

# Non-linear analysis of simultaneous effect of diagonal and horizontal-vertical stiffeners on behavior of steel plate shear wall

Seyed Mohammad Farnam

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Daneshestan Institute of Higher Education, Arak, Iran.

Mohammad Ali Haji Arbabi

MS. student, Department of Civil Engineering, Daneshestan Institute of Higher Education, Arak, Iran.

Omid Bamshad\*

Expert of concrete and construction materials Lab., Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

# تحلیل غیرخطی رفتار سخت کننده های قطری، افقی- قائم و ترکیبی در دیوار برشی فولادی

سید محمد فرنام

استادیار، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی دانشستان، اراک، ایران

محمد علی حاجی اربابی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی دانشستان، اراک، ایران

امید بامشاد\*

کارشناس آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

\*Corresponding author's email address:

Omid.bamshad@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹

How to cite this article:

Seyed Mohammad Farnam, Mohammad Ali Haji Arbabi, Omid Bamshad, Non-linear analysis of simultaneous effect of diagonal and horizontal-vertical stiffeners on behavior of steel plate shear wall, *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)*, 2023; 7(2):87-93.

ارجاع به مقاله:

سید محمد فرنام، محمد علی حاجی اربابی، امید بامشاد، تحلیل غیرخطی رفتار سخت کننده های قطری، افقی- قائم و ترکیبی در دیوار برشی فولادی، *مهندسی و مدیریت ساخت*، ۱۴۰۱؛ ۷(۲): ۸۷-۹۳.

## Abstract

The steel plate shear wall (SPSW) as a lateral bearing system in high-rise buildings has been focused in recent decades. Today, these lateral bearing members with high ductility, high energy absorption, and high initial stiffness are used in new buildings as well as rehabilitation of existing buildings, especially in earthquake-prone countries. The use of stiffeners in the SPSW reduces the thickness of the infill plate, and increases the strength and stiffness of the SPSW. The aim of this study is to present a new arrangement for stiffeners with high performance in order to achieve higher shear strength and lateral stiffness. For this purpose, after validating the numerical modeling, several SPSWs with common (horizontal-vertical and diagonal arrangement) and proposed arrangement (diagonally along with horizontal-vertical) of stiffeners were modeled in Abaqus finite element software and were subjected under monotonic and cyclic loads. The results showed that the suggested arrangement provided more confinement for the infill plate and enhanced the final shear strength of the SPSW by 47.5%.

## Keywords

Steel plate shear wall, arrangement of stiffeners, finite element analysis, shear strength, energy absorption.

## چکیده

دیوار برشی فولادی به‌عنوان عضو باربر جانبی در برابر نیروهای جانبی زلزله و باد در ساختمان‌های بلند در چند دهه اخیر مطرح و مورد توجه قرار گرفته است. امروزه این اعضای باربر جانبی با شکل‌پذیری بالا، ظرفیت جذب و استهلاک انرژی فراوان و سختی اولیه‌ی بالا در ساختمان‌های جدید و همچنین تقویت ساختمان‌های موجود به‌خصوص در کشورهای زلزله‌خیز استفاده می‌شوند. استفاده از سخت‌کننده‌ها در دیوار برشی فولادی سبب کاهش ضخامت دیوار برشی، افزایش مقاومت و سختی در دیوار برشی فولادی می‌گردد. هدف این مطالعه ارائه چیدمان جدید سخت‌کننده با عملکرد بالاتر از سایر چیدمان‌ها به منظور دستیابی به مقاومت برشی و سختی جانبی بالاتر می‌باشد. بدین منظور پس از صحت‌سنجی مدل سازی عددی، چند مدل دیوار برشی فولادی با چیدمان سخت‌کننده رایج در سازه‌ها از جمله چیدمان افقی- قائم و قطری، با چیدمان پیشنهادی به صورت قطری به همراه افقی- قائم به‌وسیله نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس تحت بارگذاری چرخه ای و یک طرفه قرار گرفته و در انتها تحلیل و مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که چیدمان جدید ارائه شده محصور شدگی بیشتری برای ورق میانی ایجاد کرده و مقاومت برشی نهایی دیوار برشی فولادی را ۴۷٫۵٪ افزایش می‌دهد.

## کلمات کلیدی

دیوار برشی فولادی، چیدمان سخت‌کننده‌ها، تحلیل اجزا محدود، مقاومت برشی، استهلاک انرژی.

زلزله‌خیز همچون آمریکا و ژاپن به‌کار گرفته شده است [۳]. از جمله ساختمان‌های ساخته شده با دیوار برشی فولادی می‌توان به ساختمان کازمپالوتن لاس‌وگاس در سال ۲۰۰۹، ساختمان اداری ۳۵ طبقه در کوبه و بیمارستان ۶ طبقه‌ای در لس‌آنجلس که دو زلزله

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر توجه و علاقه گسترده‌ای به کاربرد دیوار برشی فولادی به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی در ساختمان‌ها صورت گرفته است [۱،۲]. این سیستم در ساختمان‌های جدید و همچنین تقویت ساختمان‌های موجود به‌خصوص در کشورهای



7 (2), 2023

دوره ۷، شماره ۲

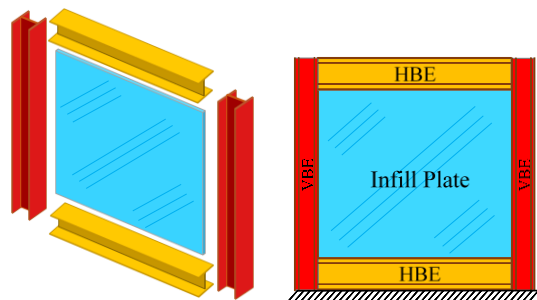
زمستان ۱۴۰۱

فصلنامه پژوهشی



نثر ریج و کوبه را با رفتار خوب و کمترین خسارت پشت سر گذاشت [۴].

