http://journalisss.ir

بررسی آزمایشگاهی رفتار عملکردی دیوارهای برشی فولادی با ورق جان صاف و موج‌دار ذوزنقه‌ای عمودی با زاویه ۴۵ درجه

سیده‌مریم دشتی‌زند[۱*]، وحیدرضا کلات‌جاری[۲]، نادر خواجه احمد عطاری[۳]

۱- دانشجوی دکتری، عمران-سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳- استاد، مهندسی عمران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* شاهرود، صندوق پستی ۳۱۶، m.dashtizand@shahroodut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰)

چکیده

تحقیقات پیشین نشان داده، دیوارهای برشی فولادی (SPSW) سیستم مهاربندی مناسب، اقتصادی کارآمد نسبت به دیگر سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی می‌باشد. مهمترین پارامترهایی که در انتخاب سیتم مقاوم در مقابل بارهای جانبی مورد توجه می‌باشد، عبارتند از: سختی اولیه و موثر، مقاومت، شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی می‌باشد. به طور کل، دیوارهای برشی فولادی معمولا به دو صورت سخت نشده و سخت شده، طراحی می‌گردد. استفاده از ورق موجدار برای جان دیوار برشی فولادی، با توجه به شکل خاص ورق‌های موجدار ذوزنقه‌ای و سختی بالای خارج از صفحه، می‌تواند جز سیستم دیوار برشی فولادی صاف و سخت شده بشمار آید. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی منحنی Backbone، سختی، مقاومت و برش حداکثر پایه، شکل‌پذیری، جذب انرژی و ضریب اصلاح شکل‌پذیری (ضریب m) نمونه‌های دیوار برشی صاف و موجدار ذوزنقه‌ای عمودی با زاویه ٤٥ درجه که ورق جان با ورق اتصال به المان مرزی متصل شده ، تحت بارگذاری چرخه‌ای، پرداخته شده است. مشاهده شد، سختی اولیه و موثر نمونه‌ی موجدار بیشتر از نمونه صاف می‌باشد و جذب انرژی دیوار برشی صاف نسبت به دیوار برشی موج‌دار بیشتر است و رفتار پایدارتری نسبت به دیوار برشی موج دار پایدارتر است. بنابراین دیوار برشی با ورق صاف در مناطق با خطر زلزله خیزی زیاد بسیار مناسب می‌باشد.

واژگان کلیدی

دیوار برشی فولادی، دیوار برشی فولادی موجدار ذوزنقه‌ای، ضریب اصلاح شکل‌پذیری، بارگذاری چرخه‌ای

Experimental investigation of the behavior of steel plate shear walls with flat sheet and corrugated vertical trapezoidal sheet with an angle of 45 degrees

S.M. Dashti zand, V.R. Kalatajari, N. Khajeh Ahmad Attari

Abstract

Previous research has showed that steel shear walls (SPSWs) are a suitable, cost-effective bracing system compared to other lateral load-bearing systems. The most important parameters that are considered in choosing a lateral load resistant system are: initial and effective stiffness, strength, ductility, energy absorption capacity. In general, steel shear walls are usually designed in methods, unstiffened and stiffened. Using corrugated sheet as the web of steel plate shear wall(because of the special shape of trapezoidal corrugated sheets and its high out of plane stiffness) can be considered as a part of flat and stiffened steel plate shear wall system.. In this paper investigate, the backbone curve, stiffness, strength and maximum shear base, ductility, energy absorption and m-factor of flat and corrugated vertical trapezoidal steel plate shear walls with 45 degree angle connected by welding of fishplate to the boundary element, under cyclic loadingwas studied. It was observed that the initial and effective stiffness of the corrugated sample is higher than the smooth sample and the energy absorption of the smooth shear wall is higher than the corrugated shear wall and the more stable behavior is more stable than the corrugated shear wall. Therefore, shear walls with smooth sheets are very suitable in areas with high seismic risk

Keywords

Steel plate shear wall, Trapezoidal corrugated steel plate shear wall, m-factor, Cyclic loading

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر استفاده از دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم برای مقابله با بارهای جانبی ناشی از زلزله‌های شدید و نیروی باد مورد توجه پژوهشگران در نقاط مختلف جهان قرار گرفته‌است. این سیستم لرزه‌ای نوین که در جهان به سرعت روبه گسترش است و برای ساختمان‌های تازه ساخت و همچنین مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود در کشورهای لرزه‌خیزی مانند، آمریکا و ژاپن مورد استفاده قرار گرفته‌است [۱]. رفتار و عملکرد دیوار برشی فولادی در مقایسه با دیگر سیستم‌های لرزه‌ای مناسب‌تر می‌باشد. مهمترین پارامترهای مورد توجه از جمله مقاومت، سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی به وسیله رفتار چرخه‌ای می‌باشد. دیوارهای برشی فولادی از صفحات فولادی که توسط تیرها و ستون‌های احاطه شده‌اند و می‌توان تا حدودی آن را به یک تیر ورق طره‌ای قائم شبیه دانست به طوریکه صفحه فولادی پرکننده قاب مشابه جان تیر ورق و ستون‌ها، بال‌های آن و تیرها، مشابه سخت‌کننده‌های عرضی آن می‌باشند. دیوار برشی فولادی که با نام اختصاری SPSW در آیین نامه AISC معرفی می‌شود سامانه‌ای است که از ورق فولادی، ستون‌های حایل و تیرهایی که در تراز هر طبقه وجود دارند، تشکیل شده است. ورق فولادی که به تیرها و ستون‌ها سیستم باربر جانبی متصل است، ورق جان[۱] نامیده می‌شود. ستون‌ها در سیستم دیوار برشی فولادی به اعضای مرزی قائم (VBE[۲]) و تیرها به اعضای مرزی افقی (HBE[۳]) موسوم هستند. رفتار دیوار برشی فولادی در تحمل بارهای جانبی ناشی از زلزله را می‌توان با عملکرد تیرورق‌ها شبیه‌سازی کرد.

تفاوت اصلی تیر ورق‌ها و دیوار برشی، مربوط به عملکرد برشی آن‌ها می‌شود. تیر ورق‌ها در حالت بارگذاری استاتیکی باید برش و لنگر حاصل از بارها را تحمل نمایند و در این حالت کافی است برش و لنگر حاصل از تحلیل، از ظرفیت برشی و خمشی تیر کمتر باشد. ظرفیت برشی و خمشی تیرورق می‌تواند از ظرفیت کمانش آن و با اعمال ضریب اطمینان، به‌دست آید و در واقع رفتار تیرورق، فرای بارهای طراحی مورد بارگذاری زلزله، دیوار باید در برش، از ظرفیت تغییر شکل‌های خمیری یا شکل‌پذیری برشی برخوردار باشد. بنابراین در دیوارهای برشی فولادی، فقط عامل مقاومت در تعیین کفایت ورق جان دخیل نیست، بلکه رفتار پس کمانشی و ظرفیت تغییر شکل‌های خمیری نیز از پارامترهای طراحی محسوب می‌شوند [۲].

دیوار برشی فولادی موقعی که در معرض تغییر شکل‌های غیرخطی رفت و برگشتی قرار می‌گیرد، از خود سختی اولیه بالا نشان داده، بسیار شکل‌پذیر عمل کرده و مقدار زیادی انرژی را مستهلک می‌کند. این ویژگی‌ها دیوارها را برای تحمل بارهای لرزه‌ای مناسب می‌سازد. پیش از اینکه تحقیقات کلیدی در دهه ۱۹۸۰ انجام شود، حد طراحی به صورت کمانش خارج صفحه دیوار در نظر گرفته می‌شد. برای پیشگیری ازکمانش، مهندسان برای دیوار سخت‌کننده در نظر می‌گرفتند. هرچند آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام شده تحت بارهای شبه استاتیکی و دینامیکی نشان داد که مقاومت پس‌کمانشی[۴] و شکل‌پذیری ورق جان نازک می‌تواند قابل توجه باشد. پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر نشان داد که وقوع کمانش برشی در ورق به معنای پایان ظرفیت باربری سیستم نیست و با توسعه میدان کشش قطری در ورق، سیستم می‌تواند حتی پس از کمانش ورق نیز همچنان به باربری خود ادامه دهد.

