیت، سخت‌کننده فولادی T شکل، سخت‌کننده بتنی، روش المان محدود.

۱- مقدمه

متصل می‌شود و به عنوان سخت‌کننده به منظور تقویت جانبی دیوار برشی فولادی استفاده می‌شود یا استفاده از پوشش بتنی پیش‌ساخته یا درجا، برای به تأخیرانداختن کماتش که توسط برشگیرها به ورق فولادی متصل می‌شود. تبدیل دیوار برشی از نوع فولادی به مرکب باعث کاهش میزان تغییر مکان‌های جانبی یا به عبارت بهتر باعث افزایش سختی جانبی می‌شود. علت افزایش سختی جانبی در این سیستم، گسترش میدان کشش قطری و تأخیر در کماتش صفحه فولادی است. با افزایش ضخامت پوشش بتنی

دیوارهای برشی فولادی یکی از سیستم‌های سازه‌ای مقاوم در برابر نیروهای جانبی است. در این نوع دیوار، کماتش خارج از صفحه ورق فولادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باعث ایجاد خطوط کشش قطری در صفحه فولادی می‌شود. به دنبال افزایش و توزیع یکنواخت‌تر این خطوط، ظرفیت برشی سیستم بهبود می‌یابد. استفاده از این ظرفیت با بهبود عملکرد، به دو شیوه کلی امکان‌پذیر است استفاده از شبکه‌های فلزی که به ورق فولادی

کلی پانل بتنی خواهد شد که این موضوع باعث ترک خوردگی بتن و جدا شدن برشگیرها و در نهایت کماتش ورق فولادی قبل از مقاومت تسلیم می‌شود، بنابراین وجود یک درز در حدود ۵-۲/۵ سانتی متر در اطراف پانل بتنی می‌تواند این تنش‌ها را کاهش داده و بسیار کارآمد باشد. این اختلاف به ظاهر ساده نتایج مهمی در عملکرد سیستم، مانند افزایش شکل پذیری و کاهش تخریب در پی خواهد داشت [6, 4]. ژائو و آستانه اصل، مطالعاتی را به صورت تحلیلی و تجربی روی رفتار چرخه‌ای سیستم‌های دیوار برشی مرکب انجام دادند [7]. نتایج تجربی نشان داد که وجود رویه بتنی مسلح در یک طرف دیوار برشی فولادی که با بولت متصل شده است، 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. طبق مطالعات ژائو و آستانه اصل [7]، یک راهنمای طراحی در آیین نامه طراحی لرزه‌ای آمریکا وجود دارد [8]. از زمان گنجانیدن این سیستم در AISC آیین نامه طراحی لرزه‌ای آمریکا [9]، مطالعات مختلفی در مورد جنبه‌های مختلف دیوارهای برشی مرکب انجام شده است. حاتمی و رهایی به بررسی اثر فاصله برشگیرها و اثر تغییرات ضخامت پوشش بتنی در دیوارهای برشی مرکب در دو حالت با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده پرداختند [10]. آنها به این نتیجه رسیدند که مقاومت برشی دیوار برشی مرکب با ضخامت پوشش بتنی نسبت مستقیم و با فاصله بین برشگیرها نسبت عکس دارد. شفاعی و همکاران به این نتیجه رسیدند که ضخامت پانل بتن مسلح تاثیر مستقیم بر ظرفیت برشی و مقاومت نهایی در سیستم دیوار برشی مرکب می‌گذارد و در طراحی ضخامت ورق‌های فولادی بسیار موثر است [11]. رهنورد و همکاران به بررسی سختی جانبی سیستم دیوار برشی مرکب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در صورتی که ورق‌های فولادی در دو طرف پانل بتنی قرار گیرد سختی بیشتر از حالتی است که ورق فولادی در یک طرف پانل بتنی قرار گیرد [12]. زانگ و همکاران عملکرد دیوار برشی های فولادی را با اضافه کردن پوشش‌های بتن مسلح روی صفحات فولادی پر کننده مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به تحقیقات آنها پوشش‌های بتنی مستعد جدا شدن از صفحات فولادی به دلیل چسبندگی ضعیف آنها می باشد [13]. با وجود تحقیقات قبلی، برای شناسایی دقیق پارامترهای تأثیرگذار بر

سختی دیوار برشی مرکب افزایش ولی با افزایش فاصله بین برشگیرها سختی کاهش می‌یابد [1]. دیوار برشی فولادی کامپوزیت یک سیستم نوین باربر جانبی و متشکل از یک ورق فولادی به همراه پوشش بتن آرمه است که این پوشش به یک سمت یا هر دو سمت آن توسط برش گیرهایی متصل شده است. در دیوار برشی فولادی کامپوزیت، پوشش بتنی مسلح با مهار کردن ورق فولادی و جلوگیری از کماتش آن باعث افزایش ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی تا حد تسلیم برش شود [2]. در دیوار برشی فولادی، برش طبقه توسط عمل میدان کششی ورق فولادی بعد از کماتش ناشی از فشار قطری تحمل می‌شود اما در دیوار برشی فولادی کامپوزیت، پوشش بتن آرمه ورق فولادی را مقید کرده و از کماتش آن قبل از تسلیم برشی داخل صفحه جلوگیری می‌کند. در نتیجه، ورق فولادی برش طبقه را با تسلیم برشی تحمل می‌نماید. ظرفیت تسلیم برشی ورق فولادی می‌تواند به اندازه قابل توجهی بیش از ظرفیت آن در مقابله با برش ناشی از تسلیم در اثر میدان کششی قطری باشد [3]. دیوار برشی فولادی کامپوزیت ضمن افزایش ظرفیت برشی سیستم، مقاومت پانل را در برابر عوامل مخرب مانند خوردگی، آتش‌سوزی، ضربه، انفجار و دیگر موارد افزایش داده و باعث کاهش بیش از ۲۵ تا ۵۰ درصدی در مصرف فولاد در ساختمان‌های میان و بلند مرتبه می‌شود [5]. کاربرد این نوع دیوار به دلیل سختی، مقاومت بالا، شکل‌پذیری عالی و رفتار مناسب در مقابل بارهای لرزه‌ای رو به افزایش است [5]. با حضور سخت‌کننده بتنی در سیستم دیوار برشی فولادی و استفاده از اتصالات مناسب بین ورق‌های فولادی و سخت‌کننده بتنی، کماتش خارج از صفحه ورق‌های فولادی محدودتر شده و ورق‌های فولادی به ظرفیت برشی کامل خود می‌رسند و عملکرد لرزه‌ای سیستم به شدت بهبود می‌یابد. در واقع در هر دو سیستم دیوار برشی فولادی و مرکب پدیده کماتش وجود خواهد داشت با این تفاوت که در دیوار برشی فولادی، کماتش به صورت کلی است و از مقاومت ناحیه محدودی از سطح ورق فولادی استفاده می‌شود در حالی که در دیوار برشی مرکب، کماتش از حالت کلی به موضعی تبدیل می‌شود و بدین ترتیب از بیشترین مقاومت برشی صفحه‌های فولادی استفاده می‌شود. با وجود اجزاء مرزی متصل به پانل بتنی و تغییر شکل‌های ایجاد شده، نیروهای بسیار بزرگی ناشی از تنش‌های فشاری به صورت قطری باعث ایجاد کماتش

مدلسازی شده است و برای تأیید نتایج نرم افزار مقایسه‌ای با نتایج بدست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. در ادامه، جزییات مدلسازی و تحلیل استاتیکی غیرخطی یک نمونه دیوار آزمایشگاهی به منظور درستی آزمایشی مدل ذکر شده و سپس به تحلیل دیوارهای مورد مطالعه در این تحقیق پرداخته می‌شود.

۲- مدل سازی عددی و درستی آزمایشی با نمونه آزمایشگاهی

دیوار برشی آزمایشگاهی ژائو و آستانه اصل [7] به علت وجود بانک اطلاعات رفتاری آن، مناسب‌ترین گزینه برای مدل‌سازی المان محدود اولیه و تعیین فرضیات مدلسازی و ارزیابی دقت است. به همین لحاظ، برای درستی آزمایشی مدل نرم‌افزاری از نمونه فوق استفاده شده [3] که نما و جزییات آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. (الف) نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب (ب) هندسه دیوار برشی مرکب فولادی با روکش بتنی متداول و نوین با لحاظ کردن فاصله بین پوشش بتنی و المان‌های مرزی مورد بررسی (ج) اجزای مختلف دیوار برشی مرکب فولادی-بتنی [7]

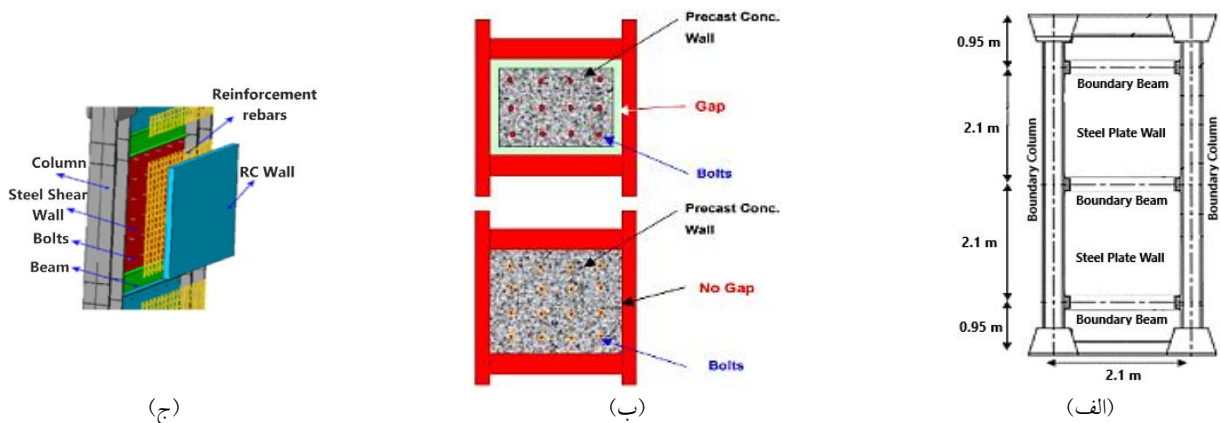


Fig. 1. (a) Laboratory sample of composite shear wall; (b) Geometry of steel composite shear wall with conventional and modern concrete coating, taking into account the distance between the concrete coating and the investigated boundary elements (c) Different components of a steel-concrete composite shear wall [7].

