

# تأثیر ابعاد بازشوی دایره‌ای شکل بر سختی اولیه و مقاومت دیوارهای برشی فولادی<sup>1</sup> (SPW<sub>s</sub>)

هادی ولیزاده کارشناس ارشد مهندسی عمران - سازه  
محمد رضا شیدایی استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه ارومیه  
حسین شوکتی دانشیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

چکیده: در سالهای اخیر استفاده از دیوارهای برشی فولادی به علت عملکرد مناسب آنها در برابر بارهای جانبی باد و زلزله در حال گسترش بوده است، همچنین استفاده از این سیستم ها برای مقاوم سازی سازه‌های فولادی و بتنی موجود مورد توجه قرار گرفته است. در مواردی وجود بازشو به دلایل معماری و یا عبور سیستم های تاسیساتی در دیوار اجتناب ناپذیر می‌باشد. تعبیه بازشو موجب کاهش ظرفیت دیوارهای برشی فولادی شده و همچنین بطور شدیدی توزیع تنش داخل صفحه را تغییر می‌دهد. در این مقاله با انجام مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی به بررسی تاثیر ابعاد بازشوی دایره ای شکل بر رفتار دیوارهای برشی فولادی پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا چهار نمونه آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۶ ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته است. برای بررسی تاثیر ابعاد بازشو، نسبت های بازشو (نسبت قطر بازشو به ارتفاع پانل) مختلفی برابر با ۰، ۰/۲۰، ۰/۳۵ و ۰/۵۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه نمونه‌هایی مشابه، اما با مقیاس واقعی به روش اجزای محدود مدل‌سازی گردیده، با در نظر گرفتن مشخصه های رفتار غیرخطی هندسی و مصالح و با انجام تحلیل غیرخطی بار افزون، رفتار این نمونه‌ها مطالعه شده است. بر اساس نتایج حاصله ضرایب کاهش مناسبی برای تخمین تاثیر ابعاد بازشو بر مقادیر سختی اولیه و مقاومت دیوارهای برشی فولادی پیشنهاد شده است که این ضرایب در قیاس با ضرایب پیشنهادی قبلی از انطباق بهتری با نتایج تجربی برخوردار می‌باشد.

کلید واژه‌ها: دیوار برشی فولادی، بازشو، تحلیل غیرخطی، سختی اولیه، مقاومت نهائی.

## EFFECTS OF CIRCULAR OPENING DIMENSIONS ON INITIAL STIFFNESS AND STRENGTH OF STEEL PLATE SHEAR WALLS

H.Valizadeh M.S. in Structural Engineering

M.R. Sheidaii Assistant Professor, Civil Engineering Dept., Urmia University

H. Showkati Associate Professor, Civil Engineering Dept., Urmia University

**ABSTRACT:** Utilization of steel shear walls is developing in the recent years because of their proper function against the lateral loading of wind and earthquake. Also usage of this system has been taken into consideration for strengthening purposes of available steel and concrete structures. Sometimes openings are unavoidable in the steel shear walls because of architectural requirements or passage of installation systems. Existence of the opening causes a reduction in the system capacity and changes the distribution of plane stresses violently. In this article the dimensional effects of circular openings have been studied experimentally and analytically. For this purpose four samples have been made in 1:6 scale and tested through cyclic loading. In order to investigate the effect of opening size, different proportions of opening ratios equal to 0, 0.20, 0.35 and 0.50 have been considered as the variable. Afterward similar full scale steel shear walls have been modeled analytically using finite element method and analyzed by nonlinear pushover method, taking into account both geometrical and material nonlinearities. Based on the obtained results, proper reduction factors are proposed for determining of effects of opening dimension on the initial stiffness and strength of the steel shear walls, the proposed reduction factors shows better agreement with reality than the previously proposed ones.

**Key words:** steel shear walls, opening, nonlinear analysis, initial stiffness, ultimate strength.

<sup>1</sup> Steel Plate Walls or Steel Plate Shear Walls (SPSW<sub>s</sub>)

ویان و برونو در سال ۲۰۰۴ [۵] در مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه Buffalo، طی یک تحقیق آزمایشگاهی، نمونه‌های دیوار برشی فولادی یک طبقه بازشودار و بدون بازشو را تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی قرار دادند و از نتایج آزمایش استنباط نمودند که دیوارهای برشی فولادی با مقاومت تسلیم کم، می‌توانند گزینه عملی مناسبی برای مقاومت در برابر بارهای جانبی دینامیکی ناشی از زلزله باشند. مقاومت تسلیم کم و ضخامت پانل کمتر منجر به کاهش مقاومت و شروع سریع جذب انرژی توسط پانل می‌شود. همچنین نمونه‌های دارای بازشو کاهش سختی و مقاومت از خود نشان داده که برای حالتی که فولاد با مقاومت تسلیم کم به آسانی قابل دسترس نمی‌باشد مفید خواهد بود.

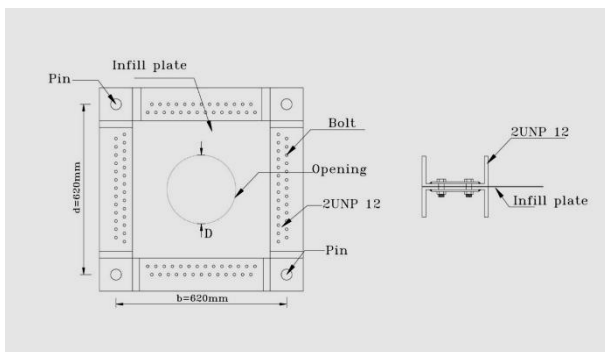
عباسی موسوی [۶] در دانشگاه صنعتی سهند با انجام یک سری مطالعات تئوریک توسط نرم افزار اجزاء محدود ANSYS بر روی دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو با شکلهای مختلف یکسری ضرایب کاهش برای اصلاح سختی اولیه و مقاومت دیوارها در اثر وجود بازشو ارائه نمود. ضرایب مزبور از خطای کمتری نسبت به ضرایب پیشنهادی قبلی برخوردار می‌باشند. خرازی و همکاران [۷] در جهت بهبود نتایج روش PFI ارائه شده توسط صبوری و روبرتز، یک مدل تحلیلی که مدل اندرکنش ورق- قاب اصلاح شده (M-PFI) نامیده شده، برای آنالیز برشی و خمشی دیوارهای با ورق فولادی شکل پذیر پیشنهاد نمودند. این مدل رفتار دیوارهای برشی فولادی را به سه بخش تقسیم می‌کرد: کمانش الاستیک، پس کمانش و تسلیم. مدل تحلیلی مزبور با نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی داشته است.

