

## ارزیابی و بهبود رفتار دیوارهای برشی صفحه فولادی با استفاده از سخت کنندههای فولادی – بتنی

هادي زرين طلا'، احمد ملكي محمد على لطف الهي يقين "

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

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

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

\* رايانامه نويسنده مسئول: A.maleki@iau-maragheh.ac.ir

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

#### چکیدہ

دیوارهای برشی فولادی در ساختمانهای مختلف بهعنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی مورداستفاده قرار گرفته اند. برتـری ویـژه ایـن نـوع دیوارها، قابلیت شکل پذیری مناسب، سختی اولیه بالا و قدرت استهلاک انرژی زیاد است و لیکن دیوار برشی فولادی به علت هندسه خاص خـود، دچـار کمانش در محـدوده ارتجـاعی می شود. برای جلوگیری از کمانش ورق فولادی در دیوارهای برشی فولادی دو راه حل کلی وجود دارد استفاده از سختکننده های فلزی و یا بهره گرفتن از پوشش بتنی کـه می شود. برای جلوگیری از کمانش ورق فولادی در دیوارهای برشی فولادی به منظور بهبود عملکرد لرزهای دیوارهای برشی فولادی - برخی فولادی - برخی نوین فولادی - بنگی برد شریق مرکب نـوین فولادی - بنی پرداخته شده است. با استفاده از روش المان محدود و به کمک نرمافزار ABAQUS، به منظور بهبود عملکرد لرزهای دیوارهای برشی مرکب نـوین فولادی - بتنی پرداخته شده است. با استفاده از روش المان محدود و به کمک نرمافزار ABAQUS، به بررسی تأثیر مشخصات هندسی سختکننده های فولادی بر عملکرد لـرزهای دیوار برشی مرکب نوین فولادی - بتنی پرداخته شده است. با استفاده از روش المان محدود و به کمک نرمافزار ABAQUS، به منظور بهبود عملکرد لرزمای دیوار برشی مرکب نـوین فولادی استی با مندی با سنفاده از روش المان محدود و به کمک نرمافزار ABAQUS، به بررسی تأثیر مشخصات هندسی سختکننده های فولادی بر عملکرد لـرزهای دیوار برشی کامپوزیتی فولادی - بتنی و درستی آزمایی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، اثـر توزیع تنش و حالته مردی بررسی شامل عمودی، افقی، مورب و ترکیبی، روی بیشترین ظرفیت باربری دیوار برشی مرکب شری با منهی مودن انهی مودن و ترکیبی روی به مودی از ترژی، میهار مردی بررا مرا مودی ترا میت بار مرا می مرکب شری بار مای عروزی تولادی - بتی آزمایتگاهی، اثـر توریع تنش و حالتهای خرابی بررسی مرکب شرین باین تعقیق نشان می دور و ترکیبی، روی به مودی و ترکیبی فولادی - بنی مورد و ترکیبی مرکب شری بایت آزمایتگاهی، اثـر توری فولادی حال برشی کامپوزیتی نولادی ترا می مرکب شری مار مرک نـوی برری مرک مولادی حال مرزی با مرک مو مرز بر می مرکب نوین فولادی - بنی و مان مودی و ترکیبی، روی بیشترین ظرفیت باربری دیوار برشی مرکب شکل و چگونگی چیدمان آنها تر ترزیع تنش و حادی مرا می مرکی و چونگی چیدمان آنه مر مرک می وری بار مرک مولای مای مری می مرک مرک مولادی را تای مر

**كلمات كليدى:** ديوار برشى كامپوزيت، سختكننده فولادى T شكل، سختكننده بتني، روش المان محدود.

#### ۱ – مقدمه

دیوارهای برشی فولادی یکی از سیستمهای سازهای مقاوم در برابر نیروهای جانبی است. در این نوع دیوار، کمانش 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

DOI: 10.22034/25.1.71 ]

متصل می شود و به عنوان سخت کننده به منظور تقویت جانبی دیوار برشی فولادی استفاده می شود یا استفاده از پوشش بتنی پیش ساخته یا درجا، برای به تأخیرانداختن کمانش که توسط برشگیرها به ورق فولادی متصل می شود. تبدیل دیوار برشی از نوع فولادی به مرکب باعث کاهش میزان تغییر مکان های جانبی یا به عبارت بهتر باعث افزایش سختی جانبی می شود. علت افزایش سختی جانبی در این سیستم، گسترش میدان کشش قطری و تأخیر در کمانش صفحه فولادی است. با افزایش ضخامت پوشش بتنی