جدول ۱. ابعاد اجزای دیوار برشی مرکب آزمایشگاهی (میلیمتر) [7]

Steel Plate Thickness	Pre-cast R/C wall			Wall Bolts Dia.	Beam Section	Column Section
	Thickness of Conc. Wall	Rebar Dia.	Rebar Spacing			
4.8	76	10	100	13	W12×26	W12×120

Table 1. Dimensions of laboratory composite [7] shear wall components (mm)

جای المان سه‌بعدی Solid زمان تحلیل را بسیار کاهش می‌دهد. همچنین برای مدل کردن رویه بتنی از المان Solid استفاده شده است. 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 شده و به بولت‌ها

ارزیابی و بهبود عملکرد دیوارهای برشی صفحه فولادی با حضور همزمان سخت‌کننده‌های بتنی و فولادی T شکل، تحقیقات بیشتری لازم است. یکی از مباحث مهمی که نادیده گرفته می‌شود، استفاده تنها از سخت‌کننده بتنی در دیوار برشی صفحه فولادی (دیوار برشی کامپوزیت) بدون حضور سخت‌کننده‌های فولادی است. بر این اساس، در مقاله حاضر، به بررسی و ارزیابی تاثیر سخت‌کننده‌های فولادی T شکل روی دیوار برشی صفحه فولادی با سخت‌کننده بتنی به روش المان محدود پرداخته می‌شود. برای این منظور، ابتدا مجموعه‌ای از نمونه‌های دیوار برشی صفحه فولادی کامپوزیت با و بدون سخت‌کننده مدلسازی و تحلیل می‌شود. نتایج نمونه فاقد سخت‌کننده به عنوان نمونه پایه و مقایسه‌ای با نمونه‌های دارای سخت‌کننده در نظر گرفته شده است. مدل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS

شکل ۱. (الف) نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب (ب) هندسه دیوار برشی مرکب فولادی با روکش بتنی متداول و نوین با لحاظ کردن فاصله بین پوشش بتنی و

المان‌های مرزی مورد بررسی (ج) اجزای مختلف دیوار برشی مرکب فولادی-بتنی [7]

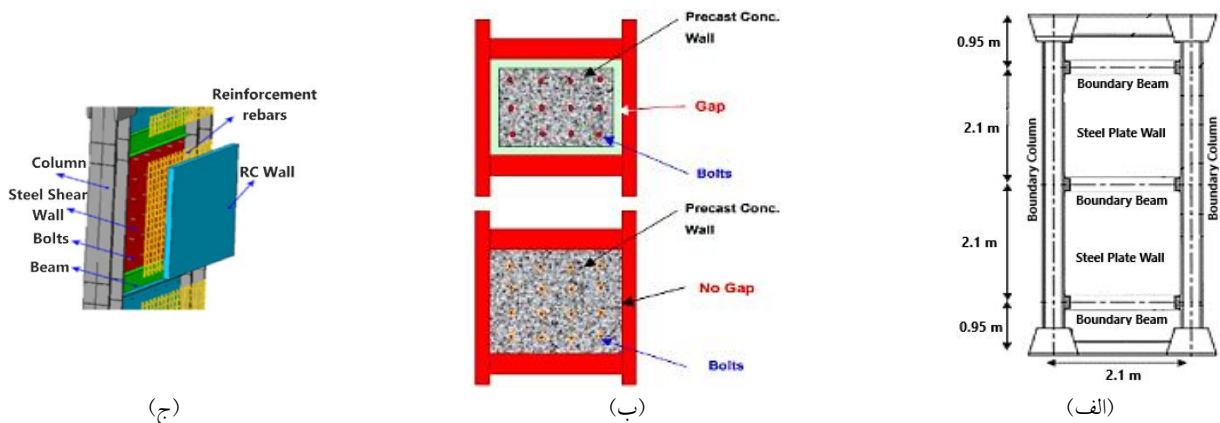


Fig. 1. (a) Laboratory sample of composite shear wall; (b) Geometry of steel composite shear wall with conventional and modern concrete coating, taking into account the distance between the concrete coating and the investigated boundary elements (c) Different components of a steel-concrete composite shear wall [7].

جدول ۱. ابعاد اجزای دیوار برشی مرکب آزمایشگاهی (میلیمتر) [7]

Steel Plate Thickness	Pre-cast R/C wall			Wall Bolts Dia.	Beam Section	Column Section
	Thickness of Conc. Wall	Rebar Dia.	Rebar Spacing			
4.8	76	10	100	13	W12×26	W12×120

Table 1. Dimensions of laboratory composite [7] shear wall components (mm)

برای مدلسازی این دیوار برشی در نرم‌افزار از اطلاعاتی که در جدول (۱) آمده استفاده شده است. مشخصات بتن و فولاد مصرفی که در مدلسازی دیوار برشی مرکب آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته در جداول (۲ و ۳) آورده شده است. برای مدل کردن تیر و ستون و صفحه فلزی در محیط نرم‌افزار Abaqus [14] از المان دو‌بعدی Shell استفاده شده است. هر جا که امکان‌پذیر باشد، استفاده از این المان به

جدول ۲. مشخصات بتن مصرفی [۷]

Poisson's ratio	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	compressive strength (MPa)
0.17	24.900	2.6	28

Table 2. Characteristics of concrete used [7]

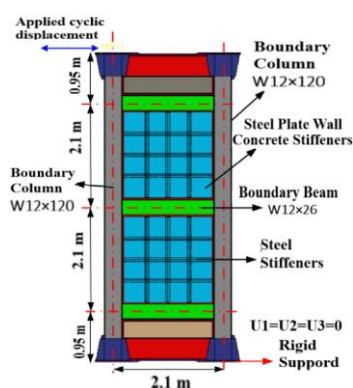
جدول ۳. مشخصات فولاد مصرفی [۷]

Poisson's ratio	Modulus of elasticity (MPa)	Yielding stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	components
0.3	200000	345	500	Beams and columns
0.3	140000	248	370	Steel Plates and stiffeners Rebars
0.3	200000	623	823	Bolts

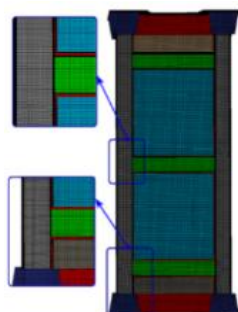
Table 3. Characteristics of used steel [7]

مدل‌های امان محدود اعمال شده است. در خصوص اجرای روکش بتنی بر روی دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده T شکل فولادی، لازم به توضیح است ابتدا اتصال جوشی سخت‌کننده‌های فولادی به ورق فولادی انجام و سپس ورق فولادی با سخت‌کننده‌های فولادی جوش شده به صورت افقی قرار گرفته و عمل بتن ریزی روی دیوار انجام می‌گیرد و بعد از خودگیری و سفت شدن بتن، مونتاژ ورق فولادی به صورت جوشی به امان‌های مرزی انجام می‌گیرد.

شکل ۲. (الف) مشخصات هندسی، شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی بر قاب فولادی دارای سخت‌کننده فولادی (ب) نمونه‌ای از مدل مش‌بندی شده قاب فولادی بدون سخت‌کننده مجهز شده به دیوار برشی مرکب نوین ارائه شده توسط محقق



(الف)



(ب)

Fig. 2. (a) Geometric specifications, boundary conditions, and applied loading on the steel frame with steel stiffeners; (b) An example of the meshed model of the steel frame without stiffeners equipped with a new composite shear wall provided by the researcher

مقطع Beam با امکان خمش و به آرماتورها مقطع Truss فقط با امکان تغییر شکل طولی نسبت داده شده است. در بخش مونتاژ 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 [14] و در بالای دیوار جابه‌جایی در راستای افقی در صفحه دیوار آزاد ش. در شکل (۲-الف) مشخصات هندسی، شرایط مرزی و بارگذاری نمونه به صورت اعمال جابه‌جایی افقی بر قاب فولادی دارای سخت‌کننده دیوار برشی مرکب جدید و در شکل (۲ ب) مدل مش‌بندی شده دیوار برشی آزمایشگاهی در تحقیق حاضر نشان داده شده است. این مدل نهایی است که پس از بررسی کردن همگرایی نتایج تحلیل حرکت جانبی دیوار با ریزتر کردن تدریجی ابعاد امان‌ها به دست آمده است. به دلیل قرار گرفتن سخت‌کننده‌ها و برشگیرهای فولادی داخل بتن برای در نظر گرفتن اندرکنش بتن و قطعات فولادی از روش Embedded region و برای جلوگیری از فرو رفتن قطعات فولادی در داخل بتن به علت تغییر شکل‌های سازه‌ای از اندرکنش تماس سخت (Hard Contact) استفاده شده است. ابعاد تمام امان‌ها در قسمتهای مختلف دیوار برشی برابر ۵ میلی‌متر است. تعداد امان رویه بتنی ۳۱۲۳۸ و صفحه فلزی ۱۷۴۵۵ تیرها ۱۴۰۷۶، سخت‌کننده ۲۲۹۷ و ستون‌ها ۳۰۳۲۴ است. در شکل (۳) پروتکل بارگذاری چرخه‌ای اعمالی ATC-24 بر قاب‌های فولادی مجهز به دیوار برشی مرکب نشان داده شده است [7, 17]. با اعمال این بارگذاری چرخه‌ای به طبقه بالای قاب فولادی تحت بررسی، منحنی‌های پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای استخراج شده و تأثیر پارامترهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. بارگذاری شامل بارگذاری جانبی در بالای ستون در طبقه آخر می‌باشد که در مدل امان محدود استفاده شده است. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای بر اساس نمونه‌های آزمایش [14, 16] و نوع بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان به

همچنین، بیشترین انرژی جذب شده به دست آمده از شبیه‌سازی تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع به ترتیب برابر 3.4 kip.in و 3.2 kip.in می‌باشد که در حدود ۶ درصد خطا دارد.

