

Hysteretic behavior study of slit steel plate shear walls

Navid Deylami¹, Mohammad Reza Sheidaii^{2*}, Saeed Tariverdilo²

1- Ph.D. Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT

Creating slits in steel plate shear walls is a new way to improve the seismic performance of these walls. The creation of slits turns the steel sheet into a number of links, each of which dissipate the seismic energy at both ends of the links. In this study, the effect of slit location and orientation on the cyclic behavior of steel shear panels is considered. For this purpose, in a laboratory study, the effect of slits location in the central area (conventional method), in the middle of the boundary elements or sheet corners on the stiffness, strength and capacity of energy dissipation and drift corresponding to the start of sheet rupture was investigated. Experimental results show that, contrary to the conventional method with slits located in the central area of the sheet, changing the location of the slits leads to a fundamental improvement in the seismic performance parameters of the wall. The best performance is observed for the specimen with slits in the middle of the boundary elements and with parallel set of slits. The increase in the strength and drift is 39 and 100%, respectively, for the specimen with parallel set of slits in the middle of the boundary elements compared to the conventional specimen with slits in the center of the sheet. Better performance could be expected with optimization of slits spacing and patterns.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 August 2021

Revise Date: 18 November 2021

Accept Date: 25 November 2021

Keywords:

*Slit steel plate shear wall
Initial stiffness
Seismic energy dissipation
Shear strength
Slit*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.299120.2523>

*Corresponding author: MohammadReza Sheidaii.

Email address: m.sheidaii@urmia.ac.ir

مطالعه رفتار چرخه‌ای پانل‌های برشی فولادی شیاردار

نوید دیلمی^۱، محمدرضا شیدائی^{۲*}، سعید تاروردیلو^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲-استاد، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

ایجاد شیار در دیوارهای برشی فولادی روشی جدید برای بهبود عملکرد لرزه‌ای این دیوارها محسوب می‌شود. ایجاد شیار، ورق فولادی را به تعدادی از اجزا رابط شکل‌پذیر تبدیل می‌نماید که هر یک از آنها به واسطه تغییر شکل دو انحنایی و ایجاد مفاصل پلاستیک در دو انتهای اجزا رابط، موجب جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای سازه می‌شوند. در این مطالعه اثر محل قرارگیری و امتداد شیارها روی رفتار چرخه‌ای پانل‌های برشی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور طی یک مطالعه آزمایشگاهی، اثر محل قرارگیری شیار در ناحیه مرکزی (روش متداول)، میانه المان‌های مرزی یا گوشه‌های دیوار بر روی سختی، مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی و دررفت متناظر با شروع پارگی ورق مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برخلاف روش متداول با شیارهای واقع در ناحیه مرکزی ورق، تغییر محل شیار به پیرامون ورق منجر به بهبود اساسی در پارامترهای عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی می‌شود. بهترین عملکرد برای حالت شیارهای واقع در میانه المان‌های مرزی با امتداد شیارهای موازی مشاهده می‌شود. میزان افزایش در مقاومت و دررفت شروع پارگی ورق (شروع کاهش مقاومت) به ترتیب ۳۹ و ۱۰۰ درصد برای نمونه با شیارهای موازی واقع در میانه المان‌های مرزی در قیاس با نمونه با شیار در ناحیه مرکزی است. در انتها از مدل اجزا برای صحت‌سنجی نتایج آزمایش‌ها استفاده شده است. انتظار می‌رود با بهینه‌سازی الگو و فواصل شیارها در نمونه مزبور، حتی عملکرد بهتری قابل حصول باشد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی شیاردار، سختی اولیه، جذب انرژی لرزه‌ای، مقاومت برشی، شیار.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2021.299120.2523	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.299120.2523	۱۴۰۱/۰۶/۳۱	۱۴۰۰/۰۹/۰۴	۱۴۰۰/۰۹/۰۴	۱۴۰۰/۰۸/۲۷	۱۴۰۰/۰۵/۲۴
			محمدرضا شیدائی		*نویسنده مسئول:	
			m.sheidaii@urmia.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولادی بعنوان یک سیستم مقاوم برابر جانبی مناسب از سال ۱۹۷۰ مورد توجه قرار گرفته‌اند. سختی اولیه و مقاومت برشی بالا از دلایل استفاده از این سیستم در سازه‌های مرتفع می‌باشند. در دهه‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با طراحی و عملکرد دیوارهای برشی فولادی انجام شده و دو رویکرد در این ارتباط، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. رویکرد اول استفاده از ورق جان ضخیم با سختی بالا به منظور بهره‌گیری از ظرفیت پلاستیک نهایی ورق و جلوگیری از کمانش خارج از صفحه آن بوده و رویکرد دوم استفاده از ورق‌های با ضخامت کم با هدف بهره‌مندی از میدان‌های پس‌کمانشی و ایجاد مفاصل پلاستیک در ورق فولادی است [۱].

ایده استفاده از شیار در دیوارهای برشی ابتدا توسط اوموری در سال ۱۹۶۶ و ماتو در سال ۱۹۶۸ با هدف بهبود مقاومت لرزه‌ای دیوارهای برشی بتنی، ارائه شد [۲-۳]. در این مطالعات، دیوار برشی دارای شیارهایی با فواصل یکسان بوده که بتن و آرماتورها را بصورت کامل قطع کرده بود. چنین دیواری، شکل‌پذیری بیشتر ولی مقاومت کمتری نسبت به دیوار برشی بتنی معمولی داشت و در جابجایی‌های کوچک همانند دیوار برشی عمل کرده و تغییرشکل‌ها را محدود و در جابجایی‌های بزرگتر اجزا رابط ایجاد شده توسط شیارها بصورت سری عمل کرده و باعث جذب انرژی می‌شدند.

استفاده از پانل‌های برشی فولادی شیاردار به لحاظ بهره‌گیری از ایجاد میدان‌های پس‌کمانشی و قابلیت بالای جذب انرژی لرزه‌ای در دهه اخیر مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته و زمینه‌های مطالعاتی گوناگونی در این راستا مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. بررسی زاویه ایجاد شیار [۴]، رفتار لرزه‌ای پانل برشی فولادی شیاردار خودکمانش‌تاب [۵] و مطالعه اندرکنش قاب و پانل برشی [۶-۷] مطالعاتی هستند که توسط محققان مختلف انجام شده است.

از دیگر زمینه‌های مطالعاتی که در این حوزه بسیار مورد توجه بوده و مطالعه پیش رو نیز در همین راستا صورت گرفته، تاثیر پارامترهای هندسی شیارها و اجزا رابط روی رفتار پانل برشی فولادی شیاردار است. هیتاکا و ماتسوی [۸] به منظور بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی شیاردار، ۴۲ نمونه با مقیاس ۱ به ۳ را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای مورد مطالعه نسبت عرض به ضخامت اجزا رابط، نسبت طول به ضخامت اجزا رابط و تعداد ردیف‌های شیارها بود. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بود که تا دررفت ۳ درصد اکثر نمونه‌ها بدون کاهش چشمگیر مقاومت برشی دچار تغییرشکل شده و شکل‌پذیری بالایی از خود نشان دادند. همچنین مشخص شد نمونه‌های با نسبت عرض به ضخامت اجزا رابط کمتر از ۲۰، رفتار چرخه‌ای پایدارتری دارند. جیو [۹] با هدف بررسی رفتار چرخه‌ای پانل‌های شیاردار یک سری مطالعات آزمایشگاهی روی پنج نمونه دیوار برشی شیاردار انجام داد. شکل‌پذیری ایده‌آل و جذب انرژی بالا از نتایج این بررسی بود. نتایج همچنین نشان داد که تعداد ردیف‌های شیار با ظرفیت جذب انرژی رابطه مستقیم و با مقاومت برشی رابطه عکس دارد.

ژائو و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای آزمایشگاهی روی دوازده نمونه با مقیاس ۱ به ۴ با تاکید بر اثر تعداد ردیف‌های شیارها انجام دادند. نتایج آزمایش نشان داد که اکثر نمونه‌هایی که دارای دو ردیف شیار بودند در مقایسه با نمونه‌های دارای یک ردیف شیار، دارای مقاومت نهایی و سختی جانبی بیشتری بوده و نمودارهای چرخه‌ای پایدارتری داشتند. در ضمن مقاومت نهایی و سختی جانبی نمونه‌ها با افزایش طول اجزا رابط رابطه عکس دارد.