کلی پانل بتنی خواهد شد که این موضوع باعث ترکخوردگی بـتن و جدا شدن برشگیرها و در نهایت کمانش ورق فولادی قبل از مقاومت تسلیم میشود، بنابراین وجود یک درز در حدود ۵–۲/۵ سانتیمتر در اطراف پانل بتنی می تواند این تنش ها را کاهش داده و بسیار کارآمد باشد. این اختلاف به ظاهر ساده نتایج مهمی در عملکرد سیستم، مانند افزایش شکلپذیری و کاهش تخریب در پی خواهد داشت [6, 6]. ژائو و آستانه اصل، مطالعاتی را بـه صـورت تحلیلی و تجربی روی رفتار چرخمهای سیستمهای دیوار برشی مركب انجام دادند [7]. نتايج تجربي نشان داد كه وجود رويه بتنيي مسلح در یک طرف دیوار برشی فولادی که با بولت متصل شده است، از کمانش ورق فولادی جلوگیری میکند. همچنین در صورت تعبیه درز بین قاب و رویه بتنی، رفتاری پایـدارتر حاصـل شده و آسیب کمتری به رویه بتنی وارد می شود. طبق مطالعات ژائو و آستانه اصل [7]، یک راهنمای طراحی در آیین نامه طراحی لرزهای آمریکا وجود دارد [8]. از زمان گنجاندن این سیستم در AISC آیین نامه طراحی لرزهای آمریکا [9]، مطالعات مختلفی در مورد جنبههای مختلف دیوارهای برشی مرکب انجام شده است. حاتمي و رهايي به بررسي اثر فاصله برشگيرها و اثر تغييرات ضخامت پوشش بتنی در دیوارهای برشی مرکب در دو حالت با سخت کننده و بدون سخت کننده پرداختند [10]. آنها به ایـن نتیجـه رسیدند که مقاومت برشی دیوار برشی مرکب با ضخامت پوشش بتنی نسبت مستقیم و با فاصله بین برشگیرها نسبت عکس دارد. شفایی و همکاران به این نتیجـه رسـیدند کـه ضـخامت پانـل بـتن مسلح تاثیر مستقیم بر ظرفیت برشی و مقاومت نهایی در سیستم دیوار برشی مرکب میگذارد و در طراحی ضخامت ورق،های فولادی بسیار موثر است [11]. رهنورد و همکاران به بررسی سختی جانبی سیستم دیوار برشی مرکب پرداختند و به ایـن نتیجـه رسیدند که در صورتی که ورقهای فولادی در دو طرف پانـل بتنـی قرار گیرد سختی بیشتر از حالتی است که ورق فولادی در یک طرف پانل بتنی قرار گیرد [12]. زانگ و همکاران عملکرد دیـوار برشی های فولادی را با اضافه کردن پوشش های بـتن مسـلح روی صفحات فولادی پر کننده مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به تحقیقات آنها پوشش های بتنی مستعد جدا شدن از صفحات فولادی به دلیل چسبندگی ضعیف آنها می باشـد [13]. بـا وجـود تحقیقات قبلی، برای شناسایی دقیق پارامترهای تأثیرگذار بر

سختي ديوار برشي مركب افزايش ولي با افزايش فاصله بين برشگیرها سـختی کـاهش مـییابـد [1]. دیـوار برشـی فـولادی کامپوزیت یک سیستم نوین بـاربر جـانبی و متشـکل از یـک 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 کمانش آن باعث افزایش ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی تا حد تسلیم برش شود [2]. در دیـوار برشى فولادى، برش طبقه توسط عمل ميدان كششى ورق فولادى بعد از کمانش ناشی از فشار قطری تحمل میشود اما در دیـوار برشی فولادی کامپوزیت، پوشش بـتنآرمـه ورق فـولادی را مقیـد کرده و از کمانش آن قبل از تسلیم برشی داخل صفحه جلـوگیری 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 باشـد [3]. دیـوار برشـی فـولادی کامپوزیـت ضمن افزایش ظرفیت برشمی سیستم، مقاومت پانےل را در برابے عوامل مخرب مانند خوردگی، آتش سوزی، ضربه، انفجار و دیگر موارد افزایش داده و باعث کاهش بیش از ۲۵ تـ ۵۰ درصـدی در مصرف فولاد در ساختمان های میان و بلند مرتبه میشود [5]. كاربرد این نوع دیوار به دلیل سختی، مقاومت بالا، شکل پذیری عالی و رفتار مناسب در مقابل بارهای لرزهای رو به افـزایش اسـت [5]. با حضور سخت کننده بتنی در سیستم دیوار برشی فولادی و استفاده از اتصالات مناسب بین ورق،های فولادی و سخت کننده بتنی، کمانش خارج از صفحه ورقهای فولادی محدودتر شده و ورقهای فولادی به ظرفیت برشی کامل خود میرسند و عملکرد لرزهای سیستم به شدت بهبود می یابد. در واقع در هـر دو سیسـتم دیوار برشی فولادی و مرکب پدیده کمانش وجود خواهد داشت با این تفاوت که در دیوار برشی فولادی، کمانش به صورت کلی است و از مقاومت ناحیه محدودی از سطح ورق فولادی استفاده می شود در حالی که در دیوار برشی مرکب، کمانش 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 کمانش

ارزیابی و بهبود عملکرد دیوارهای برشی صفحه فولادی با حضور همزمان سخت کننده های بتنی و فولادی T شکل، تحقیقات بیشتری لازم است. یکی از مباحث مهمی که نادیده گرفته می شود، استفاده تنها از سخت کننده بتنی در دیوار برشی صفحه فولادی (دیوار برشی کامپوزیت) بدون حضور سخت کنندهای فولادی است. بر این اساس، در مقاله حاضر، به بررسی و ارزیابی تاثیر سخت کننده های فولادی T شکل روی دیوار برشی صفحه فولادی با سخت کننده بتنی به روش المان محدود پرداخته می شود. برای فولادی کامپوزیت با و بدون سخت کننده مدل سازی و تحلیل می شود. نتایج نمونه فاقد سخت کننده به عنوان نمونه پایه و مقایسهای با نمونههای دارای سخت کننده در نظر گرفته شده است. معل های عددی با استفاده از نیم افرار المان محدود گرفته شده است.

