



مقایسه بررسی آزمایشگاهی و عددی دیوار برشی فولادی با ورق جان صاف، با ورق جان موجدار عمودی با زاویه ۴۵ درجه

سیده مریم دشتی زند^{۱*}، وحیدرضا کلات جاری^۲، نادر خواجه احمد عطاری^۳

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

۲. دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده عمران، شاهرود

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

* پست الکترونیکی: m.dashtizand@shahrood.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی در ساختمان‌های فولادی و بتنی مورد توجه قرار گرفته است. توانایی مدل‌سازی عددی دقیق و مبتنی بر رفتار واقعی این دیوارها در تحلیل دقیق سازه دارای دیوار برشی فولادی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله سعی شده است که صحت‌سنجی نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر مقایسه شود. بدین منظور، ابتدا مدل‌های آزمایشگاهی با بهره گرفتن از نرم‌افزار آباکوس مدل شد و نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. دو نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با جان صاف و دیوار برشی فولادی با جان ورق موجدار دوزنقه‌ای ۴۵ درجه، قائم با مقیاس یک به سه و نسبت عرض به ضخامت ۱۰۶۶، که در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. سپس، با بررسی نمودارهای هیستریزس به دست آمده، پارامترهای لرزه‌ای مانند مقاومت، سختی، شکل‌پذیری به دست آمده و با همدیگر مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده شد که تطبیق مناسب بین نتایج آزمایشگاه و نتایج نمونه مدل‌سازی شده وجود دارد و این انطباق دقت نمونه مدل‌سازی شده را تأیید می‌کند.

کلیدواژگان

دیوار برشی موجدار دوزنقه‌ای، سختی، شکل‌پذیری، نرم‌افزار آباکوس، بارگذاری چرخه‌ای

Comparison on Experimental and Numerical Investigation of Steel Plate Shear Wall with Flat Plate, with Vertical Corrugated Plate with 45° Angle

Seyedeh Maryam Dashti Zand^{1*}, Vahid Reza Kalatjari², Nader K. A. Attari³

1. PhD Student, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3. Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran

* P.O. Box 316, Shahrood, Iran, m.dashtizand@shahroodut.ac.ir

Abstract

Nowadays, the use of steel shear wall as a lateral bearing system in steel and concrete buildings has been considered. The ability of accurate numerical modeling based on the actual behavior of these walls in the accurate analysis of structures with steel shear walls is of great importance. In this article, an attempt has been made to compare the validity of laboratory and numerical samples. For this purpose, laboratory models were first modeled using ABAQUS software and the specimens were compared with each other. Two laboratory specimens of flat shear steel wall and steel shear wall with 45 degree trapezoidal corrugated sheet, vertical with one to three scale and width to thickness ratio of 1066, which were subjected to cyclic loading in the structural laboratory of Road, Housing and Urban Development Research Center. Then, by examining the obtained hysteresis diagrams, seismic parameters such as strength, hardness, ductility are obtained and compared with each other. According to the obtained results, there is a good match between the laboratory results and the results of the modeled sample, and this match confirms the accuracy of the modeled sample.

Keywords

Trapezoidal Corrugated Shear Wall, Hardness, Ductility, Abacus Software, Cyclic Loading

۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولادی سیستم‌های مقاوم باربر جانبی جهت به کارگیری در نواحی لرزه خیز زیاد است. این سیستم لرزه‌ای نو که در دنیا رو به گسترش است، برای ساختمان‌های در حال ساخت و مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود در کشورهای لرزه خیز مانند آمریکا، ژاپن و کانادا مورد استفاده قرار گرفته است. وظیفه اصلی دیوار برشی فولادی مقاومت در برابر نیروهای برشی ایجاد شده در طبقات و لنگر واژگونی حاصل از آن بر اثر زمین لرزه است [۱]. این سیستم در سازه‌ها به صورت‌های مختلف به کار گرفته می‌شود. متداول‌ترین نوع دیوارهای مورد استفاده در ایالات متحده، دیوارهای سخت نشده با جان لاغر است. این دیوارها اساس سیستم دیوار برشی فولادی ویژه هستند و در آیین‌نامه‌های [2] ASCE7 و [3] AISC341 به عنوان "سیستم مقاوم لرزه‌ای پایه" شناخته می‌شوند. این دیوارها به دلیل داشتن نسبت لاغری بالا، مقاومت فشاری کمی دارند. بنابراین، زمانی که نیروی برشی ناشی از زلزله به آنها وارد می‌شود، کمانش برشی در سطح پایینی از نیرو در این نوع از ورق‌ها رخ می‌دهد.

دیوارهای برشی فولادی سخت شده، نوع دوم از این سیستم باربر جانبی هستند که در آنها مقاومت کمانش برشی ورق جان به دلیل استفاده از سخت‌کننده‌ها افزایش یافته است. سخت کردن ورق جان در این حالت می‌تواند به روش‌های مختلفی مثل استفاده از سخت‌کننده‌های قائم، استفاده از سخت‌کننده‌های افقی، استفاده از ترکیب سخت‌کننده‌های قائم و افقی، افزودن بتن مسلح شده به یک یا هر دو وجه دیوار (دیوار برشی فولادی مختلط) و غیره صورت بگیرد. سخت کردن ورق جان تأثیر مناسبی روی مقاومت و سختی دیوار دارد. وجود سخت‌کننده موجب کاهش مقاومت و سختی مورد نیاز اجزای مرزی و بهبود رفتار هیستریزس دیوار می‌شود، ولی باعث افزایش قیمت و ضخامت دیوار می‌گردد [۴]. مهمترین پارامترهایی که در انتخاب یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی نقش دارند عبارت‌اند از: سختی، مقاومت و شکل‌پذیری. ارزیابی رفتار و عملکرد دیوار برشی فولادی در مقایسه با سایر سیستم‌های لرزه‌ای بیانگر رفتار مناسب آن است. بنابراین، استفاده از دیوار برشی فولادی به دلیل سختی مناسب در کنار شکل‌پذیری بالا در مقابل بارهای جانبی و قابلیت استهلاک انرژی لرزه‌ای و رفتار هیستریزس پایدار و به دلیل سادگی در ساخت و سرعت اجرای بالا و وزن کم و سبکی، هزینه کم [۵] از یک ایده به یک سیستم باربر جانبی مورد قبول آیین‌نامه‌ها تبدیل شده و حتی قبل از پیدایش ضوابط آیین‌نامه‌ای جدید در صنعت ساختمان‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی اجزای محدود دیوارهای برشی سخت‌نشده در تعدادی از مقالات ارائه شده است که می‌توان به کارهای انجام شده توسط الگالی و همکاران [۶] و درایور و همکاران [۷] 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 توسط علی‌نیا و دستفان [۸]، بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوارهای برشی سخت شده توسط صبوری‌قمی و سجادی [۹]، طراحی سخت‌کننده‌های دیوارهای برشی فولادی توسط علی‌نیا و صراف‌شیرازی [۱۰] و بررسی رفتار دیوارها تحت فشار و خمش توسط گروندین و همکاران [۱۱] اشاره کرد. نخستین پژوهش در زمینه‌ی رفتار کمانشی ورق‌های موج‌دار برشی در اواخر دهه‌ی ۶۴ میلادی توسط ایسلی و مک فارلند [۱۲] انجام پذیرفت. پس از آن، مطالعات نظری و آزمایشگاهی فراوانی در زمینه‌ی رفتار کمانشی و مقاومت ورق‌های موج‌دار در جان تیر ورق‌ها توسط الگالی و همکاران [۱۳]، احمد [۱۴]، و بی [۱۵] و همکاران صورت گرفت. بررسی

رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای توسط بوتروس [۱۶] نشان داد، دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار دارای ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی بیشتری نسبت به دیوارهای با ورق‌های صاف هستند. میرقادر و همکاران [۱۷] با مدل‌سازی سه بعدی دیوار با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی رفتار و کاربرد دیوارهای برشی فولادی موج‌دار را مورد ارزیابی قرار دادند.

