

ارزیابی عددی و آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با بازشوهای دایره‌ای تحت بار چرخه‌ای

حسین شوکتی، استاد گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه ارومیه
 علی صاحب جمع*، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

*alisahebjam@gmail.com

چکیده

سیستم دیوار برشی فولادی یک سیستم باربر جانبی است که به سبب داشتن مزایایی از جمله شکل‌پذیری مناسب، سختی زیاد، میزان مقاومت برشی و جذب انرژی بالا همواره مورد توجه محققین بوده است. از سال ۱۹۸۰ میلادی که تحقیقات پایه بر روی دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده صورت پذیرفت، پیوسته پژوهشگران در صدد بهبود رفتار این سیستم، افزایش کارایی و بهره‌وری آن بوده‌اند. از جمله اقداماتی که در جهت افزایش کارایی و بهره‌وری دیوار برشی فولادی صورت پذیرفت، ایجاد بازشو بر روی ورق درونی بود. تحقیقات بر روی دیوار برشی فولادی دارای بازشو در اوایل دهه ۹۰ میلادی با مطالعات صبوری قمی و رابرتز بر روی این سیستم آغاز گردید. در سال‌های اخیر یک نمونه دیوار برشی فولادی با بازشوهای منظم دایره‌ای شکل یا ماتریسی توسط محققان دانشگاه بوفالو آمریکا مطرح شده و مورد آزمایش قرار گرفت. از این نوع بازشو علاوه بر سیستمی جهت عبور تاسیسات در مواردی که ضخامت ورق مورد نیاز طراحی در دسترس نباشد می‌توان استفاده نمود، به گونه‌ای که ورق ضخیم همراه با بازشوهای دایره‌ای شکل جایگزین ورق نازک بدون بازشو می‌گردد. در این مقاله نیز به جهت مطالعات بیشتر بر روی بازشوهای منظم دایره‌ای شکل، تاثیر اینگونه بازشو بر روی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور یک نمونه دیوار برشی فولادی با بازشوهای دایره‌ای طراحی و ساخته شده سپس در مرکز تحقیقات سازه دانشگاه ارومیه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی رفتار این نوع سیستم به صورت تحلیل عددی و با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS بررسی گردیده است. در نهایت نتیجه‌ی هر دو تحلیل آزمایشگاهی و عددی با روش تئوری آنالیز پلاستیک سازه مقایسه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از تطابق مناسب پوش منحنی هیستریزس در دو تحلیل عددی و آزمایشگاهی بوده همچنین نشان دهنده‌ی محافظه‌کارانه بودن روابط روش آنالیز پلاستیک و یا ضرایب کاهشی اعمال شده بر این روابط به سبب وجود بازشو و کاهش مقطع تیر می‌باشد.

کلید واژگان: دیوار برشی مجوف فولادی، بازشوی ماتریسی، آنالیز پلاستیک، تحلیل المان محدود، نرم افزار ABAQUS

۱- مقدمه

سیستم دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم برابر جانبی همواره به سبب شکل‌پذیری مناسب، جذب انرژی، مقاومت برشی و سختی زیاد مورد توجه پژوهشگران بوده است. تا قبل از سال ۱۹۸۰ میلادی طراحی دیوار برشی فولادی بر اساس ممانعت از کمانش ورق درونی صورت می‌گرفت که بر این اساس برای طراحی و اجرای این سیستم از سخت‌کننده های فراوانی بر روی ورق درونی فولادی استفاده می‌شد. تحقیقات کلیدی که از اوایل دهه ۸۰ میلادی بر روی سیستم دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده (SPSW) صورت گرفت آیین‌نامه‌های طراحی سازه های فولادی کانادا CSA-2001 [۱] و آمریکا AISC 341 [۲] را ملزم ساخت تا ضوابطی را برای طراحی این سیستم بدون سخت کننده ارائه دهند. بر مبنای این ضوابط به ورق درونی اجازه‌ی کمانش داده می‌شود و انتقال بار از طریق عمل میدان کششی صورت می‌گیرد.

زمانی که یک SPSW تحت بار جانبی قرار می‌گیرد در مرکز ورق درونی، پلایت فولادی تحت تاثیر برش خالص قرار گرفته و تنش‌های اصلی با راستای اعمال بار زاویه ۴۵° ایجاد می‌کنند، تنش‌های اصلی به هر دو صورت فشاری و کششی در سیستم ایجاد می‌گردند، مقاومت کمانشی ورق فولادی بستگی به لاغری ورق (نسبت ارتفاع یا عرض ورق به ضخامت آن) دارد و با توجه به این که در دیوار برشی‌های بدون سخت کننده‌ی متعارف ورق فولادی بسیار لاغر می‌باشد مقاومت کمانشی آن نیز بسیار پایین خواهد بود در نتیجه زمانی که سیستم تحت بار جانبی قرار می‌گیرد با فائق آمدن تنش‌های اصلی فشاری بر مقاومت فشاری سیستم ورق در راستای یک سری خطوط مایل شروع به خم شدن و کمانش می‌نماید که راستای این خطوط عمود بر راستای تنش‌های اصلی فشاری می‌باشد، از این نقطه به بعد انتقال بار بر عهده‌ی تنش‌های اصلی کششی در ورق فولادی خواهد بود که از این رفتار فراکمانشی تحت عنوان عمل میدان کششی (Tension Field) یاد می‌شود.

در این مقاله برای تحقیقات بیشتر بر روی سیستم دیوار برشی فولادی با بازشوهای دایره‌ای شکل یا ماترسی، ابتدا یک نمونه‌ی آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده سپس در مرکز تحقیقات سازه دانشگاه ارومیه تحت بار دوره‌ای قرار می‌گیرد [۳] نتایج مطالعات آزمایشگاهی با نتایج تحلیل عددی صورت گرفته توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS و روش آنالیز پلاستیک مقایسه می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که تطابق مناسبی بین پوش منحنی هیستریز بدست آمده از دو نمونه‌ی آزمایشگاهی و المان محدود وجود دارد و نیز روابط روش آنالیز پلاستیک قدری در محاسبه‌ی ماکزیم ظرفیت باربری سیستم محافظه کارانه به نظر می‌رسند.