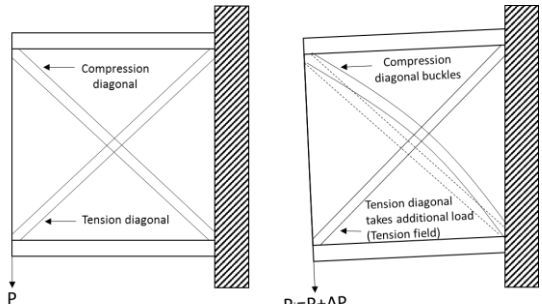
به طور کلی دیوار برشی فولادی از یک ورق فولادی تشکیل شده که توسط یک قاب مرزی محاط شده است. بر اساس تحلیل‌ها، دیوار برشی فولادی مشابه تیر ورق طره‌ای عمل می‌کند که در آن ستون‌ها به منزله بال‌های آن، تیرهای طبقات همانند سخت‌کننده‌های آن و ورق فولادی به عنوان جان تیر می‌باشند. در این سیستم اتصال تیرها به ستون‌ها می‌تواند صلب یا ساده باشد [۵]. در تصویر ۱ اعضای دیوار برشی فولادی نشان داده شده است [۳].



تصویر ۱ اعضای دیوار برشی فولادی [۳]

واگنر در سال ۱۹۳۱ نخستین پژوهش مهم را بر روی رفتار پس کمانشی تیر ورق انجام داد، او با انجام آزمایش‌هایی نظریه میدان کششی قطری را ارائه داد [۶]. یکی از مسائل شناخته شده در تیرورق‌ها، میدان کششی قطری است وقتی ورق کمانش می‌کند، مقاومت سازه با تشکیل میدان کششی وارد مرحله جدیدی از رفتار خود می‌شود به گونه‌ای که در جهت فشاری ورق مقاومت نمی‌کند اما در جهت کششی مانند اعضای کششی قاب‌های مهاربندی شده همچنان مقاومت می‌کند. این رفتار به خوبی در دیوارهای برشی فولادی تصویر ۲ دیده می‌شود [۶].

چن و چانگ در سال ۲۰۰۶ به بررسی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی با فولاد کم مقاومت پرداختند [۷]. این فولادها در ورق‌های دیوار برشی فولادی و فولاد معمولی در قاب محصورکننده سیستم مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که دیوار برشی فولادی با ورق‌های کم مقاومت قابلیت ۳ تا ۶ درصدی کنترل زاویه دررفت طبقه را دارد. همچنین یک مدل دو نیرویی برای شبیه‌سازی رفتار الاستیک و غیرالاستیک سیستم‌های دیوارهای برشی فولادی مورد آزمایش قرار گرفت [۷].



تصویر ۲ میدان کشش قطری ۱ در دیوار برشی فولادی [۶]

1 Diagonal tension field

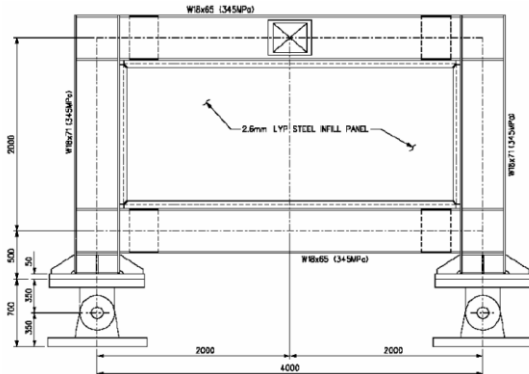
صبوری قمی و همکاران «روش اندرکنش ورق میانی و قاب پیرامونی» یک روش مدل‌سازی را با بررسی رفتار ورق میانی و قاب پیرامونی را یک بار به صورت جداگانه و یک بار به صورت اندرکنشی، ارائه کردند [۸]. تأثیر مدل اندرکنش از طریق مقایسه نتایج تحلیل با نتایجی که از آزمایشات تیملر و کولاک [۹]، ترومپوش و کولاک [۱۰]، درایور و همکاران [۱۱] و دیگر نتایج به دست آمده بود، مقایسه گردید [۱۲]. درایور و همکاران یک نمونه دیوار برشی فولادی یک طبقه یک دهانه را در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند و با استفاده از مدل اجزا محدود، نمونه آزمایش شده را تحلیل نمودند [۱۱].