شکل ۵. (الف) مقایسه منحنی هیستریزس به دست آمده از تحقیق حاضر و تست‌های آزمایشگاهی (ب) منحنی انرژی جذب شده بدست آمده از تحقیق حاضر و تست‌های آزمایشگاهی [7]

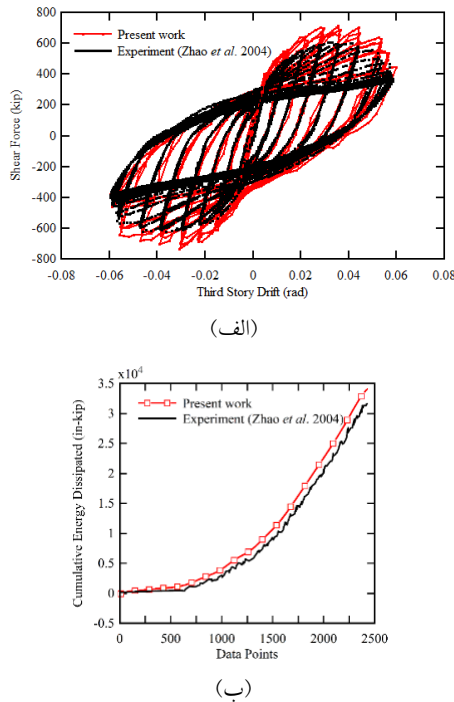


Fig. 5. (a) Comparison of the hysteresis curve obtained from the present research and laboratory tests (b) Absorbed energy curve obtained from the present research and laboratory tests [7]

در شکل (۶ الف و ب) به ترتیب تنش تسلیم قاب فولادی و خرابی سخت کننده بتنی مدل المان محدود، و در شکل (۶ ج) خرابی نمونه آزمایشگاهی مدل ژائو و آستانه اصل را نشان داده شده است.

شکل ۶. مقایسه سازوکار خرابی (الف) و (ب) به دست آمده از تحقیق حاضر و (ج) تست آزمایشگاهی ژائو و همکاران [7]

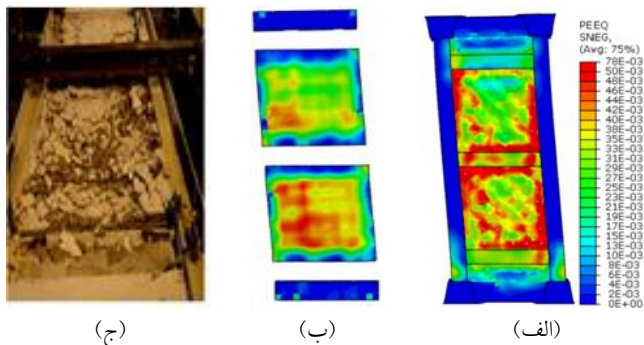


Fig. 6. Comparison of the failure mechanism (a) and (b) obtained from the present research and (c) laboratory test by Zhao et al [7]

شکل ۳. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای اعمالی بر قاب‌های فولادی مجهز به دیوار برشی مرکب تحت بررسی [7, 17]

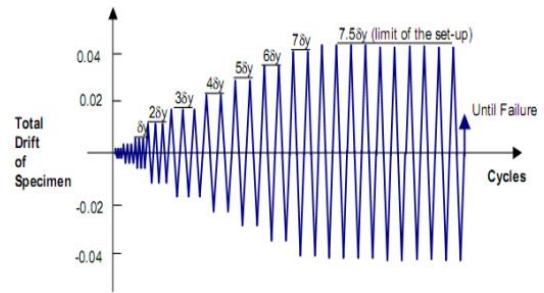


Fig. 3. Cyclic loading protocol applied to steel frames equipped with composite shear walls under investigation [7, 17]

یکی از اهداف اصلی تحقیق بررسی تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی بر روی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی مرکب است. براین اساس، هندسه‌های مختلفی برای سخت‌کننده‌ها در نظر گرفته شده است که در شکل (۴) هندسه برخی از این نمونه‌ها نشان داده شده است.

شکل ۴. مشخصات هندسه سخت‌کننده‌های فولادی و بتنی مورد استفاده در تحقیق حاضر

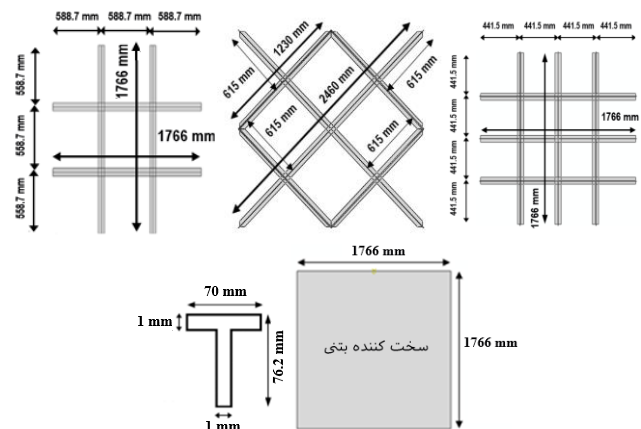


Fig. 4. Geometry specifications of steel and concrete stiffeners used in this research

شکل (۵ الف) مقایسه منحنی هیستریزس به دست آمده از تحقیق حاضر و تست‌های آزمایشگاهی مدل دیوار برشی مرکب ژائو و آستانه اصل [7] را نشان می‌دهد. در این شکل دقت و سازگاری مدل المان محدود و در شکل (۵ ب) منحنی انرژی جذب شده در طی بارگذاری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خطای بین مدل عددی ارائه شده در تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع [7] برای بیشترین نیرو و بیشترین جذب انرژی کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد [3]. بیشترین نیروی به دست آمده از شبیه‌سازی تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع به ترتیب برابر 705 kip و 620 kip می‌باشد که در حدود ۱۳ درصد خطا دارد.

بتواند بینشی جامعی از رفتار این دیوارها بدست آورد. دسته‌بندی بکار رفته برای مدل‌های ساخته شده شامل موارد زیر است که در شکل (۷) مشخصات هندسی تعدادی از قاب‌های مورد مطالعه نشان داده شده است:

۱- دیواره برشی فولادی بدون سخت‌کننده (CSPSW-NS): این مدل همان نمونه اعتبار سنجی است و به عنوان مدل پایه انتخاب شده که در شکل (۷ الف) نشان داده شده است.

۲- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با سخت‌کننده افقی (CSPSW-0VnH): این مدل شامل n سخت‌کننده افقی است. که n شامل تعداد سخت‌کننده می‌باشد، که از ۱ تا ۳ است، و حروف V و H به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و افقی می‌باشند. یعنی این مدل‌ها فقط دارای سخت‌کننده افقی هستند. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۷ ب) آورده شده است.

۳- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با سخت‌کننده عمودی (CSPSW-mV0H): این مدل شامل m سخت‌کننده عمودی می‌باشد که از ۱ تا ۳ است، یعنی این مدل‌ها فقط دارای سخت‌کننده قائم هستند. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۷ پ) نشان داده شده است.

۴- دیواره برشی فولادی کامپوزیت با ترکیبی از سخت‌کننده افقی و عمودی (CSPSW-mVnH): این مدل شامل n و m سخت‌کننده‌های افقی و عمودی است. که n و m شامل تعداد سخت‌کننده‌ها می‌باشد که از ۱ تا ۳ است. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۷ ت) به تصویر کشیده شده است.

۵- دیواره برشی فولادی کامپوزیت با سخت‌کننده مورب (CSPSW-kD): این مدل شامل k سخت‌کننده مورب است، که k شامل تعداد سخت‌کننده‌ها می‌باشد، که از ۱ تا ۳ است، و حرف D نشان دهنده جهت مورب می‌باشد. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۷ ث) آورده شده است.

۶- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با ترکیبی از سخت‌کننده افقی، عمودی و مورب (CSPSW-1DIVIH): این مدل شامل یک سخت‌کننده مورب، یک عمودی و یک افقی است که در شکل (۷ ج) نشان داده شده است.