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

## ۲- مدل سازی عددی و درستی آزمایی 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 تعین فرضیات مدلسازی و ارزیابی دقت است. به همین لحاظ، برای درستی آزمایی مدل نرمافزاری از نمونه فوق استفاده شده [3] که نما و جزئیات آن در شکل (۱) نشانداده 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] Precast Conc. Wall



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) [۷]

Stool Dioto Thiolmora	Pre-cas		Wall Dalta Dia	Doom Soction	Calaran Seation	
Steel Plate Thickness	Thickness of Conc. Wall	Rebar Dia.	<b>Rebar Spacing</b>	wan bons Dia.	Dealin Section	Column Section
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 دقیق تر 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 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. هرجا که امکانیذیر باشد، استفاده از این المان ب ارزیابی و بهبود رفتار دیوارهای برشی صفحه فولادی با استفاده از سختکنندههای ...

0.4 <b>-</b>						
0.17 24.900 2.6	28					
Table 2. Characteristics of concrete used [7]						

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 المان 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 سختکننده های فولادی به ورق فولادی انجام و سپس ورق فولادی با سخت کننده های فولادی جوش شده به صورت افقی قرار گرفته و عمل بتن ریزی رو ی دیوار انجام می گیرد و بعد از خودگیری و سفت شدن بتن، مونتاژ ورق فولادی به صورت جوشی به المانهای مرزی انجام می گیرد.

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



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 تغییرشکل طولی نسبت داده شده است. در بخش مونتاژ نرمافزار، تیر و ستونها و صفحه فلزي به يكديگر بسته (Merge) شدند تا به صورت یکیارچه عمل نمایند. برای هماهنگ کردن شرایط مرزی مدل ساخته شده در نرمافزار با نمونه آزمایشگاهی، در پای ستونها جابهجایی در هر سه جهت انتقالي بسته شد [14] و در بالاي ديـوار جابـهجـايي در راستای افقی در صفحه دیوار آزاد ش. در شکل (۲-الـف) مشخصات هندسی، شرایط مرزی و بارگذاری نمونه به صورت اعمال جابه جایی افقی بر قاب فولادی دارای سخت کننده 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 تدريجي ابعاد المانها به دست آمده است. به دليل قرار گرفتن سخت کنندهها 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 شکل های سازهای از اندرکنش تماس سخت (Hard Contact) استفاده شده است. ابعاد تمام المانها در قسمتهای مختلف دیوار برشمی برابر ۵ میلیمتر است. تعداد المان رويـه بتنـي ٣١٢٣٨، صفحه فلـزى ١٧٤٥٥، تيرهـا ۱۴۰۷۶، سخت کننده ۲۲۹۷ و ستون ها ۳۰۳۲۴ است. در شکل (۳) پروتکل بارگذاری چرخهای اعمالی ATC-24 بر قابهای فولادی مجهز به ديوار برشي مركب نشان داده شده است [7, 17]. با اعمال اين بارگذاری چرخمهای به طبقه بالای قاب فولادی تحت بررسی، منحنی های یوش حاصل از بارگذاری چرخهای استخراج شده و تـأثیر یارامتر های مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. بارگذاری شامل بارگذاری جانبی در بالای ستون در طبقه آخر می باشد که در مدل المان محدود استفاده شده است. پروتکل بارگذاری چرخه ای بر اساس نمونه های آزمایش [16, 14] و نوع بارگذاری به صورت کنترل تغییرمکان 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 می باشد که در حدود ۶ درصد خطا دارد.

**شکل ۵. (الف)** مقایسه منحنی هیسترزیس 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 تـنش تسـلیم قـاب فـولادي و
خرابی سخت کننده بتنی مدل المان محدود، و در شکل (۶ ج) خرابـی
نمونه آزمایشگاهی مدل ژائو و آستانه اصل را نشان داده شده است.
<b>شکل ۶</b> . مقایسه سازوکار خرابی (الف) و (ب) به دست آمده از تحقیق حاضر



**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



**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 هندسهی 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 هیسترزیس 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 [8]. بیشترین نیروی به دست آمده از شبیه سازی تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع به ترتیب برابر شبیه سازی تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع به ترتیب برابر

با مقایسه مدل المان محدود و مدل آزمایشگاهی در شکل های (۶ و ۵) می توان گفت که مدل المان محدود دیـوار برشی مرکب بادقت خوبی نمونه آزمایشگاهی را پیشبینی مى كند. شكل (۶ الف) نواحي كه قسمت هاى فولادى ديوار 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 می شود 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 می شود خرابی قسمت های زیادی از سخت کننده بتنی به همراه ورق فولادی و نواحی از تیرهای قاب ف ولادی به تصویر کشیده شده است. با اضافه کردن سخت کننده های فولادی می توان به اندازه زیادی از آسیب پانل بتنى جلوگيرى كرد. باتوجهبه شكل مذكور، مدل المان محدود دیوار برشی مرکب، با دقت خوبی نمونه آزمایشگاهی را ييش بيني مي کند.