تحقیقات انجام شده در مورد تاثیر ابعاد، موقعیت و شکل بازشوها بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی نشان می‌دهند که سختی اولیه و مقاومت دیوارهای برشی فولادی در اثر ایجاد بازشو کاهش می‌یابند. البته همانطور که قبلاً اشاره شد طبق پیشنهاد صبوری و روبرتز کاهش این پارامترها را می‌توان با اعمال ضریب کاهش تجربی (1-D/d) بدست آورد، اما نتایج حاصل از اعمال این ضریب بخصوص در بازشوهای بزرگ بسیار محافظه کارانه بوده است. با دقت در این رابطه ملاحظه می‌شود که در ضریب پیشنهادی فوق فقط ارتفاع قاب مدنظر قرار گرفته و پارامتر طول دهانه قاب که در طراحی این سیستم ها عامل مهمی محسوب می‌شود مورد توجه نبوده است. در این راستا در تحقیق حاضر تاثیر ابعاد بازشو دایره‌ای شکل واقع در مرکز پانل، بر سختی اولیه و مقاومت دیوارهای برشی فولادی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور چهار نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با مقیاس ۱:۶ دارای بازشو دایره‌ای با ابعاد مختلف بازشو، ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته است.

از اوایل دهه ۷۰ میلادی، شکل های مختلف دیوارهای برشی فولادی (SPW<sub>s</sub>) به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی زلزله و باد در انواع ساختمانها، و بویژه در ساختمانهای بلند مورد استفاده قرار گرفته است. بسیاری اوقات وجود بازشو در این دیوارها به دلایل معماری و یا عبور تاسیسات و نیز در مواردی به دلایل سازه ای مانند کنترل سختی و شکل پذیری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. با توجه به مزایای فنی و اقتصادی دیوارهای برشی فولادی، وجود اطلاعات دقیق در زمینه اثرات بازشو بر رفتار دیوارهای برشی فولادی برای طراحان این نوع سازه‌ها بسیار با اهمیت بوده و از اینرو انجام تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی در این زمینه همواره مورد توجه محققین بوده است. پارامترهای متغیر در دیوارهای برشی فولادی ارتفاع پانل d، عرض پانل b، قطر بازشو D، ضخامت ورق پرکننده t، نسبت بازشو D/d و ضریب لاغری b/t می‌باشند.

در اواخر دهه ۸۰ میلادی صبوری و روبرتز [۱] مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی در رابطه با رفتار دیوارهای برشی فولادی انجام دادند. تحقیقات آنان منجر به ابداع روشی به نام روش اندرکنش ورق و قاب (PFI) برای آنالیز و طراحی این سیستم‌ها گردید. این روش برای ورقهای با سخت کننده و دارای بازشو نیز قابل استفاده می‌باشد. صبوری و روبرتز با بررسی نتایج آزمایشگاهی ۱۶ نمونه پانل برشی فولادی با بازشو و بدون بازشو، پیشنهاد نمودند [۲] سختی اولیه و مقاومت پانل بازشودار با اعمال ضریب کاهش (1-D/d) در مقادیر سختی اولیه و مقاومت پانل مشابه بدون بازشو، به طور محافظه کارانه بدست می‌آید که در آن D قطر بازشو و d ارتفاع پانل برشی می‌باشد. صبوری در تحقیقات بعدی خود [۳]، ضریب کاهش اصلاح شده (1-A/A<sub>0</sub>) را جایگزین ضریب (1-D/d) نمود که در آن، A<sub>0</sub> مساحت صفحه فولادی و A مساحت بازشو می‌باشد.

دیلمی و دفتری در سال ۲۰۰۰ با انجام مطالعاتی تحلیلی [۴]، بیش از ۵۰ مدل دیوار برشی فولادی با بازشو مستطیلی در مرکز پانل را مدلسازی کرده و به روش اجزای محدود تحلیل غیرخطی نمودند و در طی این تحقیق اثر برخی پارامترهای هندسی مهم نظیر ضخامت صفحه، نسبت ارتفاع به عرض صفحه و درصد بازشو را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در حالت درصد بازشو کوچکتر، کاهش ظرفیت برشی بیشتر به ضخامت صفحه وابستگی دارد، نسبت ارتفاع به عرض بهینه بازشو، تابعی از ضخامت صفحه بوده و وابسته به درصد بازشو نمی‌باشد و در کلیه حالتها برای بدست آوردن ظرفیت برشی بهینه، نسبت ارتفاع به عرض بازشو باید بزرگتر از واحد باشد.



شکل ۱: مشخصات و ابعاد قاب و جزئیات اتصال ورق به اعضای مرزی

۰/۳۷ میلیمتر در نظر گرفته شد. برای بررسی تاثیر ابعاد بازشو بر پارامترهای لرزه‌ای دیوار برشی فولادی، بازشوه‌های دایره‌ای با سه قطر مختلف ۱۰۰، ۱۷۵ و ۲۵۰ میلی متر در مرکز پانل در نظر گرفته شد. برای تعیین مشخصات مصالح ورق فولادی نمونه ورق طبق استاندارد (ASTM, A370-97a, 2001) تهیه شده [۹] و تحت آزمایش کشش قرار گرفت و بر اساس نتایج آزمایش مشخصات مصالح ورق فولادی به شرح قید شده در جدول ۲ بدست آمد.