علایی و همکاران [۱۸] رفتار ورق صاف در ضخامت‌های متفاوت و ورق موج‌دار در ضخامت، زاویه موج و تعداد نیم موج متفاوت تحت بار سیکلیک را با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS و با در نظر گرفتن تحلیل غیرخطی هندسه و مصالح مورد بررسی قرار دادند.

کلانتری و همکاران [۱۹] 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) برای قاب سه طبقه و یک دهانه و در مقیاس واقعی با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و تحت بارگذاری ثقلی و لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر این است که اتصال بین ورق‌های جان تأثیر بسیار مطلوبی بر عملکرد این نمونه‌های تقویتی دارد.

تیبینگ و استوجادینوویچ [۲۰] آزمایش‌هایی را بر روی ۴۴ مدل مختلف دیوارهای برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای 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. ایشان در این پژوهش به بررسی ابعاد و اندازه ورق، شکل ورق و نوع قید و بست‌ها پرداختند. ضریب رفتار پیشنهادی آنها برای این نوع دیوار ۵/۵ بوده است. همچنین، این سامانه باعث افزایش ظرفیت برشی دیوار برشی می‌گردد.

مدل دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است، کار تحقیقاتی اخوان سیگاری‌یزدی و همکاران [۲۱] با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌هایی را که در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار داده بود، شبیه‌سازی کرد. این نمونه‌ها دارای مقیاس یک به سه و چیدمان آزمایش و مشخصات مصالح مطابق با نمونه آزمایشگاهی انجام شده است. در این تحقیق اطلاعات دقیق ابعاد و مشخصات مصالح قبل از انجام دادن آزمایش اندازه‌گیری و گزارش شده است. در مطالعات تحلیلی، از سخت‌شدگی ترکیبی برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی فولاد نرمه استفاده شده و ویژگی‌های الاستیک فولاد نرمه همسانگرد فرض شده است. برای اعمال نقص اولیه در مدل، در گام اول ۱۰ میلی‌متر جابه‌جایی خارج صفحه در وسط ورق هر طبقه اعمال شده و سپس بارگذاری جانبی وارد شده است.

در این مقاله دو نمونه ساخته و آزمایش شده در آزمایشگاه بخش سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و مورد مقایسه قرار گرفت.

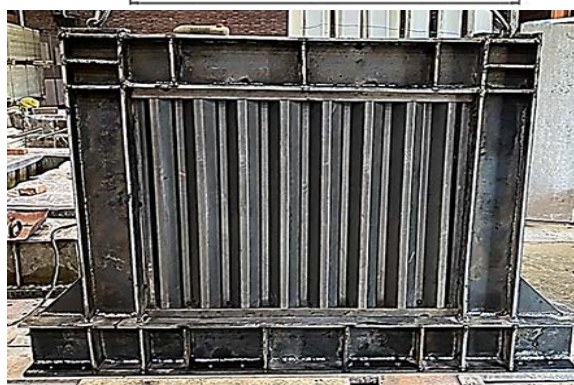
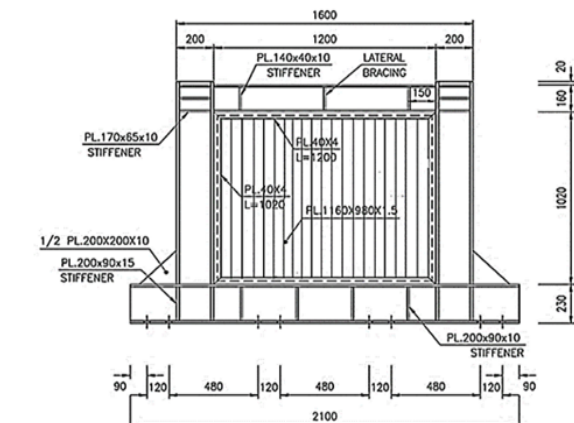
۲- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

مشخصات نمونه دیوار برشی فولادی صاف "SPSW" در شکل ۱ و نمونه دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای، "CSPSW" مورد آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. ورق جان دیوار برشی فولادی با زاویه ۴۵ درجه مطابق با شکل ۳ ساخته شده است. نمونه با مقیاس یک سوم و در یک قاب یک طبقه و یک دهانه ساخته شده و تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته

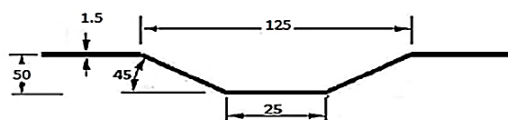
است. خصوصیات مکانیکی اعضای نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۱ آورده شده است. نوع فولاد بر اساس استاندارد DIN آلمان ST37 است [۲۲].

جدول ۱ مشخصات مکانیکی مصالح

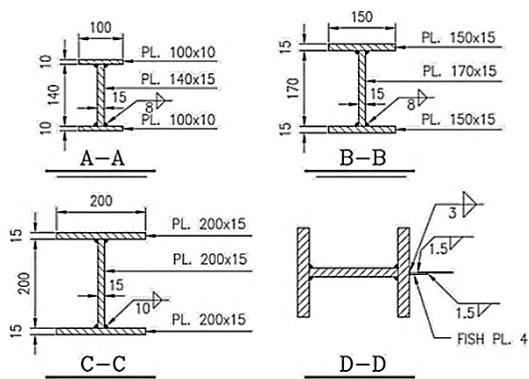
ورق اعضا	مدول یانگ E (GPa)	تنش تسلیم f_y (MPa)	تنش حداکثر f_u (MPa)	$\frac{f_u}{f_y}$
ورق جان (mm ۱/۵)	۲۱۰	۲۴۲	۳۳۹	۱/۴۰
ورق اتصال (mm ۴)	۲۱۰	۲۶۰	۳۷۴	۱/۴۳
ستون و تیر (mm ۱۰)	۲۱۰	۳۵۰	۴۳۵	۱/۲۴
ستون و تیر (mm ۱۵)	۲۱۰	۳۸۵	۴۸۰	۱/۲۵