خرازی و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک مدل عددی موسوم به اندرکنش قاب-ورق اصلاح شده را برای تحلیل برش و خمش دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر پیشنهاد کردند و برای ارزیابی اعتبار روش پیشنهادی خود از نتایج آزمایش درایور و همکاران [۱۱] با فرض زاویه ۴۵ درجه برای زاویه میدان کشش استفاده کردند [۱۳]. این مدل رفتار دیوار برشی را به سه قسمت کمانش ارتجاعی، پس-کمانش و تسلیم شدن تقسیم می‌کند. در مرحله اول با فرض رفتار جداگانه برای قاب و ورق میانی، تحلیل برشی انجام شده و نمودار برش-انحراف جانبی برای قاب و ورق میانی به طور جداگانه ترسیم می‌شود. سپس با ترکیب آن دو رفتار برشی دیوار برشی فولادی حاصل می‌شود. در مرحله دوم یک تحلیل خمشی با فرض عملکرد یکپارچه برای قاب و ورق میانی روی دیوار برشی انجام گرفته و در مرحله سوم اندرکنش بین رفتار برشی و خمشی، تحلیل دیوار برشی را کامل می‌کند [۱۳]. همچنین محققان مختلفی بر اساس مدل اجزای محدود که دارای قابلیت مدل‌سازی سه‌بعدی کمانش الاستیک خارج از صفحه دیوار برشی فولادی می‌باشد، رفتار پس کمانشی ورق نازک دیوار برشی فولادی را مورد مطالعه قرار دادند که می‌توان به مجلسی و همکاران [۱۴]، مرتضوی و همکاران [۱۵]، قاسمیه و حیدری [۱۶] و رحمزاده و همکاران [۱۷] اشاره کرد.

علی نیا و دستفان در یک مطالعه عددی، اثر سخت شدگی را بر مقاومت نهایی و رفتار چرخه‌ای پانل‌های سخت‌شده و سخت‌نشده بررسی کردند. مطابق نتایج، پیشنهادی برای نسبت صلبیت سخت‌کننده‌ها برای رسیدن به رفتار بهینه مطرح شد. همچنین مطالعات نشان داد که استفاده از ورق کم مقاومت می‌تواند نیاز به سخت‌کننده‌ها را کاهش دهد [۱۸].

ناطق و علوی رفتار غیرخطی دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های قطری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سخت‌کننده‌های قطری، اثرات ناشی از ورق فولادی پرکننده را کاهش می‌دهند. همچنین مقاومت برشی حد الاستیک و مقاومت نهایی برشی سیستم نسبت به دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده افزایش می‌یابد [۱۹]. صبوری قمی و سجادی در سال ۲۰۱۲ رفتار دیوار برشی فولادی تقویت شده و تقویت نشده را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که به کار بردن سخت‌کننده‌ها میزان جذب انرژی و مقاومت برشی دیوار را افزایش می‌دهد [۲۰]. پیراسته و کیانی به بررسی اثر سخت‌کننده بر روی دیوار برشی فولادی پرداختند [۱۳].

طراحی نمودند. این نمونه‌ها در دانشگاه تایوان تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند (تصویر ۴). در این مدل تیرها به صورت صلب به یکدیگر متصل شده‌اند و تکیه‌گاه‌ها به صورت مفصلی است و فاصله تکیه‌گاه‌ها تا مرکز تیرها ۸۵ سانتی‌متر می‌باشد [۲۱]. در صفحه دیوار برشی فولادی از فلز کم مقاومت و در مابقی اجزا از فلز A572 Gr.50 استفاده می‌گردد که تنش تسلیم و تنش نهایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

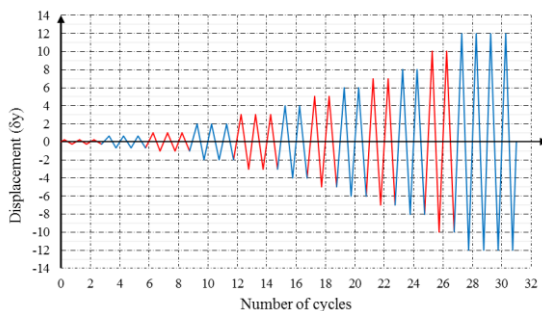


تصویر ۴ جزئیات دیوار برشی فولادی ویان و برونو [۲۱]

جدول ۱ تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد المان‌های مرزی و ورق میانی

نوع فولاد	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)
A572 Gr.50	۳۴۵	۴۵۰
کم مقاومت	۱۶۰	۳۰۰

در این پژوهش از بارگذاری چرخه‌ای استفاده می‌شود (تصویر ۵). در بارگذاری چرخه‌ای احتیاج به معرفی یک دامنه نوسان وجود دارد. در واقع دامنه نوسان تاریخچه‌ای برای بارگذاری مورد نظر است. بارگذاری چرخه‌ای در این پژوهش براساس آیین‌نامه ATC-24 می‌باشد [۲۲].



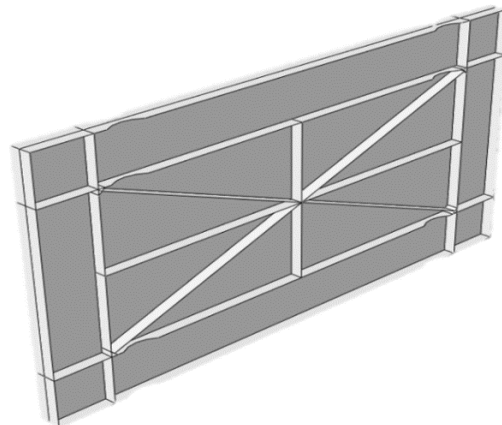
تصویر ۵ چرخه بارگذاری بر اساس آیین‌نامه ATC24 [۲۲]

مقایسه نتایج نمودار چرخه‌ای دیوار برشی مدل شده در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس با نمونه آزمایشگاهی ویان و برونو حاکی از انطباق قابل قبول سختی و مقاومت تا جابه‌جایی در حدود ۵ سانتی‌متر می‌باشد (تصویر ۶). بیشترین مقدار اختلاف سختی بارگذاری و سختی باربرداری بین دیوار برشی مدل شده در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس با نمونه آزمایشگاهی ویان و برونو به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۵ است که نشان دهنده دقت مدل‌سازی می‌باشد. همچنین اختلاف تنش تسلیم و تنش نهایی بین مدل آزمایشگاهی و منحنی پوش