۳– مطالعه پارامتری

#### ۳–۱– اطلاعات پارامتری

بعد از مدل سازی المان محدود و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی، برای بررسی تأثیر سخت کننده های فولادی T شکل در دیوار برشی مرکب مدل های جدیدی ایجاد شدند. متغیرها متشکل از تعداد و چیدمان سخت کننده های فولادی T شکل که متشکل از تعداد و چیدمان سخت کننده های فولادی T شکل که به صورت 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 سخت کننده) مقایسه شده است به ورق متصل است. برای مطالعات پارامتریک، شش دسته بندی برای استفاده از سخت کننده مالمان محدود از مقایه شده است به ورق متصل مدند بررسی و با مدل پایه (بدون سخت کننده) مقایسه شده است. برای مطالعات پارامتریک، شش دسته بندی برای استفاده از سخت کننده ای المان محدود از مطالعات پارامتریک، شش دسته بندی برای استفاده از سخت کننده مای المان محدود از مطالعات پارامتریک، شش دسته بندی برای المان محدود از مطالعات پارامتریک، شمان داده شده اند بارم محدود از مطالعات پارامتریک، شمان داده شده از موش المان محدود از محلود از معال است. مدل های المان محدود از محدود از محلود از معال داده شده ای المان محدود از محدود از معال ای محدود از معان محدود از معال است. مدل های المان محدود از مطالعات پارامتریک، شی دسته بندی برای استفاده از محدود از معال ای محدود از محدود از معال ای محدود از معال ای محدود از محدود از محدود از معال ای محدود از معال ای محدود از مطالعات پارامتریک بر اساس نمونه آزمایش تست شده توسط دارد با بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی، رفتار و عملکرد ادرد با بررسی تأثیر پارامترهای فولادی T شکل را مطالعه کرده تا

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

- ۱- دیواره برشی فولادی بدون سخت کننده (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- دیـوار برشـی فـولادی کامپوزیـت بـا سـختکننـده افقـی
  ۲- دیـوار برشـی فـولادی کامپوزیـت بـا سـختکننـده افقـی
  ۱۹ (CSPSW-0VnH): این مـدل شـامل n سـخت کننـده افقـی
  ۱۹ است. که n شامل تعداد سختکننده میباشد، کـه از ۱ تـا ۳
  ۱۹ است، و حروف ۷ و H به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و
  ۱۹ است، و حروف ۷ و H به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و
  ۱۹ است، و حروف ۷ و اب به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و
  ۱۹ است، و حروف ۷ و اب به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و
  ۱۹ است، و حروف ۷ و اب به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و
  ۱۹ است، و حروف ۷ و اب به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و
  ۱۹ است، و حروف ۷ و اب به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و
- ۳- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با سخت کننده عمودی
   ۳- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با سخت کننده عمودی
   ۵. میاشد که از ۱ تا ۳ است، یعنی این مدلها فقط دارای
   ۳۰ سخت کننده قائم هستند. نمونه ای از این مدل در شکل (۷
   ۷) نشان داده شده است.
- ۴- دیواره برشی فولادی کامپوزیت با ترکیبی از سخت کننده افقی و عمودی (CSPSW-mVnH): این مدل شامل n و m سخت کننده های افقی و عمودی است. که n و m شامل تعداد سخت کننده ها می باشد که از ۱ تا ۳ است. نمونه ای از این مدل در شکل (۷ ت) به تصویر کشیده شده است.
- ۵- دیواره برشی فولادی کامپوزیت با سخت کننده مورب
   ۵- دیواره برشی فولادی کامپوزیت با سخت کننده مورب است.
   ۵ شامل تعداد سخت کننده ها می باشد، که از ۱ تا ۳ است،
   و حرف D نشان دهنده جهت مورب می باشد. نمونه ای از
   این مدل در شکل (۷ ث) آورده شده است.
- ۶- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با ترکیبی از سخت کننده افقی، عمودی و مورب (CSPSW-1D1V1H): این مدل شامل یک سخت کننده مورب، یک عمودی و یک افقی است که در شکل (۷ ج) نشان داده شده است.