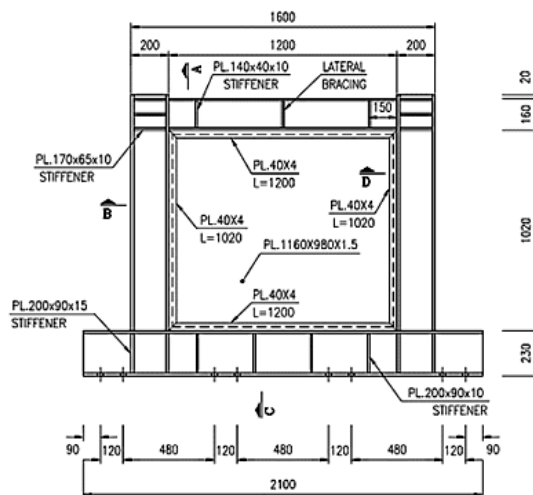
شکل ۲ نمونه "CSPSW"



شکل ۳ اندازه‌گذاری ورق دوزنقه‌ای (mm)



شکل ۴ جزئیات مقاطع تیر و ستون‌ها و اتصالات (mm)

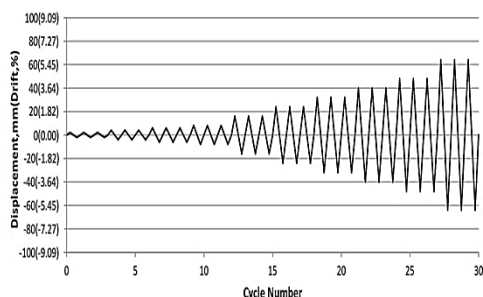


شکل ۱ نمونه "SPSW"

۴- سیستم بارگذاری

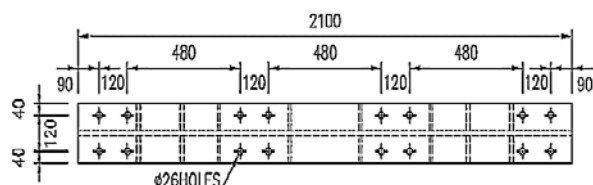
برای بررسی رفتار لرزه‌ای تحت اثر زلزله، لازم است بار زلزله یا مشابه آن به سازه وارد شود. بارگذاری جانبی در این مطالعه، از روش بارگذاری جانبی شبه استاتیکی سیکلی افزایشده استفاده شد. برای شبیه‌سازی بار زلزله و همچنین بررسی رفتار رفت و برگشتی نمونه، پروتکل [23] ATC-24 به کار گرفته شده است. بارگذاری به صورت کنترل جابه‌جایی انجام می‌شود و دامنه بارگذاری به صورت متغیر (افزاینده-کاهنده) در نظر گرفته شده است و بارگذاری در قسمت تیر فوقانی اعمال می‌شود. جهت جلوگیری از کمانش جانبی، جابه‌جایی تیرها در صفحه عمود بر صفحه بارگذاری با استفاده از مهار جانبی کنترل شده است. برای شبیه‌سازی زلزله و بررسی دقیق رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی از بارگذاری شبه استاتیکی با افزایش بار و جابه‌جایی 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 تقسیم‌کننده فشار هیدرولیکی، شیلنگ‌های فشار قوی و دو جک هیدرولیکی فشاری ۱۰۰ کیلو نیوتنی است. از آنجا 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 پرمقاومت به کف صلب آزمایشگاه متصل می‌شود، 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.

برای آنکه در حین آزمایش نیروی وارده به دیوارها توسط جک‌ها همواره در راستای افقی باشد، بار افقی با استفاده از دو جک هیدرولیکی اعمال شد. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه دیوارها در حین آزمایش، از دو پروفیل I شکل استفاده شد که به هم متصل بودند و در دو طرف تیر بارگذاری با فاصله اندکی قرار گرفتند. همان‌طور که اشاره شد، جک‌های اعمال نیرو از نوع فشاری بودند 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 می‌شد تا مزاحمتی برای حرکت جانبی دیوار ایجاد ننماید. همچنین، در حین آزمایش‌ها مشاهده شد که این روش باعث گردید که حرکت دیوارها کاملاً داخل صفحه باشد و حرکت خارج از صفحه‌ای اتفاق نیفتد. بارگذاری سیکلی به صورت کنترل‌شونده توسط تغییرمکان در آمد که در آن، هر سیکل بارگذاری با دامنه تغییرمکانی مشخص، ۳ بار تکرار شد [۲۲].



Uniaxial Strain Gauge

شکل ۷ پروتکل بارگذاری با کنترل جابه‌جایی

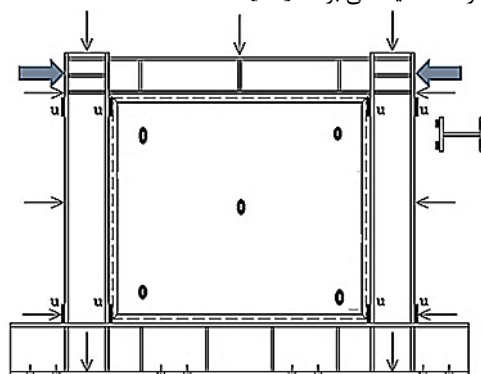


شکل ۵ جزئیات اتصال نمونه به کف آزمایشگاه

نمونه‌ها پس از ساخت، بین دو پایه قائم موجود در آزمایشگاه قرار گرفته و جک‌های هیدرولیکی، بار و جابه‌جایی مورد نظر را در تراز تیر فوقانی نمونه به آن وارد می‌کند. همچنین، موقعیت پروفیل‌هایی که تأمین‌کننده مهار جانبی تیر فوقانی در نمونه‌هاست، از تغییرشکل خارج از صفحه آن جلوگیری می‌کند.

۳- ابزاربندی نمونه‌ها

برای مطالعه رفتار هر دیوار در حین آزمایش، لازم است اطلاعات مورد نیاز اندازه‌گیری و ثبت شود. مهمترین داده‌هایی که در شناخت رفتار دیوارها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد و در این پژوهش به آنها پرداخته شد، عبارت‌اند 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 جابه‌جایی‌سنج‌های الکترونیکی استفاده شد. با توجه به اینکه با ابزارهای موجود، اندازه‌گیری 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 کرنش‌سنج تک محوری استفاده شده است (شکل ۶). 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 پروژه مورد استفاده قرار گرفت. ابزارهای الکترونیکی اندازه‌گیری شامل نیروسنج‌ها، جابه‌جایی‌سنج‌ها و کرنش‌سنج‌ها 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 [۲۲].