در مقاوم‌سازی سازه‌ها، استفاده از دیوار برشی فولادی تقویت‌شده در طراحی سازه‌های بلند، سازه‌های صنعتی و در شرایطی که محدودیت‌های عملکردی نسبت به کماتش خارج از صفحه (به خصوص در ناحیه الاستیک) وجود دارد، نسبت به سایر سیستم‌ها ترجیح داده می‌شود [۴]. پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهند که بهترین چیدمان سخت‌کننده‌ها از بین سخت‌کننده‌های افقی، قائم، افقی-قائم، قطری و مورب، سخت‌کننده‌های قطری می‌باشند، که نسبت به مدل‌های دیگر ظرفیت باربری بیشتر و تغییرشکل کمتری دارد. در این پژوهش ظرفیت باربری دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های قطری به صورت هم‌زمان با سخت‌کننده‌های افقی-قائم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- مدل‌سازی

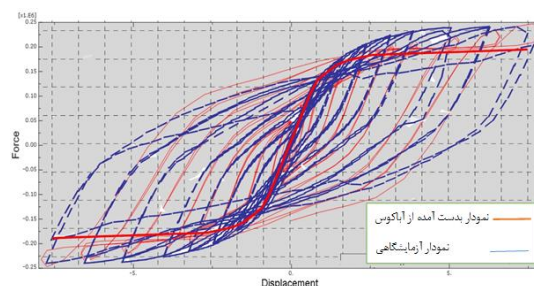
در این مطالعه چیدمان جدید سخت‌کننده‌ها به صورت قطری به همراه افقی و قائم در نظر گرفته شده است که در تصویر ۳ نشان داده شده است. همچنین مدل‌های دیگری مانند دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده، دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده افقی-قائم و دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قطری نیز در این مطالعه در نظر گرفته شده است.



تصویر ۳ دیوار برشی فولادی با چیدمان جدید سخت‌کننده قطری به همراه افقی و قائم

در تحلیل نمونه، رفتار غیرخطی هندسی و مصالح در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی تیر، ستون و ورق فولادی پرکننده در نرم‌افزار آباکوس از المان S4R استفاده شده است. حرف S بیانگر این است که این المان از جنس پوسته جدار نازک می‌باشد. عدد ۴ به معنی آزادی حول محور ۱ و حرف R به معنی انتگرال‌گیری کاهش یافته می‌باشد که به وسیله نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس مدل‌سازی می‌شود. ابعاد المان و شبکه‌بندی مدل با سعی و خطا به شکلی به دست آمده است که با تغییر ابعاد شبکه از مقادیر بزرگ به سمت مقادیر کوچک، تغییر قابل توجهی در پاسخ مدل ایجاد نشود. برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده، از مدل آزمایشگاهی ویان و برونو که یک دیوار برشی فولادی یک دهانه و یک طبقه به طول ۴ متر و ارتفاع ۲ متری باشد و از دو ستون و دو تیر با مقطع کاهش یافته تشکیل شده است، استفاده شده است [۲۱]. ویان و برونو در مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه بوفالو سه نمونه دیوار برشی فولادی با مقاومت تسلیم کم را

مدل سازی عددی به ترتیب برابر با ۱٪ و ۱۲٪ می باشد که قابل قبول است. بعلاوه، مشاهده می گردد که میزان لاغر شدگی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی بسیار نزدیک به یکدیگر بوده است، به گونه ای که نمونه آزمایشگاهی مقدار بسیار اندکی در حدود ۳ الی ۴٪ لاغر شدگی بیشتری را از خود نشان داده است. با توجه به موارد ذکر شده، می توان رفتار دیوار برشی مدل سازی شده را تا حد قابل قبولی مطابق با رفتار نمونه آزمایشگاهی دانست.



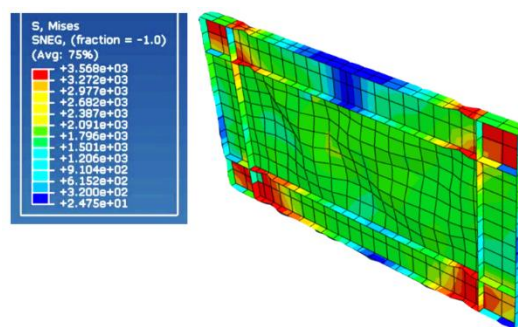
تصویر ۶ مقایسه نمودار چرخه ای نمونه آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری

### ۳- نتایج مدل سازی

تمامی مدل ها تحت بارگذاری چرخه ای و یک طرفه به وسیله نرم افزار اجزا محدود آباکوس قرار گرفتند. پس از تحلیل، مدل های دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده و با سخت کننده های افقی- قائم، قطری و قطری به همراه افقی - قائم در قالب توزیع میدان تنش از نرم افزار استخراج و با یکدیگر مقایسه می شوند.