Strategies	Models	Type and	number of	stiffeners	Max Load (kN)	Improve (%)
-	CSPSW-NS	-	-	-	2810	Basic Model
	CSPSW-0V1H	1	-	-	2924	4.01
(I)	CSPSW-0V2H	2	-	-	2974	5.84
	CSPSW-0V3H	3	-	-	3004	6.90
	CSPSW-1V0H	-	1	-	2898	3.13
(II)	CSPSW-2V0H	-	2	-	2954	5.12
	CSPSW-3V0H	-	3	-	2978	5.98
	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
(III)	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
	CSPSW-1D	-	-	1	3336	18.71
(IV)	CSPSW-2D	-	-	2	3297	17.33
	CSPSW-3D	-	-	3	3516	25.12
(V)	CSPSW-1D1V1H	1	1	1	3426	21.92

مدلهای پارامتری	ظرفيت باربري	هندسي و حداکثر	۴. پارامترهای	جدول
-----------------	--------------	----------------	---------------	------

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

نتايج حاصل از مطالعه پارامتريک مدلهای المان محدود تحت پوش حاصل از بارگذاری چرخهای در جدول (۴) ارائه شده است. نتايج شامل تاثير سخت كنندهها بر شكل پذيري قاب فولادي، استهلاک انرژی، بررسی آسیب فشاری بر پانل بتنی و حالت های شکست است. در ادامه، نتایج مورد بحث قرار گرفته و استراتژی های در نظر گرفته شده با مدل اصلی مقایسه می شوند.

### ۲-۲- نتایج تحلیل

۳-۲-۱ رفتاردیوار برشی فولادی با سخت کننده فولادی – بتنی در شکل (۸ تا ۱۰)، منحنی های نیرو - جابه جایی مدل های المان محدود ارائه شده و مقايسه منحنى هاى نيرو - جابه جايي مدل های بهبودیافته با مدل پایه انجام شده است. با مقایسه منحنی های نیرو - جابه جایی مدل های پارامتری در شکل (۸ الف)

دسته بندی (I) در مدل های بهبود یافته این دسته بندی رفتار یکنواختی مشابه مدل CSPSW-NS دیده می شود و تغییرات قابل توجهی در ظرفیت آن ها مطابق جدول (۴) مشاهده نمی شود. میزان ماکزیمم افزایش نیروی برشی، نسبت به مدل پایه ۴/۰۱ درصـد تـا ۶/۹ درصد است که میانگین مقدار نیروی برشی پایه برای این حالت استراتژی معادل ۵/۸ درصد می باشد.

با مقايسه منحني هاي نيرو – جابه جايي مدل هاي پارامتري براي شکل (۸ ب) دستهبندی (II)، رفتار یکنواختی مشابه مدل پایـه اسـت و تغییرات قابل توجهی در ظرفیت آن ها مطابق جـدول (۴) مشـاهده نمی شود، و میزان ماکزیمم افزایش نیروی برشی نسبت به مـدل پایـه 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)،



**شکل ۸**: نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخهای (الف) مدلهای دستهبندی

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

متقاطع به دیوار برشی فولادی، بیشترین ظرفیت باربری ۱۵ درصـد

افزایش نشان میدهد [18]. همچنین نتایج آزمایشگاهی وانگ در

صورت استفاده از دیوار برشی کامپوزیت به جای دیوار برشی

بتنی، بیشترین ظرفیت باربری ۱۰۶درصد افزایش نشان میدهد

[19]. با مقایسه منحنی های نیرو – جابه جایی در شکل (۱۰) افزایش

نيرو نسبت به مدلهاي قبلي بيشتر ميباشد.



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

**شکل ۱۰**: نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخهای

مدل های دستهبندی (IV)



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

(ت) دستەىندى (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 سخت کننده اعمودی یا افقی به تنهایی، تأثیر کمی روی بیشترین نیروی برشی پایه دیوارهای برشی ورق فولاد کامپوزیت دارد. مطابق شکل (۹)، میزان افزایش ماکزیمم نیروی برشی مدلهای دسته بندی (III) نسبت به مدل پایه ۷/۷ درصد تا ۱۳/۴۵ درصد است که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی برابر با ۹/۲۳ درصد است.

دستهبندی (III) ترکیبی از سخت کننده های افقی و عمودی میباشد و متناسب با افزایش تعداد سخت کننده ها، ظرفیت برشی پایه نیز افزایش مییابد، اما مطابق با شکل (۹) این افزایشی میباشد. توجه نیست ولی نسبت به نمودار شکل (۸) افزایشی میباشد. مطابق با مقادیر بیشترین برش پایه ارائه شده در جدول (۴)، برای مدل های دستهبندی (IV)، بیشترین نیروی جانبی در مقایسه با مدل پایه به ترتیب ۱۸/۷۱ درصد، ۱۷/۳۳ درصد و ۲۱/۵۲ درصد افزایش نشان می دهد. که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی معادل ۲۰/۳۸ درصد است. در مقایسه با کار آزمایشگاهی جیانگ، حاصل از بارگذاری چرخهای به بررسی تأثیر سخت کننده ها بر مشخصه های شکل پذیری قاب های فولادی تحت بررسی پرداخته می شود. میزان شکل پذیری قاب های فولادی بر اساس نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان مانند اولین تسلیم شدگی بدست آمده از نمودار پوش نیرو – جابه جایی مطابق رابطه زیر تعریف می شود [21]:

$$\mu = \frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y} \tag{1}$$

که در آن  $\sqrt{\Delta}$  تغییر مکان تسلیم و  $\Delta_{0.85}$  تغییر مکان متناظر با هشتاد و پنج درصد بار نهایی است. در شکل (۱۲) منحنی پوش بار – جابه جایی نمونه CSPSW-NS به منظور تعریف پارامترهای مهم منحنی پوش بار – جابه جایی شامل بار تسلیم  $\sqrt{P}$ ، نیروی نهایی مهم منحنی پوش بار – جابه جایی شامل بار تسلیم  $\sqrt{P}$ ، نیروی نهایی به منظور مطالعه تأثیر حالتهای مختلف استفاده از سخت کنندهها، پارامترهای جابه جایی تسلیم، جابه جایی نهایی، نیروی تسلیم، نیروی نهایی و پارامتر شکل پذیری با استفاده از منحنی های پوش نیرو – جابه جایی شکل های (۸ تا ۱۱) استخراج شده و نتایج در جدول (۵) نشان داده شده است. باتوجه به نتایج مشاهده می شود که برای نمونه پایه، شکل پذیری ۸/۸ است و بار نهایی متناظر

شکل ۱۲. تعریف پارامترهای مهم منحنی پوش بار-جابجایی 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 loaddisplacement 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 سختکننده فولادی افزایش مییابد و این نشان دهنده تأثیر مطلوب استفاده از سختکنندهها در هسته بتنی دیوارهای برشی می باشد. در مقابل، برخی از آرایش های



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

مطابق شکل (۱۱) با مقایسه منحنی های نیرو-جابهجایی دسته بندی (V) و مدل بهبود یافته با مدل پایه، ۲۱/۹۲ درصد افزایش در حداکثر برش پایه مشاهده می شود. با مقایسه بین مدل های بهبود یافته و مدل پایه مطابق جدول (۴) نشان می دهد که نیروی جانبی نهایی مدل CSPSW-3D با ۲۵/۱۲ درصد بیشتر در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه (مدل مبنا) را نشان مےدہ۔د [7]. با توجـه بـه شکلهای (۱۰ و ۱۱)، مدلهای بهبود یافته دسته بندی (IV و V) رفتار متفاوتی را در مقایسه با سایر مدل های ارائه شده نشان میدهند. ایـن تفاوت در رفتار سیسـتمهای پیشـنهادی بـه دلیـل عملکرد و سازوکار تسلیم می تواند باشد. افزایش ظرفیت برشی نهایی دیوار برشی کامیوزیت به طور کلی به دلیل وجود سخت کننده های مورب فولادی و سخت کننده بتنبی است. ایس سختكنندهها باعث به تعويـق افتـادن كمـانش ورق ديـوار برشـي میشوند که منجر به افزایش ظرفیت برشی نهایی میشود. سخت کننده بتنی به تنهایی تا حدی ظرفیت دیـوار برشـی کامپوزیـت را افزایش میدهد با اضافه شدن سخت کننده های فولادی T شکل این ظرفیت باز هم افزایش می یاب که مانند نتایج آزمایشگاهی قلهکی و همکارانش، سخت کنندهها با محدود کردن تغییر شکلها و تغییر مکان های مختلف و افزایش سختی سازه، ظرفیت دیـوار برشی صفحه فولادی در تحمل بار جانبی افزایش مییابد [20]. در تأييد اين مسأله افت مقاومت در نمونه مبنا (بدون سخت كننده ف ولادی) کے ناشبی از کم انش ورق ف ولادی در اندرکنش با ستون،های فولادی می باشد.

۳-۲-۲ تأثیر سختکنندهها بر شکلپذیری قابهای تحت بررسی در این بخش با توجه به نموداره ای نیـرو-جابـهجـایی پـوش آید. برای مدل بدون سخت کننده فولادی، ضریب اضافه مقاومت طبق جدول (۵) برابر ۱/۹ و بیشترین اضافه مقاومت مربوط به مدل CSPSW-1D1V1H برابر۲۸٬۵ میباشد که حدود ۱۲۴ درصد افزایش در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه را نشان میدهد [7]. با مقایسه ضریب شکلپذیری و ضریب اضافه مقاومت، مدلهای با سخت کننده های قطری و ترکیبی قطری و صلیبی دسته بندی (VI و V) بیشترین ضریب شکل پذیری و ضریب اضافه مقاومت را نسبت به مدل پایه دارند. مختلف سخت کننده ها باعث کاهش شکل پذیری نسبت به نمونه مبنا می شوند. با بررسی نتایج مشاهده می شود که مدل های بهبود یافته دستهبندی (IV و V) دارای ضریب شکل پذیری بالاتری بوده و مدل CSPSW-3D دارای بیشترین ضریب شکل پذیری است که حدود ۲۶ درصد افزایش شکل پذیری در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه [7]. ضریب اضافه مقاومت (**Ω**)، یکی دیگر از پارامترهایی است که در جدول (۵) بررسی شده است. ضریب اضافه مقاومت از تقسیم نیروی نهایی به نیروی تسلیم بدست می