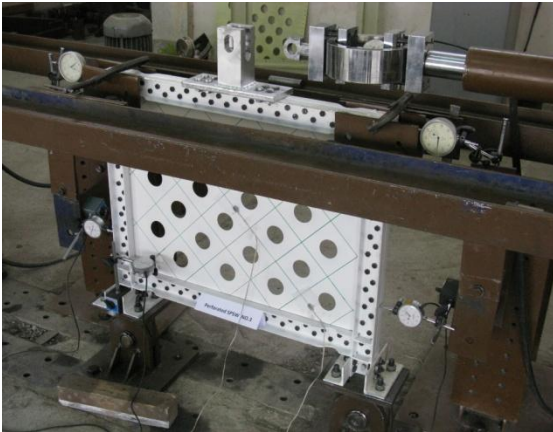
۲- مروری بر تحقیقات پیشین

در اوایل دهه ۸۰ میلادی با آغاز تحقیقات پایه‌ی محققینی چون Thorburn [۴] و Timler, Kulak [۵] و ارائه‌ی مدل تحلیل نواری توسط این محققین، استفاده از دیوار برشی های فولادی بدون سخت کننده به سبب مقاومت فراکمانشی قابل توجه این سیستم نظر پژوهشگران زیادی را به خود جلب نمود و بر اساس همین تحقیقات پایه آیین نامه‌های فولاد کانادا و آمریکا ضوابطی را برای تحلیل و طراحی SPSW ارائه نمودند. با ادامه‌ی پژوهش‌ها در سالهای ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ Roberts صوری و قمی [۷] و [۶] روش تحلیل و طراحی دیگری را تحت عنوان اندرکنش قاب و ورق فولادی (PFI) مطرح نمودند. بر اساس روش PFI دو عنصر قاب فولادی و ورق درونی هر کدام به تنهایی ارزیابی و تحلیل می‌گردد، سپس با استفاده از اصل جمع آثار قوا رفتار کلی سیستم پیش‌بینی می‌شود. لازم به توضیح است که در این روش سیستم دیوار برشی فولادی تحت اثر بار برشی قرار دارد که بعدها خرازی [۸] با بررسی نیروی خمشی وارده به سیستم در سازه‌های بلند روش مذکور را توسعه داده و با اصلاح روابط ارائه شده در روش PFI، روش اندرکنش قاب و ورق اصلاح شده یا M-PFI را ارائه نمود. در سال ۲۰۰۳ Berman, Bruneau [۹] استفاده از روش آنالیز پلاستیک بر روی دیوار برشی فولادی را مطرح نمودند، اگرچه این روش قادر به پیش‌بینی جابجایی سیستم دیوار برشی فولادی نبود ولی به خوبی ماکزیم مقاومت برشی سیستم را محاسبه می‌نمود. پس از آغاز تحقیقات بر روی دیوار برشی‌های فولادی دارای بازشو توسط صوری قمی در سال ۱۹۹۲ محققین ضرایب کاهش متعددی را ارائه نمودند که با اعمال آنها در روابط روشهای مدل نواری، PFI و آنالیز پلاستیک، کاهش سختی و ظرفیت باربری ناشی از وجود بازشوها قابل پیش‌بینی می‌گردید. از جمله‌ی این ضرایب کاهش و اصلاحی می‌توان به ضرایب پیشنهادی Vian [۱۰] اشاره نمود که تاثیر وجود RBS یا کاهش مقطع تیر، مفاصل پای ستون و وجود بازشوهای دایره‌ای شکل بر روی ورق فولادی را در روابط روش آنالیز پلاستیک اعمال می‌نمود. در این مقاله نیز به جهت تشابه نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد تحقیق و نمونه‌ی مطالعه شده توسط Vian از روابط پیشنهادی این محقق در محاسبات آنالیز پلاستیک استفاده شده است.

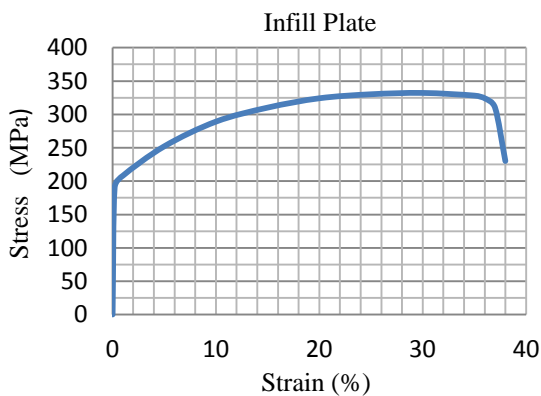
۳- نمونه‌ی آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات نمونه

برای تحلیل و طراحی نمونه‌ی آزمایشگاهی از ضوابط و مقررات موجود در AISC 341 و AISC Steel Design Guide 20 [۱۱] استفاده شده است. با توجه به محدودیت نسبت عرض به ارتفاع پانل دیوار برشی فولادی ($0.8 < \text{aspect ratio} < 2.5$) در ضوابط مذکور



شکل ۲- تصویری از نمونه ی آزمایشگاهی پیش از بارگذاری



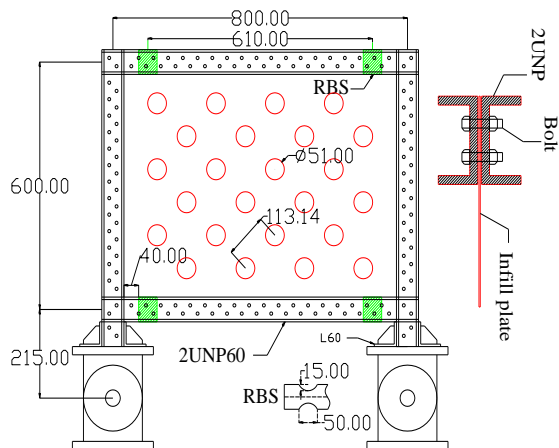
شکل ۳- نمودار تنش - کرنش ورق فولادی درونی