Uniaxial Strain Gauge

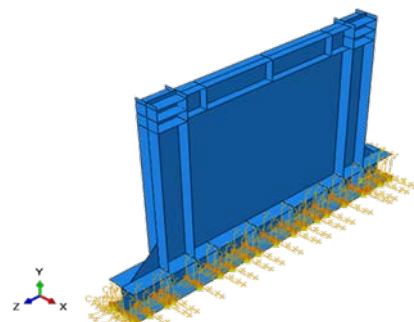
LVDT

شکل ۶ ابزاربندی روی نمونه

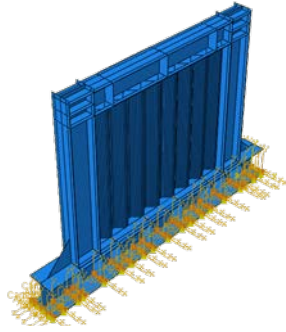
۵- اصول مدل سازی و بارگذاری نمونه ها

با استفاده از امکانات تعبیه شده در ماژول پارت^۱ نرم افزار آباکوس، طراحی هندسه نمونه ها انجام گردید. در این ماژول، اجزای مختلف نمونه ها شامل تیرها، ستون ها، ورق فولادی دیوار برشی صاف و موجدار، سخت کننده های تیرها و ستون ها، کف صلب آزمایشگاه و ورق های مثلثی پای ستون ها با ابعاد مشخص خود به طور جداگانه و تحت عنوان یک پارت به صورت یک المان سه بعدی از نوع شل^۲، برحسب نوع کاربردشان در مدل سازی شکل پذیر^۳ یا صلب^۴، ترسیم و طراحی شد. با توجه به عرض کم ورق های اتصال^۵ در مدل اجزای محدود، ورق جان مستقیماً به المان مرزی اتصال داده شد. مدل سازی اجزای قاب با استفاده از مدل سازی صریح آنها به صورت اجزای ساخته شده از ورق انجام شده تا مفاصل پلاستیک و کمانش های موضعی اجزای مختلف در مدل قابل مشاهده باشد. اتصال تیر تحتانی به کف قوی در آزمایشگاه مطابق با شکل ۸ با پیچ صورت گرفته است. در نتیجه امکان اتصال پیوسته آنها وجود نداشته، بنابراین در خصوص نیروهای کششی و فشاری پای نمونه، در محل اتصال پیچ ها، فنرهایی با سختی برابر با AE/L_b برای هر پیچ در نظر گرفته شده است (A؛ سطح مقطع، E؛ مدول الاستیسیته و L_b ؛ طول گیر پیچ است).

در مدل سازی نمونه ها در نرم افزار یک ورق شکل پذیر به ابعاد $30 \times 200 \times 210$ میلی متر نمونه را به کف آزمایشگاه متصل می کند. سپس در ماژول مربوط به بارگذاری با انتخاب این عضو که از قبل به عنوان یک مجموعه برای نرم افزار معرفی شده، حرکتها و دورانها را در هر سه جهت برابر صفر قرار داده شد تا با این روش صلبیت به ورق کف آزمایشگاه اعمال شود.



الف- SSPW



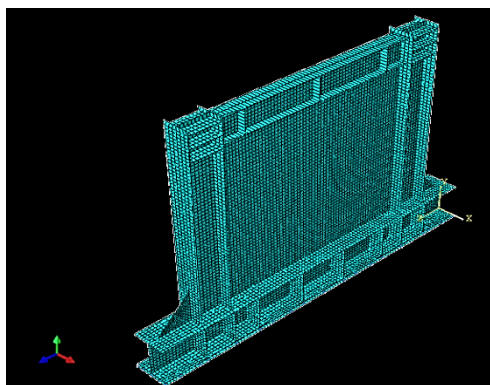
ب- CSPSW

شکل ۸ مدل سازی پیچ ها در محل اتصال نمونه به کف صلب آزمایشگاه

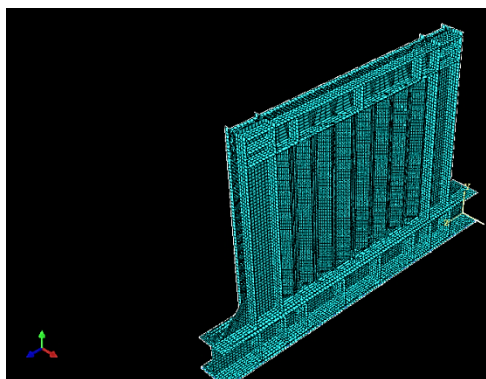
دیوار برشی فولادی شامل تیر، ستون (المان مرزی) و ورق نازک جان است. اعضای مرزی و ورق جان با استفاده از المان های چهارگره ای S4R که یک المان پوسته ای (shell) کامل است، مدل سازی شده است. المان S4R، قابلیت مدل سازی رفتار غیرخطی هندسی و غیرخطی مواد و همچنین، انتگرال گیری عددی در راستای ضخامت پوسته را دارد. بهره گیری از روش انتگرال گیری کاهش یافته می تواند اطلاعات دقیقی را به کاربر بدهد و در مقایسه با روش انتگرال گیری کامل، زمان پردازش توسط کامپیوتر را کاهش دهد. مدل سازی رفتار پوسته های نازک و ضخیم با استفاده از این المان امکان پذیر است. همچنین، از سخت شدگی کینماتیک برای نمایش رفتار ورق جان و اعضای قاب در حالت پلاستیک و سخت شدگی کینماتیک باعث جابه جایی سطوح تسلیم بدون گسترش آن در طول کرنش پلاستیک شده و برای تحلیل های بار افزون مناسب است. مشخصات سخت شدگی کینماتیک مصالح مورد استفاده در مدل سازی، با استفاده از تنش واقعی (تنش کوشی) و کرنش لگاریتمی در نظر گرفته شده است. مدل سازی اجزای قاب پیرامون دیوار، با استفاده از مدل سازی صریح آنها به صورت اجزای ساخته شده از ورق انجام شد تا امکان مشاهده مفاصل پلاستیک و کمانش های موضعی اجزای مختلف در مدل فراهم شود. همچنین، تأثیر مقدار تغییر شکل اولیه ورق جان و اندازه مش بر رفتار نمونه بررسی و مشخص شد که مقدار تغییر شکل اولیه ورق جان تأثیر ملموسی در رفتار نمونه ندارد، اما با کوچکتر کردن اندازه مش دقت نتایج بالا می رود. دقت مش بندی به نحوی در نظر گرفته شد که خطا در محاسبه برش پایه کمتر از ۵ درصد باشد. در این تحقیق، از کاهش مقاومت و خرابی پس از دستیابی به مقاومت پلاستیک برای ورق ها و اعضای مختلف در مدل سازی به دلیل نیاز به تکنیک های خاص مدل سازی و افزایش زمان تحلیل، صرف نظر شده است. شایان ذکر است در تحلیل های متعارف المان محدود، مدل سازی خرابی ها در نظر گرفته نمی شود. برای اعمال بار جانبی و بررسی رفتار نمونه ها در آزمایشگاه، چک های هیدرولیکی در تراز فوقانی نمونه قرار داده شد و بارگذاری بر اساس پروتکل [23] ATC-24 بر نمونه ها وارد شد.