ژاکوبسن و همکاران [۱۱] با هدف بررسی اثر طول اجزا رابط و فاصله آنها از یکدیگر، یکسری مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج نشانگر آن بود که رفتار نمونه‌های با طول‌های متفاوت اجزا رابط مشابه رفتار نمونه‌های با طول اجزا رابط ثابت است. این در حالی است که نمونه‌های با فاصله اجزا رابط متفاوت در قیاس با نمونه‌های دارای فواصل ثابت اجزا رابط، رفتار بهتری دارند.

لو و همکاران [۱۲] یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی در مورد تاثیر فواصل شیارها و عرض اجزا رابط بر روی پارامترهای لرزه‌ای از قبیل ظرفیت نهایی، سختی اولیه، میزان جذب انرژی لرزه‌ای و شکل پذیری سیستم انجام دادند. مطالعه بر روی سه نمونه با تعداد اجزا رابط یکسان و فواصل یکنواخت و غیریکنواخت شیارها انجام گرفت. علیرغم آن که ظرفیت نهایی برشی و سختی اولیه در نمونه‌های با فواصل شیار مساوی در قیاس با نمونه‌های دارای فواصل نامساوی تغییر چندانی ندارد، نمونه‌های با فواصل نامساوی شیارها از نظر جذب انرژی و شکل پذیری عملکرد بهتری دارند.

لو و همکاران [۱۳] در ادامه تحقیقات خود روی دیوارهای برشی شیاردار، اثر افزایش تعداد ردیف اجزا رابط شکل پذیر در ارتفاع ورق را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه رفتار سه نمونه دیوار برشی شیاردار با یک، دو و سه ردیف شیار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش تعداد ردیف‌های اجزا رابط باعث افزایش سختی اولیه، مقاومت نهایی و ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود.

هی و همکاران [۱۴] با بهره‌گیری از شیارهای چند ردیفی، بهبود عملکرد دیوارهای شیاردار را از نظر باریک‌شدگی (Pinching) چرخه-های هیستریزیس و کنترل پارگی ورق در انتهای شیارها بررسی کردند. نتایج حاکی از بهبود عمده در سختی دیوار در بارگذاری مجدد، کاهش باریک‌شدگی چرخه‌های هیستریزیس و همچنین جلوگیری از پارگی ورق در انتهای شیارها در اثر استفاده از شیارهای چند ردیفی بوده است.

خاتمی راد و شریعتمدار [۱۵] تاثیر شکل اجزا رابط بر رفتار دیوارهای برشی فولادی شیاردار را مورد بررسی قرار دادند. آنها در کنار یک دیوار با شیارهای متداول، عملکرد دو نوع شیار جدید پیشنهادی را نیز بررسی نمودند. جذب انرژی، کمناش خارج از صفحه، سختی و مقاومت اولیه پارامترهایی بودند که مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که شکل اجزا رابط پارامتری مهم در کنترل عملکرد لرزه‌ای دیوار شیاردار است.

علی‌اکبری و شریعتمدار [۱۶] ضریب رفتار لرزه‌ای را برای دیوارهای برشی با استفاده از نتایج تحلیل استاتیکی بار افزون و تحلیل دینامیکی افزایش یافته تعیین نمودند. آنها ابتدا با صحت‌سنجی مدل اجزا محدود با نتایج آزمایشگاهی به بررسی کفایت مدل اجزا محدود پرداخته و سپس با تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی به تعیین ضریب رفتار یک سازه ۶ طبقه پرداختند. نتایج نشانگر تفاوت محسوس در تعیین ضریب رفتار مبتنی بر تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. همین نتایج موید ضریب اضافه مقاومت بالایی (بیش از ۴) برای این سیستم سازه‌ای است که بسیار بیشتر از مقادیر مورد انتظار برای سیستمهای دیوار سازه‌ای است.

لو و همکاران [۱۷] طی مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی به بررسی تاثیر الگوهای تغییر طول شیار در حالت شیارها با طول نامساوی پرداختند. دو الگوی پروانه‌ای و مخروطی برای تغییر طول شیارها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد نمونه‌هایی که دارای طول شیارهای متفاوتی هستند، جذب انرژی و شکل‌پذیری بهتری از خود نشان می‌دهند.

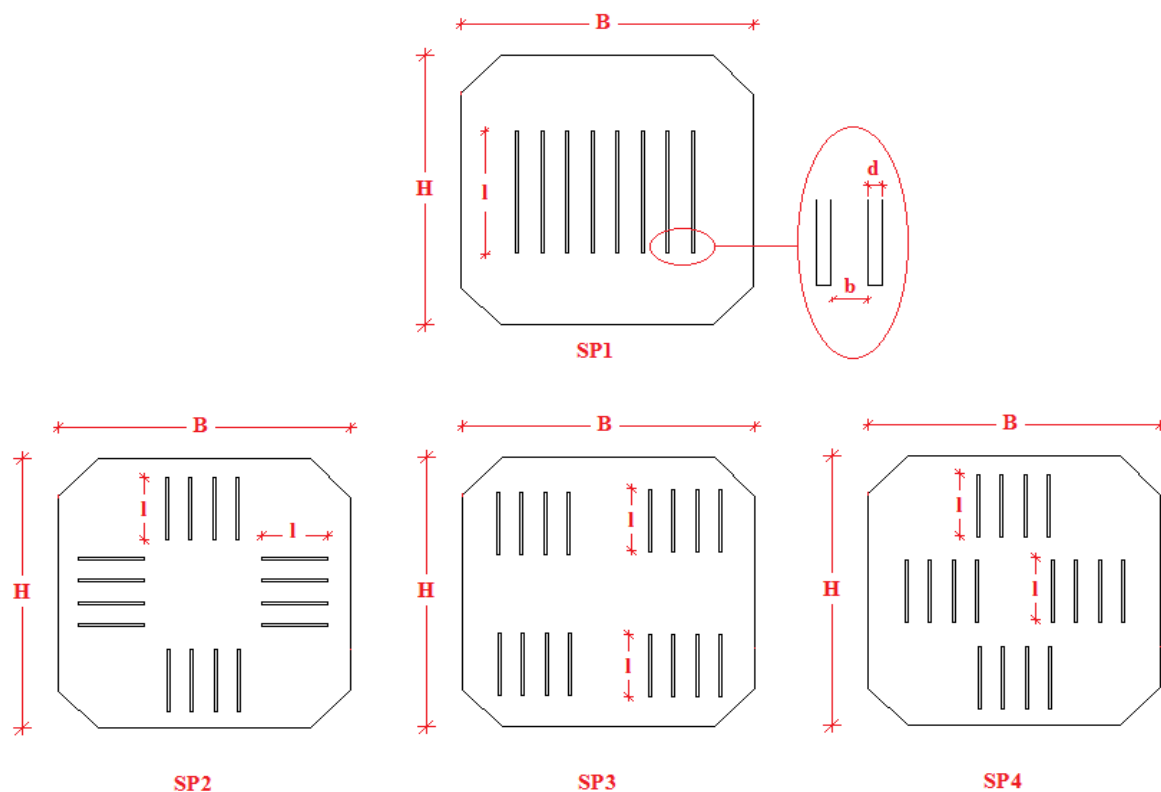
لو و همکاران [۱۸] با توجه به شکل‌پذیری و جذب انرژی مناسب، ولی سختی کم دیوارها با شیار در بارگذاری مجدد، از سیستم قاب خمشی با تیرهای فولادی پیش‌تنیده برای افزایش سختی سیستم دوگانه مرکب دیوار و قاب در تغییر مکان‌های نزدیک صفر و به عنوان ابزاری مرکزگرا (self-centering device) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشانگر بهبود اساسی در سختی اولیه و کاهش باریک‌شدگی در چرخه-های هیستریزیس با بکارگیری ابزار مرکزگرا همراه با دیوار برشی شیاردار می‌باشد.