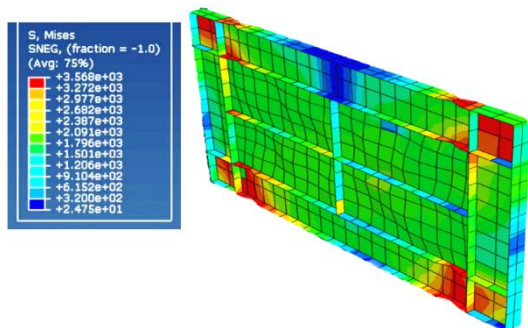
#### ۳-۱- توزیع میدان تنش

در مدل دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده تنش زیادی به دو انتهای المان های افقی و قائم و چشمه های اتصال وارد شده که با رنگ قرمز نمایش داده شده است. به دلیل اعمال بار جانبی در وسط تیر بالایی، هیچ نیرویی را این قسمت تحمل نمی کند که با رنگ آبی نمایش داده شده است. در تصویر ۷ توزیع میدان تنش در خروجی نرم افزار به صورت کامل قابل مشاهده است. همان گونه که مشاهده می گردد، ورق میانی کاملاً دچار کمانش شده و به جز چند ناحیه که در محدوده تنش ۹۱۰ مگاپاسکال قرار دارند، بقیه قسمت های ورق میانی در محدوده تنش ۱۷۹۶ مگاپاسکال قرار گرفته است. همچنین اعوجاج بیش از حد ورق میانی باعث شده است که در برخی از قسمت های مرکزی ورق میانی، محدوده تنش به ۲۹۷۷ مگاپاسکال نیز برسد.



تصویر ۷ توزیع میدان تنش در دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده

در مدل دیوار برشی فولادی با سخت کننده افقی - قائم (تصویر ۸) همچنان تنش زیادی بر دو انتهای المان های افقی و قائم و چشمه های اتصال وارد شده است. از نظر کمانش ورق میانی، به دلیل وجود سخت کننده و کاهش طول آزاد کمانش، کمی از میزان کمانش آن نسبت به حالت بدون سخت کننده کاسته شده ولی همچنان کمانش زیادی وجود دارد. همچنین ملاحظه می شود که به دلیل افزایش مقاومت ورق میانی در برابر کمانش، ورق میانی تنش های بیشتری را نسبت به حالت بدون سخت کننده تجربه می کند. به گونه ای که قسمت هایی از ورق که تنش ۹۱۰ مگاپاسکال را تجربه می کنند بسیار کاهش یافته و غالب قسمت های ورق تنش هایی در محدوده ۱۷۹۶ مگاپاسکال الی ۲۳۸۷ مگاپاسکال را تجربه می کند. بعلاوه ملاحظه می گردد که سخت کننده قائم متحمل تنش های زیادی نشده و در محدوده ۶۱۵،۲ مگاپاسکال الی ۱۵۰۱ مگاپاسکال قرار دارد. اما سخت کننده افقی در اکثر نواحی متحمل تنش هایی در محدوده ۱۵۰۱ مگاپاسکال الی ۲۹۷۷ مگاپاسکال شده است که نشان می دهد سخت کننده قائم نسبت به سخت کننده افقی تقریباً بی اثر بوده است و محل مناسبی را به لحاظ جلوگیری از کمانش ورق میانی پوشش نداده است. لازم به ذکر است که در این نوع چیدمان، هیچ یک از سخت کننده های افقی و قائم دچار کمانش نشده اند و نقش مستقیم در تحمل نیروی جانبی وارده بر دیوار برشی ندارند، زیرا در محل اتصال سخت کننده ها به المان های قائم و افقی، هیچ گونه تمرکز تنش در این اعضا مشاهده نمی گردد.



تصویر ۸ توزیع میدان تنش در دیوار برشی فولادی با سخت کننده افقی- قائم

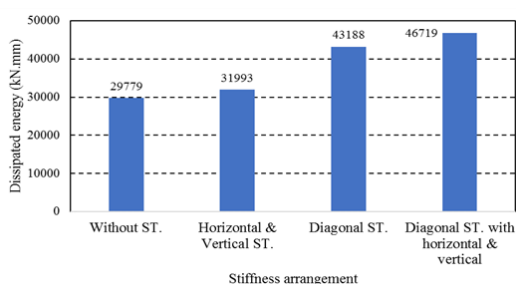
با توجه به توزیع میدان تنش در مدل دیوار برشی فولادی با سخت کننده قطری (تصویر ۹) مشاهده می گردد که همچنان تنش زیادی بر دو انتهای المان های افقی و قائم و چشمه های اتصال وارد شده است، اما این تنش نسبت به دو مدل قبل به شدت کاهش یافته و انتهای ستون ها از حالت بحرانی خارج گردیده است. در این نوع سخت کننده، بر خلاف دیوار برشی فولادی با سخت کننده افقی- قائم، ورق میانی دچار کمانش شده است و از شدت کمانش کلی به ورق میانی کاسته شده است.

از نظر کمانش ورق میانی، به دلیل ایجاد قرارگیری سخت کننده در خلاف جهت میدان کششی قطری، کمی از میزان کمانش آن نسبت به حالت با سخت کننده افقی-قائم کاسته شده ولی همچنان



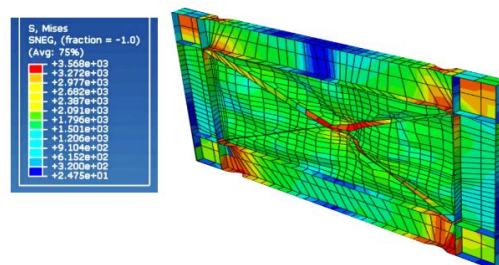
### ۳-۲- استهلاک انرژی

میزان استهلاک انرژی توسط دیوار برشی فولادی با چیدمان‌های مختلف سخت‌کننده در تصویر ۱۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که میزان استهلاک انرژی دیوار برشی بدون سخت‌کننده و دیوار برشی با سخت‌کننده افقی - قائم اختلاف اندکی با یکدیگر دارند. به‌گونه‌ای که می‌توان گفت در صورت استفاده از سخت‌کننده افقی - قائم، مساحت نمودار چرخه‌ای حدود ۷ درصد نسبت به دیوار برشی بدون سخت‌کننده افزایش خواهد یافت. دلیل این امر آن است که میزان لاغر شدگی نمودار چرخه‌ای این دو دیوار برشی بسیار نزدیک به هم بوده و در نتیجه مجموع مساحت چرخه‌های این دو چیدمان اختلاف اندکی با یکدیگر دارند.