در مدل سازی نمونه ها، بارگذاری جانبی به صورت چرخه ای معکوس شونده (شبه استاتیکی) و مطابق با الگوی نمونه های آزمایشگاهی انجام شد. برای اعمال بار جانبی در نرم افزار، از گزینه Amplitudes الگوی بارگذاری به برنامه معرفی شد. سپس، در ماژول مربوط به بارگذاری، با انتخاب محل اعمال بار که به عنوان یک مجموعه به نرم افزار معرفی شده است، الگوی بارگذاری مورد نظر به نمونه اعمال گردید. با توجه به اینکه از شکل اولیه ورق های جان

¹ Part
² Shell
³ Deformable
⁴ Discrete Rigid
⁵ Fish Plate



الف - SSPW

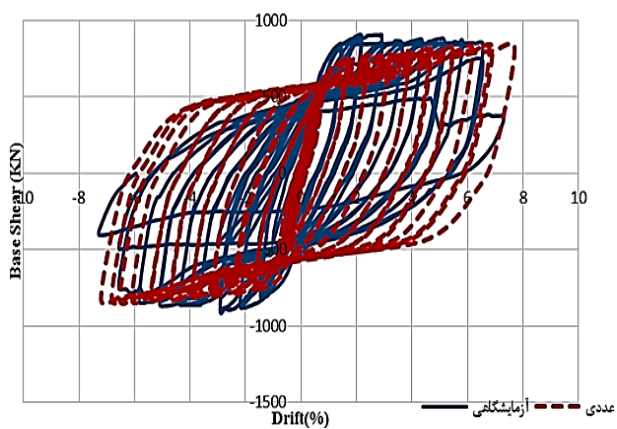


ب - CSPSW

شکل ۱۰ مش بندی نمونه های مدل سازی شده

۶-۱- منحنی هیستریزس آزمایشگاهی و تحلیلی

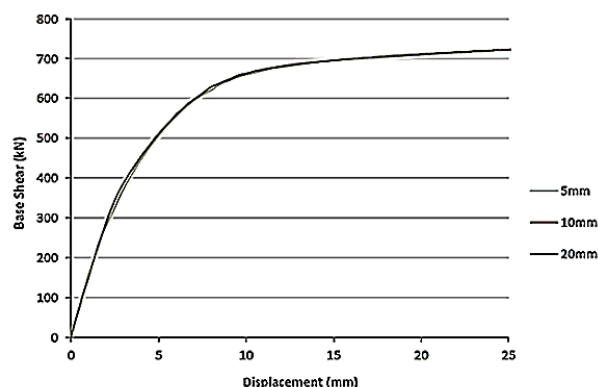
در شکل ۱۱ (الف و ب)، منحنی پاسخ هیستریزس تحت بار چرخه ای علاوه بر تحلیل بار افزون انجام شده که نتایج آن و مقایسه نمونه های تحلیلی با رفتار آزمایشگاهی برای هر نمونه دیوار فولادی ساده و موجدار نشان داده شده است.



الف - SSPSW

پیش از بارگذاری در آزمایشگاه اطلاعاتی وجود نداشت، اعمال تأثیر میزان خطای ساخت و تغییر شکل اولیه ورق های جان در مدل سازی نمونه ها مهم است. به طور کلی، تغییر شکل های خارج از صفحه جزیی ورق جان به دلیل فرآیند ساخت و نصب، حمل و نقل، ضخامت کم ورق جان، جوشکاری و اتصال اعضای مختلف باعث کمانش و تغییر شکل ورق جان می گردد، بنابراین، این عیوب باید در مدل المان محدود نمونه ها لحاظ گردد.

برای لحاظ کردن عیوب اولیه، تحلیل کمانشی مقدار ویژه نمونه ها انجام شد تا مود اول کمانشی ورق جان پیش از اعمال بارگذاری جانبی مشخص گردد. مود اول کمانشی ورق جان، در یک جابه جایی کم ضرب شد و به عنوان شرایط اولیه نمونه در تحلیل بار افزون مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین مقدار مناسب تغییر شکل اولیه خارج از صفحه ورق جان و همچنین اعمال تغییر شکل های اولیه ناشی از خطای ساخت و غیره، سه مقدار ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی متر به عنوان تغییر شکل های خارج از صفحه در شکل مود اول کمانشی ورق جان نمونه SPSW ضرب شد. تحلیل بار افزون نمونه اول با سه مقدار تغییر شکل اولیه انجام شد. همان طور که در شکل ۹ مشاهده شد، مقدار تغییر شکل اولیه اثر ناچیزی بر رفتار سیستم دارد و منحنی تغییر شکل های اولیه با مقادیر مختلف، بر هم منطبق است. علت این است که با اعمال جابه جایی جانبی به نمونه، ورق جان کمانش می کند و تأثیری از شکل اولیه ورق جان نمی پذیرد. بنابراین، در کلیه نمونه های مدل سازی شده با انتخاب مجموعه ای از گره های ورق جان و در نظر گرفتن حرکت بیرون از صفحه به میزان ۱۰ میلی متر، عیوب اولیه ورق در تحلیل نمونه ها در نظر گرفته شد.

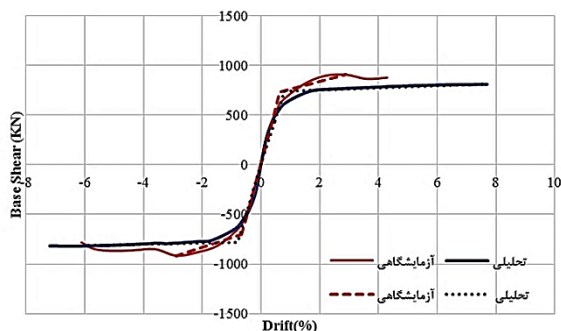


شکل ۹ اثر تغییر شکل اولیه ورق جان بر منحنی نیرو- جابه جایی

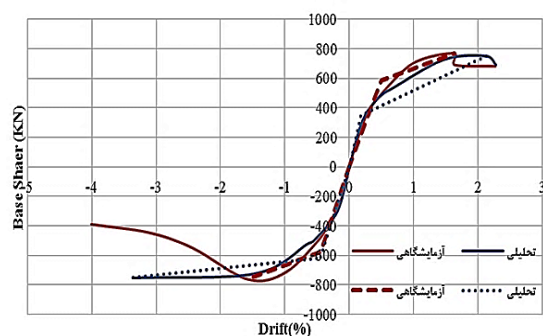
در تنظیمات مربوط به مش بندی نمونه ها در نرم افزار، هم اعضای مرزی و هم ورق جان با استفاده از المان های چهار گره ای S4R که یک المان شل کامل است مدل سازی شده اند (شکل ۱۰).

۶- تحلیل رفتار مدل ها و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

بعد از آزمایش و مدل سازی نمونه ها، رفتار دیوارهای برشی فولادی به وسیله مقایسه پارامترهای عملکردی شامل سختی اولیه و مؤثر، مقاومت، با نتایج دیوارهای فولادی موجدار دوزنقه ای عمودی با زاویه ۴۵ درجه عمودی ارزیابی شد.