در تمام آزمایش‌های انجام شده قبلی از یک الگوی شیار با طول یا فاصله مساوی یا نامساوی و یا با شکل متفاوت شیار در ناحیه مرکزی دیوار برشی فولادی استفاده شده است. این مطالعه درصدد بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر امتداد و موقعیت شیار روی عملکرد لرزه‌ای

دیوار برشی فولادی شیاردار است. برای بررسی اثر امتداد و موقعیت شیارها روی عملکرد، مجموعه‌ای متشکل از چهار آزمایش با امتداد و موقعیت متفاوت شیار مورد آزمایش قرار گرفته است. در حالی که در نمونه اول شیارها در ناحیه مرکزی دیوار تعبیه شده‌اند، در سه آزمایش دیگر سه آرایش با شیارهایی با طول مساوی و واقع در گوشه‌ها یا میانه‌های المان‌های مرزی، و با امتداد شیارهای موازی و متعامد مد نظر قرار گرفته‌اند. در ضمن مدل اجزا محدود برای بررسی اثر امتداد و موقعیت شیارها و مقایسه نتایج تحلیلی با آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی و پروتکل بارگذاری مورد استفاده ارائه شده، سپس نتایج آزمایش‌ها به تفکیک و در مقایسه با هم آورده شده است. در انتها نیز مدل اجزا محدود مورد استفاده برای صحت‌سنجی نتایج آزمایش‌ها ارائه و نتایج تحلیلی و عددی با هم مقایسه شده‌اند.

۲- نمونه‌ها و پروتکل بارگذاری

این تحقیق در برگزیده انجام بارگذاری چرخه‌ای روی چهار نمونه دیوار برشی فولادی شیاردار یک طبقه و یک دهانه با مقیاس ۱ به ۳ در آزمایشگاه مرکز تحقیقات مهندسی زیرساخت دانشگاه ارومیه می‌باشد. به منظور بررسی تاثیر موقعیت و نحوه چینش شیارها، در تحقیق حاضر علاوه بر نمونه دیوار برشی با شیار واقع در ناحیه مرکزی ورق (SP1)، سه نمونه با موقعیت و چینش غیرمرکزی شیارها (نمونه‌های SP2، SP3 و SP4) مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۱). در نمونه‌های SP2 و SP4 شیارها در ناحیه میانی المان‌های مرزی قرار دارند و در نمونه SP3 شیارها در گوشه‌های ورق قرار گرفته‌اند. تفاوت نمونه‌های SP2 و SP4 در امتداد شیارها است، به گونه‌ای که در نمونه SP2 امتداد شیارها متعامد ولی در SP4 موازی هستند. مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در برنامه آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است. انتخاب مشخصات هندسی شیارها به نحوی انجام گرفته است که مساحت کل ناحیه شیار خورده در هر چهار نمونه برابر باشد.

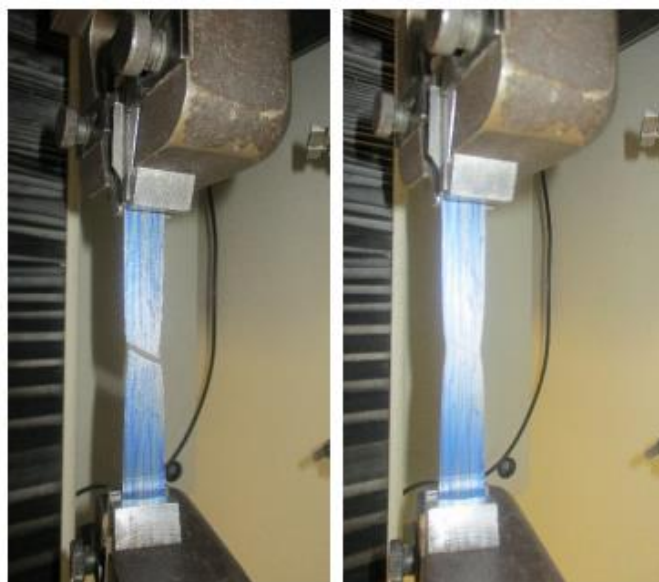


شکل ۱: آرایش هندسی شیارهای ورق

جدول ۱: مشخصات هندسی نمونه‌ها

نمونه	موقعیت و امتداد شیار	H ارتفاع ورق (mm)	B عرض ورق (mm)	ضخامت ورق (mm)	d عرض شیار (mm)	l طول شیار (mm)	b فاصله شیارها (mm)
SP1	مرکزی	۹۷۵	۹۷۵	۰/۷	۵	۴۰۰	۸۰
SP2	میانه المان‌های مرزی با شیارهای متعامد	۹۷۵	۹۷۵	۰/۷	۵	۲۰۰	۸۰
SP3	گوشه ورق	۹۷۵	۹۷۵	۰/۷	۵	۲۰۰	۸۰
SP4	میانه المان‌های مرزی با شیارهای موازی	۹۷۵	۹۷۵	۰/۷	۵	۲۰۰	۸۰

برای تعیین منحنی تنش- کرنش ورق‌های مورد استفاده از آزمایش کششی محوری (شکل ۲) استفاده شد. نتایج آزمایش کشش محوری در جدول ۲ آورده شده است.



(ب)

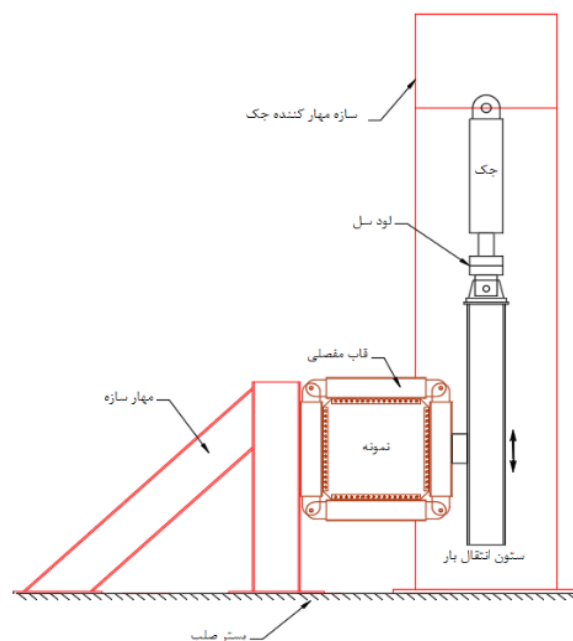
(الف)

شکل ۲: آزمایش کششی روی نمونه ورق، (الف) نمونه قبل از آزمایش، (ب) نمونه گسیخته شده بعد از آزمایش

جدول ۲: مشخصات مکانیکی نمونه‌های ورق

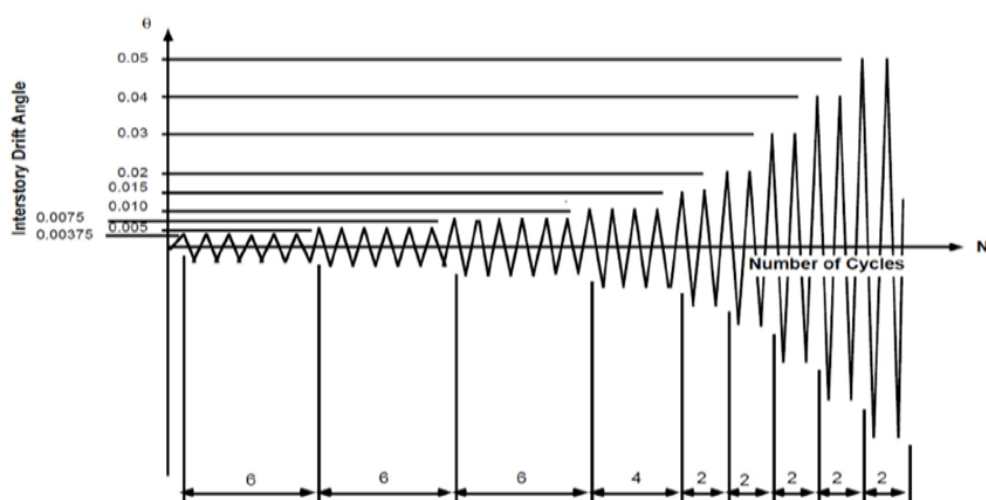
نمونه	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)
نمونه ورق ۱	۱۷۶	۱۷۳	۳۰۷	۴۲
نمونه ورق ۲	۱۷۷	۱۷۴	۳۰۹	۴۱
نمونه ورق ۳	۱۷۶	۱۷۷	۳۰۸	۴۱

شکل ۳ نمونه تحت آزمایش را نشان می‌دهد. اتصال ورق به المان‌های مرزی (قائم و افقی) توسط دو نبشی نمره ۵ در طرفین ورق انجام گرفته است. المان‌های مرزی از پروفیل IPE200 ساخته شده و اتصال انتهای آن‌ها به هم توسط پین انجام شده است، این امر منجر به اتصال مفصلی بین المان‌های مرزی می‌شود. از این رو آزمایش نمونه قادر به ارائه تخمینی مناسب از عملکرد خود ورق دیوار برشی خواهد بود و با توجه به ابعاد المان‌های مرزی و اتصال انتظار نمی‌رود جذب انرژی محسوسی در سایر اجزای دیوار غیر از ورق رخ دهد. دیوار برشی به همراه قاب مفصلی پیرامون آن توسط یک سیستم خرپایی به کف صلب متصل شده است. ابعاد خرپا و مقاطع مورد استفاده در آن به نحوی طراحی شده‌اند که در خلال بارگذاری تغییر شکل محسوسی نداده و کاملاً الاستیک باقی بمانند. جک ۱۰۰۰ کیلو نیوتنی بار را توسط یک ستون رابط به قاب مفصلی انتقال می‌دهد. مهار جانبی مناسب برای جلوگیری از حرکت عمود بر صفحه نمونه تعبیه شده است. از پتانسیومتر خطی (LVDT) برای اندازه‌گیری اعوجاج برشی ورق استفاده شده است. سرعت انجام بارگذاری حدود ۲۰ میلی‌متر بر دقیق بوده است.