بر این اساس ضوابط آئین‌نامه‌های CAN/CSAS16-01 [۳] کانادا، NEHRP2003، FEMA 450 و AISC 341 تدوین شده که در آن‌ها اجازه کمانش برشی دیوار و عملکرد میدان کششی را می‌دهد.

تحقیقات روی دیوارهای برشی فولادی سخت نشده با بررسی تاثیر اتصال ساده در مقابل اتصال گیردار تیر به ستون بر رفتار دیوار (Caccese و همکارانش [٤])، پاسخ دینامیکی دیوار برشی فولادی (Sabouri-Ghomi و Roberts [٥] و Rezai [٦])، تاثیر سوراخ در ورق پرکننده (Roberts و Sabouri-Ghomi [۷])، استفاده از فولاد مقاومت پایین و ورق فولادی نازک (Vian و Bruneau [۸]) و بررسی اتصالات ورق جان (Schumacher و همکارانش [۹]) مطالعه شده‌است. به علاوه، مدل‌سازی اجزای محدود دیوارهای برشی سخت نشده در تعدادی از مقالات ارائه شده است که می‌توان به کارهای انجام شده توسط Elgaaly و همکارانش [۱۰] و Driver و همکارانش [۱۱] اشاره کرد. در مورد دیوارهای سخت شده نیز تحقیقاتی انجام شده است. در این مورد می‌توان به بررسی رفتار سیکلیک، قابلیت تغییر شکل و سختی سیستم (Alinina و همکارانش [۱۲])، بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوارهای برشی سخت‌شده (Sabouri-Ghomi و همکارانش [۱۳])، بررسی رفتار دیوارها تحت فشار و خمش (Grondin و همکارانش [١٤]) اشاره‌کرد.

مطالعات نظری و آزمایشگاهی فراوانی درزمینه رفتارکمانشی و مقاومت ورق‌های موجدار در جان تیرورق‌ها توسط Elgaaly

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

و همکارانش [۱۵ و ۱۶]، Ahmed [۱۷]، Yi و همکارانش [۱۸] صورت گرفت.

این گروه از مدل‌های اجزاء محدود و مدل‌های بر پایه روش چند نواری تکامل یافته که توسط Timler و Kulak [۱۹]، ۱۹۸۳ ارائه شده بود، استفاده نمودند. در مدل اجزاء محدود از هندسه و رفتار غیرخطی مصالح برای مدل‌سازی رفتار دیوار استفاده گردید. ضخامت ورق مشابه نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. اتصالات تیر به ستون گیردار بود و بار جانبی به صورت یکنواخت تا جایی اعمال شد که ناپایداری بر اثر تشکیل مفاصل پلاستیک در ستون‌ها و کمانش موضعی بال روی داد. نتیجه‌گیری شد که دیوارهای با ورق ضخیم‌تر الزاماً پر مقاومت‌تر نیستند زیرا در صورتی‌که ستون به اندازه کافی سختی و مقاومت نداشته باشد، تسلیم آن حاکم بر طرح خواهد بود. مدل‌های اجزای محدود با المان‌های شِل به صورت محسوسی ظرفیت و سختی را بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زد. در سال ۲۰۰۶، Botros و Kulak [۲۰] با بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار ذوزنقه‌ای نشان داد دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار دارای ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی بیشتری نسبت به دیوارهای با ورق‌های صاف می‌باشند. در این پژوهش رفتار دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار پرداخته شد. نتایج نشان داد که دیوارهای برشی فولادی موج‌دار، دارای مقاومت برشی بالاتری نسبت به ورق ساده بوده‌است. از طرفی عرض پانل، زاویه موج‌ها و نوع پروفیل‌های موج‌دار اثر کمتری روی مقاومت برشی دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دارند، همچنین دیوارهای برشی فولادی موج‌دار، دارای ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری بالاتری نسبت به ورق صاف دارد. او همچنین در بررسی‌های تئوریک خود بیان نمود که دیوارهای دارای ورق‌های موج‌دار افقی دارای اتلاف انرژی و شکل‌پذیری بیشتر نسبت به دیوارهای موج‌دار مورب می‌باشد.

در سال ۲۰۰۸، Tipping و Stojadinovic [۲۱] آزمایش‌هایی را بر روی ٤٤ مدل مختلف دیوارهای برشی فولادی موج‌دار ذوزنقه‌ای یک طبقه انجام دادند. ورق‌های مورد آزمایش با پیچ به قاب پیرامونی متصل شده بودند. همچنین، ضخامت ورق‌های سرد نورد مورد استفاده بسیار کم بود، از این رو خرابی دیوارها بیشتر در محل پیچ‌ها اتفاق افتاد و دیوارها وارد مرحله پس‌کمانش نشدند. آنها در این پژوهش به بررسی ابعاد و اندازه ورق، شکل ورق، نوع قید و بست‌ها پرداختند. ضریب رفتار پیشنهادی آنها برای این نوع دیوار ۵/۵ بوده‌است. همچنین دریافتند که این سامانه باعث افزایش ظرفیت برشی دیوار برشی می‌گردد.

Tanaka و همکارانش [۲۲] در سال ۲۰۰۸ روی قاب‌های بتنی پیش ساخته که با استفاده از ورق‌های موج‌دار ذوزنقه‌ای مقاوم شدند و بصورت آزمایشگاهی و تئوریک مورد مطالعه قرار دادند. آنها چهار قاب بتنی با شرایط ساختار متفاوت که با استفاده از ورق‌های فولادی ذوزنقه‌ای جهت استهلاک انرژی در دهانه قاب و تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار دادند. قاب‌های بتنی شامل قاب بتنی معمولی، قاب بتنی پیش‌تنیده و پیش ساخته کاملا چسبیده به هم و قاب بتنی پیش تنیده و پیش ساخته که به طور کامل به یکدیگر نچسبیده‌اند، مورد آزمایش قرار دادند. ورق‌های فولادی دارای تنش‌های تسلیم تسلیم ۳۰۰، ۲۲۵ و ۱۰۰ مگا پاسکال بودند. نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی نشان داد که تغییر شکل‌های پسماند خیلی کوچک در قاب‌های پیش‌ساخته نسبت به قاب بتنی معمولی دارد و اتلاف انرژی در قاب‌ها با پانل‌های فولادی بسیار قابل ملاحظه بود. نتایج تئوریک بدست آمده بسیار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک بود. در تحقیقی که به مقایسه رفتار خطی دیوارهای برشی فولادی ساخته شده از ورق‌های صاف و موج‌دار انجام گرفت، نتایج بیانگر افزایش قابل توجه جذب انرژی توسط ورق‌های موج‌دار نسبت به ورق‌های صاف بود.

در ارزیابی آزمایشگاهی، توسط Emami و همکارانش [۲۳] در سال ۱۳۹۲ رفتار دیوارهای برشی سخت‌نشده، موج‌دار قائم و افقی مورد بررسی قرار گرفت.

در این آزمایش نمونه‌های دیوار برشی شامل دیوار برشی فولادی با ورق‌های صاف بدون سخت‌کننده و دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها در مقیاس ۲÷۱ و در یک قاب یک طبقه و یک دهانه ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته‌اند. نتایج مقایسه نمونه‌های ورق فولادی موج‌دار و صاف نشان داد، مقادیر سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی نمونه‌های موج‌دار بالاتر از نمونه سخت نشده‌است در حالی که مقاومت نهایی نمونه سخت‌نشده بیشتر از نمونه‌های موج‌دار بوده است.

Kalantari و Kalatjari [۲٤] در سال ۱۳۹٦، در پژوهش انجام شده رفتار و عملکرد دیوارهای برشی فولادی در حالت‌های سخت نشده، موج‌دار افقی، موجدار عمودی، تقویتی ورق موج‌دار افقی با دو ورق صاف و تقویتی ورق موج‌دار عمودی با دو ورق صاف (همگی با مصرف مصالح یکسان) به صورت دقیق مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ها برای قاب سه

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

طبقه و یک دهانه و در مقیاس واقعی با نرم‌افزار آباکوس مدلسازی شده و تحت بارگذاری ثقلی و لرزه‌ای قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها برای نسبت طول دهانه به ارتفاع در سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و هرکدام برای سه ضخامت ۱،۳/۵ و ٤/۵ میلی‌متر ارزیابی شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که دیوار برشی مرکب از ورق صاف و موجدار در طول بارگذاری رفتار پایدار و مناسبی از خود نشان داده و توانسته‌است ضعف‌های مربوط به عملکرد لرزه‌ای دیوارهای سخت‌نشده و موجدار را به خوبی بهبود بخشد.