۳-۲- آماده سازی نمونه برای آزمایش

اتصال نمونه به کف صلب آزمایشگاه توسط مفاصل پای ستون صورت می‌گیرد همچنین برای جلوگیری از حرکت برون محور SPSW از دو پروفیل I شکل در دو طرف نمونه و در تراز تیر فوقانی استفاده می‌شود. نمونه توسط غلتک‌هایی به مهار جانبی I شکل اتصال می‌یابد. این غلتک‌ها به دیوار اجازه می‌دهند بدون حرکت برون محور، به راحتی در راستای خود به سمت جلو و عقب حرکت نمایند. بارگذاری نمونه نیز توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت 15 ton از وسط تیر فوقانی صورت می‌گیرد. جک هیدرولیکی با اعمال نیروی فشاری و کششی، نمونه را در راستای خود دیوار به جلو و عقب می‌راند و بدین ترتیب امکان استخراج و ارزیابی رفتار نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای را فراهم می‌سازد. در شکل (۴) می‌توان طریقه مهار جانبی نمونه‌ی آزمایشگاهی را ملاحظه نمود.

عرض پانل 800 mm و ارتفاع آن 600 mm انتخاب شده است که در این حالت aspect ratio معادل 1.33 بوده و از محدودیت فوق پیروی خواهد نمود. فریم محاط کننده‌ی دیوار از 2UNP60 تشکیل یافته که به صورت پشت به پشت و به حالت I شکل در شرایطی که ورق درونی مابین آن‌ها قرار گرفته به یکدیگر اتصال می‌یابند و المان‌های تیر HBE و ستون VBE را ایجاد می‌کنند. اتصال پروفیل‌های UNP توسط پیچ‌های پر مقاومت فولادی و از ناحیه‌ی جان آن‌ها به یکدیگر صورت گرفته است. ورق درونی نیز از ورق فولادی به ضخامت 0.4 mm با بازشوهای دایره ای شکل تشکیل یافته است. قطر هر یک از بازشوها D برابر 51 mm و فاصله‌ی عمودی، افقی آنها از یکدیگر 80 mm می‌باشد به عبارت دیگر فاصله مایل مرکز به مرکز سوراخ‌ها از یکدیگر S_{dia} معادل 113.14 mm است. برای جلوگیری از ایجاد مفصل پلاستیک در المان ستون از کاهش مقطع تیر یا RBS در ابتدا و انتهای المان تیر استفاده شده، بعلاوه در همین راستا از وجود مفاصل پای ستون با یک درجه آزادی دورانی نیز بهره برده شده است.

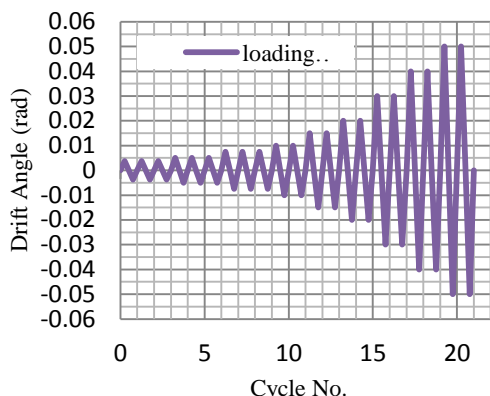
در شکل (۱) می‌توان طرح، ابعاد و نحوه‌ی اتصال ورق درونی به فریم محاط کننده را ملاحظه نمود، در شکل (۲) نیز تصویری از نمونه‌ی آزمایشگاهی قابل مشاهده می‌باشد. تنش تسلیم و تنش نهایی مصالح فولادی در فریم محاط کننده به ترتیب 240 MPa و 450 MPa می‌باشد که در مورد ورق درونی تنش‌های فوق به ترتیب معادل با 190 MPa و 330 MPa هستند. در شکل (۳) می‌توان نمودار تنش - کرنش ورق درونی ناشی از آزمایش کشش مستقیم را ملاحظه نمود.



شکل ۴- ابعاد نمونه‌ی آزمایشگاهی و نحوه‌ی اتصال ورق درونی به فریم محاط کننده

۳-۳- پروتکل بارگذاری

بارگذاری نمونه به صورت چرخه‌ای و شبه استاتیکی صورت می‌گیرد. از جمله پروتکل‌های بارگذاری چرخه‌ای می‌توان به دو پروتکل ATC-24 و SAC اشاره نمود. ATC-24 یکی از قدیمی‌ترین پروتکل‌های تدوین شده در ایالات متحده در حوزه ارزیابی لرزه‌ای به شمار می‌رود که در آن از جابجایی تسلیم Δ_{yield} به عنوان پایه‌ای برای افزایش دامنه‌ی بارگذاری استفاده می‌گردد. به سبب ابهاماتی که در تعیین Δ_{yield} پیش از انجام آزمایش وجود داشت در سال ۲۰۰۰ میلادی پروتکل SAC جایگزین ATC-24 در آیین‌نامه‌ی AISC 341 گردید [۱۲]. در پروتکل SAC بارگذاری نمونه بر اساس کنترل دررفت نمونه صورت می‌گیرد. با توجه به کمبود امکانات آزمایشگاهی و زمانبر بودن تست، مقداری از تعداد سیکل‌های بارگذاری در پروتکل SAC می‌کاهیم و آن را SAC تقلیل یافته می‌نامیم. در جدول (۱) می‌توان ۹ کورس بارگذاری نمونه با پروتکل SAC و SAC تقلیل یافته را ملاحظه نمود. همچنین در شکل (۵) منحنی بارگذاری چرخه‌ای نمونه نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی مربوط به تاریخچه‌ی بارگذاری نمونه