شکل ۳: نحوه انجام بارگذاری روی نمونه

بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌ها در این مطالعه مطابق با پروتکل پیشنهادی SAC انجام شده، و در شکل ۴ این پروتکل بارگذاری نشان داده شده است.



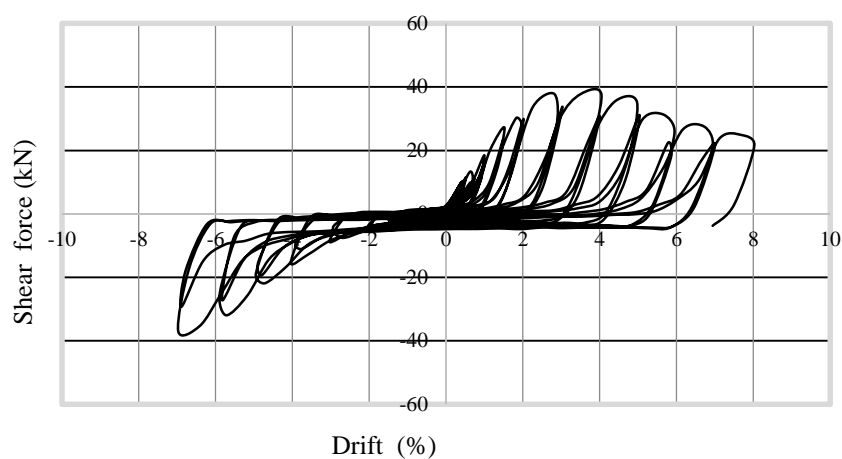
شکل ۴: پروتکل بارگذاری SAC

۳- نتایج آزمایش‌ها

در این بخش نتایج آزمایش‌ها برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. ابتدا عملکرد مشاهده شده برای هر نمونه به تفصیل ارائه شده و در انتهای این بخش عملکرد نمونه‌ها از نظر پارامترهای مهم عملکرد لرزه‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است.

نمونه SP1

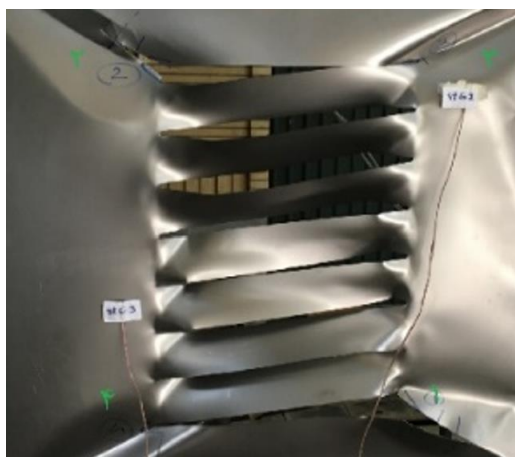
شکل ۵ الف پاسخ هیستریزیس نمونه SP1 را نشان می‌دهد که توام با باریک‌شدگی شدید چرخه‌های هیستریزیس است. نمونه SP1 در جهت مثبت بارگذاری تا دریفت ۳/۵ درصد (تغییرمکان جانبی ۴۱ میلی‌متر) بدون افت مقاومت تغییرشکل می‌دهد، در این دریفت پارگی ورق در انتهای شیارها (شکل ۵ ب) رخ می‌دهد. بعد از وقوع این پارگی، افت مقاومت در سیکل‌های بعدی و در دریفت‌های بالاتر پدیدار می‌گردد. این کاهش مقاومت بدلیل پارگی بیشتر پارگی اولیه و وقوع پارگی‌های جدید در سایر نقاط ورق رخ می‌دهد. شکل ۵ پ وضعیت گسترش پارگی را در مجاورت شیارها در انتهای آزمایش نشان می‌دهد. هم‌چنان که مشاهده می‌شود تمرکز پارگی در انتهای ردیف اول یا آخر شیارها بوده و در انتهای ردیف شیارهای میانی پارگی مشاهده نمی‌شود. بارگذاری نمونه در دریفت ۸/۰ درصد (تغییرمکان جانبی ۹۴ میلی‌متر) متناظر با بار جانبی ۲۱ کیلو نیوتن متوقف شد. این بار حدود ۵۶ درصد بار ماکزیمم نمونه است.



(الف)



(ب)



(پ)

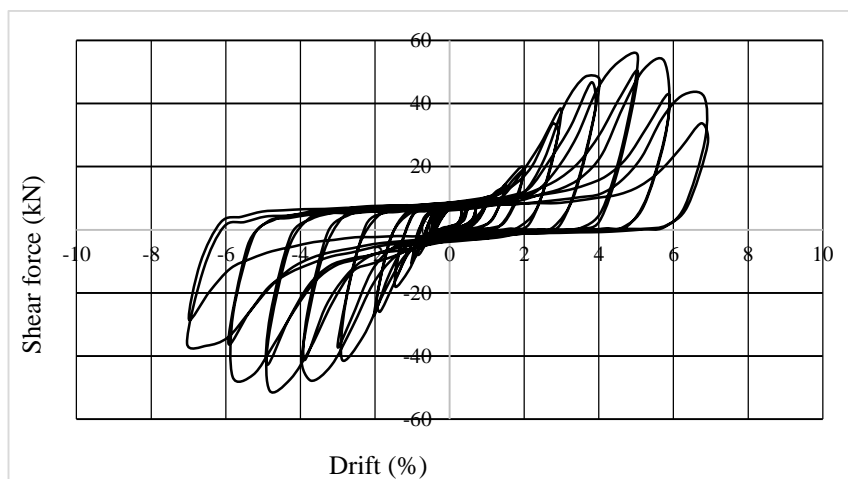
شکل ۵: نمونه SP1، الف) رفتار هیستریزیس، ب) پارگی ورق در دریفت ۳/۵ درصد، پ) پارگی ورق در انتهای آزمایش

نمونه SP2

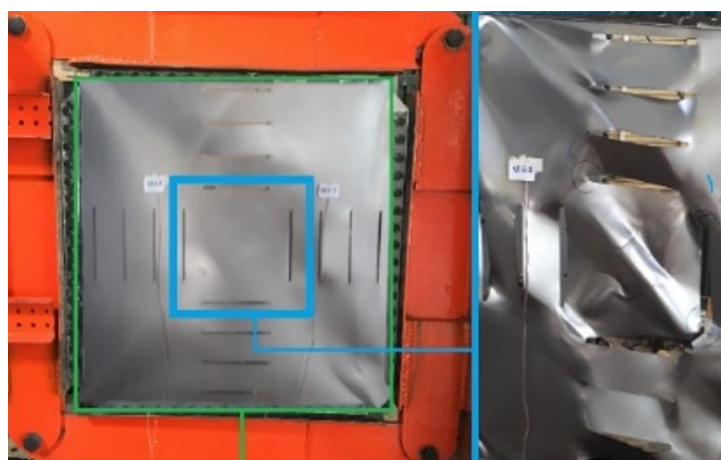
در این نمونه شیپارها در میانه المان‌های مرزی واقع بوده و در ضمن امتداد شیپارها متعامد است (شکل ۱). رفتار هیستریزیس نمونه در شکل ۶ الف ارائه شده است. افزایش محسوس در مقاومت و جذب انرژی این نمونه در قیاس با نمونه SP1 محسوس است. افت مقاومت در دریفت

۵ درصد در جهت مثبت بارگذاری و در بار جانبی ۵۴/۸ کیلو نیوتن رخ می‌دهد. دلیل افت مقاومت دوباره شروع پارگی ورق در انتهای شیارهای نزدیک مرکز ورق است (شکل ۶ ب). افزایش محسوس در دررفت نظیر شروع پارگی ورق در قیاس با نمونه SP1 کاملاً قابل مشاهده است. وضعیت نهایی پارگی ورق در انتهای آزمایش در دررفت ۶/۹ درصد در شکل ۶ پ نشان داده شده است. مقاومت نمونه در این دررفت حدود ۷۷ درصد مقاومت ماکزیمم نمونه است. گسترش پارگی در انتهای اکثر شیارها در شکل ۶ پ به خوبی قابل مشاهده است.