الف - SSPSW



ب - C-SPSW

شکل ۱۳ منحنی‌های Backbone حاصل از نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی (خطوط ممتد) و چندخطی برازش شده بر آن (خطوط منقطع)

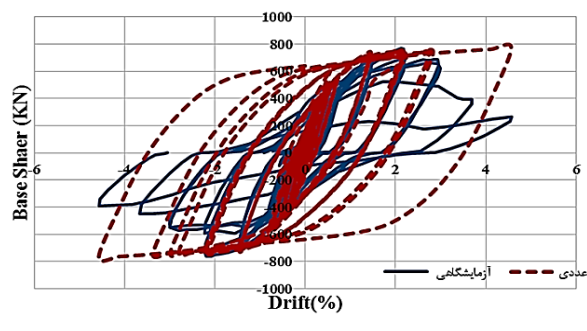
۳-۶- مقایسه سختی و مقاومت و شکل پذیری

در جدول ۲ مقایسه سختی اولیه، سختی مؤثر، حداکثر مقاومت برشی و حداکثر مقاومت تسلیم برای نمونه‌ها نشان داده شده است. در این مقایسه، اختلاف بین مقادیر مربوط به سختی اولیه، سختی مؤثر، حداکثر مقاومت برشی و مقاومت تسلیم به صورت درصد آرایه شده است. علامت‌های مثبت و منفی در ستون تفاوت به ترتیب نشان‌دهنده افزایش و کاهش در میزان پارامتر مورد نظر برای یک نمونه تحلیلی نسبت به نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ مقایسه مشخصات سازه‌ای محاسبه شده نمونه‌های آزمایشگاهی با تحلیلی

نمونه	سختی اولیه (KN/mm)		تفاوت (%)
	تحلیلی	آزمایشگاهی	
SPSW	۱۳۴/۰۱	۱۱۳/۸۹	+۱۷
CSPSW	۱۴۶/۱۳	۱۵۱/۳۲	-۳

نمونه	سختی مؤثر (KN/mm)		تفاوت (%)
	تحلیلی	آزمایشگاهی	
SPSW	۸۵/۳۰	۹۹/۹۶	-۱۷
CSPSW	۱۵۰/۵۷	۱۱۲/۶۴	+۳۳



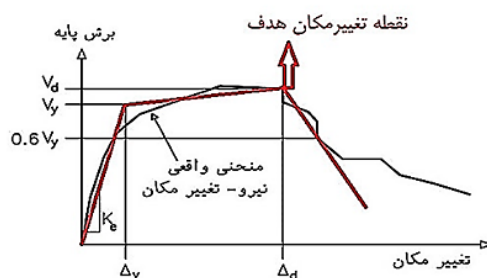
ب - C-SPSW

شکل ۱۱ مقایسه نتایج منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی (خطوط ممتد) با نمونه‌های تحلیلی (خطوط منقطع)

۲-۶- چندخطی سازی رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی

برای مقایسه برخی خواص نمونه‌ها، مانند: سختی، مقاومت اولیه و مقاومت مؤثر، لازم است تا منحنی چندخطی نیرو-جابجایی بر منحنی پوش هر یک از نمونه‌ها برازش داده شود. طبق آیین‌نامه [۲۴] ASCE41-17 برای محاسبه مقادیر سختی و مقاومت رسم منحنی سه خطی خواهد بود. خط اول منحنی چندخطی نیرو-جابجایی از مبدأ شروع شده و شیبی برابر با سختی جانبی مؤثر، K_e دارد. سختی جانبی مؤثر، K_e برابر است با سختی محاسبه شده برای نمونه در نیرویی معادل ۶۰٪ مقاومت تسلیم مؤثر سازه. مقاومت تسلیم مؤثر V_y نباید بزرگتر از برش پایه حداکثر قرائت شده در منحنی نیرو-جابجایی در هیچ نقطه‌ای باشد. خط دوم باید نمایانگر شیب مثبت پس از تسلیم باشد. این شیب با ترسیم خطی بین (V_d, Δ_d) و نقطه‌ای از خط اول به دست می‌آید به نحوی که سطح زیر منحنی واقعی با منحنی دو خطی حاصل با هم برابر باشد.

(V_d, Δ_d) نقطه‌ای روی منحنی رفتار واقعی نمونه است که بیانگر نقطه هدف جابه‌جایی یا جابه‌جایی معادل با حداکثر برش پایه هر کدام است که کمتر باشد.



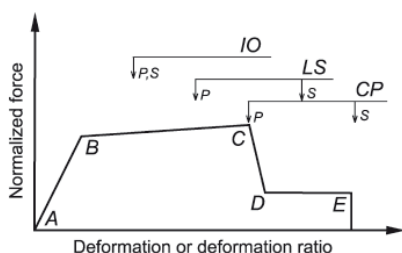
شکل ۱۲ چندخطی سازی رفتار نمونه‌ها طبق آیین‌نامه ASCE41-17

برای مقایسه کمی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، منحنی‌های Backbone حاصل از آزمایش نمونه‌ها و چندخطی برازش شده بر آن، براساس روش آیین‌نامه ASCE41-17 از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ها با نتایج تحلیلی تحت بار چرخه‌ای در شکل ۱۳ آرایه شده است. شایان ذکر است مدل سازی خرابی نمونه‌ها و بررسی آن، در این مقاله در نظر گرفته نشده است. نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی پارامترهایی مانند: سختی اولیه، سختی مؤثر و مقاومت نهایی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

تسلیم آنهاست، به عنوان معیاری برای تعیین مقدار تغییرشکل‌های غیرخطی ایجادشده در اعضا استفاده می‌شود.

ضریب اصلاح مورد استفاده در معیار پذیرش اعضا و اجزای کنترل‌شونده، به وسیله تغییرشکل شناخته می‌شود که مبین قابلیت شکل‌پذیری جزء است و m نام دارد.

نحوه محاسبه ضریب m بر اساس دستورالعمل ASCE41-13 [۲۵]، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. برای محاسبه ضریب m، ابتدا مقدار مجاز تغییرشکل برای حد آستانه فروریزش (CP) محاسبه می‌گردد (فرمول ۱) و سپس، نسبت این تغییرشکل به تغییرشکل متناظر با تسلیم تقسیم می‌شود. با ضرب کردن ضریب ۰/۷ در نسبت به دست آمده، مقدار ضریب m برای حد ایمنی جانی (LS) به دست می‌آید (فرمول ۲). مقدار ضریب m برای حد خدمت‌رسانی (IO) نیز از حاصل ضرب ۰/۶۷ در مقدار حد ایمنی جانی به دست می‌آید (فرمول ۳).