دیوار برشی فولادی با سخت کننده به دلیل تنش‌های پس‌ماند ناشی از جوشکاری سخت‌کننده‌ها و با جزئیات اجرای بیشتر نیاز به وقت و هزینه زیاد می‌باشد. بنابراین، با توجه به شکل هندسی خاص ورق موجدار ذوزنقه‌ای و سختی هندسی خارج از صفحه قابل ملاحظه آن، این نوع ورق‌ها از مقاومت کمانشی به مراتب بیشتری نسبت به ورق صاف برخوردار می‌باشد. همچنین به علت وجود خم‌های متعدد در ورق و تبدیل نیروی درون صفحه‌ای به نیروهای برون صفحه‌ای و بالعکس، ورق‌های صاف تشکیل‌دهنده ورق موجدار، یکدیگر را مقید می‌نماید، با بکارگیری آن به عنوان جان تیرورق، علاوه بر کاهش ضخامت مورد نیاز جان، ضرورت استفاده از سخت‌کننده نیز مرتفع می‌شود و می‌توانند مزایای هر دو نوع دیوار برشی سخت‌شده و سخت‌نشده را دارا باشد. یعنی به دلیل وجود سختی هندسی ذاتی ورق موجدار، مشکلات مربوط به کمانش برون صفحه‌ای و یا سختی عملیات حمل و نصب را برطرف می‌کند و به علت عدم احتیاج به سخت‌کننده‌ها و کاهش زمان ساخت و عملیات مرتبط، هزینه‌ها نیز کاهش می‌یابد.

در این مقاله طی یک تحقیق آزمایشگاهی در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بار چرخه‌ای بر روی دو نمونه پیشنهادی دیوار برشی فولادی صاف و موجدار ذوزنقه‌ای عمودی با زاویه ٤٥ درجه که ورق جان با ورق اتصال به المان‌های مرزی متصل شده، با مقیاس یک به سه، در یک دهانه و یک طبقه ساخته شدند، مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌ها از نظر ضخامت ورق‌های جان (۱/۵ میلی‌متر) و مشخصات المان‌های مرزی و همچنین اتصالات مشابه در نظر گرفته‌شد. نمونه‌ها در کف گیردار و اتصالات تیر به ستون صلب و خمشی اجرا شدند. این آزمایشات بر اساس یک روش تأیید شده برای شبیه سازی بارهای لرزه‌ای و به صورت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی انجام شده است. همچنین، از بارهای ثقلی برای نمونه‌ها صرف‌نظر شده‌است.

برای طراحی اعضای دیوار برشی فولادی ویژه با ورق صاف، تقویت نشده، از الزامات راهنمای طراحی AISC20 [۲۵] استفاده شد و همچنین برای مقایسه عملکرد لرزه‌ای نمونه‌های دیوار برشی فولادی در این تحقیق، همان مقاطع تیر و ستون(المان مرزی) برای سایر دیوارهای برشی نیز استفاده گردید. به این ترتیب نیروی برشی اسمی وارد شده بر ورق جان عبارتست از:

$$V_n = 0.42 f_y t_w L_{cf} \sin 2\alpha \qquad (۱)$$

f_y مقاومت تسلیم فولاد، t_w ضخامت ورق جان، L_{cf} طول خالص تیر (فاصله بین دو بر ستون) و α زاویه شیب میدان کشش قطری می‌باشد. برای محاسبه زاویه α تعیین اندازه و ابعاد اولیه اعضای مرزی قائم و افقی ضروری است. تعیین ابعاد اولیه بر اساس فرضیات برای تحمل نیروهای ایجاد شده در اعضا انجام می‌شود. برای طراحی اولیه فرض بر این است که ورق جان در برابر کل برش سیستم مقاومت می‌کند و زاویه تنش کششی که بین ۳۰ تا ٦۰ درجه متغیر است.

بر اساس آیین نامه AISC-341 [۲] حداقل ممان اینرسی ستون از رابطه زیر بدست می‌آید.

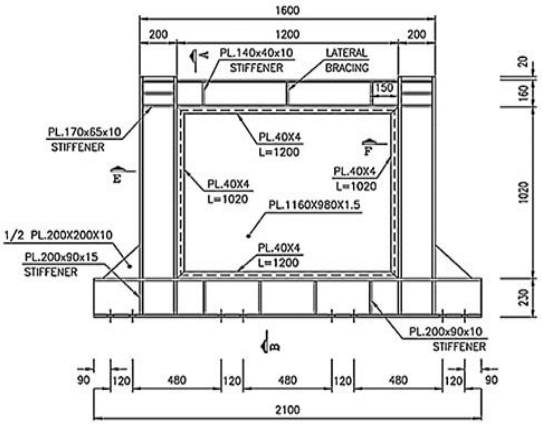
$$I_c \geq 0.00307 t_w h^4 / L \qquad (۲)$$

I_c ممان اینرسی ستون، t_w ضخامت ورق جان، h ارتفاع ورق جان، L طول ورق جان می‌باشد. در صورت تغییر h با L در معادله (۲) برای عناصر مرزی افقی (HBEs) قابل استفاده است. با توجه به محدودیت موجود در حداکثر بار مجاز و اندازه نمونه‌ها درآزمایشگاه، طراحی شدند و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس، سهم باربری جانبی ورق جان از باربری کل مجموعه برابر با ۳۵٪ محاسبه شد.

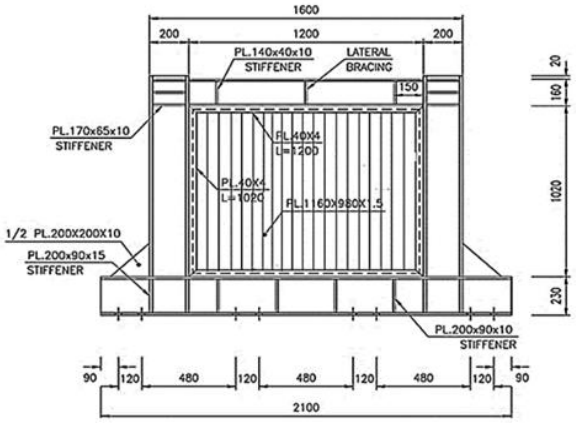
۲- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

اولین نمونه که "SSPW" نامیده می‌شود، دارای دیوار سخت نشده با جان لاغر است (شکل (۱)). نمونه دوم "CSPW" نامیده می‌شود، که دیوار سخت نشده با جان لاغر موجدار ذوزنقه‌ای عمودی با زاویه ٤٥ درجه است (شکل (۲)). کلیه مقاطع تیرها و ستون‌ها از ورق ساخته شده‌است (شکل (۳)). ستون‌ها به صورت I شکل، عرض و ضخامت ورق بال‌های ستون‌ها به ترتیب ۱۵۰ و ۱۵ میلی‌متر، عرض و ضخامت ورق جان آن‌ها به ترتیب برابر ۱۷۰ و ۱۵ میلی‌متر منظور شده است.

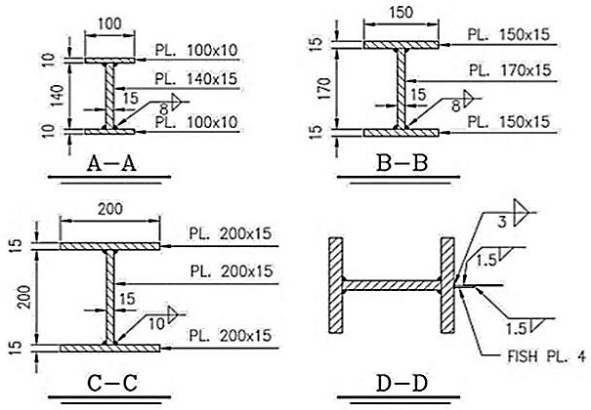
[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]



شکل ۱- نمونه "SSPW"



شکل ۲- نمونه "CSPW"



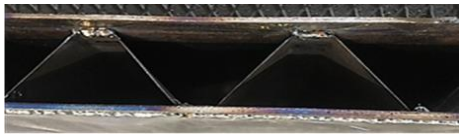
شکل ۳- جزییات مقاطع تیر و ستون‌ها و اتصالات

در کلیه نمونه‌ها، عرض و ضخامت بال‌های تیر فوقانی به ترتیب برابر ۱۰۰ و۱۰ میلی‌متر و عرض و ضخامت جان آن به ترتیب برابر ۱۴۰ و ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. ورق‌های ستون و تیرها به وسیله جوش گوشه به بعد ۸ میلی‌متر با الکترود E6013 متصل شده است. عرض و ضخامت بال تیر بالایی به ترتیب ۱۰۰و ۱۰ میلی‌متر و عرض و ضخامت جان تیر بالایی به ترتیب ۱۴۰ و ۱۵ میلی‌متر می‌باشد و بال به جان تیر به وسیله جوش گوشه با ضخامت ۸ میلی‌متر با الکترود E6013 متصل شده است. اتصال ورق جان به قاب پیرامونی (المان مرزی) به وسیله ورق اتصال به عرض ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ٤ میلی‌متر انجام شده‌است.