به نظر می‌رسد نزدیکی انتهای شیارها در ناحیه مرکزی ورق، دلیل شروع پارگی و کاهش مقاومت در این نمونه بوده و برای کنترل رفتار نمونه، کنترل فاصله بین انتهای شیارهای متعامد مهم خواهد بود.



(الف)



(ب)



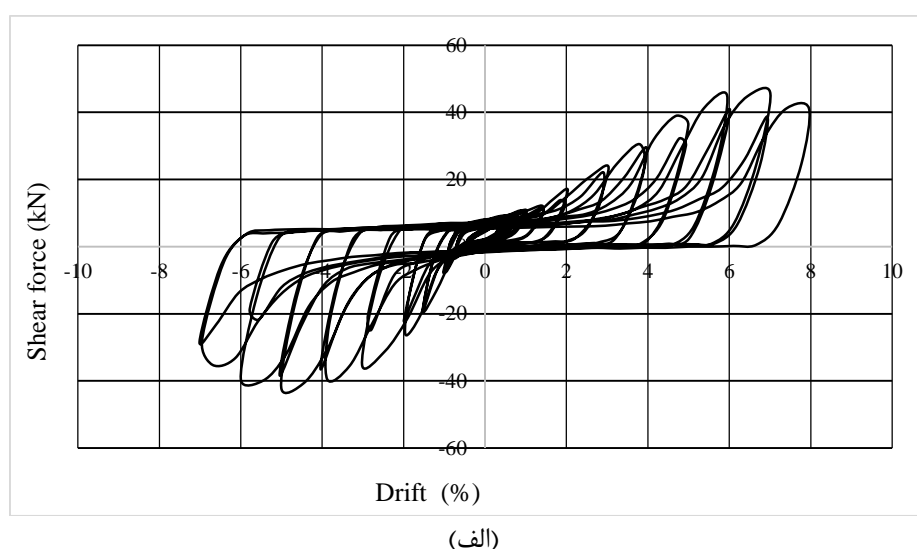
(پ)

شکل ۶: نمونه SP2، الف) رفتار هیستریزیس، ب) پارگی ورق در دررفت ۵ درصد، پارگی ورق در انتهای آزمایش

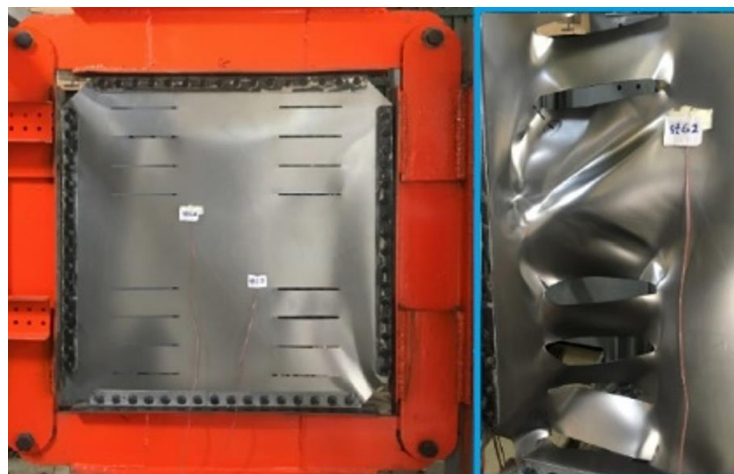
نمونه SP3

برخلاف نمونه SP2، در این نمونه شیپارها در گوشه‌های ورق قرار داشته و شیپارها موازی هستند (شکل ۱). رفتار هیستریزیس نمونه در شکل ۷ الف ارائه شده است. افزایش محسوس در دررفت متناظر با شروع پارگی ورق در قیاس با دو نمونه قبلی (SP1 و SP2) در این نمونه قابل مشاهده است. افت مقاومت متناظر با شروع پارگی ورق در این نمونه در دررفت ۷ درصد (تغییر مکان جانبی ۸۲ میلیمتر) و در بار ۴۵/۶ کیلونیوتن رخ می‌دهد. بار ماکزیمم این نمونه مابین بار ماکزیمم نمونه‌های SP1 و SP2 قرار دارد. شکل ۷ ب وضعیت شروع پارگی ورق را در دررفت ۷ درصد و شکل ۷ پ وضعیت پارگی ورق را در انتهای آزمایش در دررفت ۸ درصد و بار متناظر با ۹۲ درصد بار ماکزیمم نشان می‌دهد.

بهبود در ظرفیت تغییر شکل نمونه و دررفت متناظر شروع پارگی ورق در این نمونه در قیاس با نمونه‌های SP1 و SP2 محسوس است. برخلاف نمونه SP2، پارگی‌ها در گوشه‌های ورق متمرکزند. به عبارتی کنترل فاصله انتهای شیپار و گوشه ورق، پارامتر اصلی کنترل رفتار خستگی سیکل پائین ورق خواهد بود.



(الف)



(ب)

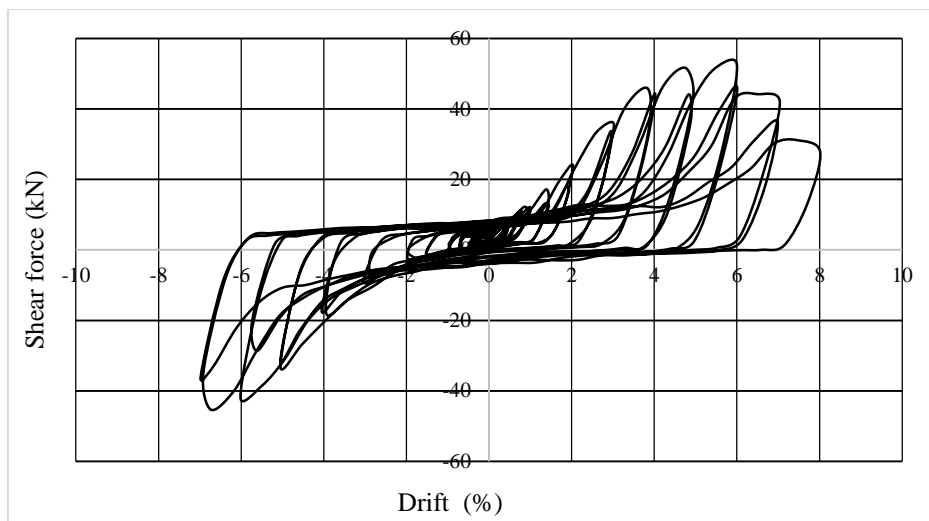


(پ)

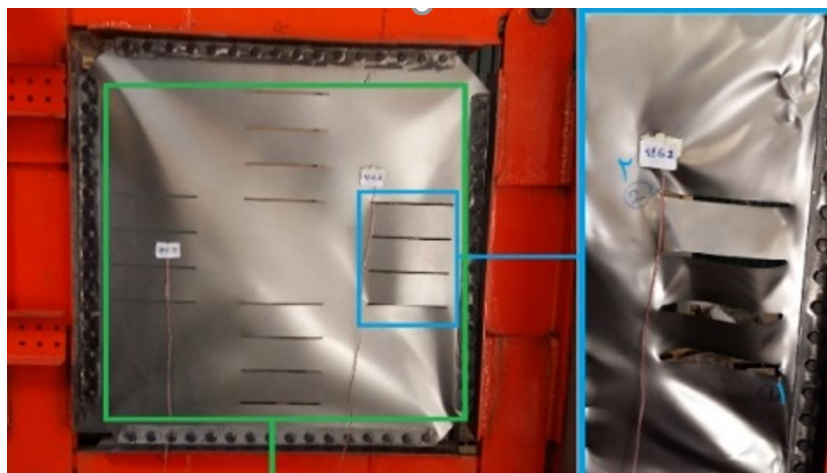
شکل ۷: نمونه SP3، الف) رفتار هیستریزیس، ب) پارگی ورق در دریفت ۷ درصد، پ) پارگی ورق در انتهای آزمایش