**جدول ۵**. تأثیر پارامترهای هندسی بر ضریب شکل پذیری و اضافه مقاومت مدلهای مورد بررسی

<u> </u>	Models	Yielding		Ultimate		Ductility		Over strength
Strategies		Py (kN)	Δy (mm)	P <sub>max</sub> (kN)	$\Delta_{\max}$ (mm)	μ	$\Delta_{0.85}$	Ω
-	CSPSW-0V0H	1471.5	33.25	2810	210.45	281.74	8.47	1.90
	CSPSW-0V1H	1685.6	32.08	2924	210.02	281.16	8.76	1.73
<b>(I</b> )	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
( <b>II</b> )	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
	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
(III)	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
( <b>IV</b> )	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 ذوزنقهای 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

۳-۲-۳- تأثیر سخت کننده ها بر استهلاک انرژی قابهای تحت بررسی در شکل (۱۳) نمودار میلهای استهلاک انرژی مدلهای عددی ارائه شده است. مساحت زیر نمودار منحنی های چرخهای نشانگر میزان استهلاک انرژی می باشد. مفهوم چرخهای (هیسترزیس) اصطلاحی که در ادبیات مهندسی عمران به ویژه در مهندسی زلزله به چشم می خورد و با اصطلاحاتی خصوصا پاسخ لرزهای مناسب، قابلیت جاذب انرژی چرخهای، حلقه های چاق و یا لاغر، کاهش سختی و افت مقاومت در منحنی چرخهای شناخته می شود. منحنی بار – تغییر شکل تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی منحنی چرخه ای یا همان هیسترزیس نامیده می شود [2]. هر چه مساحت زیر نمودار چرخهای بزرگتر باشد میزان استهلاک انرژی بیشتر خواهد بود و می تواند انرژی نیروهای جانبی مثل زلزله را بیشتر مستهلک نماید و از شدت و آسیبهای مخرب زلزله کم

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.

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

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

 
 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

# ۳–۲–۴– تأثیر سختکننده های فـولادی T شـکل بـر آسـیب فشاری سخت کننده بتنی

حالتهای کانتور آسیب فشاری بتن (DAMAGEC) مدل های المان محدود در شکل (۱۷) برای تعدادی از مدل ها با شماره (۱ تا ۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در مدل (۱) CSPSW-NS (مدل پایه) دیده می شود، آسیب فشاری کل پانل بتنی در طبقات اول و دوم به وضوح دیده میشود که ناشی از کمانش خـارج از صـفحه ورقهای فولادی میباشد و باعث خرابی کلی در دیوار بتونی شده است. با اضافه کردن سختکننده های 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 مدل های (۲ و ۳)، اضافه کردن سخت کننده های افقی یا عمودی به تنهایی تأثیر زیادی در جلوگیری از شکست بنن ندارند. در مدلهای با سختکننده های افقی و عمودی ترکیبی، همانطور که در شکل برای مدل های (۴، ۵ و ۶) نشان داده شده است، شکست فشاری بتن محدود به مابین سخت کننده ها شده و سطح پیوسته آسیب بتن در مدل پایه، به سطوح کوچکتری مابین سختکننده ها کاهش پیدا کرده است. این سختکنندهها نیز تأثیر زیادی در جلـوگیری از آسـیب و خرابی بتن ندارند. ولی در مدلهای (۷ تا ۱۰) با سختکننده های مورب و ترکیبی، آسیب و خرد شدن بتن به سطوح کوچکتر مابین سخت کنندهها محدود شده و به صورت چشمگیری از شکست پانل بتنی کاسته شده است. شکست و خرابی بـتن در مـدلCSPSW-3D، آسیب بسیار کمتری نسبت به سایر مدلها پیدا کرده و در مقایسـه بـا نتايج مدل ژائو و آستانه بسياركمتر مي باشـد [7]. فلسـفه اسـتفاده از یوشش بتنی در این گونه دیوارها، جلوگیری از کمانش ورق فـولادی نازک و تغییر مود باربری ورق از حالت مقاومت پس کمانشی (میدان کششی قطری) به مقاومت برشی داخل صفحه بوده که بدین ترتیب مقاومت جانبی سیستم افزایش می یابد. که مانند نتایج آزمایشگاهی وانگ و همکارانش بتن نقش مهمی در مقاومت كمانشى صفحه فولادي دارد [19]. علت اصلى كاهش خرابي دیوارههای بتونی کمانش کمتر خارج از صفحه یانل است، بنابراین استفاده از سختکنندههای مورب نسبت به سختکنندههای افقمی و عمودی منجر به جلوگیری بیشتری از کمانش ورق فولادی مے شود که در نتیجه باعث کاهش آسیب در دیواره بتن می شود، همانطور که در شکل (۱۵) برای مدل (۹) نشان داده شده است.

**شکل ۱**۵. حالتهای آسیب فشاری سخت کننده 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 (۱۶) مراحل خرابی مدل CPSW-0VOH نشان داده شده است. ایـن مراحل خرابی بـر اساس مشاهدات بـه دست آمـده از تحلیل های المان محدود استنباط شده است همانطور کـه مشاهده میشود، در ابتدا بخشی از تیرهای میانی وارد ناحیـه پلاسـتیک شـده و در ادامه آن اعضای فولادی این قسمتها دچار تغییر شکل های بـزرگ 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 پوشـش بتنی به صورت کامل تخریب شده و از بدنه دیوار برشی جدا میشود.