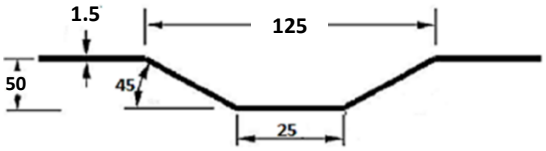
در نمونه "CSPW" قسمت ورق موج‌دار جان، به دو ورق اتصال جوش شد و سپس ورق جان که با دو ورق اتصال احاطه شده به تیر بالا و پایین جوش شد (شکل (٤)). عرض، ارتفاع و ضخامت ورق جان نمونه‌ها به ترتیب برابر۱۱۶۰، ۹۸۰، ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. اندازه‌گذاری و مشخصات ورق ذوزنقه‌ای جان در شکل (۵) نشان داده شده‌است. در نمونه‌ها، به علت ضخامت کم ورق جان، از جوش با بعد کم، برای اتصال ورق جان به ورق اتصال استفاده شد. به منظور جلوگیری از حرکت خارج از صفحه، دو تیر به عنوان مهار جانبی در تراز بالای نمونه‌ها و موازی باتیر بالایی در هر دو طرف اجرا شد. از جوش نفوذ کامل برای اتصال پای ستون به تیر کف استفاده شده و اتصال جوشی به بال تیر کف متناسب با بار طراحی انجام شد. برای جلوگیری

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

از گسیختگی اتصال جان به بال تیر کف، ورق تقویت‌کننده مثلثی متساوی‌الساقین، به اتصال پای ستون به تیر کف افزوده شد تا بار متمرکز ستون در طول بیشتر به تیر کف منتقل شود و از زوال اتصال جلوگیری نماید. به منظور برقراری اتصال با گیرداری کامل، اتصال ستون‌ها به تیر تحتانی و اتصال تیر فوقانی به ستون‌ها با جوش شیاری نفوذ کامل بال‌ها و جوش گوشه ورق جان و ورق اتصال، اجرا شد. پس از ساخت کامل نمونه‌ها، کنترل کیفیت جوش‌های شیاری و آزمایش نفوذ برای جوش‌ها بر اساس استاندارد AWS و بازرسی چشمی جوش (VT) و بازرسی مایعات نافذ (PT) انجام شده‌است

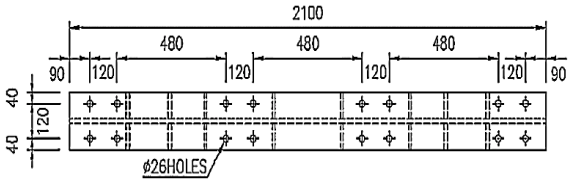


شکل ٤- تصویر اتصال ورق جان به تیرها



شکل ٥- اندازه‌گذاری ورق ذوزنقه‌ای (mm)

برای اتصال دیوار برشی فولادی به کف آزمایشگاه از یک تیر عمیق H شکل استفاده شد. نمونه‌ها با استفاده از اتصال بال پایین تیر تحتانی به کف قوی آزمایشگاه و با پیچ و مهره‌های مقاومت بالا M24 متصل شدند. چیدمان پیچ و مهره‌ها در شکل (٦) نشان داده‌شده است.



شکل ٦- جزییات اتصال نمونه به کف آمایشگاه

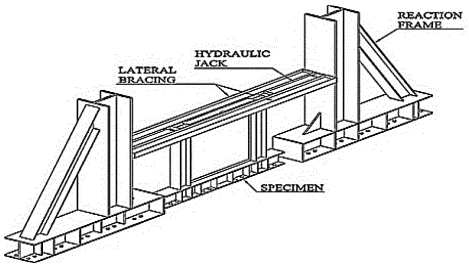
فولاد مورد استفاده برای ورق جان و اجزای مرزی برای کلیه نمونه‌ها ST37 مطابق با استاندارد DIN [٢٦] آلمان است. خواص مکانیکی ورق‌های فولادی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول (١) گزارش شده‌است. برای هر ضخامت ورق، سه نمونه تحت آزمایش قرار گرفت.

جدول ١- مشخصات مکانیکی مصالح

ورق اعضا	مدول یانگ، E (GPa)	تنش تسلیم، f_y (MPa)	تنش حداکثر، f_u (MPa)	$\frac{f_u}{f_y}$	ازدیاد طول نسبی (٪)
ورق جان (١/٥ mm)	٢١٠	٣٣١	٣٤٥	١/٠٤	٤٨
ورق اتصال (٤ mm)	٢١٠	٢٩٠	٤٣٠	١/٤٨	١٤
ستون و تیر (١٠ mm)	٢١٠	٢٨٥	٣٩٠	١/٣٩	٣٤
ستون و تیر (١٥ mm)	٢١٠	٢٨٠	٤٣٠	١/٥٣	٤٦

نمونه‌ها پس از ساخت و پیش از بارگذاری، با محلول آهک هیدراته کلیه سطوح قابل مشاهده، پوشانده شد تا امکان مشاهده رفتار نمونه در طول بارگذاری را تسهیل نماید.

نمونه‌ها پس از ساخت، بین دو پایه قائم موجود در آزمایشگاه قرار گرفته و جک‌های هیدرولیکی، بار و جابجایی مورد نظر را در تراز تیر فوقانی نمونه با آن وارد می‌کنند. همچنین موقعیت پروفیل‌های که تامین‌کننده مهار جانبی تیر فوقانی در نمونه‌ها است و از تغییر شکل خارج از صفحه آن جلوگیری می‌کنند (شکل (٧)).



شکل ٧- قرارگیری نمونه‌ها برای انجام آزمایش

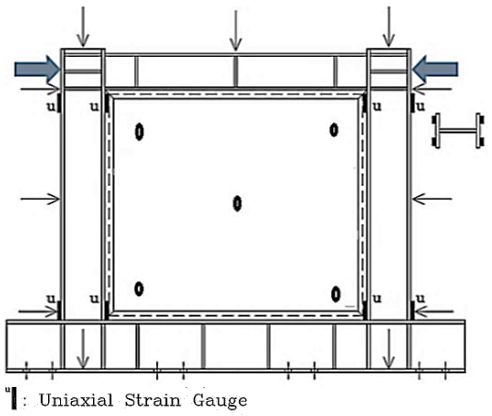
٣- ابزاربندی نمونه‌ها

برای مطالعه رفتار هر دیوار در حین آزمایش، لازم است اطلاعات مورد نیاز اندازه‌گیری وثبت شد. مهمترین داده‌هایی که در شناخت رفتار دیوارها نقش تعیین کننده‌ای داشته و در این پژوهش به آنها پرداخته شد، عبارتند از: نیرو، تغییرمکان و کرنش. همچنین در این مطالعه نحوه توزیع ترک و گسترش آنها در دیوارهای برشی فولادی در مراحل مختلف بارگذاری، برداشت شده است. برای اندازه‌گیری تغییرمکان‌های دیوار در نقاط حساس، از جابجایی سنج های الکتریکی استفاده شد. با توجه

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

به اینکه با ابزارهای موجود، اندازه گیری تنش به صورت مستقیم امکان‌پذیر نیست، اندازه‌گیری کرنش اهمیت پیدا می‌کند. با اندازه‌گیری کرنش و با استفاده از روابط موجود در مکانیک مصالح، مقدار تنش قابل محاسبه است.