### ۳-۲- بارگذاری و شرایط مرزی

پس از تنظیم ورق فولادی پرکننده در داخل قاب و استقرار مجموعه بر روی کف صلب آزمایشگاه، اعمال نیروی یک جک هیدرولیکی به سیستم دیوار برشی فولادی از طریق یک تکیه‌گاه مفصلی فوقانی مطابق شکل ۲ صورت گرفت. برای جمع آوری اطلاعات مربوط به مقادیر کرنش و تغییرمکان نمونه هاز سه عدد تغییر مکان سنج<sup>۲</sup> برای اندازه گیری تغییرمکان رفت و برگشتی و کنترل نشست تکیه گاهی استفاده شد، همچنین برای محاسبه مقادیر کرنش در طی بارگذاری از تعدادی کرنش سنج<sup>۳</sup> در راستای قطرهای اصلی و فرعی ورق در دو جهت رفت و برگشت استفاده گردید [۸].

با اتصال ابزارهای اندازه گیری کرنش و تغییرمکان و انجام تنظیمات دستگاه دیتالاگر<sup>۴</sup>، نمونه دیوار فولادی آماده بارگذاری شد (شکل ۲). برای ایجاد مهار جانبی که در سازه های واقعی در تراز طبقات توسط کف ها ایجاد می گردد، در آزمایشگاه از دو نیمرخ IPE استفاده شده است که در تراز تیر بالا در دو طرف پانل ها قرار گرفته و تکیه‌گاه‌های غلطکی متصل به نمونه بر روی بال آنها حرکت می‌نمایند.

سپس برای مطالعه تاثیر طول دهانه در رفتار دیوارهای دارای بازشو و توسعه نتایج، یکسری نمونه های تحلیلی با مقیاس واقعی در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدلسازی و به روش تحلیل غیرخطی بارافزون مورد تحلیل قرار گرفته اند. بر اساس نتایج حاصله سعی در بدست آوردن ضرایب کاهش مناسبی برای تعیین تاثیر ابعاد بازشو در تغییر مقادیر سختی اولیه و مقاومت دیوارهای برشی فولادی شده است.

### ۲- مطالعه آزمایشگاهی

برای بررسی تاثیر ابعاد بازشو بر پارامترهای سختی و مقاومت دیوارهای برشی فولادی، چهار نمونه آزمایشگاهی آماده شده و در آزمایشگاه تحقیقاتی سازه دانشکده فنی دانشگاه ارومیه به روال توضیح داده شده در ذیل، تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است [۸].

### ۲-۱- دستگاه آزمایشگاه

برای حذف پیچیدگی های ناشی از اندرکنش قاب و ورق فولادی در باربری جانبی سیستم دیوار برشی فولادی، یک قاب مفصلی با ضریب اطمینان بالا با جزئیات نشان داده شده در شکل ۱ طراحی شده و مطابق شکل ۲ بر روی پی صلب آزمایشگاه نصب گردید. ابعاد مرکز تا مرکز تیرها و ستونهای قاب مزبور برابر با ۶۲۰ میلیمتر بوده و برای تیرها و ستون ها مقاطعی از نوع 2UNP12 در نظر گرفته شد. برای ایجاد اتصال مفصلی تیر و ستونها از یک پیچ A490 به قطر ۲۴ میلی‌متر در هر گوشه استفاده شد. همچنین برای اتصال ورق فولادی داخل قاب دو ردیف پیچ A490 به قطر ۱۰ میلی‌متر بکار برده شد، در تعیین تعداد پیچ ها از عامل اصطکاک صرف نظر شده و تدابیر لازم برای جلوگیری از لهیدگی و برش ورق پرکننده فولادی در نظر گرفته شد. برای اعمال بارگذاری چرخه ای جهت بررسی رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها، یک سیستم جک دو طرفه با ظرفیت ایجاد نیروی فشاری و کششی ۱۵ تن طراحی و ساخته شد (شکل ۲).

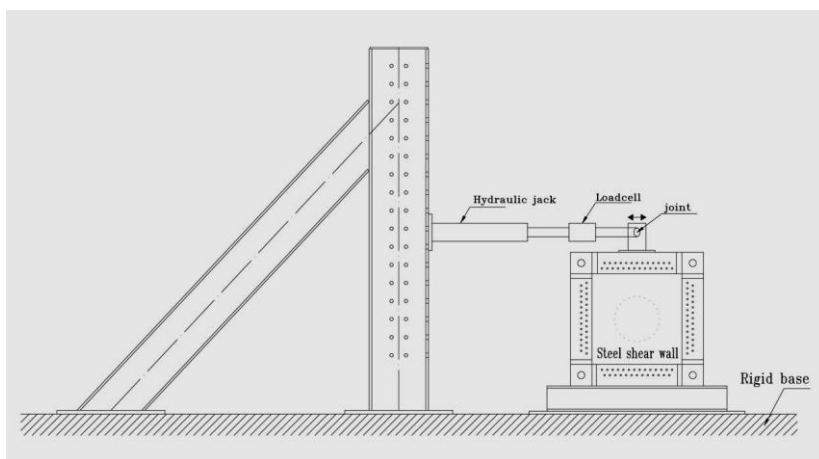
### ۲-۲- نمونه های آزمایشگاهی

چهار نمونه آزمایشگاهی یک طبقه مطابق جدول ۱ در مقیاس ۱:۶ برای بررسی تجربی رفتار دیوارهای برشی فولادی آماده شد. پانل‌های فولادی همگی دارای ابعاد یکسان برابر ۵۰۰ میلی متر بوده و اتصال اعضای مرزی به یکدیگر مفصلی در نظر گرفته شد تا از اثر قاب در تحمل نیروی جانبی و پیچیدگی های ناشی از آن صرف نظر شود. ضخامت ورق فولادی