نمونه SP4

در نمونه SP4 مشابه نمونه SP2، شیارها در مناطق میانی المان‌های مرزی قرار داشته، ولی برخلاف نمونه مزبور شیارها موازی هستند (شکل ۱). رفتار هیستریزیس نمونه در شکل ۸ الف نشان داده شده است. شروع افت مقاومت به واسطه شروع پارگی ورق در دریفت ۶ درصد (تغییر مکان جانبی ۷۰ میلی‌متر) برای بارگذاری در جهت مثبت ایجاد می‌شود (شکل ۸ ب)، بار ماکزیمم متناظر نیز ۵۲/۵ کیلو نیوتن می‌باشد. تغییر مکان متناظر برای بارگذاری در جهت منفی ۷۹ میلی‌متر می‌باشد. آزمایش در دریفت ۸/۱ درصد (تغییر مکان جانبی ۹۵ میلی‌متر) متوقف شد. دلیل اتمام آزمایش تغییر مکان زیاد و نه پارگی ورق بود. تمرکز پارگی ورق برخلاف نمونه SP2 در گوشه‌های ورق می‌باشد. وضعیت پارگی ورق در انتهای آزمایش در شکل ۸ پ ارائه شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۸: نمونه SP4، الف) رفتار هیستریزیس، ب) شروع پارگی ورق در دریفت ۶ درصد، پ) وضعیت پارگی ورق در انتهای آزمایش

مقایسه عملکرد نمونه‌ها

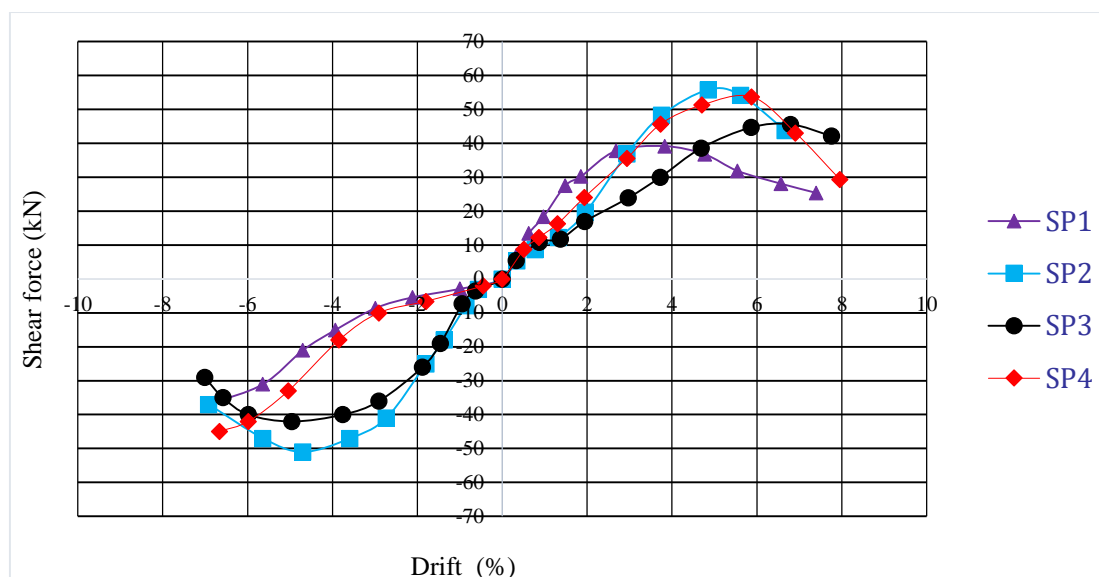
در این بخش عملکرد نمونه‌ها از نظر سختی اولیه و سکانتی، مقاومت، جذب انرژی، دررفت متناظر شروع پارگی ورق و دررفت نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. وجه مشخصه تمام آزمایش‌ها مشاهده باریک‌شدگی شدید چرخه‌های هیستریزیس در تمام نمونه‌ها است که عمدتاً ناشی از وقوع کمانش خارج از صفحه و عملکرد میدان کششی می‌باشد.

در جدول ۳ مقادیر سختی اولیه، مقاومت بیشینه، مقاومت نهایی، دررفت متناظر با شروع پارگی ورق و دررفت نهایی برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد تغییر محل شیاریها از ناحیه مرکزی ورق به گوشه‌های آن یا به میانه المان‌های مرزی، منجر به بهبود عمده‌ای در مقاومت بیشینه و همچنین دررفت شروع پارگی ورق (دررفت متناظر با شروع کاهش مقاومت) شده است. نمونه‌های SP2 و SP4 بهترین عملکرد را از نظر مقاومت داشته و نمونه‌های SP3 و SP4 بهترین عملکرد را از نقطه نظر دررفت متناظر با شروع پارگی ورق از خود نشان داده‌اند. در یک ارزیابی اولیه براساس این دو پارامتر نمونه SP4، یعنی نمونه با شیاری موازی در مناطق میانی المان‌های مرزی، بهترین عملکرد را داشته است. در قیاس با نمونه SP1 یعنی نمونه با شیاری در ناحیه مرکزی ورق، افزایش در مقاومت و دررفت شروع پارگی ورق به ترتیب ۳۹ و ۱۰۰ درصد بوده است. توجه به این نکته لازم است که با بهینه‌سازی فاصله شیاریها از هم و از گوشه می‌توان عملکرد فوق را حتی ارتقا هم داد. محل شروع پارگی ورق که مشخص کننده فاصله بحرانی کنترل کننده رفتار است در تمام نمونه‌ها غیر از نمونه SP2 در گوشه ورق است.

جدول ۳: پارامترهای عملکرد لرزه‌ای نمونه‌ها

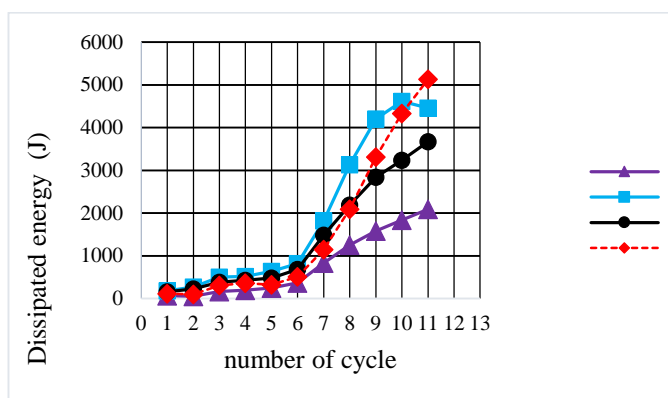
نمونه	سختی اولیه (kN/mm)	مقاومت بیشینه (kN)	مقاومت نهایی (kN)	دررفت متناظر با شروع پارگی ورق	دررفت نهایی	محل شروع پارگی ورق
SP1	۲/۱	۳۷/۷	۲۱	۳/۵	۸/۰	گوشه
SP2	۲/۲	۵۴/۸	۴۲	۵/۰	۶/۹	مرکز
SP3	۱/۷	۴۵/۶	۴۲	۷/۰	۸/۰	گوشه
SP4	۱/۹	۵۲/۵	۲۷	۶/۰	۸/۵	گوشه

منحنی پوش هیستریزیس نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۹ ارائه شده است. بهترین عملکرد در جذب انرژی را با توجه به این شکل نمونه-های SP2 و SP4 دارند. ایجاد شیاریها در نواحی غیر از مرکز ورق در نمونه‌های SP2، SP3 و SP4 منجر به کاهش بیشتر سختی در قیاس با SP1 شده است (همچنین به جدول ۳ توجه نمائید).

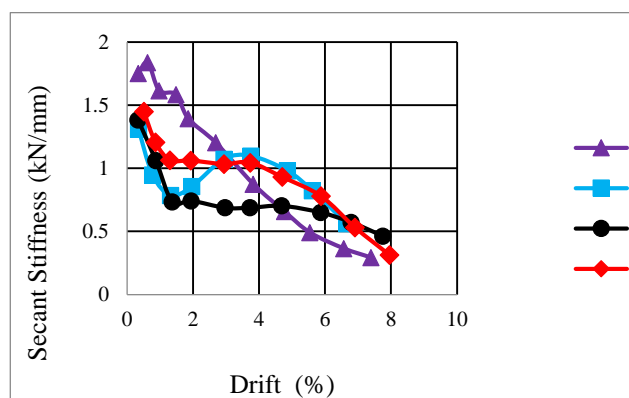


شکل ۹: منحنی پوش نمونه‌های آزمایشگاهی

شکل ۱۰ تغییرات در سختی سکانتی نمونه‌ها را برای دریفتهای افزایشده نشان می‌دهد. بیشترین سرعت کاهش سختی در نمونه SP1 رخ داده و نمونه‌های SP2 و SP4 با شیپارهای واقع در میانه المان‌های مرزی رفتار به مراتب پایدارتری از خود نشان داده‌اند.