برای نمونه‌های مورد مطالعه این کرنش‌سنج‌ها روی بال ستون‌ها و به موازات لبه بال استفاده شده است. در مقاطع فوقانی و تحتانی هر ستون از ۸ کرنش سنج تک محوری مطابق با آنچه در شکل (۸) مشاهده می‌شود، استفاده شد.



شکل ۸- موقعیت کرنش سنج‌ها

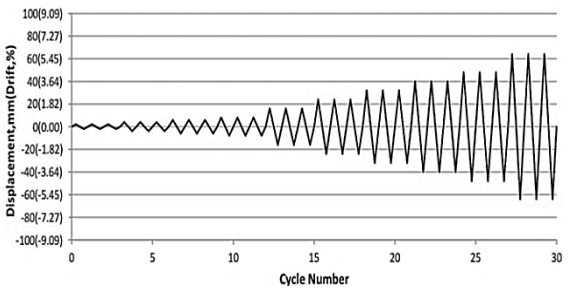
نیروها، تغییرمکان‌ها و کرنش‌ها همگی توسط یک سیستم جمع‌آوری اطلاعات ثبت و نگهداری شدند. دستگاه ثبت داده‌ها از مدل TDS 601 ساخت شرکت TML ژاپن در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. ابزارهای الکتریکی اندازه‌گیری شامل نیروسنج‌ها، جابجایی سنج‌ها و کرنش سنج‌ها به وسیله کابل‌های چند سیمی به صورت منظم و طبق یک شماره‌گذاری مشخص، به جعبه سوئیچ روی دستگاه وصل شدند و در هنگام آزمایش، مقادیر آن‌ها مرتب ثبت گردید تا نمونه به مرحله گسیختگی برسد.

٤- سیستم انجام آزمایش و بارگذاری

برای بررسی رفتار لرزه‌ای تحت اثر زلزله، لازم است بار زلزله یا مشابه آن به سازه وارد شود. بارگذاری جانبی در این مطالعه، از روش بارگذاری جانبی شبه استاتیکی سیکلی افزاینده استفاده شد شکل(۹). برای شبیه‌سازی بار زلزله و همچنین بررسی رفتار رفت و برگشتی نمونه، پروتکل ATC-24 [۲۷] به‌کارگرفته شده‌است. بارگذاری به صورت کنترل جابجایی بوده و دامنه بارگذاری به صورت متغیر (افزاینده-کاهنده) در نظر گرفته شده‌است و بارگذاری در قسمت تیر فوقانی اعمال می‌شود.

برای شبیه‌سازی زلزله و بررسی دقیق رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی از بارگذاری شبه استاتیکی با افزایش بار و جابجایی در هر چرخه استفاده شده است. برای اعمال این بارگذاری جانبی، از سیستم هیدرولیک دستی استفاده شد. این سیستم دارای پمپ دستی مجهز به ترمینال تقسیم کننده فشار هیدرولیکی، شیلنگ‌های فشار قوی و دو جک هیدرولیکی فشاری ۱۰۰ کیلونیوتن می باشد.از آن جا که جک‌های هیدرولیکی مورد استفاده از نوع فشاری بودند لذا برای اعمال بارگذاری رفت و برگشتی، ابتدا در هر طرف نمونه یک قاب صلب فولادی که توسط پیچ‌های پر مقاومت به کف صلب آزمایشگاه متصل می شود، قرار داده شد. دو نشیمن‌گاه فولادی ساخته شد و به قاب‌های صلب متصل شد تا جک‌های هیدرولیکی بر روی آنها قرار بگیرند. این مجموعه مقاوم نقش تکیه‌گاه جک‌های هیدرولیکی را دارد که نیروهای افقی را به نمونه آزمایشگاهی اعمال می‌کنند.

بار افقی با استفاده از دو جک هیدرولیکی اعمال شد. برای آنکه در حین آزمایش نیروی وارده به دیوارها توسط جک‌ها همواره درراستای افقی باشد. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه دیوارها در حین آزمایش، از دو پروفیل I شکل استفاده شد که به هم متصل بوده و در دو طرف تیر بارگذاری با فاصله اندکی قرار گرفتند. همان طور که اشاره شد، جک‌های اعمال نیرو از نوع فشاری بوده و توانایی اعمال نیروهای کششی را نداشتند. از این رو هنگام اعمال بار جانبی توسط هر یک از جک‌ها، بایستی جک دیگر به عقب کشیده می شد تا مزاحمتی برای حرکت جانبی دیوار ایجاد ننماید. همچنین در حین آزمایش‌ها مشاهده شد که این روش باعث شد حرکت دیوارها کاملاً داخل صفحه باشد و حرکت خارج از صفحه، اتفاق نیفتد. بارگذاری سیکلی به صورت کنترل شونده توسط تغییرمکان درآمد که در آن، هر سیکل بارگذاری با دامنه تغییرمکانی مشخص، ۳ بار تکرار شد.



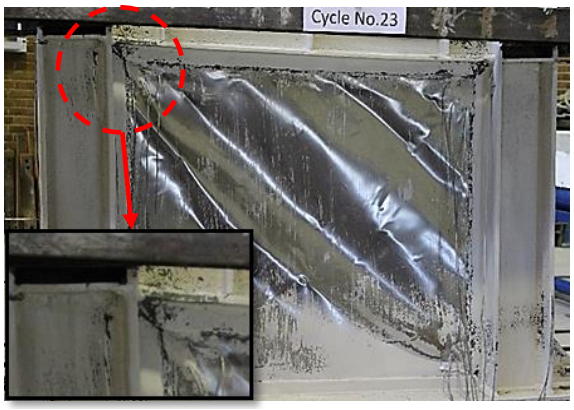
شکل ۹- پروتکل بارگذاری با کنترل جابجایی

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

۵- رفتار نمونه ساده "SSPW" در طول بارگذاری

در این نمونه تسلیم ورق جان با تحلیل اطلاعات ثبت شده توسط داده نگار در اولین چرخه بارگذاری درجابجایی ۱/۹۳ میلی‌متر (۰/۱۸٪) اتفاق افتاد. با ادامه‌ی بارگذاری، در چرخه یازدهم با جابجایی ۷/۷۱ میلی‌متر (۰/۷٪) کمانش دائمی در ورق جان کاملاً مشاهده شد شکل (۱۰) و تسلیم بال خارجی ستون در مقطع پای آن نیز اتفاق افتاد. در چرخه بیست و سوم بارگذاری با جابجایی جانبی ۳۰/۸۳ میلی‌متر (۲/۸٪) اولین سوراخ شدگی روی ورق جان در کنج آن و در نزدیکی اتصال تیر به ستون روی داد شکل (۱۱)، سوراخ شدگی پس از تسلیم کامل ورق جان و پیدایش تغییر شکل‌های بزرگ روی آن بود.

شکل ۱۰- وقوع کمانش دائمی ورق جان در جابجایی ۰/۷٪



شکل ۱۱- تسلیم کامل و گسترش تغییر شکل‌های ماندگار روی ورق جان و پیدایش اولین سوراخ روی ورق جان در مجاورت اتصال تیر فوقانی به ستون در جابجایی ۲/۸۰٪

با ادامه بارگذاری نمونه، تسلیم بال تیر فوقانی در مجاورت اتصال به ستون و خرابی اتصال آن ، تسلیم بال ستون شکل (۱۲)، گسیختگی جوش ورق جان به ورق اتصال و جداشدگی لبه اتصال فوقانی ورق مثلثی از بال ستون مشاهده شد (شکل (۱۳)).

اعمال جابجایی بر نمونه تا حداکثر مقدار رفت و برگشت جک‌ها که برابر با ۸۰ میلی‌متر بود، ادامه داشت (شکل (۱٤)). حداکثر ظرفیت برشی نمونه اول برابر ۹۰۰ کیلونیوتن در چرخه نوزدهم بارگذاری با جابجایی متناظر ۲۲/۵۲ میلی‌متر (۲/۰۵٪) مشاهده شد.