تصویر ۱۱ مقایسه استهلاک انرژی چیدمان‌های مختلف سخت‌کننده در دیوار برشی فولادی

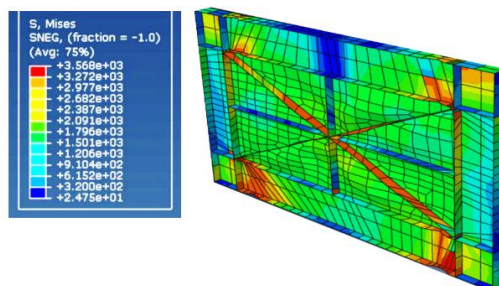
کمانش زیادی وجود دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که در این چیدمان، سخت‌کننده‌ها نیز در تحمل نیروی جانبی به‌طور مستقیم نقش مهمی ایفا می‌نمایند، زیرا در محل اتصال سخت‌کننده‌ها به المان‌های قائم و افقی، تمرکز تنش زیادی در این اعضا مشاهده می‌شود. در نتیجه ورق میانی تنش‌های کمتری را نسبت به حالت سخت‌کننده افقی-قائم تجربه کرده است، به‌گونه‌ای که تقریباً نیمی از ورق متحمل تنش ۹۱۰ مگاپاسکال الی ۱۵۰۱ مگاپاسکال و نیم دیگر آن متحمل تنش ۱۵۰۱ مگاپاسکال الی ۲۰۹۱ مگاپاسکال شده است. بعلاوه ملاحظه می‌گردد که هر دو سخت‌کننده متحمل تنش‌های تقریباً برابری شده و میزان تنش در قسمت‌های مرکزی سخت‌کننده‌ها که بیشترین تمایل ورق میانی به کمانش در این قسمت وجود دارد، حداکثر مقدار ۳۲۷۲ مگاپاسکال الی ۳۵۶۸ مگاپاسکال می‌باشد. لازم به ذکر است که در این نوع چیدمان، هر دو سخت‌کننده دچار کمانش موضعی شده‌اند.



تصویر ۹ توزیع میدان نیرو در دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قطری

همچنین ملاحظه می‌گردد که میزان استهلاک انرژی دیوار برشی با سخت‌کننده قطری و دیوار برشی با سخت‌کننده قطری به همراه افقی - قائم نیز اختلاف اندکی با یکدیگر دارند. میزان استهلاک انرژی دیوار برشی با سخت‌کننده قطری به همراه افقی-قائم نشان می‌دهد حدود ۸ درصد نسبت به دیوار برشی با سخت‌کننده قطری افزایش یافته است. اما همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، میزان استهلاک انرژی در دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قطری به‌صورت ترکیبی با سخت‌کننده افقی - قائم افزایش چشمگیری نسبت به دیوار برشی بدون سخت‌کننده داشته است، به‌گونه‌ای که در حدود ۳۶/۵ درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده موجب استهلاک انرژی شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت با توجه به تصویر ۱۱، هر چه از دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده به سمت دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده با چیدمان قطری به همراه افقی-قائم برویم، محصور شدگی بیشتری برای ورق میانی ایجاد شده و عملکرد میدان کششی قطری بهبود می‌بخشد. در نتیجه مقاومت برشی دیوار برشی فولادی افزایش یافته و به دنبال آن میزان استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد. در تصویر ۱۲ نمودار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده و دارای سخت‌کننده با چیدمان‌های مختلف مشاهده می‌گردد.

در مدل دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قطری به همراه افقی-قائم در تصویر ۱۰ مشاهده می‌شود که از مزایای هر دو چیدمان سخت‌کننده قطری و سخت‌کننده افقی-قائم استفاده شده است. به‌گونه‌ای که سخت‌کننده‌های قطری اولاً به‌طور مستقیم در تحمل نیروی جانبی مشارکت نموده و متحمل تنش‌های بیشتری نسبت به سخت‌کننده‌های افقی و قائم شده‌اند. ثانیاً با قرارگیری در موقعیت مناسب، کمانش ورق میانی را تا حد مطلوبی محدود کرده است. همچنین سخت‌کننده‌های افقی و قائم با ایجاد محدودیت بیشتر ورق میانی در برابر کمانش، از ظرفیت برشی ورق استفاده بیشتری شده است. به‌گونه‌ای که ملاحظه می‌گردد نسبت به حالت سخت‌کننده قطری، ورق میانی متحمل تنش‌های بیشتری شده است و کمانش آن نیز محدودتر شده است. همچنین ملاحظه می‌گردد که در این چیدمان، هیچ یک از سخت‌کننده‌ها دچار کمانش موضعی نشده‌اند و این به دلیل محدودیت زیاد ورق میانی در برابر کمانش می‌باشد.