شکل ۱۴ پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ضریب m [۲۵]

$$m_{CP} = \frac{\Delta_U}{\Delta_Y} \quad (1)$$

$$m_{LS} = 0.75 \times m_{CP} \quad (2)$$

$$m_{IO} = 0.67 \times m_{LS} \quad (3)$$

پس از دوخطی‌سازی نمودارها ضریب اصلاح شکل‌پذیری (ضریب m)، برای نمونه‌ها استخراج و مقادیر آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴ ضرایب m محاسبه شده برای نمونه‌ها

نمونه	m_{CP}	m_{LS}	m_{IO}
SPSW	۳/۳۵	۲/۵۱	۱/۶۸
CSPSW	۲/۶۸	۲/۰۲	۱/۳۵
SPSW	۴/۴۵	۳/۸۳	۲/۲۳
CSPSW	۳/۶۴	۳/۴۳	۲/۲۵

نمونه	حداکثر برش پایه (KN)	
	تحلیلی	آزمایشگاهی
SPSW	۸۱۴/۳۱	۹۰۰
CSPSW	۷۵۱/۵۳	۷۷۰

نمونه	مقاومت تسلیم (KN)	
	تحلیلی	آزمایشگاهی
SPSW	۷۴۴/۶۱	۷۱۴/۷۵
CSPSW	۴۸۳/۲۵	۵۸۰/۶۰

شایان ذکر است مقادیر نشان داده شده در جدول ۲ برای مقاومت برشی حداکثر نمونه‌ها در حالت تحلیلی، مقاومتی است که در مدل المان محدود در جابه‌جایی متناظر با حداکثر مقاومت نمونه در آزمایشگاه به دست آمده است. از آنجا که در این پژوهش، خرابی اعضا در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است، رفتار اعضا در مدل تحلیلی پس از رسیدن به حداکثر ظرفیت پلاستیک در همان سطح باقی ماند و افت مقاومت در منحنی رفتار تحلیلی نمونه‌ها مشاهده نشد. نسبت شکل‌پذیری یکی دیگر از پارامترهایی است که به منظور بررسی خصوصیات لرزه‌ای و سازه‌ای یک سیستم، باید محاسبه شود. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی در جدول ۳ ارائه شده است. یادآوری می‌شود که برای مدل‌سازی کلیه نمونه‌ها، معیار خرابی در نظر گرفته نشده است. بنابراین، محاسبه جابه‌جایی حداکثر برای کلیه نمونه‌ها براساس وقوع اولین خرابی در اجزای دیوار صورت گرفته است، به این صورت که در هر نمونه اجزای اصلی، مانند: تیر فوقانی، ستون‌ها و ورق جان از نمونه جدا شده و جابه‌جایی کل نمونه متناظر با وقوع اولین خرابی در عضو ثبت شده است.

جدول ۳ ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی با تحلیلی

نمونه	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	$\mu = \Delta_{max}/\Delta_y$
SPSW	۷/۱۵	۳۱/۹۰	۴/۴۶
CSPSW	۵/۱۷	۱۷/۶۳	۳/۴۱
SPSW	۸/۸۰	۶۵/۲۲	۷/۴۱
CSPSW	۳/۴۲	۳۰/۲۲	۶/۱۰

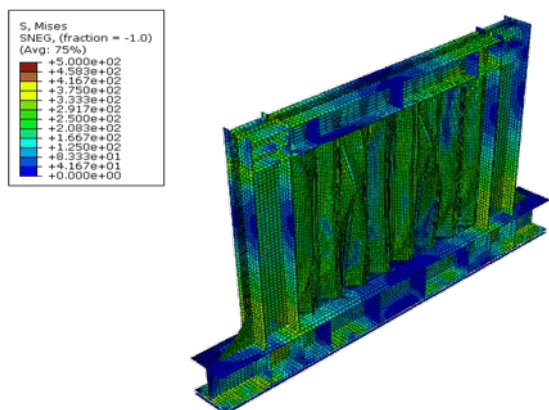
۷- ضریب اصلاح بر مبنای رفتار غیرخطی اعضا

در تحلیل خطی، مدل خطی الاستیک برای رفتار اعضا فرض شده است و تأثیر بارگذاری جانبی در این مدل بررسی می‌شود. در صورتی که مدل پاسخ غیرخطی از خود نشان دهد که البته در اغلب مواقع این اتفاق می‌افتد، بار جانبی و متعاقب آن نیروی داخلی اعضا از حد تسلیم فراتر می‌رود. اینکه تا چه حدی نیروهای داخلی ایجادشده در اعضا فراتر از نیروهای متناظر با

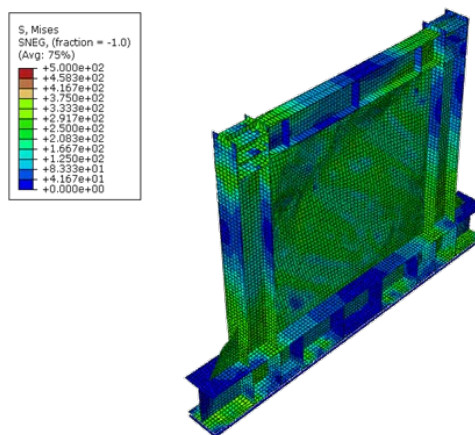
با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی در دو نمونه SPSW و CSPSW ضریب m_{CP} به ترتیب حدود ۳۳٪ و ۳۵٪ کمتر و برای ضریب m_{LS} به ترتیب حدود ۵۲٪ و ۶۹٪ و ضریب m_{IO} به ترتیب حدود ۳۲٪ و ۶۶٪ کمتر است.

۸- بررسی تغییرشکل نمونه‌ها در تحلیل اجزای محدود

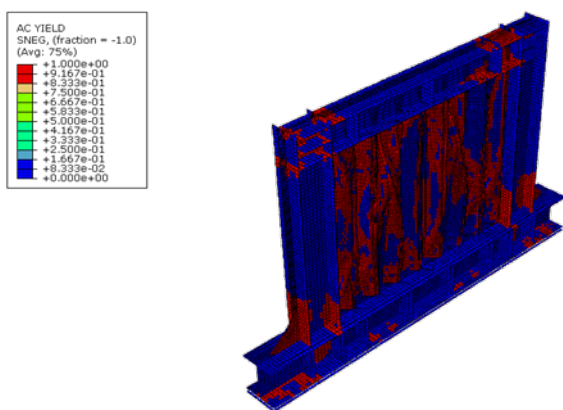
شکل ۱۵ تغییرشکل نمونه‌ها پس از اتمام تحلیل و آنالیز را نشان می‌دهد. در این تصاویر کنتورهای رنگی نمایشگر مقدار تنش فون میسر بر حسب مگاپاسکال است. علاوه بر نمایش توزیع تنش فون میسر برای هر نمونه، تصاویر مربوط به نواحی تسلیم شده در هر نمونه نیز ارائه شده است.