شکل ۱۲- تسلیم بال ستون در مجاورت لبه فوقانی ورق مثلثی تقویت اتصال در جابجایی ۲/۸۳٪

شکل ۱۳- پارگی بال ستون در مجاورت لبه فوقانی ورق مثلثی تقویت اتصال در جابجایی ٦/٦١٪

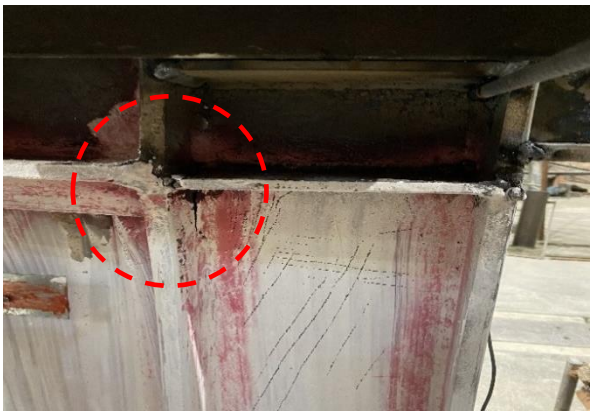
شکل ١٤- نمونه پس از بارگذاری تا جابجایی ۷/۲۷٪

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

٦- رفتار نمونه ساده "CSPW" در طول بارگذاری

در این نمونه بر پایه اطلاعات ثبت شده در دستگاه داده‌نگار، تسلیم ورق جان درچرخه دوم بارگذاری در جابجایی ٤ میلی‌متر (٠/٣٦٪) رخ داد. در چرخه هفتم بارگذاری زمانی که جابجایی ٦ میلی‌متر (٠/٤٥٪)، ترک در جوش ورق موج‌دار با ورق اتصال پایین از یک طرف، مشاهده شد (شکل (١٥)). در چرخه یازدهم بارگذاری زمانی که جابجایی ٨ میلی‌متر (٠/٧٣٪)، ادامه تنش در ورق موج‌دار جان و شکست جوش ورق موج‌دار با ورق اتصال پایین به همراه سوراخ شدگی دروورق جان مشاهده و همچنین تنش در لچکی پای ستون آغاز شد. در چرخه شانزدهم بارگذاری زمانی که ١٦ میلی‌متر (١/٤٥٪)، ترک خوردگی در جوش ورق اتصال با ستون رخ داد. در چرخه بیستم با جابجایی ٢٤ میلی‌متر (٢/١٨٪)، ادامه تنش در ستون‌ها و همچنین ورق جان به صورت قطری و پراکنده در موج‌های مختلف ورق جان و باز شدن موج ورق در پایین ورق جان (شکل (١٦)) مشاهده شد و در چشمه اتصال جوش سخت‌کننده ستون دچار شکستگی شد و لچکی پای ستون کمی دچار کمانش شد. در چرخه بیست و سوم (شکل (١٧)) با جابجایی ٣٢ میلی‌متر (٢/٩٠٪)، جوش سخت کننده زیر ستون شکست و مجدد اصلاح گردید. از آنجایی که دیوار هنوز توانایی تحمل بار از خود نشان می‌داد، بارگذاری ادامه پیدا کرد. وضعیت نمونه در پایان بارگذاری در شکل (١٨) نشان داده شده است. حداکثر ظرفیت برشی این نمونه برابر ٧٧٠ کیلو نیوتن در چرخه هجدهم با جابجایی متناظر ٢٤ میلی‌متر، مشاهده گردید. از آنجایی که خرابی در پای ستون، زودتر از ظرفیت باربری اتفاق افتاد آزمایش با شکست مجدد در چشمه اتصال تیر، متوقف گردید.

شکل ١٥- ترک در جوش ورق موج‌دار با ورق اتصال پایین در جابجایی ٠/٤٥٪



شکل ١٦- ترک جوش در چشمه اتصال و جوش سخت‌کننده ستون در جابجایی ٢/١٨٪

شکل ١٧- شکست جوش سخت کننده زیر ستون در جابجایی ٢/٩٠٪

شکل ١٨- روند تغییر شکل در پایان بارگذاری تا جابجایی ٤/٥٪

٧- تحلیل رفتار نمونه‌ها

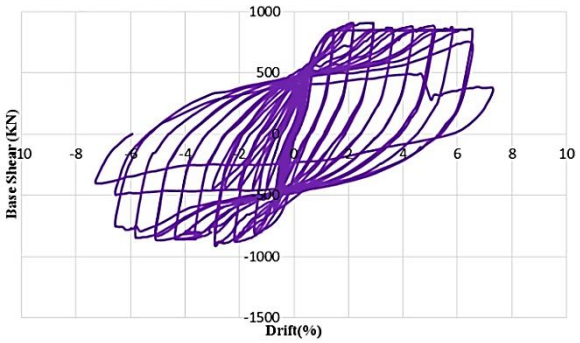
بعد از آزمایش‌ها، رفتار دیوارهای برشی فولادی ساده به وسیله

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

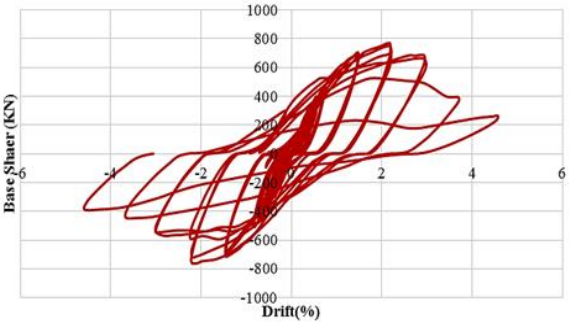
مقایسه پارامترهای عملکردی شامل سختی، مقاومت، با نتایج دیوارهای فولادی موجدار ذوزنقه‌ای قائم با زاویه ٤٥ درجه ارزیابی می‌شوند.

۷-۱- منحنی هیسترزیس نمونه‌ها

منحنی هیسترزیس، منحنی تنش-کرنش می‌باشد با این تفاوت که به جای بارگذاری یکنواخت بارگذاری به صورت سیکلی (رفت و برگشتی) انجام می‌شود و سازه به طور متناوب تحت کشش و فشار قرار می‌گیرد. نیروی لازم برای هل دادن هر دیوار و تغییر مکان نظیر آن در هر مرحله بارگذاری اندازه‌گیری شد. پاسخ منحنی هیسترزیس نمونه‌های نمونه "SSPW" و "CSPW" در شکل (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده‌است.



شکل ۱۹- منحنی بار-تغییرمکان نمونه "SSPW"

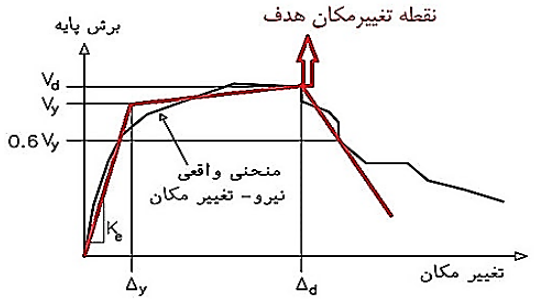


شکل ۲۰- منحنی بار-تغییرمکان نمونه "CSPW"

همانطور که مشاهده می‌شود منحنی هیسترزیس نمونه "SSPW" دوکی شکل می‌باشد و منحنی هیسترزیس نمونه "CSPW" فشرده‌تر می‌باشد بنابراین ظرفیت جذب انرژی نمونه اول بیشتر از نمونه دوم می‌باشد.

۷-۲- چند خطی سازی رفتار نمونه‌ها

برای مقایسه برخی خواص نمونه‌ها نظیر سختی، مقاومت واولیه و موثر، استهاولیه و موثر، استهلاک انرژی لازم است تا منحنی چند خطی نیرو جابجایی بر منحنی پوش هر یک از نمونه‌ها برازش داده شود. طبق آئین نامه ASCE41-17 [۲۸] برای محاسبه مقادیر سختی و مقاومت رسم منحنی سه خطی خواهد بود (شکل (۲۱)). خط اول منحنی چند خطی نیرو- جابجایی از مبدا شروع شده و شیبی برابر با سختی جانبی موثر، K_e دارد. سختی جانبی موثر، K_e برابر است با سختی محاسبه شده برای نمونه در نیرویی معادل ٦٠٪ مقاومت تسلیم موثر سازه. مقاومت تسلیم موثر Vy، نباید بزرگتر از برش پایه حداکثر قرائت شده در منحنی نیرو- جابجایی در هیچ نقطه‌ی باشد. خط دوم باید نمایانگر شیب مثبت پس از تسلیم باشد. این شیب با ترسیم خطی بین (Δd و Vd) و نقطه‌ای از خط اول بدست می آید به نحوی که سطح زیر منحنی واقعی با منحنی دو خطی حاصله با هم برابر باشد. (Δd و Vd) نقطه‌ای روی منحنی رفتار واقعی نمونه است که بیانگر نقطه هدف جابجایی یا جابجایی معادل با حداکثر برش پایه هر کدام که کمتر است می باشد. خط سوم می بایست نمایانگر شیب منفی پس از تسلیم باشد که دو انتهای آن با نقطه‌های (Δd و Vd) و نقطه‌ای که برش پایه به ٦٠٪ مقاومت تسلیم موثر می‌رسد، محدود می‌شود.