۴-۴- تست نمونه و نتایج آن

با شروع بارگذاری نمونه، ورق درونی فولادی شروع به کمانش می‌نماید. اولین کمانشی که همراه با صدای شدید می‌باشد در مسیر فشار از سیکل اول در کورس A ایجاد می‌گردد که جابجایی و باری معادل 0.1 mm و 2.2 kN را دارا می‌باشد و نشان دهنده‌ی ناچیز بودن ظرفیت پیش از کمانش ورق فولادی می‌باشد. همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره گردید دیوار برشی‌های فولادی بدون سخت‌کننده مقدار لاغری بالایی دارند و به راحتی با اعمال بار ناچیزی تنش‌های اصلی فشاری بر مقاومت فشاری ورق فولادی فائق آمده و ورق شروع به کمانش می‌نماید. در شکل (۶) می‌توان تشکیل موج‌های کمانشی در راستای میدان کششی را ملاحظه نمود. مطابق شکل مذکور راستای میدان کششی بسیار نزدیک به راستای قرارگیری بازو ها می‌باشد که نشان می‌دهد زاویه میدان کششی مقداری نزدیک به 45° نسبت به امتداد قائم را داراست. با انتخاب نقطه‌ای در تراز تیر فوقانی و ثبت جابجایی آن نقطه منحنی هیستریزس نمونه‌ی آزمایشگاهی مطابق شکل (۷) استخراج می‌گردد. همان‌گونه که در این شکل نیز می‌توان ملاحظه نمود بنا به عدم توانایی جابجایی سنجها برای ثبت جابجایی‌های بزرگ تست نمونه قبل از مشاهده‌ی افت بار در منحنی هیستریزس به پایان می‌رسد. در ادامه به بررسی سه پارامتر مهم در ارزیابی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی شامل شکل‌پذیری، سختی الاستیک و ماکزیمم مقاومت برشی سازه پرداخته می‌شود. برای یافتن مقادیر پارامترهای فوق پوش منحنی هیستریزس در ناحیه‌ی بار فشاری یا جابجایی‌های مثبت را با یک منحنی دو خطی الاستو - پلاستیک ایده‌آل معادل سازی می‌شود. از پارامترهای اشاره شده سختی الاستیک سازه برابر با شیب ناحیه‌ی خطی منحنی هیستریزس سازه و شکل‌پذیری معادل ماکزیمم جابجایی سیستم، مقداری برابر با Δ_{Max} / Δ_y را داراست که مقادیر مربوط به Δ_{Max} و Δ_y را می‌توان با مراجعه به منحنی دوخطی ایده‌آل بدست آورد. شکل (۸) منحنی دوخطی ایده‌آل معادل پوش منحنی هیستریزس را نشان می‌دهد. مقادیر هر یک از پارامترهای استخراج شده‌ی ماکزیمم مقاومت برشی، شکل‌پذیری و سختی الاستیک سیستم را می‌توان در جدول (۲) ملاحظه کرد.



شکل ۴- نحوه‌ی مهار جانبی نمونه‌ی آزمایشگاهی

جدول ۱- مقادیر مربوط به پروتکل بارگذاری چرخه‌ای نمونه

Loading Protocol →	SAC		SAC تقلیل یافته	
	Cycles	θ (rad)	Cycles	θ (rad)
Course A	6	0.00375	3	0.00375
Course B	6	0.005	3	0.005
Course C	6	0.0075	3	0.0075
Course D	4	0.01	2	0.01
Course E	2	0.015	2	0.015
Course F	2	0.02	2	0.02
Course G	2	0.03	2	0.03
Course H	2	0.04	2	0.04
Course I	ادامه‌ی زوج سیکلها با نمو $\theta=0.01$		2 Cycles $\theta=0.05$	

جدول ۲- نتایج مطالعات پارامتریک نمونه‌ی آزمایشگاهی

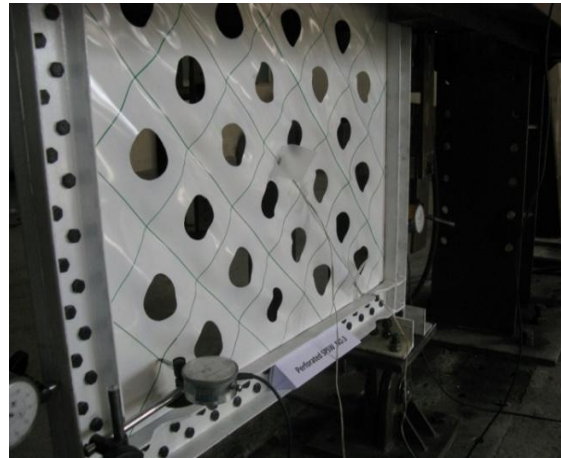
نام نمونه	سختی الاستیک K_e (kN/mm)	ماکزیمم مقاومت برشی V_{max} (kN)	شکل پذیری معادل ماکزیمم جابجایی $\mu = \Delta_{max}/\Delta_y$
SPSW _{TEST}	5.9	60.4	5.75