<sup>2</sup> Transducer

<sup>3</sup> Strain Gauge

<sup>4</sup> Data Logger



شکل ۲: مجموعه دستگاه آزمایشگاه

بازشو توسعه میدان کشش و موجهای کمانشی با ایجاد یک موج در قطر اصلی آغاز شده و با افزایش تغییرمکان جانبی نمونه، موجهای فرعی همسو با موج اصلی ایجاد گردیده است. در نمونه بدون بازشو SPW1 در اندیس خیز جانبی ۳ درصد، تعداد ۷ موج کامل با زاویه ۴۵ درجه مشاهده شده است (شکل ۴-الف). نمونه بدون بازشو با توجه به مقاومت بالا و تسلیم ورق فولادی، دارای مد شکست لهیدگی و برش در محل اتصالات پیچی ورق به اعضای مرزی بوده است. همچنین در نمونه‌های دارای بازشو SPW2 و SPW3 بعلت تمرکز تنش در اطراف بازشو همراه بوده است. در شکل ۵ دیاگرام نیرو-تغییرمکان چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. دو عامل تعیین کننده در سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی، سختی و مقاومت می‌باشند، که به کمک دیاگرام نیرو و-تغییرمکان جانبی سازه تعیین می‌گردند [۳]. در دیاگرام مذکور شیب ناحیه خطی، سختی اولیه<sup>۶</sup> و حداکثر مقدار نیروی قابل تحمل، مقاومت نهایی<sup>۷</sup> سیستم مقاوم جانبی را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات نمونه های آزمایشگاهی (mm)

نمونه	ضخامت ورق	ضریب لاغری	قطر بازشو	نسبت بازشو
SPW1	۰/۳۷	۱۳۵۱	۰	۰
SPW2	۰/۳۷	۱۳۵۱	۱۰۰	۰/۲۰
SPW3	۰/۳۷	۱۳۵۱	۱۷۵	۰/۳۵
SPW4	۰/۳۷	۱۳۵۱	۲۵۰	۰/۵۰

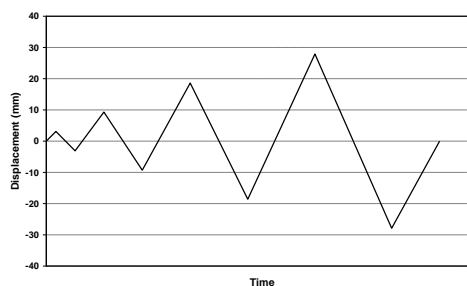
جدول ۲: مشخصات مصالح تعیین شده توسط آزمایش کشش

نمونه	ضخامت (mm)	تنش تسلیم (Mpa)	تنش نهایی (Mpa)
Test 1	۰/۳۷	۲۸۸/۸	۳۷۷/۹
Test 2	۰/۳۷	۳۰۹/۲	۳۷۱/۵

<sup>6</sup> Initial Stiffness

<sup>7</sup> Ultimate Strength

برای بررسی رفتار لرزه ای نمونه هایک تاریخچه بارگذاری رفت و برگشتی در ۴ سیکل تا اندیس خیز جانبی ۴/۵ درصد تعریف شده است که سیکل اول با اندیس خیز جانبی ۰/۵ درصد در محدوده الاستیک و برای در نظرگرفتن شرایط آماده‌سازی<sup>۵</sup> و سه سیکل بعدی برای بررسی رفتار سیستم در محدوده غیرالاستیک در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از ایجاد حالت دینامیکی، بارگذاری نمونه ها بصورت آهسته انجام شده است (شکل ۳).

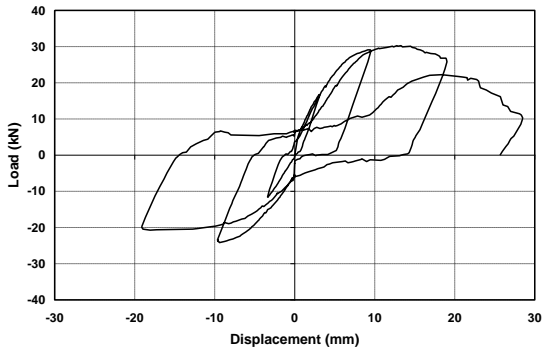


شکل ۳: تاریخچه زمانی تغییرمکان اعمال شده

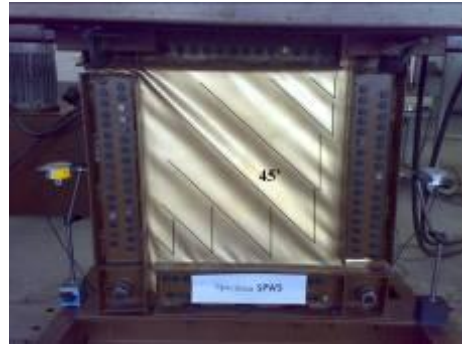
## ۲-۴- بحث و بررسی نتایج آزمایشگاهی

چهار نمونه دیوار برشی فولادی با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ مطابق توضیحات فوق، در آزمایشگاه تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار داده شده، رفتار هر یک از نمونه ها استخراج و مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴ تغییرشکل و توسعه میدان کشش در نمونه های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. ملاحظه شد با تعبیه بازشو در پانل از ایجاد ضربه و صدا در هنگام کمانش ورق کاسته شده، بطوری که در نمونه دارای بزرگترین نسبت بازشو کاملا حذف می‌گردد. ایجاد صدای شدید در نمونه های واقعی دیوارهای برشی فولادی در هنگام زلزله، موجب رعب و وحشت ساکنین خواهد شد [۵]. با توجه به مربع شکل بودن نمونه‌های آزمایشگاهی، زاویه میدان کشش ایجاد شده در ورق فولادی ۴۵ درجه بوده است. در نمونه بدون