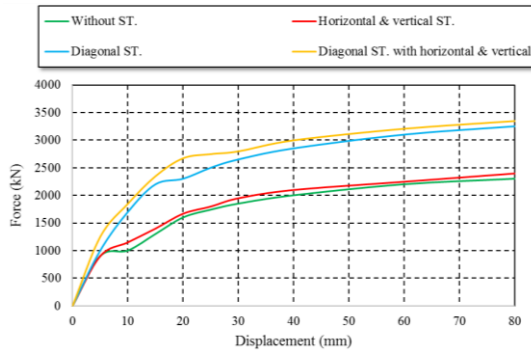


تصویر ۱۰ جزئیات دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قطری به همراه افقی-قائم

است. همچنین تأثیر این چیدمان در میزان سختی بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد نیز قابل مشاهده است. به گونه‌ای که میزان هر سه سختی ذکر شده در این چیدمان از سایر چیدمان‌ها بیشتر است.

### ۳-۳- بارگذاری یک‌طرفه

در این قسمت رفتار یک طرفه دیوار برشی فولادی با چیدمان‌های مختلف سخت‌کننده در تصویر ۱۳ ارائه گردیده است.



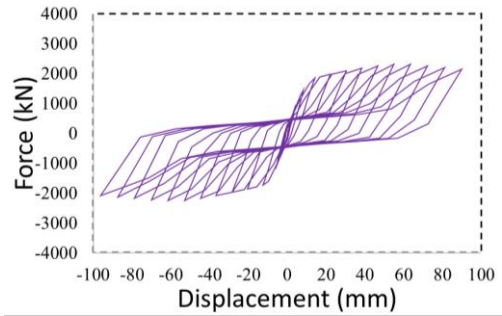
تصویر ۱۳ مقایسه نمودارهای پوش آور

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با حرکت از دیوار برشی بدون سخت‌کننده به سمت دیوار برشی دارای سخت‌کننده قطری به همراه افقی- قائم، میزان سختی اولیه، تنش تسلیم تنش نهایی افزایش داشته است. همچنین تنش تسلیم در کرنش‌های بزرگ‌تری رخ داده است. مشابه نمودارهای چرخه‌ای، نمودارهای یک‌طرفه نیز حاکی از آن است که رفتار یک‌طرفه دیوار برشی با سخت‌کننده قطری به همراه افقی-قائم بسیار نزدیک به رفتار دیوار برشی با سخت‌کننده قطری است و رفتار دیوار برشی با سخت‌کننده افقی- قائم نیز بسیار مشابه با رفتار دیوار برشی بدون سخت‌کننده است.

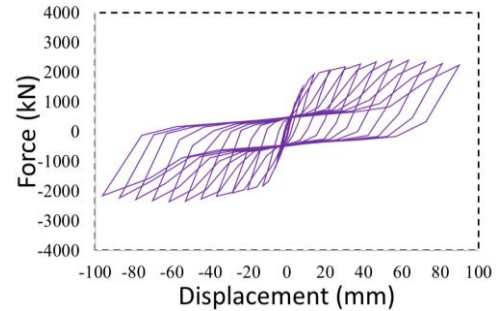
### ۴- نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه به دست آوردن چیدمان مطلوب با عملکرد بالاتر از سایر چیدمان‌ها به منظور استفاده حداکثر از ظرفیت دیوار برشی فولادی و در نتیجه دستیابی به مقاومت و سختی بالاتر می‌باشد. بدین منظور، ابتدا مدل‌سازی دیوار برشی فولادی یک طبقه یک دهانه با نمونه آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردید. سپس چند مدل دیوار برشی فولادی با چیدمان سخت‌کننده رایج در سازه‌ها به همراه چیدمان قطری به همراه افقی-قائم به وسیله نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای و یک‌طرفه قرار گرفته و در انتها تحلیل و مقایسه شدند. با توجه به نتایج به دست آمده، موارد ذیل قابل ارائه می‌باشد:

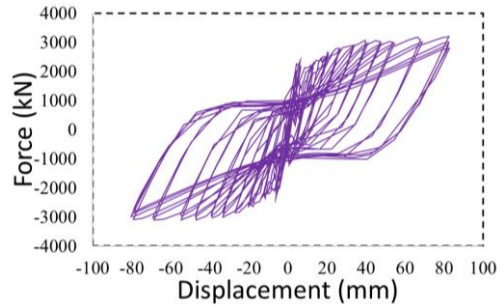
- ۱- عملکرد دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده افقی- قائم تقریباً مشابه دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده می‌باشد.
- ۲- عملکرد دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قطری به همراه افقی- قائم تقریباً مشابه دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قطری می‌باشد.
- ۳- چنانچه از سخت‌کننده قطری استفاده شود، سخت‌کننده نیز کماتش موضعی می‌کند.



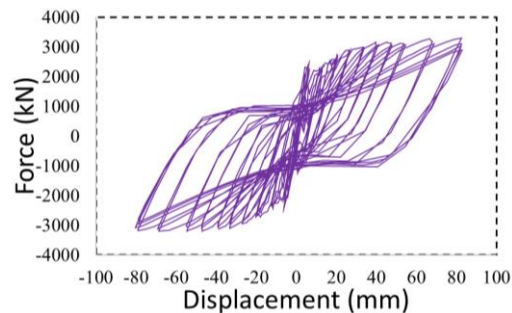
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

تصویر ۱۲ نمودار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی (الف) بدون سخت‌کننده (ب) با سخت‌کننده افقی-قائم (ج) با سخت‌کننده قطری (د) با سخت‌کننده قطری به همراه افقی-قائم