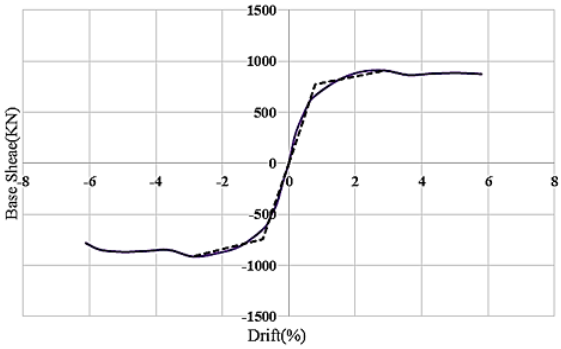
شکل ۲۱- چند خطی‌سازی رفتار نمونه‌ها

منحنی چند خطی رفتار نمونه‌ها در شکل (۲۲) و(۲۳) نشان داده شده است.

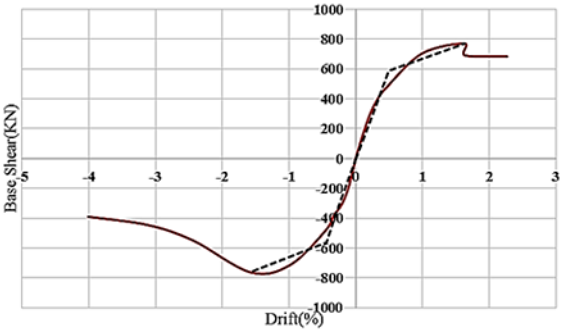
آئین نامه ASCE41-17 ضریبی به نام m را پیشنهاد کرده‌است که برای در نظر گرفتن شکل‌پذیری مورد انتظار عضو سازه‌ای در هر تراز عملکردی سازه است که به کمک منحنی خطی‌سازی شده حاصل از منحنی مشخصه نتایج آزمایشگاهی محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه همواره سه سطح عملکرد، قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO) ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) در هنگام بررسی مفاصل مورد توجه قرار می‌گیرد، در تحلیل نتایج، این سطوح بررسی شده‌است. برای محاسبه این ضریب در هر سطح عملکردی ابتدا باید جابجایی

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

در هر سطح عملکردی مشخص شود.



شکل ۲۲– منحنی Backbone نمونه "SSPW" (خطوط ممتد) و چندخطی برازش شده بر آن(خطوط منقطع)



شکل ۲۳– منحنی Backbone نمونه "CSPW" (خطوط ممتد) و منحنی‌های چندخطی برازش شده بر آن(خطوط منقطع)

جابجایی در سطح جلوگیری از فروریزش (δ_{Cp}): این جابجایی برابر با جابجایی نمودار دوخطی شده در حداکثر برش پایه می‌باشد (فرمول (۳)).جابجایی در سطح ایمنی جانی (δ_{Ls}): این جابجایی برابر با ۰/۷۵ جابجایی سطح جلوگیری از فروریزش می‌باشد (فرمول (٤)). جابجایی در سطح قابلیت استفاده بی وقفه (δ_{Io}): این جابجایی برابر با جابجایی است که در آن، اولین آسیب‌های (ترک) دائمی و قابل مشاهده در نمونه آزمایشگاهی رخ می‌دهد. این مقدار نباید بیشتر از ۰/٦۷ جابجایی در سطح ایمنی جانی باشد (فرمول (۵)).

جابجایی تسلیم (δ_y): این جابجایی مربوط به نقطه تسلیم نمونه می‌باشد. مقدار ضریب m در هر سطح عملکردی برابر با ۰/۷۵ جابجایی آن سطح عملکردی تقسیم بر جابجایی نقطه تسلیم می‌باشد.

$$m_{Cp} = \frac{\delta_{Cp}}{\delta_y} \qquad (۳)$$

$$m_{Ls} = \frac{\delta_{Ls}}{\delta_y}, \quad \delta_{Ls} = 0.75\delta_{Cp} \qquad (٤)$$

$$m_{Io} = 0.67 \times m_{Ls} \qquad (۵)$$

پس از دوخطی‌سازی، نمودارها ضریب اصلاح شکل‌پذیری (ضریب m)، برای نمونه‌ها استخراج و مقادیر آن در جدول (۲) نشان داده شده‌است.

جدول ۲– ضریب اصلاح شکل‌پذیری (ضریب m) نمونه‌ها

نمونه	m_{Cp}	m_{Ls}	m_{Io}
SSPW	۳/۳۵	۲/۵۱	۱/٦۸
CSPW	۲/٦۸	۲/۰۲	۱/۳۵

۷-۳- سختی و مقاومت

در جدول (۳) مقادیر سختی اولیه، سختی موثر، حداکثر برش پایه و مقاومت تسلیم نمونه‌هاکه از متوسط سیکل رفت و برگشت بدست آمده‌است، نشان داده شده‌است.

جدول ۳-۵– مشخصات سازه‌ای محاسبه شده برای نمونه‌ها بر اساس اطلاعات حاصل از آزمایش

نمونه	K_0 (kN/mm)	K_e (kN/mm)	F_u (kN)	F_y (kN)
SSPW	۱۱۳/۸۸	۹۹/۹٦	۹۰۰	۷۱٤/۷۵
CSPW	۱۵۱/۳۳	۱۱۲/٦٤	۷۷۰	۵۸۰/٦۰

سختی اولیه و موثر نمونه "CSPW" ۳٤٪ بیشتر از نمونه "SSPW" می‌باشد. با توجه به اینکه، سهم باربری ورق جان در نمونه دیوار با ورق صاف و در طرح ابتدایی نمونه ۳۵٪ از ظرفیت باربری کل باربری جانبی سیستم است، بنابراین سختی ایجاد شده در سیستم از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است.

مقاومت تسلیم و حداکثر برش پایه نمونه "CSPW" به ترتیب ۳۱٪ و ۱٦٪ کمتراز نمونه "SSPW" می‌باشد و این موضوع به دلیل سختی بالا و عدم تحمل جوش‌ها در تیر کف نمونه می‌باشد.

۷-٤- ضریب شکل‌پذیری نمونه‌ها

شکل‌پذیری سازه‌های باربر لرزه‌ای تا حدی که بتواند تغییر شکل‌های غیرارتجاعی را در مقطع خاصی بدون کاهش مقاومت و سختی قابل ملاحظه در برابر بارگذاری‌های رفت و برگشتی

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

تحمل کند، شکل‌پذیری (μ) تلقی می‌شود. این نسبت با به کارگیری فرمول (٦) محاسبه می‌شود و مقادیر آن در جدول (٤) ارائه شده‌است.

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \qquad (٦)$$

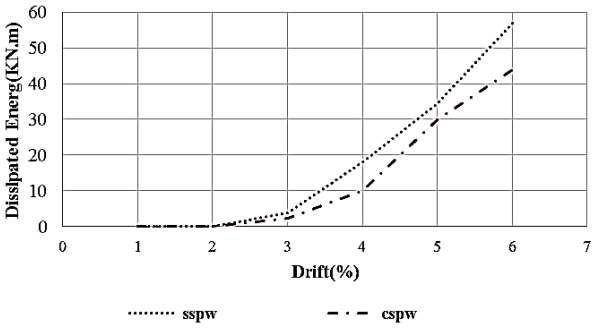
جدول ٤- ضریب شکل‌پذیری نمونه‌ها براساس اطلاعات حاصل از آزمایش

نمونه	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	μ
SSPW	٧/١٥	٣١/٩٠	٤/٤٦
CSPW	٥/١٧	١٧/٦٣	٣/٤١

ضریب شکل‌پذیری نمونه "SSPW" در مقایسه با نمونه "CSPW"، ٣٠٪ بیشتر می‌باشد و این موضوع به دلیل سختی بالای ورق موج‌دار ذوزنقه‌ای می‌باشد.