شکل ۱۱: میزان جذب انرژی در سیکل‌های افزایشده بارگذاری چرخه-ای



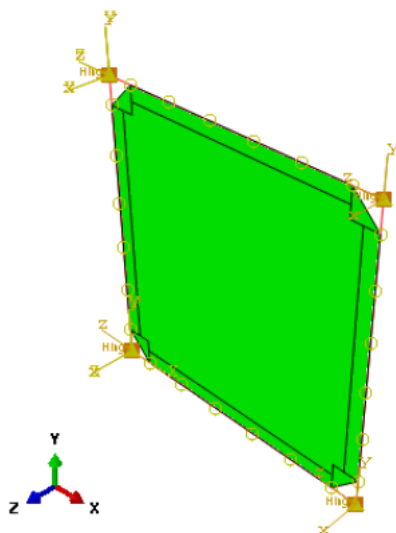
شکل ۱۰: تغییرات سختی سکانتی نمونه‌ها برای دریفتهای افزایشده

شکل ۱۱ انرژی جذب شده توسط نمونه‌های مورد آزمایش در هر سیکل بارگذاری را نشان می‌دهد. دوباره بهترین عملکرد برای نمونه‌های SP2 و SP4 با شیپارهای واقع در میانه المان‌های مرزی مشاهده شده و بدترین عملکرد برای نمونه با شیپار مرکزی دیده می‌شود.

۴- صحت سنجی نمونه‌های آزمایشگاهی با تحلیل‌های اجزای محدود

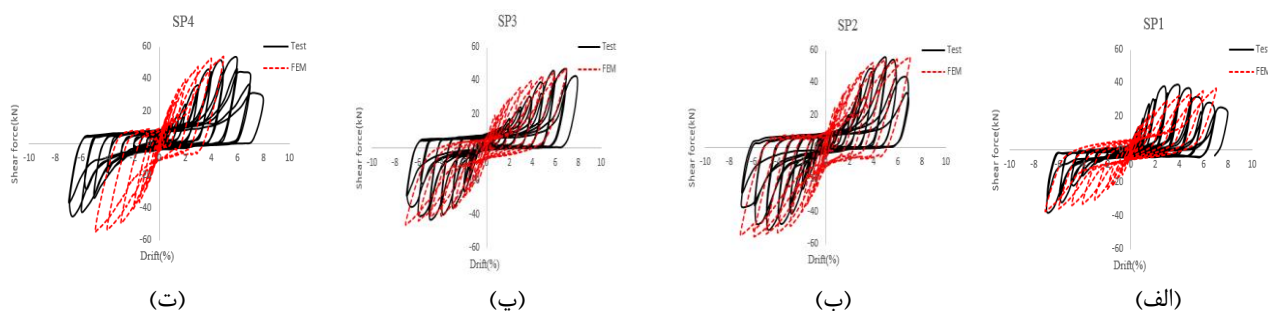
برای صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی از نرم افزار اجزای محدود Abaqus [۱۹] استفاده شده است. در این راستا قاب مفصلی با استفاده از المان‌های تیر B31 بر اساس جزئیات مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده است (شکل ۱۲). اتصالات چهار گوشه اعضای اصلی قاب با استفاده از اتصال HINGE و پانل‌های برشی فولادی با المان پوسته (SHELL) با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته از نوع S4R مدل شده است. برای اتصال

پانل به قاب، از اتصال TIE به صورت سطح به سطح استفاده شده و از مدل نمودن ورق‌های کمکی بدلیل آنکه در نتایج تأثیری ندارند، صرف‌نظر شده است [۲۰]. مش‌بندی ورق با الگوریتم BASE FRONT ADVANCING با اندازه مش ۲۵ میلیمتر در ورق و ۱۰ میلیمتر در مجاورت شیارها انجام شده است.



شکل ۱۲: نمونه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Abaqus

محل اتصال قاب به تکیه‌گاه برای مدل نمودن اتصال جوشی با اتصال FIX (تمامی درجات آزادی مقید شده) مدل شده است. برای جلوگیری از جابجایی خارج از صفحه تیر انتقال نیرو به قاب و محل ورق‌های کمکی بر روی پانل، درجه آزادی انتقالی در جهت عمود بر صفحه و دوران حول محورهای X و Y مقید شده‌اند. اجزا دیوار شامل تیر، ستون و ورق با رفتار الاستوپلاستیک دوخطی مدل شده‌اند. برای شبیه‌سازی لقی اتصالات در مدل عددی، نقص اولیه‌ای به میزان یک میلیمتر متناظر مدهای اول و دوم کمانش در پانل‌های برشی اعمال گردیده است. برای بارگذاری از پروتکل بارگذاری آزمایش استفاده شده است با این تفاوت که برای کاهش زمان تحلیل‌ها در هر مرحله از بارگذاری متناظر دامنه جابجایی خاص، فقط یک سیکل در مدل عددی در نظر گرفته شده است. در تحلیل‌ها علاوه بر خصوصیات غیر خطی مصالح، اثرات غیر خطی هندسی نیز در نظر گرفته شدند.



شکل ۱۳: مقایسه منحنی چرخه‌ای آزمایشگاهی و تحلیلی، (الف) نمونه SP1، (ب) نمونه SP2، (پ) نمونه SP3، (ت) نمونه SP4

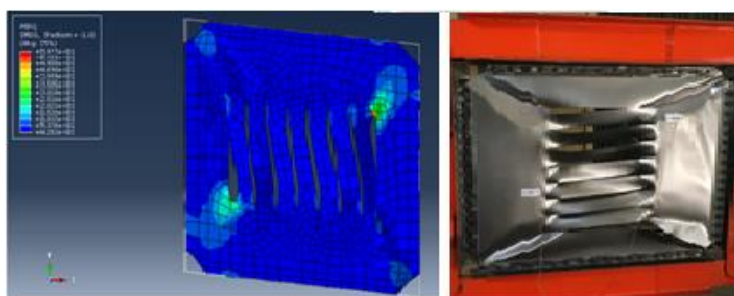
نتایج حاصل از تحلیل عددی و مقایسه آنها با نتایج آزمایش در شکل ۱۳ آورده شده است. مدل اجزا محدود به خوبی قادر به تعیین افزایش ظرفیت دیوار با افزایش دررفت است، ولی از نظر سختی اولیه به دلیل عدم مدل‌سازی لغزش و جابجایی پیچ‌ها، انطباق خوبی بین نتایج

تحلیلی و آزمایشگاهی دیده نمی‌شود. همین امر دلیل کاهش دقت مدل در شبیه‌سازی باریک‌شدگی چرخه‌های هیستریزیس به خصوص در جابجایی صفر می‌باشد. از طرفی به دلیل در نظر نگرفتن اثر خستگی چرخه پائین در مدل اجزا محدود، نتایج تحلیل قادر به شناسایی دررفت متناظر افت مقاومت نیستند. ولی همچنان که ذکر شد نتایج تحلیلی دقت مناسبی در تعیین ظرفیت برشی دیوارها ارائه می‌کنند. جدول ۴ ظرفیت برشی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی را با هم مقایسه می‌کند.