با مقایسه مدل المان محدود و مدل آزمایشگاهی در شکل‌های (۶ و ۵) می‌توان گفت که مدل المان محدود دیوار برشی مرکب بادقت خوبی نمونه آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند. شکل (۶ الف) نواحی که قسمت‌های فولادی دیوار برشی به حد تسلیم رسیده و خرابی اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد و در شکل (۶ ب) خرابی پانل بتنی به تصویر کشیده شده که در طبقات اول و دوم این خرابی به‌وضوح دیده می‌شود که ناشی از کمانش خارج از صفحه ورق فولادی است و باعث خرابی کلی در دیوار بتونی شده است. شکل (۶ ج) خرابی نمونه آزمایشگاهی را در دریفت ۴/۴ درصد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود خرابی قسمت‌های زیادی از سخت‌کننده بتنی به همراه ورق فولادی و نواحی از تیرهای قاب فولادی به تصویر کشیده شده است. با اضافه کردن سخت‌کننده‌های فولادی می‌توان به‌اندازه زیادی از آسیب پانل بتنی جلوگیری کرد. با توجه به شکل مذکور، مدل المان محدود دیوار برشی مرکب، با دقت خوبی نمونه آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند.

۳- مطالعه پارامتری

۳-۱- اطلاعات پارامتری

بعد از مدل‌سازی المان محدود و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی، برای بررسی تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی T شکل در دیوار برشی مرکب مدل‌های جدیدی ایجاد شدند. متغیرها متشکل از تعداد و چیدمان سخت‌کننده‌های فولادی T شکل که به‌صورت عمودی، افقی، مورب و ترکیبی که با مجموع ۲۰ مدل عددی که در جدول (۴) نشان داده شده است به ورق متصل شدند بررسی و با مدل پایه (بدون سخت‌کننده) مقایسه شده است. برای مطالعات پارامتریک، شش دسته بندی برای استفاده از سخت‌کننده‌های T شکل با استفاده از روش المان محدود انتخاب و مدل‌سازی شده است. مدل‌های المان محدود مطالعات پارامتریک بر اساس نمونه آزمایش تست شده توسط ژائو و آستانه اصل [7] توسعه داده شده‌اند. این بخش سعی دارد با بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی، رفتار و عملکرد CSPSW با سخت‌کننده‌های فولادی T شکل را مطالعه کرده تا

جدول ۴. پارامترهای هندسی و حداکثر ظرفیت باربری مدل‌های پارامتری

Strategies	Models	Type and number of stiffeners			Max Load (kN)	Improve (%)
-	CSPSW-NS	-	-	-	2810	Basic Model
(I)	CSPSW-0V1H	1	-	-	2924	4.01
	CSPSW-0V2H	2	-	-	2974	5.84
	CSPSW-0V3H	3	-	-	3004	6.90
(II)	CSPSW-1V0H	-	1	-	2898	3.13
	CSPSW-2V0H	-	2	-	2954	5.12
	CSPSW-3V0H	-	3	-	2978	5.98
(III)	CSPSW-1V1H	1	1	-	2970	5.70
	CSPSW-1V2H	2	1	-	3023	7.58
	CSPSW-1V3H	3	1	-	3059	8.86
	CSPSW-2V1H	1	2	-	3026	7.69
	CSPSW-2V2H	2	2	-	3091	10
	CSPSW-2V3H	3	2	-	3059	8.86
	CSPSW-3V1H	1	3	-	3067	9.14
	CSPSW-3V2H	2	3	-	3142	11.81
	CSPSW-3V3H	3	3	-	3188	13.45
	(IV)	CSPSW-1D	-	-	1	3336
CSPSW-2D		-	-	2	3297	17.33
CSPSW-3D		-	-	3	3516	25.12
(V)	CSPSW-1D1V1H	1	1	1	3426	21.92

Table 4. Geometric parameters and maximum load capacity of parametric models

شکل ۷. مشخصات هندسی تعدادی از قاب‌های مورد مطالعه



Fig. 7. Geometric characteristics of a number of studied frames

دسته بندی (I) در مدل‌های بهبود یافته این دسته بندی رفتار یکنواختی مشابه مدل CSPSW-NS دیده می‌شود و تغییرات قابل توجهی در ظرفیت آن‌ها مطابق جدول (۴) مشاهده نمی‌شود. میزان ماکزیمم افزایش نیروی برشی، نسبت به مدل پایه ۴/۰۱ درصد تا ۶/۹ درصد است که میانگین مقدار نیروی برشی پایه برای این حالت استراتژی معادل ۵/۸ درصد می‌باشد.

با مقایسه منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی مدل‌های پارامتری برای شکل (۸ ب) دسته‌بندی (II)، رفتار یکنواختی مشابه مدل پایه است و تغییرات قابل توجهی در ظرفیت آن‌ها مطابق جدول (۴) مشاهده نمی‌شود، و میزان ماکزیمم افزایش نیروی برشی نسبت به مدل پایه ۳/۱۳ درصد تا ۵/۹۸ درصد است که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی معادل ۴/۷۴ درصد است. با توجه به شکل (۸ الف و ب)،

نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک مدل‌های المان محدود تحت پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج شامل تاثیر سخت کننده‌ها بر شکل پذیری قاب فولادی، استهلاک انرژی، بررسی آسیب فشاری بر پانل بتنی و حالت‌های شکست است. در ادامه، نتایج مورد بحث قرار گرفته و استراتژی‌های در نظر گرفته شده با مدل اصلی مقایسه می‌شوند.

۳-۲- نتایج تحلیل

۳-۲-۱- رفتار دیوار برشی فولادی با سخت کننده فولادی - بتنی

در شکل (۸ تا ۱۰)، منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی مدل‌های المان محدود ارائه شده و مقایسه منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی مدل‌های بهبود یافته با مدل پایه انجام شده است. با مقایسه منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی مدل‌های پارامتری در شکل (۸ الف)

مقاطع به دیوار برشی فولادی، بیشترین ظرفیت باربری ۱۵ درصد افزایش نشان می‌دهد [18]. همچنین نتایج آزمایشگاهی وانگ در صورت استفاده از دیوار برشی کامپوزیت به جای دیوار برشی بتنی، بیشترین ظرفیت باربری ۱۰۶ درصد افزایش نشان می‌دهد [19]. با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی در شکل (۱۰) افزایش نیرو نسبت به مدل‌های قبلی بیشتر می‌باشد.

شکل ۹. نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای مدل‌های دسته بندی (III)

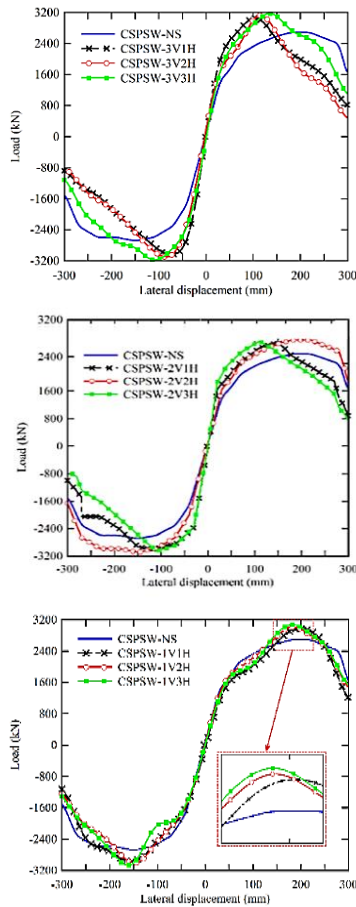


Fig. 9. Push diagram resulting from cyclic loading of classification models (III)

شکل ۱۰: نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای مدل‌های دسته‌بندی (IV)

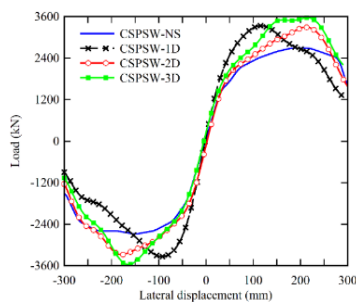
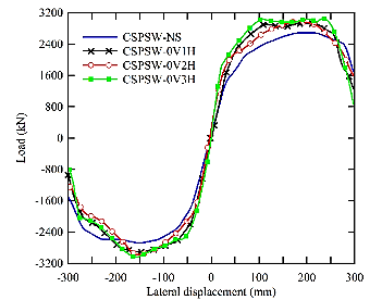
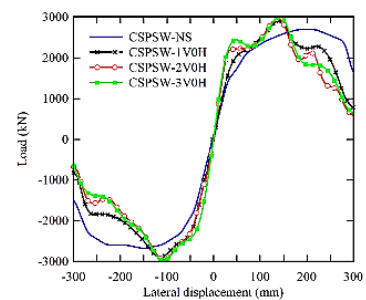


Fig. 10. Push diagram resulting from cyclic loading of classification models (IV)

شکل ۸: نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای (الف) مدل‌های دسته‌بندی (I) و (ب) مدل‌های دسته‌بندی (II)



(الف) دسته‌بندی (I)



(ب) دسته‌بندی (II)

Fig. 8. Push diagram resulting from cyclic loading of (a) category (I) and (b) category (II) models

مقایسه مدل‌های بهبود یافته با مدل پایه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها عمودی یا افقی به تنهایی، تأثیر کمی روی بیشترین نیروی برشی پایه دیوارهای برشی ورق فولاد کامپوزیت دارد. مطابق شکل (۹)، میزان افزایش ماکزیم نیروی برشی مدل‌های دسته بندی (III) نسبت به مدل پایه ۵/۷ درصد تا ۱۳/۴۵ درصد است که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی برابر با ۹/۲۳ درصد است.