٧-٥- استهلاک انرژی

مقایسه مقادیرتجمعی استهلاک انرژی برای نمونه‌ها در جابجایی مختلف، در شکل (٢٤) نشان داده شده‌است.



شکل ٢٤- نمودار استهلاک انرژی نمونه‌ها

به صورت کمی، متوسط انرژی مستهلک شده نمونه "SSPW" از دریفت ١ تا٥ حدود ٣٠ ٪ بیشتراز نمونه "CSPW" می‌باشد.

٨- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای تعیین و مقایسه سختی، مقاومت، حداکثر برش پایه، ضریب شکل‌پذیری و ضریب اصلاح بر اساس رفتار غیرخطی در دیوارهای برشی فولادی صاف و موج‌دار ذوزنقه‌ای عمودی دو آزمایش انجام شده‌است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد:

سختی اولیه و موثر نمونه "CSPW" به ترتیب ٣٤٪ بیشتر از نمونه "SSPW" می‌باشد. این موضوع با انتظارات قبل از انجام آزمایش سازگاری کامل دارد و می‌تواند به علت شکل هندسی خاص ورق موج‌دار ذوزنقه‌ای و سختی هندسی خارج از صفحه قابل ملاحظه آن، این نوع ورق‌ها از مقاومت کمانشی به مراتب بیشتری نسبت به ورق صاف برخوردار می‌باشد.

حداکثر مقاومت تسلیم و برش پایه نمونه "SSPW" به ترتیب٣١٪ و ١٦٪ بیشتر از نمونه موج‌دار ذوزنقه‌ای ٤٥ درجه عمودی می‌باشد این موضوع به علت خرابی زودهنگام درجوش سخت کننده پای ستون نمونه موج‌دار می‌باشد و با توجه به شکل نمونه‌ها در آخرین مرحله بارگذاری موید این موضوع می‌باشد که ورق جان در صورت مقاومت المان مرزی ظرفیت باربری داشته‌است.

در منحنی هیسترزیس نمونه "SSPW" دوکی شکل‌تری نسبت به منحنی "CSPW" می‌باشد. بنابراین ظرفیت استهلاک انرژی در نمونه "SSPW" بیشتر از نمونه دوم می‌باشد. به صورت کمی، متوسط انرژی مستهلک شده نمونه "SSPW" از دریفت ١ تا ٥ حدود ٣٠ ٪ بیشتراز نمونه "SSPW" می‌باشد.

مقدار ضریب m در سطوح جلوگیری از فروریزش، ایمنی جانی و قابلیت استفاده بی‌وقفه نمونه "SSPW" حدود ٢٥٪ بیشتر از نمونه "CSPW" می‌باشد.

دیوار برشی فولادی سخت نشده، نمونه اول خرابی ایجاد شده به صورت کششی می‌باشد و دارای شکل‌پذیری بیشتر می‌باشد بنابراین سهم باربری قاب یا المان مرزی بیشتر از ورق جان می‌گردد ولی در دیوار برشی فولادی موجدار عمودی، نمونه دوم خرابی ایجادشده به صورت شکست برشی در دیوار حاکم خواهد شد بنابراین سهم باربری قاب یا المان مرزی کمتر از ورق جان می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دیوار برشی فولادی موجدار عمودی دارای سختی اولیه و موثر بالایی دارد و با تقویت مختصری در اعضای مرزی می‌توان به نتایج بهتری در رفتار این دیوار مشاهده نمود. جذب انرژی دیوار برشی صاف نسبت به دیوار برشی موج‌دار بیشتر است و رفتار پایدارتری نسبت به دیوار برشی موج دار پایدارتر است.و دیوار برشی با ورق صاف در مناطق با خطر زلزله خیزی زیاد بسیار مناسب می‌باشد.

٩- مراجع

[1] Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and Elwi, A.E. (1998), "Cyclic test of four-story steel plate shear wall", Journal of Structural Engineering, Vol. 124, pp. 112–120.

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

[2] ANSI/AISC 341-10, (2010), Seismic provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction Inc, Chicago, IL.

[3] CAN/CSA S16-01, (2001), Limit states design of steel structures, Willowdale, Ontario: Canadian Standards Association.

[4] Caccese, V., Elgaaly, M. and. Chen, R. (1993), "Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load", Journal of Structural Engineering, Vol. 119, pp. 573–587.

[5] Sabouri-Ghomi, S. and Roberts, T. (1992), "Nonlinear Dynamic analysis of steel plate shear walls including shear and bending deformations", Engineering Structures, Vol. 14, pp. 309–317.

[6] Rezai, M. (1999), "Seismic behaviour of steel plate shear walls by shake table testing", PhD Disserttion, Department of Civil Engineering, University of British Columbia.

[7] Roberts, T. and Sabouri-Ghomi, S. (1991), "Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels", Thin-Walled Structures, Vol. 12, pp. 145–162.

[8] Vian, D. and Bruneau, M. (2004), "Testing of special LYS steel plate shear walls", In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada.

[9] Schumacher, A., Grondin, G.Y. and Kulak, G.L. (1999), "Connection of infill panels in steel plate shear walls", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 26, pp. 549–563.

[10] Elgaaly, M., Caccese, V. and Du, C. (1993), "Post-buckling behavor of steel-plate shear walls under cyclic loads", Journal of Strucural Engineering, Vol. 119, pp.588–605.

[11] Driver, R., Kulak, G., Kennedy, D. and Elwi, A. (1997), "Finite element modelling of steel plate shear walls", Proceeding of the Structural Stability Research Council Annual Technical Session, pp. 253–264.

[12] Alinina, M. and Dastfan, M. (2007), "Cyclic behaviour, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, pp. 554–563.

[13] Sabouri-Ghomi, S. and Sajjadi, R. (2012), "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", Journal of Construction Steel Research, Vol. 75, pp. 152–159.

[14] Grondin, G., Chen, Q., Elwi, A. and Cheng, J. (1998), "Stiffened steel plates under compression and bending", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 45, pp. 125–148.

[15] Elgaaly, M., Hamilton, R.W. and Seshadri, A. (1996), "Shear strength of beam with corrugated webs", Journal of Structural Engineering, Vol. 122, pp. 390–398.

[16] Ibrahim, S.A., El-Dakhakhni, W.W. and Elgaaly, M. (2006), "Behavior of bridge girders with corrugated webs under monotonic and cyclic loading", Engineering Structures, Vol. 28, pp. 1941–1955.

[17] Sayed-Ahmed, E.Y. (2001), "Behavior of steel and composite girders with corrugated steel webs", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28, pp. 656–672.

[18] Yi, J., Gil, H., Youm, K. and Lee, H (2008), "Interactive shear buckling corrugated steel webs," Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1659–1666.

[19] Timler, P.A. and Kulak, G.L. (1983), "Experimental study of steel plate shear walls," Issue 114 of Structural Engineering Report, ISSN 0319–0110.

[20] Gayed, B. and Kulak, G.L. (2006), "Nonlinear Finite Element Analysis of corrugatead steel plate shear walls", Journal of Structural Engineering, ASCE 1998, Vol. 124, pp. 112–20.

[21] Tipping, S. and Stojadinovic, B. (2008), "Innovative corrugated steel shear walls for multi-story residential buildings", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

[22] Tanaka, Y., Ichioka, Y., Kono, S., Ohta, Y. and Watanabe, F. (2008), "Precast prestressed portal frames with corrugated steel panel dampers", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, china.

[23] Emami, F., Mofid, M. and Vafai, A. (2012), "On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 23, pp. 94–104.

[۲٤] کلانتری، الف. و کلات‌جاری، و.ر. (۱۳۹۹)، "بررسی عملکرد لرزه‌یی سیستم نوین پیشنهادی دیوار برشی فولادی مرکب از ورق‌های صاف و موج‌دار"،مهندسی عمران شریف، دوره ۳٦.۲، شماره ۲.۲، ص. ۳-۱۲.

[25] AISC Steel Design Guide 20, (2007), Steel plate shear walls, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, Inc.

[26] DIN 1623, (1983), German institute for standardization.

[27] ATC-24, 1992, Guildlines for cyclic testing of components of Steel structures"Applied Technology Council, Redwood City,CA.

[28] ASCE41, SEI, (2017), ASCE standard, seismic evaluation and retrofit of existing buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.

پی نوشت

[1] Web plate

[2] Vertical boundary element

[3] Horizontal boundary element

[4] Post buckling

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]