همان‌طور که از تصویر ۱۲ ملاحظه می‌گردد، میزان لاغر شدگی در نمودار چرخه‌ای دیوار برشی با سخت‌کننده قطری به همراه افقی- قائم در مقایسه با دیوار برشی بدون سخت‌کننده، بسیار کمتر شده و در نتیجه میزان استهلاک انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته

- [8] S. Sabouri-ghomi, C.E. Ventura, M.H.K. Kharrazi, Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls, *J. Struct. Eng.* 131 (2005) 878-889.
- [9] P.A. Timler, G.A. Kulak, Experimental study of steel plate shear walls, structural engineering report No. 114, Department of Civil Engineering University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, (1983).
- [10] E.W. Tromposch, G.L. Kulak, Cyclic and static behaviour of thin panel steel plate shear walls, structural engineering report No. 145, Department of Civil Engineering University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, (1987).
- [11] R.G. Driver, G.L. Kulak, K.D.J. Laurie, Seismic behavior of steel plate shear wall, structural engineering report No 215, Department of Civil Engineering University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, (1997).
- [12] S. Sabouri-Ghomi, T.M. Roberts, Nonlinear dynamic analysis of steel plate shear walls including shear and bending deformations, *Eng. Struct.* 14 (1992) 309-317.
- [13] M.H.K. Kharrazi, H.G.L. Prion, C.E. Ventura, Implementation of M-PFI method in design of steel plate walls, *J. Constr. Steel Res.* 64 (2008) 465-479.
- [14] A. Majlesi, H. Asadi-ghoozhd, O. Bamshad, R. Attarnejad, A.R. Masoodi, On the Seismic Evaluation of Steel Frames Laterally Braced with Perforated Steel Plate Shear Walls Considering Semi-Rigid Connections, *Buildings*. 12 (2022) 1427.
- [15] S.M.R. Mortazavi, M. Ghassemieh, M.S. Ghobadi, Research on the Behavior of the Steel Plated Shear Wall by Finite Element Method, *J. Struct.* (2013) 1-9.
- [16] M. Ghassemieh, N. Heidari, Parametric analysis of steel plated shear structures, *J. Cent. South Univ.* 21 (2014) 2083-2090.
- [17] A. Rahmzadeh, M. Ghassemieh, Y. Park, A. Abolmaali, Effect of stiffeners on steel plate shear wall systems, *Steel Compos. Struct.* 20 (2016) 545-569.
- [18] M.M. Alinia, M. Dastfan, Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members, *J. Cons.* 62 (2006) 730-738. doi:10.1016/j.jcsr.2005.11.007.
- [19] F. Nateghi, E. Alavi, Non-linear behavior and shear strength of diagonally stiffened steel plate shear walls, *Int. J. Eng.* 22 (2009) 343-356.
- [20] S. Sabouri-ghomi, S. Ramin, A. Sajjadi, Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners, *J. Constr. Steel Res.* 75 (2012) 152-159. doi:10.1016/j.jcsr.2012.03.018.
- [21] D. Vian, M. Bruneau, MCEEER's Experimental Research on Steel Plate Wall, *Struct. Eng. Assoc. Calif.* 2004 Conv. Monterey, Calif. (2004) 211-215.
- [22] ATC-24, Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures, Applied Technology Council, USA, (1992).

۵- دیوار برشی فولادی با چیدمان جدید سخت کننده قطری به همراه افقی-قائم نسبت به دیگر چیدمان ها به دلیل ایجاد محدودیت بیشتر برای ورق میانی در برابر کمانش، از تفاوت چشمگیری برخوردار است.

۶- در دیوار برشی فولادی با سخت کننده قطری به همراه افقی-قائم افزایش چشم گیر ظرفیت نهایی سیستم حدود ۴۷/۵٪ نسبت به دیوار برشی بدون سخت کننده می باشد.

۷- میزان استهلاک انرژی در دیوار برشی فولادی با سخت کننده قطری به صورت ترکیبی با سخت کننده افقی - قائم در حدود ۳۶/۵ درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده افزایش داشته است.

#### ۵- تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

#### ۶- حمایت مالی

این تحقیق از هیچگونه حمایت مالی ای برخوردار نبوده است.

#### ۷- مراجع

- [1] O. Bamshad, M. Ghassemieh, Deterioration hysteresis model for steel plated shear wall system, *Modares Civ. Eng. J.* 19 (2019) 15-28.
- [2] Mimura, H, Akiyama, H, Load-deflection relationship of earthquake resistant steel shear walls with a developed diagonal tension field, *Trans. AIJ.* 260 (1977).
- [3] O. Bamshad, M. Ghassemieh, Development of Modified Ibarra - Krawinkler Deterioration Model for One - Story Steel Plate Shear Wall, *Int. J. Steel Struct.* 20 (2020) 1730-1754. doi:10.1007/s13296-020-00407-4.
- [4] A. Astaneh-asl, Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls, 2001 (2001).
- [5] L.J. Thorburn, G.L. Kulak, C. J. Montgomery, Analysis of steel plate shear walls, structural engineering report No. 107, Department of Civil Engineering University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, (1983).
- [6] Wagner H., Flat Sheet Metal Girders with Very Thin Metal Webs, USA, 1931.
- [7] S. Chen, C. Jhang, Cyclic behavior of low yield point steel shear walls, *Thin-Walled Struct.* 44 (2006) 730-738. doi:10.1016/j.tws.2006.08.002.



7 (2), 2023

دوره ۷، شماره ۲

زمستان ۱۴۰۱

فصلنامه پژوهشی



#### COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by **Journal of Engineering & Construction Management (JECM)**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)