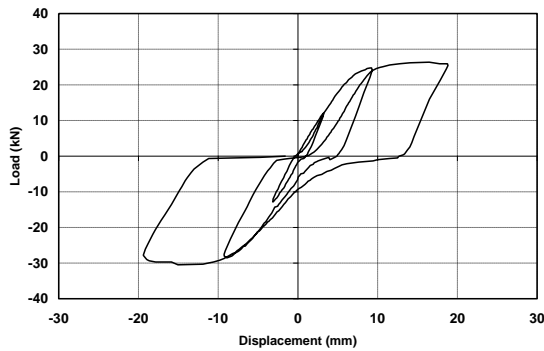
<sup>5</sup> Conditioning



۵- الف) نمونه SPW1



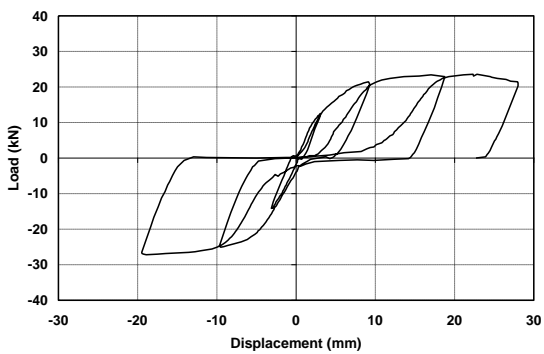
۴- الف) نمونه SPW1



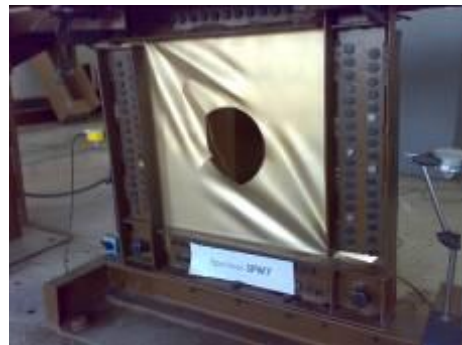
۵- ب) نمونه SPW2



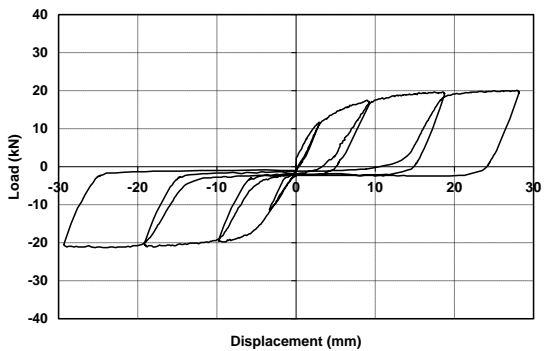
۴- ب) نمونه SPW2



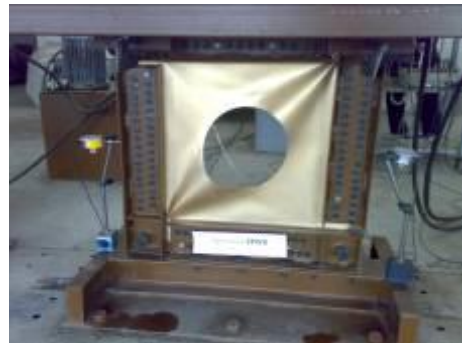
۵- ج) نمونه SPW3



۴- ج) نمونه SPW3



۵- د) نمونه SPW4



۴- د) نمونه SPW4

شکل ۵: دیاگرام نیرو- تغییر مکان چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی

شکل ۴: نمایش تغییر شکل و توسعه میدان کشش در نمونه‌های آزمایشگاهی

لاغری دیوار برای هر سه سری نمونه ها ثابت و برابر ۱۸۱۶ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: مشخصات هندسی نمونه های سری SPWI

نمونه	ابعاد		نسبت بازشو
	ارتفاع	دهانه	
SPWI-CR1	۳۰۰۰	۲۲۷۰	۱/۲۵
SPWI-CR2	۳۰۰۰	۲۲۷۰	۱/۲۵
SPWI-CR3	۳۰۰۰	۲۲۷۰	۱/۲۵
SPWI-CR4	۳۰۰۰	۲۲۷۰	۱/۲۵
SPWI-CR5	۳۰۰۰	۲۲۷۰	۱/۲۵
SPWI-CR6	۳۰۰۰	۲۲۷۰	۱/۲۵

جدول ۵: مشخصات هندسی نمونه های سری SPW2

نمونه	ابعاد		نسبت بازشو
	ارتفاع	دهانه	
SPW2-CR1	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱/۶۵
SPW2-CR2	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱/۶۵
SPW2-CR3	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱/۶۵
SPW2-CR4	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱/۶۵
SPW2-CR5	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱/۶۵
SPW2-CR6	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱/۶۵

جدول ۶: مشخصات هندسی نمونه های سری SPW3

نمونه	ابعاد		نسبت بازشو
	ارتفاع	دهانه	
SPW3-CR1	۳۰۰۰	۴۵۴۰	۲/۵
SPW3-CR2	۳۰۰۰	۴۵۴۰	۲/۵
SPW3-CR3	۳۰۰۰	۴۵۴۰	۲/۵
SPW3-CR4	۳۰۰۰	۴۵۴۰	۲/۵
SPW3-CR5	۳۰۰۰	۴۵۴۰	۲/۵
SPW3-CR6	۳۰۰۰	۴۵۴۰	۲/۵

جدول ۷: مشخصات اعضای مرزی پانل ها

مقطع ستون	مقطع تیر		نمونه
	پایین	بالا	
W14X48	W14X34	W14X34	SPW1
W14X82	W14X74	W14X74	SPW2
W14X99	W14X82	W14X99	SPW3

### ۳-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

تمامی مدلها با اعمال بار جانبی در گره های اتصالات تیر به ستون بر اساس ضوابط آیین نامه FEMA356 بارگذاری شدند [۱۰]. با توجه به اینکه تغییر مکان هدف محاسبه شده بر اساس ضوابط آیین نامه فوق رفتار کامل نمونه ها را توصیف

در جدول ۳ مقادیر سختی اولیه و مقاومت نمونه های آزمایشگاهی ذکر شده است. با توجه به مد های خرابی مختلف نمونه ها، مقادیر مقاومت نظیر اندیس خیز جانبی ۳ درصد برای تمامی نمونه ها مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین مقادیر سختی اولیه نمونه ها با توجه به وجود نوسانات در نمودار با حذف ناحیه آماده سازی بصورت تقریبی تخمین زده شده و در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مقادیر سختی اولیه و مقاومت نمونه های آزمایشگاهی در اندیس خیز جانبی ۳ درصد