۴- تحلیل عددی

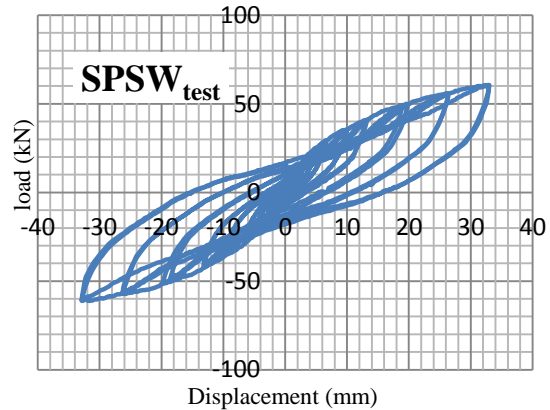
در این بخش نمونه‌ی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی مجوف توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی می‌شود. برای تحلیل شبه استاتیکی نمونه از متد صریح دینامیکی (Explicit) استفاده شده است از آنجایی که این متد بر پایه‌ی روابط دینامیکی استوار می‌باشد، برای اعمال این متد در مسائل شبه استاتیکی باید تمهیدات ویژه‌ای را مد نظر قرار داد. برای دقت و بازدهی بیشتر تحلیل شبه استاتیکی، بارگذاری تا حد امکان باید به صورت ملایم صورت گیرد تا تغییرات شتاب از یک نمو تا نمو دیگر بسیار کم باشد بدین منظور از دامنه‌ی بارگذاری Smooth Step استفاده می‌شود که اتوماتیک وار ملایم ترین دامنه‌ی بارگذاری را بین دو نقطه ایجاد می‌کند. همچنین برای برقراری یک تحلیل شبه استاتیکی، بعنوان یک قاعده‌ی کلی انرژی جنبشی سیستم تغییر شکل یافته نباید از ۵ الی ۱۰ درصد انرژی درونی سیستم بیشتر شود و نیز انرژی درونی سیستم باید با کار انجام یافته توسط نیروی خارجی برابر گردد که با کنترل این قواعد پس از پایان تحلیل المان محدود می‌توان از صحت انجام تحلیل شبه استاتیکی اطمینان حاصل نمود [۱۳] و [۱۴].

۴-۱- مدل‌سازی و مش‌بندی نمونه

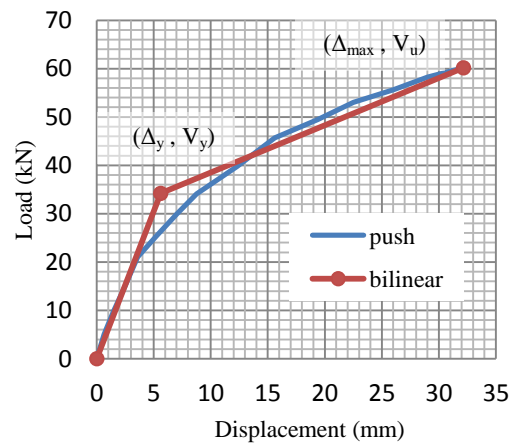
برای ثبت کمانش موضعی در فریم جانبی و ورق درونی کل سیستم دیوار برشی مجوف فولادی با المان Shell مدل‌سازی شده و نیز برای مش‌بندی نمونه نیز از المان پوسته‌ی S4R استفاده گردیده است. المان مذکور یک المان چهار گرهی دو انحنایی با انتگرال‌گیری کاهش یافته می‌باشد، هر گره این المان دارای ۶ درجه‌ی آزادی می‌باشد که شامل سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی است. از این نوع المان می‌توان هم در پوسته‌های ضخیم و هم در پوسته‌های نازک استفاده نمود. برای دانه‌بندی نمونه Seed، از روش Global Seeds با سایز 20 mm استفاده شده است، مش‌بندی نمونه نیز با استفاده از تکنیک مش‌بندی منظم یا Structured انجام گرفته است. لازم به ذکر است که از این روش مش‌بندی بر روی سطوحی می‌توان استفاده نمود که اولاً سطح مذکور عاری از هر گونه سوراخ، خط یا نقطه باشد و ثانیاً سطح متشکل از سه تا پنج خط متصل به هم باشد. برای برقراری شروط فوق می‌توان سطح ورق درونی و محل RBS ها را به طور مناسبی پارتیشن‌بندی نمود [۱۵].



شکل ۶- تصویر نمونه‌ی آزمایشگاهی پس از آزمایش و تشکیل میدان کششی



شکل ۷- منحنی هیستریزس نمونه‌ی آزمایشگاهی



شکل ۸- منحنی دو خطی ایده‌آل معادل پوش منحنی هیستریزس

۴-۴- مشخصات مکانیکی مصالح

مقادیر تنش جاری‌شدگی و نهایی مصالح فولادی پیش‌تر در بخش ۳-۱ مشخص گردیده‌اند، لازم به ذکر است برای وارد نمودن مشخصات مکانیکی مصالح فولادی در نرم افزار المان محدود می‌بایست از مقادیر تنش‌های اصلی و کرنش‌های لگاریتمیک مصالح استفاده نمود. در این مقاله برای تعیین کار سختی مصالح فولادی از روش Combined با تعریف اثر Cyclic Hardening استفاده شده است.

۴-۵- نتایج تحلیل المان محدود

ابتدا باید از صحت تحلیل شبه استاتیکی اطمینان حاصل نمود. از این‌رو انرژی جنبشی و انرژی درونی سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای برقراری تحلیل شبه استاتیکی مقادیر انرژی جنبشی سیستم نباید از ۵ الی ۱۰ درصد انرژی درونی سیستم بیشتر باشد. شکل (۱۰) صحت تحلیل شبه استاتیکی را نمایان می‌سازد. مطابق شکل مذکور انرژی درونی سیستم منطبق بر کار انجام یافته توسط نیروهای خارجی بوده و در مقابل انرژی جنبشی قابل اغماض است.

با پایان تحلیل شبه استاتیکی کنتور تنش با معیار میزس در ماکزیمم جابجایی سیستم و منحنی هیستریزس نمونه‌ی نرم افزاری به ترتیب مطابق با اشکال (۱۱) و (۱۲) استخراج می‌گردد.

با توجه به کنتور تنش نمونه می‌توان ملاحظه نمود که ورق درونی فولادی به صورت قابل توجهی تسلیم شده در حالی که فریم محاط کننده عمدتاً بغیر از نواحی RBS هنوز در حالت الاستیک باقی مانده است که این مسئله علاوه بر تایید صحت طراحی سیستم حاکی از کارامدی RBS در جلوگیری از تشکیل مفاصل پلاستیک در المان ستون VBE می‌باشد.