دسته‌بندی (III) ترکیبی از سخت‌کننده‌های افقی و عمودی می‌باشد و متناسب با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، ظرفیت برشی پایه نیز افزایش می‌یابد، اما مطابق با شکل (۹) این افزایش قابل توجه نیست ولی نسبت به نمودار شکل (۸) افزایشی می‌باشد. مطابق با مقادیر بیشترین برش پایه ارائه شده در جدول (۴)، برای مدل‌های دسته‌بندی (IV)، بیشترین نیروی جانبی در مقایسه با مدل پایه به ترتیب ۱۸/۷۱ درصد، ۱۷/۳۳ درصد و ۲۵/۱۲ درصد افزایش نشان می‌دهد. که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی معادل ۲۰/۳۸ درصد است. در مقایسه با کار آزمایشگاهی جیانگ، با اضافه کردن سخت‌کننده‌های فولادی گیردار صلیبی با مهارهای

حاصل از بارگذاری چرخه‌ای به بررسی تأثیر سخت کننده‌ها بر مشخصه‌های شکل پذیری قاب‌های فولادی تحت بررسی پرداخته می‌شود. میزان شکل پذیری قاب‌های فولادی بر اساس نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان مانند اولین تسلیم شدگی بدست آمده از نمودار پوش نیرو- جابه‌جایی مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [21]:

$$\mu = \frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y} \quad (1)$$

که در آن Δ_y تغییر مکان تسلیم و $\Delta_{0.85}$ تغییر مکان متناظر با هشتاد و پنج درصد بار نهایی است. در شکل (۱۲) منحنی پوش بار- جابه‌جایی نمونه CSPSW-NS به منظور تعریف پارامترهای مهم منحنی پوش بار- جابه‌جایی شامل بار تسلیم P_y ، نیروی نهایی P_{max} ، تغییر مکان تسلیم و تغییر مکان نهایی نشان داده شده است. به منظور مطالعه تأثیر حالت‌های مختلف استفاده از سخت کننده‌ها، پارامترهای جابه‌جایی تسلیم، جابه‌جایی نهایی، نیروی تسلیم، نیروی نهایی و پارامتر شکل پذیری با استفاده از منحنی‌های پوش نیرو- جابه‌جایی شکل‌های (۸ تا ۱۱) استخراج شده و نتایج در جدول (۵) نشان داده شده است. باتوجه به نتایج مشاهده می‌شود که برای نمونه پایه، شکل پذیری $8/47$ است و بار نهایی متناظر 2810 کیلونیوتن است.

شکل ۱۲. تعریف پارامترهای مهم منحنی پوش بار-جابه‌جایی شامل بار تسلیم، بار نهایی، تغییر مکان تسلیم و تغییر مکان نهایی برای مدل پایه (CSPSW-NS)

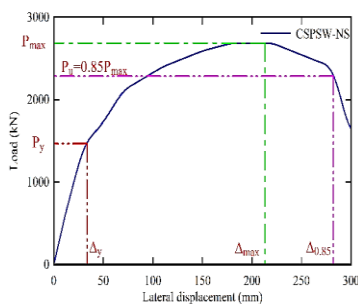


Fig. 12. Definition of the important parameters of the load-displacement curve, including the yield load, ultimate load, yield displacement, and ultimate displacement for the base model (CSPSW-NS)

به ازای برخی از حالت‌های تقویت، ضریب شکل پذیری و بار نهایی نسبت به نمونه مبنا بدون سخت کننده فولادی افزایش می‌یابد و این نشان دهنده تأثیر مطلوب استفاده از سخت کننده‌ها در هسته بتنی دیوارهای برشی می‌باشد. در مقابل، برخی از آرایش‌های

شکل ۱۱: نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای

مدل‌های دسته‌بندی (V)

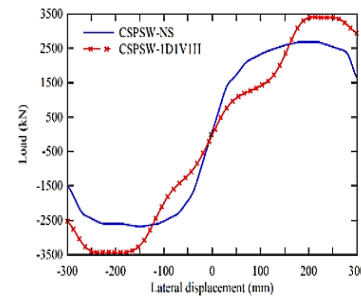


Fig. 11. Push diagram resulting from cyclic loading of classification models (V)

مطابق شکل (۱۱) با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی دسته بندی (V) و مدل بهبود یافته با مدل پایه، $21/92$ درصد افزایش در حداکثر برش پایه مشاهده می‌شود. با مقایسه بین مدل‌های بهبود یافته و مدل پایه مطابق جدول (۴) نشان می‌دهد که نیروی جانبی نهایی مدل CSPSW-3D با $25/12$ درصد بیشتر در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه (مدل مبنا) را نشان می‌دهد [7]. با توجه به شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، مدل‌های بهبود یافته دسته بندی (IV و V) رفتار متفاوتی را در مقایسه با سایر مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهند. این تفاوت در رفتار سیستم‌های پیشنهادی به دلیل عملکرد و سازوکار تسلیم می‌تواند باشد. افزایش ظرفیت برشی نهایی دیوار برشی کامپوزیت به طور کلی به دلیل وجود سخت کننده‌های مورب فولادی و سخت کننده بتنی است. این سخت کننده‌ها باعث به تعویق افتادن کماتش ورق دیوار برشی می‌شوند که منجر به افزایش ظرفیت برشی نهایی می‌شود. سخت کننده بتنی به تنهایی تا حدی ظرفیت دیوار برشی کامپوزیت را افزایش می‌دهد با اضافه شدن سخت کننده‌های فولادی T شکل این ظرفیت باز هم افزایش می‌یابد که مانند نتایج آزمایشگاهی قلهکی و همکارانش، سخت کننده‌ها با محدود کردن تغییر شکل‌ها و تغییر مکان‌های مختلف و افزایش سختی سازه، ظرفیت دیوار برشی صفحه فولادی در تحمل بار جانبی افزایش می‌یابد [20]. در تأیید این مسأله افت مقاومت در نمونه مبنا (بدون سخت کننده فولادی) که ناشی از کماتش ورق فولادی در اندرکنش با ستون‌های فولادی می‌باشد.

۲-۲-۳- تأثیر سخت کننده‌ها بر شکل پذیری قاب‌های تحت بررسی

در این بخش با توجه به نمودارهای نیرو-جابه‌جایی پوش

آید. برای مدل بدون سخت‌کننده فولادی، ضریب اضافه مقاومت طبق جدول (۵) برابر ۱/۹ و بیشترین اضافه مقاومت مربوط به مدل CSPSW-1D1V1H برابر ۴/۲۵ می‌باشد که حدود ۱۲۴ درصد افزایش در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه را نشان می‌دهد [7]. با مقایسه ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه‌مقاومت، مدل‌های با سخت‌کننده‌های قطری و ترکیبی قطری و صلیبی دسته بندی (IV و V) بیشترین ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت را نسبت به مدل پایه دارند.

جدول ۵. تأثیر پارامترهای هندسی بر ضریب شکل‌پذیری و اضافه‌مقاومت مدل‌های مورد بررسی

Strategies	Models	Yielding		Ultimate		Ductility		Over strength
		Py (kN)	Δy (mm)	P _{max} (kN)	Δ _{max} (mm)	μ	Δ _{0.85}	Ω
-	CSPSW-0V0H	1471.5	33.25	2810	210.45	281.74	8.47	1.90
(I)	CSPSW-0V1H	1685.6	32.08	2924	210.02	281.16	8.76	1.73
	CSPSW-0V2H	2018.2	35.92	2974	181.32	242.74	6.75	1.47
	CSPSW-0V3H	1820.1	33.73	3004	230.1	265.00	7.85	1.65
	CSPSW-1V0H	1955.3	40.04	2989	139.9	157.01	3.89	1.53
(II)	CSPSW-2V0H	2107.6	25.61	2954	137.7	152.07	5.94	1.40
	CSPSW-3V0H	2100.4	25.89	2978	141.9	161.05	6.22	1.42
	CSPSW-1V1H	920.3	33.86	2970	200.6	251.10	7.41	3.22
	CSPSW-1V2H	924.7	32.78	3023	198.9	247.50	7.55	3.27
(III)	CSPSW-1V3H	929.4	37.07	3059	198.9	238.00	6.42	3.29
	CSPSW-2V1H	1667.8	21.71	3026	148.00	185.14	8.53	1.81
	CSPSW-2V2H	1685.3	31.54	3091	180.65	235.13	7.45	1.83
	CSPSW-2V3H	1857.6	20.33	3059	110.57	163.40	8.04	1.65
	CSPSW-3V1H	1990.3	30.25	3067	107.56	188.90	6.24	1.54
	CSPSW-3V2H	1371.2	20.78	3142	115.13	151.70	7.30	2.29
	CSPSW-3V3H	1476.3	25.64	3188	135.03	177.10	6.90	2.16
	CSPSW-1D	1598.4	18.05	3336	120.29	160.00	8.86	2.09
(IV)	CSPSW-2D	1478.2	29.41	3297	211.76	249.54	8.48	2.30
	CSPSW-3D	1443.5	24.68	3516	217.63	264.27	10.70	2.44
(V)	CSPSW-1D1V1H	806.8	31.04	3426	210.16	290.01	9.34	4.25

Table 5. The effect of geometrical parameters on the plasticity factor and the added strength of the investigated models

کند. مساحت زیر نمودار چرخه‌ای مدل‌ها به روش دوزنقه‌ای محاسبه شده است. بیشترین سخت‌کننده‌های مستهلک انرژی، سخت‌کننده‌های قطری و ترکیبی قطری، عمودی و افقی و کمترین مستهلک انرژی مدل بدون سخت‌کننده فولادی می‌باشد.