نمونه	SPW4	SPW3	SPW2	SPW1
مقاومت (kN)	۱۹/۵	۲۲/۶	۲۵/۹	۲۶/۶
سختی اولیه (kN/mm)	۴/۹	۵/۱	۵/۶	۷/۱

### ۳- مطالعه تحلیلی

با توجه به محدودیت های کارهای آزمایشگاهی از نظر هزینه و زمان، در ادامه برای توسعه نتایج آزمایشگاهی و بررسی پارامترهای ابعاد پانل و قطر بازشو تعدادی نمونه تحلیلی با مقیاس واقعی به روش اجزای محدود مدل سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱- مشخصات مصالح

تمام مصالح بکار رفته در مدلها به صورت ایزوتروپیک با رفتار غیرالاستیک سخت شونده دو خطی در نظر گرفته شده اند. رفتار در کشش و فشار به صورت یکسان و سطح تسلیم فون- میزس به عنوان ضابطه تسلیم پذیرفته شده است. تنش تسلیم ورق فولادی و اعضای مرزی به ترتیب برابر با ۲۵۰ و ۳۵۰ مگاپاسکال و کرنش نهایی آنها به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶۲۵ و ۰/۰۰۸۷۵ در نظر گرفته شده است. مقدار مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال، مدول مماسی ۲ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۳ فرض شده است.

### ۳-۲- مشخصات نمونه ها

برای بررسی همزمان تاثیر ابعاد بازشو و ابعاد قاب بر پارامترهای سختی اولیه و مقاومت دیوارهای برشی فولادی سه سری نمونه در مقیاس واقعی مطابق جداول ۴ الی ۶ در نظر گرفته شده است.

همچنین جدول ۷ مشخصات اعضای مرزی پانلها را نشان می دهد. عرض و ارتفاع پانل ها به ترتیب فواصل مرکز به مرکز ستونها و تیرها واقع در اطراف پانل می باشد. شکل بازشو بصورت دایره ای در مرکز پانل و با نسبتهای بازشو  $D/d$  برابر ۰ ، ۰/۱ ، ۰/۲ ، ۰/۳ ، ۰/۴ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است. ضریب

نمی‌کند و با استناد به بند ۵-۷-۳-۳ آیین نامه FEMA جهت تحلیل استاتیکی غیرخطی دیوارهای برشی فولادی و بدست آوردن نمودار بار- تغییرمکان تا حد شکست، بارهای جانبی تا حدی فراتر از تغییرمکان هدف اعمال گردیده اند بطوریکه سبب ایجاد مفصل پلاستیک یا کمانش در ستون گردند. اتصال ورق به اعضای مرزی به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن اتصال ستون به کف ستون، جابجایی گره‌های پایین هر دو ستون در تمام جهات مقید شده اند. برای مدل کردن تغییرشکل خارج از صفحه مقید شده توسط دال سقف در ساختمانها، از تغییرشکل خارج از صفحه جان تیر فوقانی با بستن درجات آزادی در این جهت جلوگیری شده است.

### ۳-۴- انتخاب المان

مدل عددی تمام نمونه ها با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS که از قابلیت‌های بالایی در مدلسازی و تحلیل مسائل غیرخطی برخوردار است انجام گرفته است. یک طرح مناسب از دیوار برشی فولادی طراحی شده است که در آن ورق نسبت به قاب انرژی بیشتری تلف کند از اینرو برای استفاده مناسب از ورق، لازم است قبل از ایجاد کمانش یا تسلیم در قاب، ورق تسلیم گردد و اعضای مرزی قادر به تحمل تنش‌های ناشی از میدان کشش قطری ایجاد شده در ورق باشند [۷ و ۱۱]. کنترل موارد فوق با استفاده از معادلات مربوطه در روش M-PFI [۱۱] برای تمام مدلها انجام گردیده است. هر چند ضوابط تشریح شده در روش M-PFI سبب می‌شود تیرها و ستونها قوی انتخاب شده و خطر کمانش موضعی اعضای مرزی از بین برود با این وجود جهت پیش بینی دقیق رفتار مدلها، ورق و نیز اعضای مرزی در تمام مدلها با المان پوسته S4R که یک المان چهارگره‌ای دو انحنایی با انتگرال گیری کاهش یافته از دسته المانهای نرم افزار ABAQUS است مدلسازی شده‌اند. هر گره از المان مزبور ۶ درجه آزادی شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی دارد [۱۲].

### ۳-۵- روش تحلیل

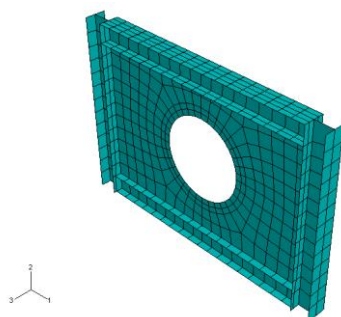
تغییرشکل ناگهانی خارج از صفحه ورق فولادی به علت توسعه میدان کشش سبب مشکلات همگرایی در آنالیز سیستم‌های SPW می‌گردد. با توجه به عملکرد ضعیف روش اجزای محدود ضمنی<sup>۸</sup>، روش صریح<sup>۹</sup> دینامیکی برای آنالیز مدل‌های دیوار برشی فولادی انتخاب گردیده است [۱۲]. پیش‌بینی رفتار مدلها بر اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی

بارافزون<sup>۱۰</sup> شامل عوامل غیرخطی هندسی و مصالح صورت گرفته است. معیار سنجش تحلیل شبه استاتیکی کنترل انرژی جنبشی سیستم بوده است که باید در طول تحلیل مقدار آن ناچیز باشد. بر خلاف روشهای ضمنی در ABAQUS/Standard که در آنها برای بدست آوردن پاسخ قابل قبول لازم است شبکه بندی به طور کاملاً مناسبی صورت گیرد، اندازه شبکه در روش صریح را می‌توان بزرگ در نظر گرفت. بر اساس مطالعات انجام شده، اندازه شبکه ۲۵ سانتیمتر برای پانلهای رفتار مدلها را با دقت کافی پیش بینی کرده است. شبکه بندی انتخابی برای نمونه ها در نرم افزار ABAQUS در شکل ۶ نشان داده شده است.