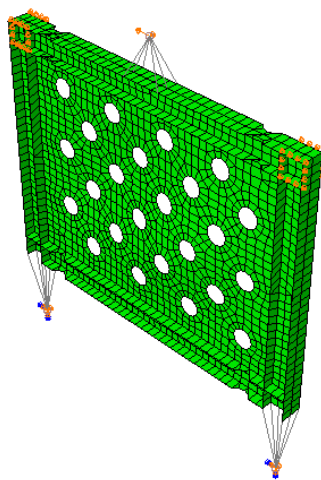
در جدول (۳) نیز می‌توان مقادیر پارامترهای ماکزیمم مقاومت برشی، شکل‌پذیری و سختی الاستیک سیستم را ملاحظه نمود.

۴-۲- اعمال ناکاملی اولیه Initial imperfection

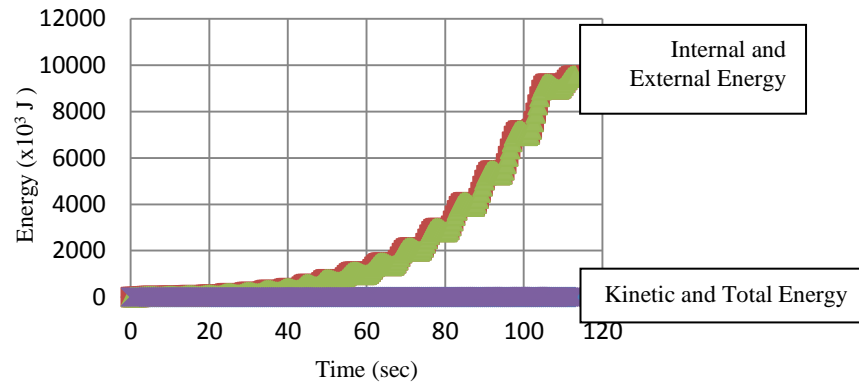
چنانچه بار اعمالی کاملاً بر سطح مقطع ورق درونی عمود باشد و ورق درونی هیچگونه عیب و نقص هندسی نداشته باشد کمانشی اتفاق نخواهد افتاد. از این‌رو برای اینکه بتوان کمانش ورق فولادی را مورد ارزیابی قرار داد در این مقاله از یک ناکاملی اولیه استفاده شده است، بدین صورت که با انجام یک آنالیز مقدار ویژه جابجایی‌های بدست آمده از یک مُد این تحلیل با اعمال ضریبی بعنوان ناکاملی اولیه به نمونه‌ی اصلی اختصاص داده شده است به طوری که ماکزیمم مقدار این ناکاملی از 6 mm تجاوز نمی‌نماید.

۴-۳- شرایط مرزی و بارگذاری مدل المان محدود

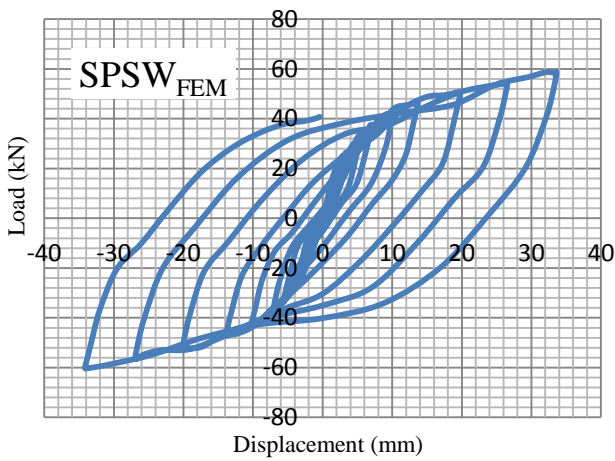
برای مدل‌سازی مفاصل پای ستون ابتدا محل لولای مفاصل به صورت یک Reference Point تعریف شده، سپس شرایط تکیه گاهی موجود در نمونه‌ی آزمایشگاهی دقیقاً به نقطه‌ی رفرنس اختصاص داده شده است، به گونه‌ای که این نقاط فقط یک درجه آزادی دورانی حول محور عمود بر دیوار یا محور Z دارند. سپس نقاط مذکور توسط المان Coupling به پای ستون اتصال یافته‌اند. برای مدل‌سازی نحوه بارگذاری نیز به طریقه‌ی مشابه تکیه گاهی در تراز ۱۰۰ میلیمتری از بال تیر فوقانی تعریف شده که با اختصاص جابجایی‌های رفت و برگشتی در راستای دیوار به این تکیه گاه از طریق دامنه‌ی Smooth steps بارگذاری نمونه با کنترل دررفت صورت می‌پذیرد. مهار جانبی دیوار نیز با اعمال محدودیت بر حرکت برون محور نمونه در اطراف پانل زون مدل‌سازی شده است. همچنین نقطه‌ی مشخص ثبت جابجایی در مدل آزمایشگاهی نیز بعنوان یک Set در مدل المان محدود معرفی گشته که امکان ارزیابی حرکت این نقطه را به آسانی فراهم می‌سازد. در شکل (۹) تصویر نمونه‌ی کامل مدل‌سازی شده را می‌توان مشاهده نمود.