شکل ۱۳. نمودار میله‌ای استهلاک انرژی مدل‌های عددی

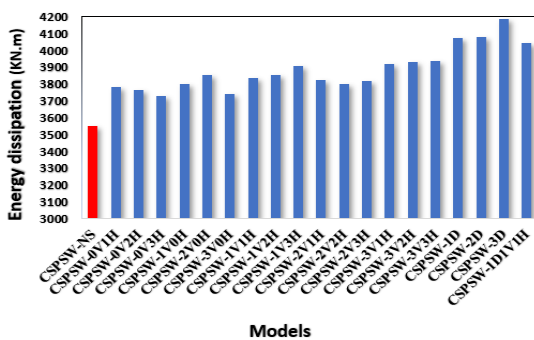


Fig. 13. Bar chart of energy consumption for numerical models

مختلف سخت‌کننده‌ها باعث کاهش شکل‌پذیری نسبت به نمونه مبنا می‌شوند. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که مدل‌های بهبود یافته دسته‌بندی (IV و V) دارای ضریب شکل‌پذیری بالاتری بوده و مدل CSPSW-3D دارای بیشترین ضریب شکل‌پذیری است که حدود ۲۶ درصد افزایش شکل‌پذیری در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه [7]. ضریب اضافه‌مقاومت (Ω), یکی دیگر از پارامترهایی است که در جدول (۵) بررسی شده است. ضریب اضافه‌مقاومت از تقسیم نیروی نهایی به نیروی تسلیم بدست می‌

۳-۲-۳- تأثیر سخت‌کننده‌ها بر استهلاک انرژی قاب‌های تحت بررسی

در شکل (۱۳) نمودار میله‌ای استهلاک انرژی مدل‌های عددی ارائه شده است. مساحت زیر نمودار منحنی‌های چرخه‌ای نشانگر میزان استهلاک انرژی می‌باشد. مفهوم چرخه‌ای (هیستریزیس) اصطلاحی که در ادبیات مهندسی عمران به ویژه در مهندسی زلزله به چشم می‌خورد و با اصطلاحاتی خصوصاً پاسخ لرزه‌ای مناسب، قابلیت جذب انرژی چرخه‌ای، حلقه‌های چاق و یا لاغر، کاهش سختی و افت مقاومت در منحنی چرخه‌ای شناخته می‌شود. منحنی بار-تغییر شکل تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی منحنی چرخه‌ای یا همان هیستریزیس نامیده می‌شود [2]. هر چه مساحت زیر نمودار چرخه‌ای بزرگتر باشد میزان استهلاک انرژی بیشتر خواهد بود و می‌تواند انرژی نیروهای جانبی مثل زلزله را بیشتر مستهلک نماید و از شدت و آسیب‌های مخرب زلزله کم

۳-۲-۴- تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی T شکل بر آسیب

فشاری سخت‌کننده بتنی

حالت‌های کانتر آسیب فشاری بتن (DAMAGEC) مدل‌های المان محدود در شکل (۱۷) برای تعدادی از مدل‌ها با شماره (۱) تا (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در مدل (۱) CSPSW-NS (مدل پایه) دیده می‌شود، آسیب فشاری کل پانل بتنی در طبقات اول و دوم به وضوح دیده می‌شود که ناشی از کمناش خارج از صفحه ورق‌های فولادی می‌باشد و باعث خرابی کلی در دیوار بتونی شده است. با اضافه کردن سخت‌کننده‌های T شکل افقی یا عمودی به تنهایی، آسیب و خرد شدن بتن فقط در مسیرهایی که سخت‌کننده حضور دارد از بین رفته یا کمتر شده است. همانند مدل‌های (۲) و (۳)، اضافه کردن سخت‌کننده‌های افقی یا عمودی به تنهایی تأثیر زیادی در جلوگیری از شکست بتن ندارند. در مدل‌های با سخت‌کننده‌های افقی و عمودی ترکیبی، همانطور که در شکل برای مدل‌های (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است، شکست فشاری بتن محدود به مابین سخت‌کننده‌ها شده و سطح پیوسته آسیب بتن در مدل پایه، به سطوح کوچکتری مابین سخت‌کننده‌ها کاهش پیدا کرده است. این سخت‌کننده‌ها نیز تأثیر زیادی در جلوگیری از آسیب و خرابی بتن ندارند. ولی در مدل‌های (۷) تا (۱۰) با سخت‌کننده‌های مورب و ترکیبی، آسیب و خرد شدن بتن به سطوح کوچک‌تر مابین سخت‌کننده‌ها محدود شده و به صورت چشمگیری از شکست پانل بتنی کاسته شده است. شکست و خرابی بتن در مدل CSPSW-3D، آسیب بسیار کمتری نسبت به سایر مدل‌ها پیدا کرده و در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه بسیار کمتر می‌باشد [7]. فلسفه استفاده از پوشش بتنی در این گونه دیوارها، جلوگیری از کمناش ورق فولادی نازک و تغییر مود باربری ورق از حالت مقاومت پس کمناشی (میدان کششی قطری) به مقاومت برشی داخل صفحه بوده که بدین ترتیب مقاومت جانبی سیستم افزایش می‌یابد. که مانند نتایج آزمایشگاهی وانگ و همکارانش بتن نقش مهمی در مقاومت کمناشی صفحه فولادی دارد [19]. علت اصلی کاهش خرابی دیواره‌های بتونی کمناش کمتر خارج از صفحه پانل است، بنابراین استفاده از سخت‌کننده‌های مورب نسبت به سخت‌کننده‌های افقی و عمودی منجر به جلوگیری بیشتری از کمناش ورق فولادی می‌شود که در نتیجه باعث کاهش آسیب در دیواره بتن می‌شود، همانطور که در شکل (۱۵) برای مدل (۹) نشان داده شده است.

در جدول (۶) درصد بهبود استهلاک انرژی مدل‌های عددی نسبت به مدل پایه آورده شده است. مدل CSPSW-3D دارای بیشترین استهلاک انرژی است که در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه حدود ۱۸ درصد بیشتر استهلاک انرژی را نشان می‌دهد [7]. نتایج بررسی مدل عددی مومنی نیز حکایت از افزایش استهلاک انرژی توسط دیوار برشی مرکب می‌باشد [19]. نمودار چرخه‌ای تعدادی از مدل‌های عددی در شکل (۱۴) آورده شده است.

جدول ۶. درصد بهبود استهلاک انرژی مدل‌های عددی نسبت به مدل پایه

Strategies	Models	Energy depreciation (KN.m)	Improve (%)
-	CSPSW-NS	3550	Basic Model
(I)	CSPSW-0V1H	3784	6.6
	CSPSW-0V2H	3763	6
	CSPSW-0V3H	3727	5
(II)	CSPSW-1V0H	3798	7
	CSPSW-2V0H	3852	8.5
	CSPSW-3V0H	3742	5.4
	CSPSW-1V1H	3834	8
	CSPSW-1V2H	3855	8.6
	CSPSW-1V3H	3905	10
(III)	CSPSW-2V1H	3823	7.7
	CSPSW-2V2H	3798	7
	CSPSW-2V3H	3816	7.5
	CSPSW-3V1H	3919	10.4
	CSPSW-3V2H	3930	10.7
	CSPSW-3V3H	3940	11
(IV)	CSPSW-1D	4072	14.7
	CSPSW-2D	4082	15
	CSPSW-3D	4189	18
(V)	CSPSW-1D1V1H	4047	14

Table 6. Percentage improvement of energy consumption of numerical models compared to the base model

شکل ۱۴. نمودار چرخه‌ای تعدادی از مدل‌های عددی

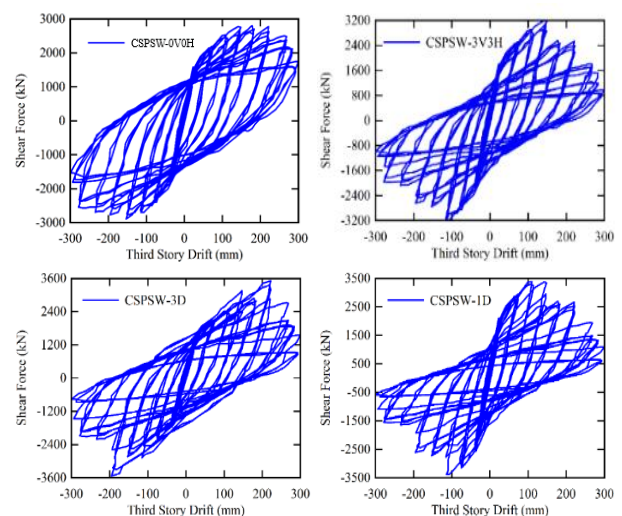


Fig 14. Cyclic diagram of a number of numerical models

شکل ۱۵. حالت‌های آسیب فشاری سخت‌کننده بتنی برای مدل‌های مطالعات پارامتریک از تحلیل‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای