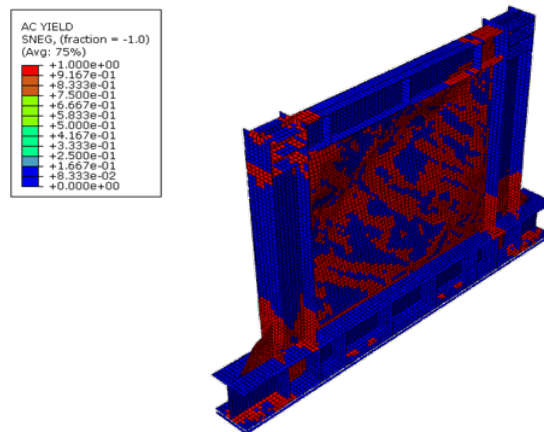
ب-۱



الف-۱



ب-۲



الف-۲

الف-۱ تغییرشکل و توزیع تنش فون میسر برای نمونه سخت نشده SPSW

الف-۲ نواحی تسلیم شده در نمونه SPSW

ب-۱ تغییرشکل و توزیع تنش فون میسر برای نمونه موجدار عمودی CSPSW

ب-۲ نواحی تسلیم شده در نمونه CSPSW

شکل ۱۵ تغییرشکل و توزیع تنش فون میسر، نواحی تسلیم شده در نمونه‌ها

تسلیم ورق جان کلیه نمونه‌ها، در همه سطح آن پخش شده است. مقاطع بحرانی و مفاصل پلاستیک در دو انتهای تیر فوقانی و در مجاورت اتصال آن با ستون، در پای ستون‌ها و در تیر تحتانی در زیر ناحیه اتصال ستون، مطابق با انتظار و تحلیل انجام شده اتفاق افتاد. در کلیه نمونه‌ها کماتش و تسلیم ورق جان دیوار برشی نیز به وضوح قابل مشاهده است.

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برای تحلیل اجزای محدود، ابتدا دو موضوع اثر مقدار تغییرشکل اولیه ورق جان و اندازه مش بر رفتار نمونه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار تغییرشکل اولیه ورق جان تأثیر زیادی در رفتار نمونه‌ها ندارد، ولی با کوچکتر شدن اندازه مش‌ها دقت نتایج بالاتر خواهد رفت. با توجه به هزینه‌های مربوط به کوچک شدن اندازه مش و زمان بر بودن، دقت مش‌بندی طوری انتخاب شد که خطا در محاسبه برش پایه کمتر از ۵ درصد باشد.

- بعد از صحت‌سنجی مدل‌های تحلیلی، با مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی معتبر مدل‌سازی نمونه‌ها انجام شد.
- با مقایسه نمونه تحلیلی نسبت به نمونه آزمایشگاهی برای نمونه‌های CSPSW و SPSW سختی اولیه ۳- و ۱۷+ درصد، سختی مؤثر به ترتیب ۱۷- و ۳۳+ درصد و حداکثر برش پایه به ترتیب ۱۰- و ۲- درصد و مقاومت تسلیم به ترتیب ۴+ و ۲۰- درصد مشاهده گردید.
- از نتایج تحلیلی مشاهده شد که مدل‌سازی تحلیلی به خوبی قادر به پیش‌بینی نتایج است و انطباق خوبی بین نتایج وجود دارد.
- ۱۰- مراجع**
- [۱] الف. زمانی‌بیدختی، س. م. دشتی‌زند، "بررسی سیستم دیوار برشی پیش‌ساخته حفاظت شده با اتصال پیچی"، اولین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، ۱۳۹۶.
- [2] A. S. C. Engineers, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE Standard 7-10, American Society of Civil Engineers, 2010.
- [3] ANSI, AISC 341-10, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 2010.
- [4] AISC Steel Design Guide 20, *Steel Plate Shear Walls*, IL, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, 2007.
- [5] P. Timler, G. Kulak, *Experimental Study of Steel Plate Shear Walls*, Structural Engineering Report, No. 114, Alberta, Edmonton, 1983.
- [6] M. Elgaaly, V. Caccese, C. Du, *Post-Buckling Behavior of Steel-Plate Shear Walls Under Cyclic Loads*, Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 2, pp. 588-605, 1993.
- [7] R. Driver, G. Kulak, D. Kennedy, A. Elwi, *Finite Element Modelling of Steel Plate Shear Walls*, Proceedings of the Structural Stability Research Council Annual Technical Session, pp. 253-264, 1997.
- [8] M. Alinia, M. Dastfan, *Cyclic behaviour, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, pp. 554-563, 2007.
- [9] S. Sabouri-Ghomi, R. Sajjadi, *Experimental and Theoretical Studies of Steel Shear Walls With and Without Stiffeners*, Journal of Construction Steel Research, Vol. 75, pp. 152-159, August, 2012.
- [10] M. Alinia, R. Sarraf Shirazi, *On the design of stiffeners in steel plate shear walls*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 2069-2077, 2009.
- [11] G. Grondin, Q. Chen, A. Elwi, J. Cheng, *Stiffened Steel Plates Under Compression and Bending*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 45, No. 2, pp. 125-148, 1998.
- [12] M. Elgaaly, R. W. Hamilton, A. Seshadri, *Shear strength of beam with corrugated webs*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 122, pp. 390-398, 1996.
- [13] S. A. Ibrahim, W. W. El-Dakhkhni, M. Elgaaly, *Behavior of bridge girders with corrugated webs under monotonic and cyclic loading*, Engineering Structures, 28, pp. 1941-1955, 2006.
- [14] E. Y. Sayed-Ahmed, *Behavior of steel and composite girders with corrugated steel webs*, Canadian Journal of Civil Engineering, 28, pp. 656-672, 2001.
- [15] J. Yi, J. Gil, H. Youm, H. Lee, "Interactive shear buckling corrugated steel webs", Engineering Structures, 30, pp. 1659-1666, 2008.
- [16] Gayed botros, Kulak GL, "Nonlinear Finite Element Analysis of corrugated steel plate shear walls", Journal of Structural Engineering, ASCE 1998, 124(2), 112-20, 2006.
- [۱۷] ر. میرقادر، ش. ترابیان، "رفتار و محدوده کاربرد دیوارهای برشی فولادی موجدار"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۴۰، شماره ۵، ۱۳۸۵.
- [۱۸] ح. کلای، ف. علایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بررسی رفتار دیوار برشی فولادی با ورق موجدار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۲.
- [۱۹] الف. کلانتری، و. ر. کلات‌جاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بررسی عملکرد سیستم نوین دیوار برشی موجدار تقویت شده با ورق فولادی دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۶.
- [20] S. Tipping, B. Stojadinovic, *Innovative corrugated steel shear walls for multi-story residential buildings*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [۲۱] م. اخوان‌سیگاری، ع. جفتایی، ن. خواجه‌احمدعطاری، رساله دکتری، بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده با سخت‌کننده‌های قطری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۵.
- [۲۲] س. م. دشتی‌زند، و. ر. کلات‌جاری، ن. خواجه‌احمدعطاری، بررسی آزمایشگاهی سختی، مقاومت و برش پایه دیوارهای برشی فولادی صاف و موجدار نوزنقه‌ای قائم، نشریه علمی- پژوهشی سازه و فولاد، سال پانزدهم، شماره ۳۲، ۱۴۰۰.
- [23] ATC-24, *Guidelines for cyclic testing of components of steel structures*, Applied Technology Council, Redwood City, CA, 1992.
- [24] ASCE/ SEI, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 41-17, 2017.
- [25] Gayed botros, Kulak GL, "Nonlinear Finite Element Analysis of corrugated steel plate shear walls", Journal of Structural Engineering, ASCE 1998, 124(2), 112-20, 2006.