### ۳-۶- اعتبار سنجی مدلسازی تحلیلی بر اساس نتایج

#### آزمایشگاهی

جهت اعتبار سنجی مدلسازی و تحلیل انجام شده در این تحقیق، نمونه آزمایشگاهی SPW4 که در بخش قبل رفتار تجربی آن تحت بارگذاری رفت و برگشتی توضیح داده شد مجدداً بکمک نرم افزار ABAQUS مدلسازی و تحلیل شده است [۸]. نمودار بار- تغییرمکان جانبی حاصل از تحلیل بارافزون در ABAQUS و رفتار رفت و برگشتی بدست آمده در آزمایشگاه، همزمان در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تحلیل عددی انجام شده توسط نرم‌افزار، پوش رفتار هیستریزس نمونه را به خوبی پیش بینی کرده است. در دیوارهای برشی فولادی با اتصال پیچی و ورق به اعضای مرزی، لغزش در محل اتصال پیچی و تسلیم شدن ورق در مرزها موجب کاهش سختی سیستم می‌شود. بنابراین یک دیوار برشی فولادی با اتصال پیچی ورق به اعضای مرزی، در شرایط عملی از سختی الاستیک کمتری برخوردار بوده و تسلیم اولیه بعلت لغزش و لهیدگی در محل اتصال در بار کمتری رخ خواهد داد [۱۳].



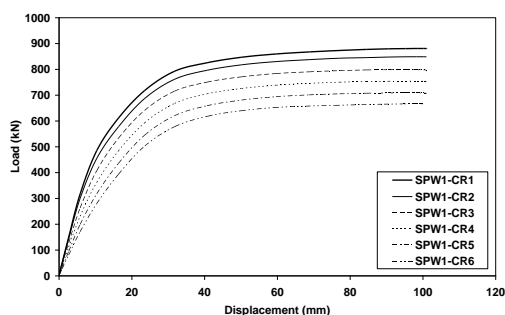
شکل ۶ - شبکه‌بندی مدل اجزای محدود مربوط به نمونه SPW3-CR6

<sup>5</sup> Implicit method  
<sup>6</sup> Explicit method

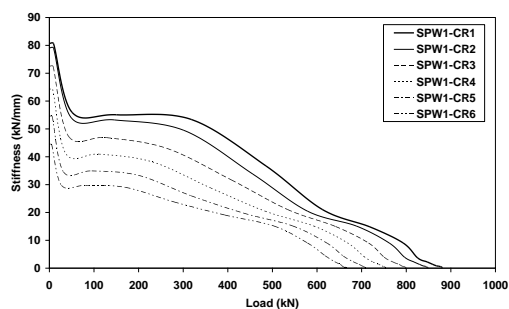
<sup>10</sup> Pushover

مختلف مشاهده می شود درصد کاهش مقاومت با افزایش قطر بازشو، در هر سه سری نمونه ها تقریباً یکسان است. بطوری که برای نسبت بازشو ۰/۵ مقاومت نمونه های سری اول، دوم و سوم در حدود ۲۳/۴ درصد کاهش می یابد. این در حالی است که درصد کاهش سختی اولیه نمونه ها بویژه در نسبت های بازشو بزرگتر با افزایش طول دهانه پانل کاهش می یابد. بطوری که برای نسبت بازشو ۰/۵ سختی اولیه نمونه های سری اول، دوم و سوم بترتیب ۴۵، ۳۸ و ۳۰/۵ درصد کاهش می یابد.

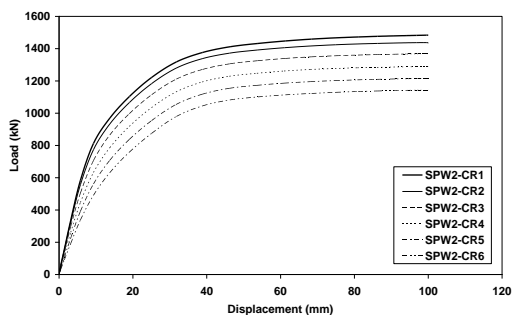
بطوریکه قبلاً اشاره شد صوری و روبرتز [۲] با انجام یک سری مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی، اینگونه استنباط نمودند که سختی اولیه و مقاومت پانل های دارای بازشو با ضریب  $1-D/d$  کاهش می یابد که در آن  $D$  قطر بازشو و  $d$  ارتفاع پانل می باشد.



شکل ۹ - نمودار بار - تغییر مکان نمونه های سری اول

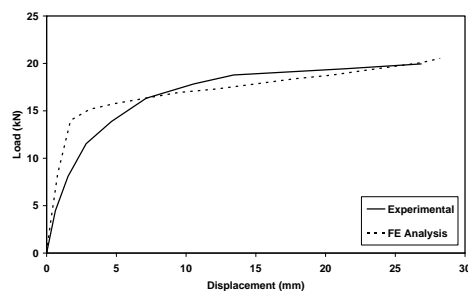


شکل ۱۰ - نمودار سختی - بار نمونه های سری اول



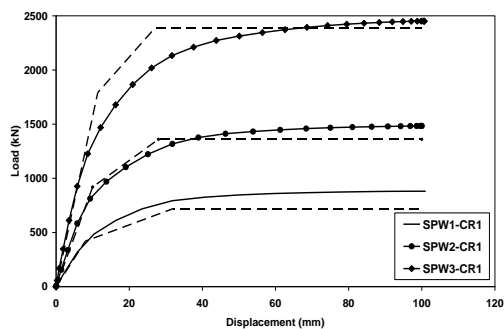
شکل ۱۱ - نمودار بار - تغییر مکان نمونه های سری دوم

لازم به تذکر است که پدیده پیچیده لغزش اتصال در مدلسازی المان محدود لحاظ نشده است، همچنین وجود ناکاملی ها در نمونه آزمایشگاهی و طبیعت رفتار مصالح در بارگذاری رفت و برگشتی، سبب نرم شدگی در رفتار سازه می شود که این مسئله نیز سبب ایجاد اختلاف پوش رفتار هیستریزس و نمودار بدست آمده از نرم افزار شده است. همچنین برای بررسی صحت نتایج منحنی بار - تغییر مکان نمونه های بدون بازشو SPW1-CR1، SPW2-CR1 و SPW3-CR1، از روش اندر کنش قاب و ورق اصلاح شده [۱۱] برای محاسبه رفتار این نمونه ها استفاده شده و نتایج حاصله با نتایج تحلیل المان محدود مقایسه شده است (شکل ۸). برای سادگی محاسبات زاویه میدان کشش ۴۵ درجه فرض شده که با توجه به زوایای میدان کشش نمونه های مورد بررسی دور از واقعیت نمی باشد. مقایسه نتایج حاصله قابل قبول بودن مدلسازی انجام شده را تأیید می نماید.