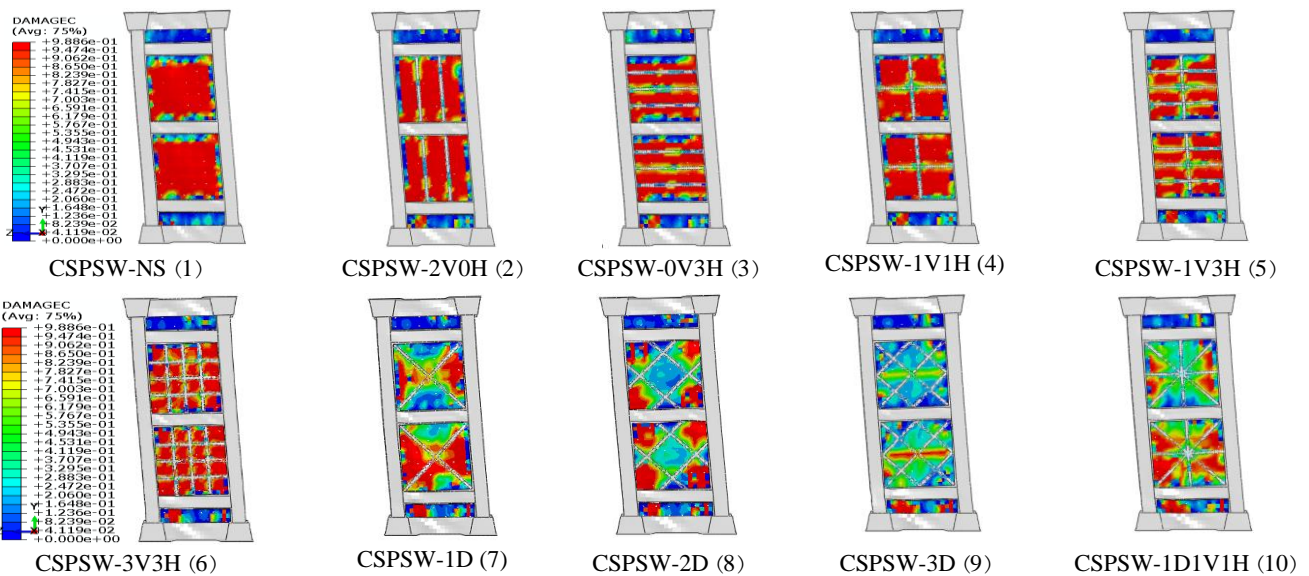


Fig. 15. Concrete compressive damage modes for parametric study from cyclic loading analyses

۳-۲-۵- بررسی روند خرابی

در شکل (۱۷) مراحل خرابی به دست آمده از تحلیل‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای در نمونه CPSW-1D1V1H برحسب موقعیت‌های مختلف روی نمودار نیرو-جابجایی نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود تا نقطه A نمودار به صورت خطی می‌باشد و در این بخش هیچ قسمت از سازه وارد ناحیه پلاستیک نمی‌شود. با افزایش بیشتر نیرو، در نقطه A خرابی به صورت تسلیم در بخش‌های فولادی سازه آغاز شده که در شکل قابل مشاهده می‌باشد. تا این مرحله به علت وجود فاصله کناری بین پوشش‌های بتنی و ستون‌های قاب، نیروی زیادی به پوشش بتنی وارد نمی‌شود. افزایش بیشتر نیرو سبب می‌شود تا نیرو از طریق تقویت‌کننده‌ها به پوشش بتنی وارد شده و در نتیجه آن سختی سازه دوباره به صورت افزایشی می‌یابد. در این مرحله تخریب پوشش بتنی آغاز شده و در موقعیت B تخریب در پوشش بتنی دهانه بالایی شدت می‌یابد. در ادامه با درگیر شدن پوشش بتنی طبقه پایینی، مجدداً سختی سازه حالت افزایش پیدا کرده و مقاومت سازه در برابر تغییر شکل افزایش می‌یابد. تا رسیدن به نقطه C خرابی پوشش بتنی طبقه پایینی نیز رشد پیدا کرده و در نتیجه تخریب کامل پوشش‌های بتنی از نقطه D به بعد سازه مقاومت خود را از دست داده و دچار تخریب در ستون‌ها می‌شود. چنین رفتار مشابهی با توجه به شکل (۱۸) که مراحل خرابی در نمونه CPSW-3V3H برحسب موقعیت‌های مختلف روی نمودار نیرو - جابه‌جایی را نشان می‌دهد قابل ملاحظه است.

در شکل (۱۶) مراحل خرابی مدل CPSW-0V0H نشان داده شده است. این مراحل خرابی بر اساس مشاهدات به دست آمده از تحلیل‌های المان محدود استنباط شده است همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدا بخشی از تیرهای میانی وارد ناحیه پلاستیک شده و در ادامه آن اعضای فولادی این قسمت‌ها دچار تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود. در ادامه، این تغییر شکل‌های بزرگ به پوشش‌های بتنی انتقال داده شده و سبب ایجاد تخریب در این پوشش‌ها می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که قبل از تخریب کامل پوشش‌های بتنی، ستون‌ها نیز وارد فاز پلاستیک می‌شوند. در نهایت در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر پوشش بتنی به صورت کامل تخریب شده و از بدنه دیوار برشی جدا می‌شود.

شکل ۱۶. مراحل خرابی بارگذاری چرخه‌ای در نمونه CPSW-0V0H

(ترتیب مراحل خرابی از راست به چپ می‌باشد)

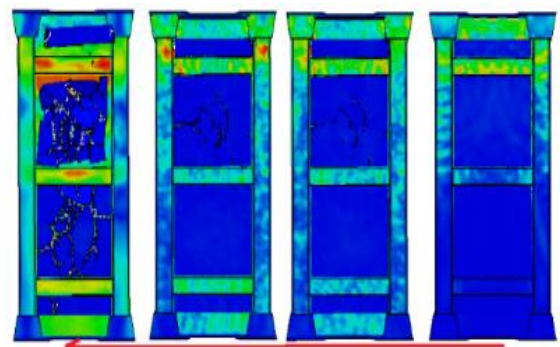


Fig. 16. Cyclic loading failure stages in the CPSW-0V0H sample (the order of failure stages is from right to left)

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار جانبی دیوار برشی مرکب با سخت کننده فولادی T شکل مورد بررسی قرار گرفت و اثر پارامترهایی مانند تعداد سخت کننده های T شکل، نوع چیدمان شامل عمودی، افقی، مورب و ترکیبی، روی سختی سیستم، ضریب شکل پذیری، ظرفیت نهایی دیوار برشی مرکب، و حالت های خرابی بررسی و مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- استفاده از سخت کننده های قطری T شکل فولادی در دیوارهای برشی کامپوزیت نسبت به دیوار برشی کامپوزیت بدون سخت کننده فولادی، باعث کاهش چشمگیر در آسیب سخت کننده بتنی می شود.

۲- سخت کننده های مورب نسبت به سخت کننده های عمودی تنها، افقی تنها و ترکیبی افقی و عمودی، ماکزیمم برش پایه را تا ۲۵ درصد بیشتر افزایش می دهند. این تفاوت در رفتار سیستم های پیشنهادی به دلیل عملکرد و سازوکار تسلیم می باشد.

۳- افزایش تعداد سخت کننده ها نباید ملاک افزایش ماکزیمم برش پایه در دیوار برشی مرکب باشد بلکه انتخاب یک دسته بندی مناسب برای سخت کننده ها می تواند تأثیر زیادی در افزایش ماکزیمم برش پایه داشته باشد.

۴- با اضافه شدن سخت کننده ها، میدان کششی محدود به ناحیه بین سخت کننده ها شده است و کماتش کلی ورق به کماتش موضعی تبدیل می شود.

۵- استفاده از سخت کننده های مورب نسبت به سخت کننده های افقی و عمودی منجر به جلوگیری بیشتری از کماتش ورق فولادی می شود که در نتیجه باعث کاهش آسیب و شکست در پانل بتن می شود.

۶- سخت کننده ها با آرایش قطری نسبت به دیگر سخت کننده ها بیشتر مستهلک کننده انرژی می باشند و مدل قطری CPSW-3D ۱۸ درصد بیشتر مستهلک کننده انرژی نسبت به مدل پایه است.

۷- بیشترین ضریب شکل پذیری و ضریب اضافه مقاومت قاب فولادی دارای سخت کننده، برای مدل های CPSW-3D و CPSW-1D1V1H بدست آمده است که بترتیب حدود ۲۶ و ۱۲۴ درصد بیشتر از نمونه مبنای بدون استفاده از سخت کننده ها می باشد.

شکل ۱۷. مراحل خرابی به دست آمده از تحلیل های حاصل از بارگذاری چرخه ای در نمونه CPSW-1D1V1H برحسب موقعیت های مختلف روی نمودار نیرو - جابه جایی

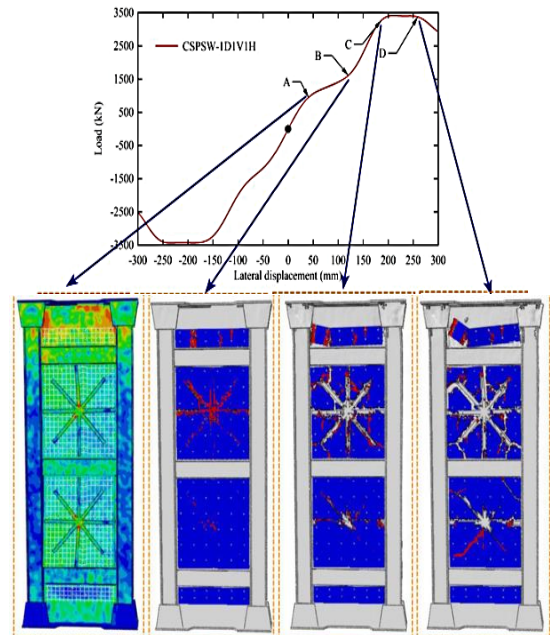


Fig. 17. Failure stages obtained from the analysis of cyclic loading in the CPSW-1D1V1H sample according to different positions on the force-displacement diagram

شکل ۱۸. مراحل خرابی به دست آمده از تحلیل های حاصل از بارگذاری چرخه ای در نمونه CPSW-3V3H برحسب موقعیت های مختلف بر روی نمودار نیرو - جابه جایی