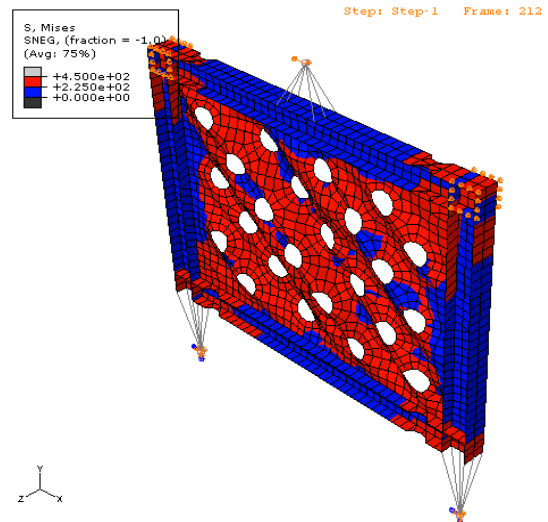
شکل ۹ - تصویری از نمونه ی المان محدود مدل‌سازی شده



شکل ۱۰- ارزیابی صحت آنالیز شبه استاتیکی



شکل ۱۲- منحنی هیستریزس نمونه ی المان محدود



شکل ۱۱- تغییر شکل و کنتور تنش نمونه ی المان محدود

جدول ۳- نتایج مطالعات پارامتریک نمونه ی المان محدود

نام نمونه	سختی الاستیک K_e (kN/mm)	ماکزیمم مقاومت برشی V_{max} (kN)	شکل پذیری معادل ماکزیمم جابجایی $\mu = \Delta_{max}/\Delta_y$
SPSW _{FEM}	7.4	58.7	6.81

۵- آنالیز پلاستیک نمونه

آنالیز پلاستیک نمونه تحلیل مشابه با روش PFI می باشد که توسط Bruneau و Berman برای دیوار برشی فولادی ارائه گردیده است با این تفاوت که این روش قادر به پیش‌بینی جابجایی سیستم نبوده و فقط ماکزیمم ظرفیت باربری سیستم را محاسبه می نماید. در این روش نیز ظرفیت پلاستیک المان‌های فریم محاط کننده و ورق درونی به صورت مجزا محاسبه شده، سپس با استفاده از اصل جمع آثار قوا ظرفیت کل سیستم به دست می آید.

ظرفیت فریم محاط کننده در این روش از رابطه (۱) محاسبه می گردد. این رابطه متاثر از دو عامل کاهش ظرفیت مفاصل پای ستون و RBS ها می باشد.

$$V_{yf} = \frac{4 \cdot \beta \cdot M_p}{\lambda \cdot (H + h_{hinge})} \quad (1)$$

در رابطه ی فوق β نسبت مدول پلاستیک تیر در محل RBS به مدول پلاستیک مقطع کامل تیر، M_p ممان پلاستیک تیر، λ نسبت فاصله ی مرکز به مرکز RBS ها به عرض فریم، H ارتفاع فریم و h_{hinge} فاصله ی محور مفاصل پای ستون تا مرکز تیر تحتانی می باشد.

همچنین محاسبه ی ظرفیت ورق فولادی درونی از طریق رابطه ی زیر صورت می گیرد که متاثر از مفاصل پای ستون می باشد.

(۲)

$$V_{yp} = \left(\frac{H}{H + h_{hinge}} \right) \cdot \frac{1}{2} F_{yp} \cdot t \cdot W_{panel} \cdot \sin 2\alpha$$

با اعمال ضریب کاهش به سبب وجود بازشو، محاسبه ی ظرفیت ورق فولادی درونی از رابطه ی زیر صورت خواهد گرفت.

$$V'_{yp} = \left(1 - 0.7 \frac{D}{S_{dia}} \right) V_{yp} \quad (3)$$

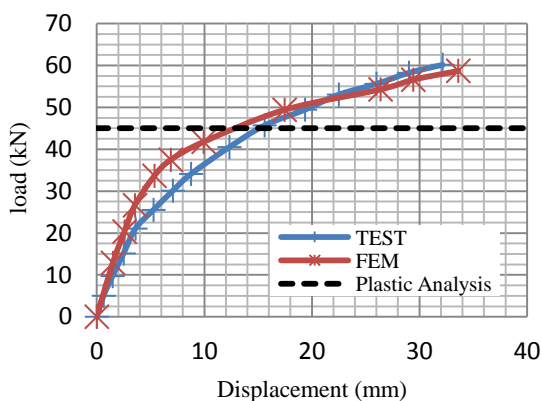
که در این روابط F_{yp} تنش تسلیم ورق درونی، t ضخامت ورق، W_{panel} عرض خالص پانل، α زاویه ی میدان کششی که در اینجا معادل 45° فرض می شود، D قطر بازشو و S_{dia} فاصله ی مرکز به مرکز دو بازشو از یکدیگر می باشند. در نهایت ظرفیت کل پانل از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه خواهد بود.

$$V_{total} = V_{yf} + V'_{yp} \quad (4)$$

که با در نظر گرفتن مقادیر $\beta=3/4$ ، $\lambda=0.76$ ، $h_{hinge}=215$ mm و سایر مقادیر مشخص شده در بخش‌های پیشین، ظرفیت کل سیستم معادل با 45 kN محاسبه می‌گردد.

۶- مقایسه ی نتایج

برای مقایسه ی نتایج بدست آمده از آزمایش، تحلیل المان محدود و آنالیز پلاستیک، در شکل (۱۳) مقایسه ی پوش منحنی هیستریزس در ناحیه ی جابجایی‌های مثبت برای نتایج آزمایشگاهی و المان محدود نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل می توان ملاحظه نمود تحلیل المان محدود با دقت بسیار مناسبی پوش منحنی هیستریزس سیستم را پیش‌بینی می نماید، البته لازم به ذکر است که پیش‌بینی ناحیه Pinching در منحنی هیستریزس با دقت کمتری نسبت به پوش منحنی هیستریزس آزمایشگاهی و المان محدود می توان بدین صورت گرفته است که با مقایسه ی این ناحیه در دو منحنی هیستریزس آزمایشگاهی و المان محدود می توان بدین موضوع پی برد. در این تصویر همچنین ماکزیمم ظرفیت آنالیز پلاستیک نیز با خطوط منقطع نشان داده شده است.



شکل ۱۳- مقایسه ی پوش منحنی های هیستریزس آزمایشگاهی و عددی.

جدول ۴- مقایسه ی مطالعات پارامتریک دو نمونه ی آزمایشگاهی و عددی.