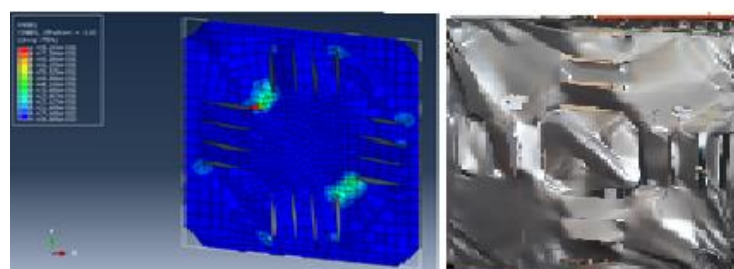
جدول ۴: ظرفیت برشی نمونه‌ها حاصل از آزمایش و تحلیل عددی

نمونه		نتایج آزمایش	نتایج تحلیل عددی	(%) اختلاف
SP1	دریفت مثبت	۳۷/۷۹	۳۶/۷۹	۲/۷
	دریفت منفی	۳۷/۰۰	۳۷/۴۹	۱/۳
SP2	دریفت مثبت	۵۴/۸۱	۵۵/۸۲	۱/۸
	دریفت منفی	۵۰/۹۷	۵۵/۵۵	۸/۲
SP3	دریفت مثبت	۴۵/۶۴	۴۷/۰۸	۳/۰
	دریفت منفی	۴۲/۰۷	۴۶/۳۴	۹/۲
SP4	دریفت مثبت	۵۲/۴۶	۵۴/۰۰	۲/۸
	دریفت منفی	۴۵/۲۹	۵۴/۸۸	۱۷/۴

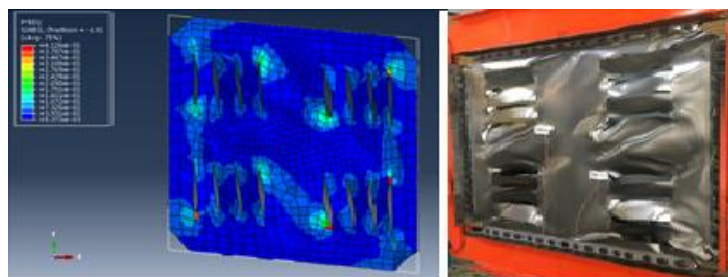
شکل ۱۴ نیز مد تغییرشکل نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی را با هم مقایسه می‌کند. همانگونه که مشاهده می‌شود، تحلیل عددی به نحو مناسبی مدهای خرابی هر چهار نمونه را در قیاس با نتایج آزمایشگاهی مدل کرده است.



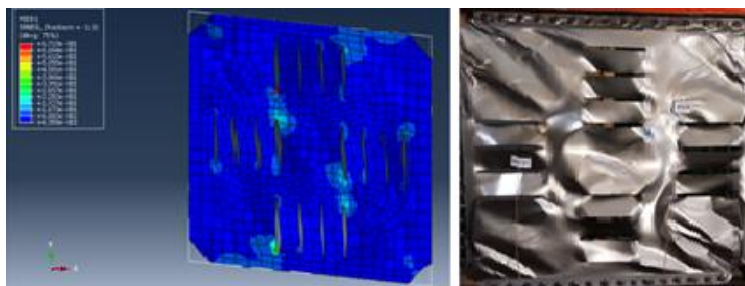
(الف)



(ب)



(ب)



(ت)

شکل ۱۴: مقایسه مدهای خرابی چهار نمونه در تحلیل عددی و آزمایشگاهی، الف) نمونه SP1، ب) نمونه SP2، پ) نمونه SP3، ت) نمونه SP4

۵- نتیجه گیری

این تحقیق به بررسی اثر محل قرارگیری و امتداد شیارها روی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی می‌پردازد. محل متداول قرارگیری شیارها معمولاً ناحیه مرکزی ورق می‌باشد که در این تحقیق اثر قرارگیری شیارها در مجاورت میانه المان‌های مرزی و گوشه‌های ورق نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا یک نمونه با محل شیار در ناحیه مرکزی (SP1) یعنی نمونه با آرایش متداول شیارها، دو نمونه با شیارهای واقع در میانه المان‌های مرزی (SP2 و SP4) و یک نمونه با شیارهای واقع در گوشه‌های ورق مورد آزمایش چرخه‌ای قرار گرفتند. در نمونه SP2 امتداد شیارها متعامد ولی در نمونه SP4 امتداد شیارها موازی است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که از نظر مقاومت، جذب انرژی و دررفت شروع پارگی ورق (دررفت شروع کاهش مقاومت) هر سه نمونه با آرایش غیرمتداول پیشنهادی در این مقاله (SP2، SP3 و SP4)، عملکرد به مراتب بهتری در قیاس با نمونه با آرایش متداول شیارها (SP1) از خود نشان می‌دهند. در مجموع بهترین عملکرد از آن نمونه SP4 بود که مقاومت و دررفت شروع پارگی ورق آن به ترتیب ۳۹ و ۱۰۰ درصد بیشتر از مقادیر متناظر در نمونه متداول یعنی SP1 بوده است. با بررسی عملکرد نمونه‌های با آرایش غیرمتداول انتظار می‌رود که با کنترل فاصله شیارها با هم و گوشه ورق، حتی عملکرد بهتری در نمونه‌های با آرایش غیرمتداول قابل دستیابی باشد.

References

- [1] Takahashi, Y., Takemoto, Y., Takeda, T.M., (1973) Experimental study on thin steel shear walls and particular bracing under alternative horizontal load, Preliminary Rep, IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-defined Repeated Loads, International Association for Bridges and Structural Engineering, Lisbon, Portugal.
- [2] Omori, S., Toyam, K., Cho, T., Takahashi, T., (1966) Test on RC shear wall with slits, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ, (Kanto, Japan).

- [3] Mutoh, K., Miyashita, O., Osada, M., Kanayama, H., (1968) Stress and deformation of slit wall, using FEM, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ, (Chugoku, Japan).
- [4] Shuangshuang Jin, Jiulin Bai, Jinping Ou, (2017) Seismic behavior of a buckling-restrained steel plate shear wall with inclined slots, *Journal of Constructional Steel Research* 129 1–11.
- [5] Peijun Wang, Zipeng Xue, Shaowen Xiao, (2017) Seismic behavior of Self-Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall made by two incline-slotted infill plates, *Journal of Constructional Steel Research* 133 47–64.
- [6] Hitaka, T., Matsui, C., and Sakai, J., (2007) Cyclic tests on steel and concrete-filled tube frames with slit walls, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36 707–727.
- [7] Cortes, G. and Liu, J. (2011), Experimental evaluation of steel slit panel–frames for seismic resistance, *Journal of Constructional Steel Research*, 67(2), 181-191.
- [8] Hitaka, T., Matsui, C., (2003) Experimental study on steel shear wall with slits, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 129 586–595.
- [9] Guo, L.H., Ma, X.B., Zhang, S.M., (2012) Experimental research on steel plate shear wall with slits. *Engineering Mechanics*, 29 133–142.
- [10] Zhao, Z.Z., Xiao, M., Qian, J.R., (2007) Experimental study on seismic behavior of steel plate shear walls with vertical slits, *Building Structure*, 37 105–109.
- [11] Jacobsen, A., Hitaka, T., Nakashima, M., (2010) Online test of building frame with slit-wall dampers capable of condition assessment, *Journal of Constructional Steel Research*, 66 1320–1329.
- [12] Lu, J.Y., Qiao, X.D., Liao, J., Tang, Y., (2016) Experimental study and numerical simulation on steel plate shear walls with nonuniform spacing slits, *International of Journal of Steel Structures.*, 16 1373–1380.
- [13] Lu, J.Y., Shunji Y., Qiao, X.D., Na Li., Tang, Y., (2018) Experimental Study on Low Cyclic Loading Tests of Steel Plate Shear Walls with Multilayer Slits, *International of Journal of Steel Structures.*, 16 1373–1380.
- [14] He, L., Togo, T., Hayashi, K., Kurata, M., Nakashima, M., (2016) Cyclic Behavior of Multirow Slit Shear Walls Made from Low-Yield-Point Steel, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 142 04016094.
- [15] Khatamirad, M., Shariatmadar, H., (2017) Experimental and analytical study of steel slit shear wall, *Steel and Composite Structures*, 24 741-751.
- [16] Aliakbari F, Shariatmadar H., (2019), Seismic response modification factor for steel slit panel-frames, *Engineering Structures*, 181:427-36.
- [17] Lu, J., Yu, S., Xia, J., Qiao, X., Tang, Y., (2018) Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits, *Journal of Constructional Steel Research* 147 477–487
- [18] Lu J, Zhang H, Yu S., (2021), Study on seismic behaviors of self-centering steel plate shear walls with slits. *Journal of Constructional Steel Research*, 185:106878.
- [19] ABAQUS V. 6.14 Documentation. Dassault Systemes Simulia Corporation; 2014.
- [20] Monsef Ahmadi, H, Sheidaii, M.R., Boudaghi, H, De Matteis, G., (2020) Experimental and numerical study on largely perforated steel shear plates with rectangular tube–shaped links, *Advances in Structural Engineering*, 1369433220937147.