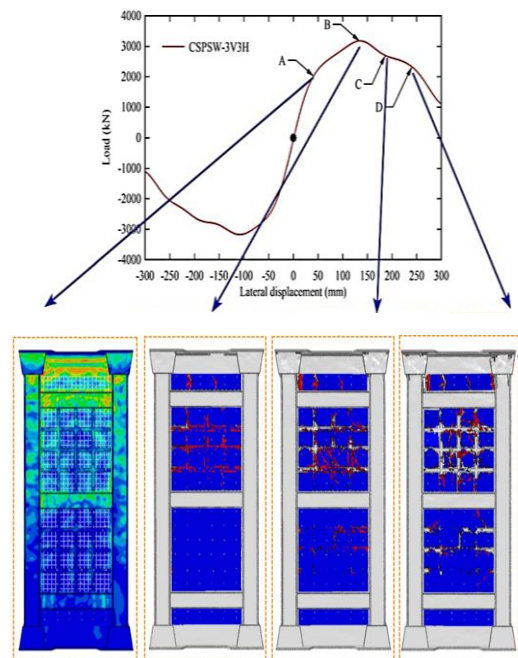


Fig. 18. Failure stages obtained from the analysis of cyclic loading in the CPSW-3V3H specimen according to different positions on the force-displacement diagram

- Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 74(2), pp.267-282.
- [10] Hatami F., 2009. A. Rahaei, Behavior of composite shear walls under seismic loading. *Journal of Sharif University of Technology*, 46, pp.21-31. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117263>.
- [11] Shafaei, S., Ayazi, A. and Farahbod, F., 2016. The effect of concrete panel thickness upon composite steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp.81-90.
- [12] Rahnavard, R., Hassanipour, A. and Mounesi, A., 2016. Numerical study on important parameters of composite steel-concrete shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, pp.441-456.
- [13] Zhang, Y., Song, Y., Zhu, G. and Jiang, Z., 2020. Hysteretic performance and shear deformation of external ring stiffened joint between composite CFST column and steel beam. *Journal of Building Structures*, 41, pp.154-164. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2018.0131>.
- [14] Zhou, J., Fang, X. and Jiang, Y., 2021. Cyclic behavior of concrete-encased high-strength concrete-filled steel tube composite walls: An experiment. *Structural Concrete*, 22(2), pp.691-708.
- [15] Seyed Kolbadi, S.M., Hassani, N., Seyed-Kolbadi, S.M. and Mirtaheri, M., 2021. Analyzing Parametric Sensitivity on the Cyclic Behavior of Steel Shear Walls. *Shock and Vibration*, 2021, pp.1-10.
- [16] Usefvand, M., Maleki, A. and Alinejad, B., 2022. An innovative system of coupled steel plate shear wall with pin FUSE in link beam: Cyclic behavior and energy dissipation. *Advances in Structural Engineering*, 25(3), pp.473-490.
- [17] Bypour, M., Yekrangnia, M. and Kioumars, M., 2024. Predicting the shear capacity of composite steel plate shear wall with the application of RSM. *Engineering Structures*, 301, pp.1-17.
- [18] Yu, J.G., Feng, X.T., Li, B. and Hao, J.P., 2018. Cyclic performance of cross restrained steel plate shear walls with transverse braces. *Thin-Walled Structures*, 132, pp.250-264. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.08.020>.
- [19] Wang, W., Wang, Y. and Lu, Z., 2018. Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete composite shear wall. *Engineering Structures*, 160, pp.281-292. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.08.020>.
- [20] Gholhaki, M. and jalilzadeh afshari, M., 2018. Effect of Different Configurations of Stiffeners on the Shear Capacity and Stiffness of Stiffened Steel Plate Shear Walls. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33.2(4.2), pp.3-12. <https://doi.org/10.24200/j30.2018.1060>.
- [21] Zhang, H., Dong, J., Duan, Y., Lu, X. and Peng, J., 2014. Seismic and Power Generation Performance of U-Shaped Steel Connected PV-Shear Wall under Lateral Cyclic Loading. *International Journal of Photoenergy*, 2014, pp.1-15. <https://doi.org/10.1155/2014/362638>.
- عناوین زیر برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود:
- ۱- توصیه می‌شود نمونه‌های بررسی شده در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گیرند.
- ۲- بررسی تأثیر ضخامت پانل بتنی و ورق فولادی در دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های بتنی - فولادی.
- ۳- بررسی فاصله گل‌میخ‌های اتصال بتن به ورق فولادی با وجود سخت‌کننده‌های فولادی.
- ۴- بررسی تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی دیگر مانند ناودانی، نبشی و غیره بر روی دیوار برشی‌های فولادی با سخت‌کننده‌های بتنی - فولادی.
- ۵- مطالعه رفتار تأثیر سخت‌کننده‌های پانل بتنی در دو سمت ورق فولادی دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های بتنی - فولادی.
- ۶- بررسی تأثیر بتن با مقاومت بالا بر روی دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های بتنی - فولادی.
- ۵- مراجع
- [1] Rahai, A. and Hatami, F., 2009. Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings. *Journal of constructional steel research*, 65(7), pp.1528-1537.
- [2] Rahimi, T., Kheyroddin, A., and Gholhaki, M., 2020. An Analytical and Numerical Study on Effect of Thickness and Concrete Type of Panels on Behavior of Composite Steel Plate Shear Walls. *Amirkabir J. Civil Eng*, 53, pp.3623-3648. <http://dx.doi.org/10.22060/ceej.2020.17929.6713>. [In Persian]
- [3] Momeni, S., Siahpolo, N. and Jahanpour, A., 2024. Numerical study on semi-supported steel composite shear wall at the edges under near and far-fault loading. *Sharif Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.24200/j30.2023.62420.3223>.
- [4] Astaneh-Asl, A., 2002. *Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls* (pp. 7-8). Moraga, CA, USA: Structural Steel Educational Council.
- [5] Sabouri, S., 2001. Lateral load resisting systems an introduction to steel shear walls. *Anguizeh Publishing Co*, pp.220-227.
- [6] Astaneh-Asl, A., 2001. *Seismic behavior and design of steel shear walls*. Moraga, CA: Structural Steel Educational Council.
- [7] Zhao, Q. and Astaneh-Asl, A., 2007. Seismic behavior of composite shear wall systems and application of smart structures technology. *Steel Structures*, 7(2007), pp.69-75.
- [8] American Institute of Steel Construction, 2002. *Seismic provisions for structural steel buildings* (No. 2). American Institute of Steel Construction.
- [9] Fathy, E., 2020. Seismic assessment of thin steel plate shear walls with outrigger system. *Structural*

Evaluation and improvement of the behavior of steel plate shear walls using steel-concrete stiffeners

Hadi Zarrintala¹, Ahmad Maleki^{2*}, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin³

1. Ph.D. Student, School of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University
3. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* Corresponding Author Email: A.maleki@iau-maragheh.ac.ir

Received: 2024/03/18- Accepted: 2024/11/20

Abstract

Steel shear walls have been used in various buildings as a system to resist lateral loads. The special advantage of this type of wall is its good malleability, high initial hardness, and high energy consumption power. But due to its special geometry, the steel shear wall undergoes buckling in the elastic range. To prevent steel sheet buckling in steel shear walls, there are two general solutions: using metal stiffeners or using concrete cover that is connected to steel sheet through shears. Based on this research, a solution has been proposed to improve the seismic performance of modern steel-concrete composite shear walls. The composite steel shear wall is a modern lateral bearing system consisting of a steel sheet with a reinforced concrete cover, which is connected to the sheet from one side or both sides by clips. In the composite steel shear wall, the reinforced concrete cover, by restraining the steel sheet and preventing its buckling, increases the shear capacity of the steel shear wall to the point of yielding in shearing inside the plate instead of tension in the direction of the tensile field. The composite steel shear wall, while increasing the shear capacity of the system, increases the resistance of the panel against destructive factors such as corrosion, fire, impact, explosion, and other cases and causes a reduction of more than 25 to 50 percent in the consumption of steel in medium and large buildings. In the new composite steel shear wall system, a distance is created between the concrete cover and the boundary beams and columns. Tests on conventional and modern composite steel shear walls show that the modern system has little damage compared to the conventional system. From nonlinear static analysis using the finite element method and with the help of ABAQUS software, the influence of the geometric characteristics of steel stiffeners on the seismic performance of the modern steel-concrete composite shear wall has been investigated. After modeling the steel-concrete composite shear wall and validating the numerical model with laboratory results, the effect of parameters such as the number of stiffeners, the type of arrangement, including vertical, horizontal, diagonal, and combined, on the maximum bearing capacity of the composite shear wall, ductility coefficient, additional strength, energy consumption, compressive damage of the concrete hardener, and failure modes have been investigated. The results of this research show that the use of T-shaped steel stiffeners and their arrangement have a significant effect on the bearing capacity of steel-concrete composite shear walls and cause the overall buckling of the steel sheet to become local buckling between the stiffeners. The use of diagonal stiffeners increases the capacity of steel shear walls by 25%. The ductility factor and added strength factor of the steel frame with diagonal stiffeners are about 26 and 124% higher than the ductility factor and added strength factor of the base sample without the use of stiffeners, respectively. The use of diagonal stiffeners in composite shear walls compared to composite shear walls without steel stiffeners increases energy consumption by about 18%. The use of T-shaped steel diagonal stiffeners in composite shear walls compared to composite shear walls without steel stiffeners causes a significant reduction in the damage and failure of the concrete stiffener.

Keywords: composite shear wall, T-shaped steel stiffener, concrete stiffener, finite element method.