نام نمونه	سختی الاستیک K_c (kN/mm)	ماکزیمم مقاومت برشی V_{max} (kN)	شکل پذیری معادل ماکزیمم جابجایی $\mu = \Delta_{max}/\Delta_y$
SPSW _{TEST}	5.9	60.4	5.75
SPSW _{FEM}	7.4	58.7	6.81
Difference	+25 %	-2.8 %	+18.4 %

در جدول (۴) نیز می‌توان مقایسه ی مطالعات پارامتریک مربوط نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری و درصد اختلاف نتایج المان محدود نسبت به نتایج آزمایشگاهی را ملاحظه نمود که حاکی از تطابق مناسب مقادیر پارامتر های مورد مطالعه در دو حالت است.

Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta.

[5] Timler P.A, Kulak G.L. 1983. Experimental study of steel plate shear walls. Structural Engineering Report No.114. Dept. of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta.

[6] Roberts T.M, Sabouri-Ghomi S. 1991. Hysteresis characteristics of unstiffened plate shear panels. Thin-Walled Structures, 12, 145-162.

[7] Roberts T.M, Sabouri-Ghomi S. 1992. Hysteresis characteristics of unstiffened perforated steel plate shear wall. Thin-walled Structures, 14, 139-151.

[8] Kharrazi M, Ventura C, Prion H, Sabouri-Ghomi S. 2004. Bending and shear analysis and design of ductile steel plate walls. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, paper No.77.

[9] Berman J.W, Bruneau M. 2003. Plastic analysis and design of steel plate shear walls. Journal of Structural Engineering, ASCE, 129(11), 1148-1156.

[10] Vian D, Bruneau M, Tsai K.C, Lin Y.-C. 2009. Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams, I: Experimental investigation. ASCE, 211-220.

[11] AISC, Steel Design Guide 20. Steel Plate Shear Walls. American Institute of Steel Construction. 2007.

[12] Krawinkler H. 2009. Loading histories for cyclic test in support of performance assessment of structural components. 3rd International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, San Francisco.

[13] Behbahanifard M.R, Grondin G.Y, Elwi A.E. 2003. Experimental and numerical investigation of steel plate shear wall. Structural Engineering Reports No.254, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.

[14] Hibbit, Karlsson, Sorenson. ABAQUS/Standard user's manual. Version 6.9. HKS Inc. 2009.

[15] خلخالی ابوالفضل. تحلیل اجزای محدود با کمک

ABAQUS. انتشارات موسسه ی فرهنگی هنری دیباگران

تهران. چاپ اول، ۱۳۸۶.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد دیوار برشی مجوف فولادی تحت بار چرخه ای بر مبنای سه روش مطالعه ی آزمایشگاهی، تحلیل المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS و آنالیز پلاستیک سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاکی از تطابق بسیار مناسب منحنی هیستریزس استخراج شده از بارگذاری نمونه ی آزمایشگاهی و تحلیل المان محدود سیستم می باشند. همچنین مقادیر بدست آمده از مطالعات پارامتریک بر روی شکل پذیر، ماکزیمم ظرفیت برشی و سختی الاستیک سازه، دارای همخوانی نسبتاً عادلانه ای در دو روش مذکور می باشند. در نهایت ماکزیمم ظرفیت باربری سیستم با استفاده از روش تحلیل پلاستیک محاسبه شده که مقایسه ی ظرفیت بدست آمده با منحنی های هیستریزس نشان دهنده ی محافظه کارانه بودن روابط این آنالیز یا ضرایب کاهش اعمال شده به آن ها می باشد.

۸- تشکر و قدردانی

نگارنده ی مقاله بر خود وظیفه می داند از یاری و مساعدت تمام کسانی که در انجام این پژوهش سهیم بوده اند تشکر و قدردانی نماید، از جناب آقای مهندس جعفر عظیم زاده کارشناس محترم آزمایشگاه سازه ی دانشگاه ارومیه و تشکر ویژه از جناب آقای سعید خوشخرام که بدون یاری این بزرگوار انجام چنین پژوهشی بسیار دشوار می نمود.

۹- مراجع

[1] CSA, CAN/CSA-S16-01. Limit States Design of Steel Structures. Canadian Standards Association, Toronto (ON). Approved June 2003.

[2] AISC, ANSI/AISC 341-05. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago (IL). 2005.

[۳] علی صاحب جمع، پایان نامه کارشناسی ارشد، ارزیابی عددی و آزمایشگاهی دیوار برشی مجوف فولادی- پلیمری تحت بار چرخه- ای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، خرداد ۱۳۹۱.

[4] Thorburn L.J, Kulak G.I, Montgomery C.J. 1983. Analysis of steel plate shear walls. Structural Engineering Report No.107. Dept. of Civil

Numerical and Experimental Investigation of Multi-Perforated Steel Shear Wall Under Cyclic Loading

H. Showkati

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

A. Sahebjam

Graduate Student, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

ABSTRACT

Steel Shear Walls are a lateral resistance system in frames that has attracted many researchers' attention owing to advantages such as appropriate ductility, high stiffness, significant shear strength and energy absorption. Since the early 1980s, when key researches on unstiffened Steel Shear Wall (SPSW) were under considerations, researchers were continuously trying to improve the performance and efficiency of this system. One of these efforts was the creation of the opening in infill plate. Studies on perforated-SPSW began in the early 1990s by the experiments of Sabouri and Roberts. Recently a perforated-SPSW which having some circular openings was presented and examined by the researchers of Buffalo University. In addition to a system for passing the utility through the infill plate, this kind of opening is useful when a required thinner plate is not available, so it can be possible to substitute a proper multi-perforated Steel Shear Wall with a solid plate. This paper presents results of a research on the effect of multi openings on the performance of SPSW. Beside the experimental investigation a numerical study was conducted using the well-known ABAQUS finite element program was conducted. Eventually the results of numerical and experimental studies were compared with the Plastic analysis' conclusion. Results show a good agreement between experimental and numerical hysteresis and envelop curves. Furthermore, the Plastic analysis reduction factors seem to be conservative.

Keywords: Perforated steel shear wall, Multi circular openings, Plastic analysis, Finite element method, ABAQUS software