### CPSW-0V0H **شکل ۱۶.** مراحل خرابی بارگذاری چرخهای در نمونه (ترتیب مراحل خرابی از راست به چپ می باشد)



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

در شکل (۱۷) مراحل خرابی به دست آمده از تحلیل های حاصل از بارگذاری چرخیهای در نمونیه CPSW-1D1V1H برحسب موقعیتهای مختلف روی نمودار نیرو-جابهجایی نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می شود تا نقطه A نمودار به صورت خطی میباشد و در این بخش هیچ قسمت از سازه وارد ناحیه پلاستیک نمی شود. با افزایش بیشتر نیرو، در نقطـه A خرابـی به صورت تسلیم در بخشهای فولادی سازه آغاز شده که در شکل قابل مشاهده مي باشد. تا اين مرحله به علت وجود فاصله كناري بین پوششهای بتنی و ستونهای قاب، نیروی زیادی به پوشش بتنی وارد نمی شود. افزایش بیشتر نیرو سبب مےشود تا نیـرو از طریق تقویتکننده ها به پوشـش بتنـی وارد شـده و در نتیجـه آن سختی سازه دوباره به صورت افزایشی می یابد. در این مرحله تخریب پوشش بتنی آغاز شده و در موقعیت B تخریب در پوشش بتنی دهانه بالایی شدت می یابد. در ادامه با درگیر شدن پوشش بتني طبقه پاييني، مجدداً سختي سازه حالت افـزايش پيـدا كـرده و مقاومت سازه در برابر تغییر شکل افزایش مییابد. تـا رسـیدن بـه نقطه C خرابی پوشش بتنی طبقه پایینی نیز رشـد پیـدا کـرده و در نتیجه تخریب کامل یوشـش.هـای بتنـی از نقطـه D بـه بعـد سـازه مقاومت خود را از دست داده و دچار تخریب در ستونها می شود. چنین رفتار مشابهی با توجه به شکل (۱۸) که مراحل خرابی در نمونه CPSW-3V3H برحسب موقعیتهای مختلف روی نمودار نيرو - جابهجايي را نشان مي دهد قابل ملاحظه است.

**شکل ۱**۷. مراحل خرابی به دست آمده از تحلیلهای حاصل از بارگذاری چرخهای در نونه CPSW-1D1V1H برحسب موقعیتهای مختلف روی



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 ۱**۸. مراحل خرابی به دست آمده از تحلیل های حاصل از بارگذاری چرخهای در نمونه CPSW-3V3H برحسب موقعیتهای مختلف بر روی



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

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار جانبی دیوار برشی مرکب با سختکننده فولادی T شکل مورد بررسی قرار گرفت و اثر پارامترهایی مانند تعداد سختکننده های T شکل، نوع چیدمان شامل عمودی، افقی، مورب و ترکیبی، روی سختی سیستم، ضریب شکلپذیری، ظرفیت نهایی دیوار برشی مرکب، و حالتهای 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 میدهند. این تفاوت در رفتار سیستمهای
   پیشنهادی به دلیل عملکرد وسازوکار تسلیم میباشد.
- 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 کمانش کلی ورق به کمانش موضعی تبدیل می شود.
- ۵- استفاده از سخت کننده های مورب نسبت به سخت کننده های افقی و عمودی منجر به جلوگیری بیشتری از کمانش ورق فولادی می شود که در نتیجه باعث کاهش آسیب و شکست در پانل بتن می شود.
- ۶- سختکننده ها با آرایش قطری نسبت به دیگر سختکننده ها بیشتر مستهلک کننده انرژی می باشند و مدل قطری بیشتر مستهلک کننده انرژی نسبت به مدل یایه است.
- ۷- بیشترین ضریب شکل پذیری و ضریب اضافه مقاومت قاب فولادی دارای سخت کننده، برای مدلهای CSPSW-3D و CSPSW-1D1V1H بدست آمده است که بترتیب حدود ۲۶ و ۱۲۴ درصد بیشتر از نمونه مبنای بدون استفاده از سخت کنندها می باشد.

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 Kioumarsi, 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:

- 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 سخت کننده های فولادی دیگر مانند ناودانی، نبشی و غیره بر روی دیوار برشی های فولادی با سخت کننده های بتنی - فولادی.
- ۵- مطالعه رفتار تأثیر سخت کننده های پانل بتنی در دو سمت ورق فولادی دیوار برشی فولادی با سخت کننده های بتنی – فولادی.
   ۶- بررسی تأثیر بتن با مقاومت بالا بر روی دیوار برشی فولادی با سخت کننده های بتنی – فولادی.

- 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 Poblishing 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*

DOI: 10.22034/25.1.71 ]

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

Hadi Zarrintala<sup>1</sup>, Ahmad Maleki<sup>2</sup>\*, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, School of Civil Engineering, Marageh Branch, Islamic Azad University

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Marageh 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 sheat 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 sheat 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.