شکل ۷: مقایسه پوش منحنی چرخه ای حاصل از آزمایشگاه با نتایج

تحلیل اجزای محدود برای نمونه SPW4



شکل ۸: مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی اجزای محدود و روش

M-PFI برای نمونه های بدون بازشو

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

نمودار بار - تغییر مکان و سختی - بار مربوط به نمونه های سری اول، دوم و سوم در شکل های ۹ الی ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در نمودارها مشخص می باشد با افزایش قطر بازشو از مقاومت و سختی نمونه ها کاسته شده است. با بررسی مقادیر مقاومت نهایی نمونه های تحلیلی با نسبت های بازشو



می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیل اجزای محدود نمونه‌ها با مقیاس واقعی و مقایسه با نتایج ضرائب کاهش مذکور مشاهده می‌گردد که خطای حاصل از ضرائب فوق زیاد بوده، که به نظر می‌رسد در نظر نگرفتن شکل پانل نیز در این خطا موثر بوده است. از اینرو در ادامه با بررسی دقیق نتایج حاصل از این تحقیق، ضریب کاهش  $(1-D/H)^S$  برای اصلاح مقاومت و ضریب کاهش  $1-D/H$  برای اصلاح سختی اولیه پانل‌ها پیشنهاد شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است که در ضرایب کاهش مزبور  $S=b/H$  بوده،  $D$  قطر بازشو،  $H$  قطر پانل و  $b$  عرض پانل می‌باشد. در جداول ۸ و ۹ درصد خطای ضرایب کاهش سختی و مقاومت پیشنهادی تحقیق حاضر، با مقادیر نظیر ضرایب پیشنهادی صبوری و روبرتز [۲] برای نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. که این مقایسه دقت بهتر ضرایب پیشنهادی این تحقیق بویژه برای بازشوه‌های بزرگ را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ضرایب کاهش سختی و مقاومت پیشنهادی این تحقیق برای نمونه‌های امان محدود، با ضرایب کاهش سختی و مقاومت حاصل از تحقیقات پیشین مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود ضرایب پیشنهادی تحقیق حاضر توانسته است مقادیر سختی اولیه و مقاومت دیوارهای برشی فولادی با ابعاد متفاوت قاب و همچنین قطرهای مختلف بازشو را به خوبی پیش‌بینی نماید.

جدول ۸: مقایسه درصد خطای ضریب کاهش سختی پیشنهادی برای نمونه‌های آزمایشگاهی

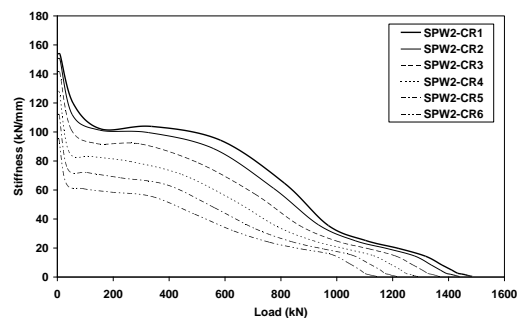
نمونه	SPW1	SPW2	SPW3	SPW4
D/d	۰	۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۵۰
1-D/d	...	۱/۰	۹/۸	۲۶/۵
1-D/H	...	-۹/۸	۳/۹	۶/۱

جدول ۹: مقایسه درصد خطای ضریب کاهش مقاومت پیشنهادی برای نمونه‌های آزمایشگاهی

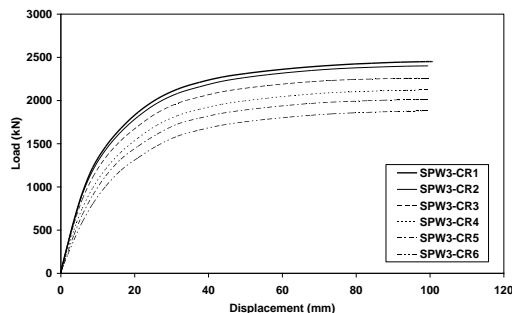
نمونه	SPW1	SPW2	SPW3	SPW4
D/d	۰	۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۵۰
1-D/d	...	۱۷/۷	۲۳/۵	۳۱/۸
$(1-D/H)^S$	...	۸/۱	۴/۰	۰

#### ۵- نتیجه‌گیری

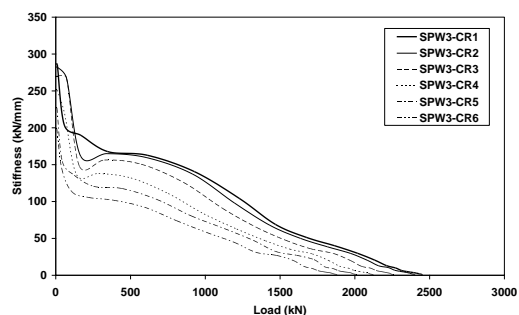
در انتها به ذکر اهم نتایج حاصل از این تحقیق پرداخته شده است، شایان ذکر است که استخراج این نتایج در حوزه نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی در این تحقیق بوده است، ولی انتظار می‌رود که نتایج مزبور دارای حوزه کاربرد وسیع‌تری باشند.



شکل ۱۲ - نمودار سختی- بار نمونه‌های سری دوم



شکل ۱۳ - نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های سری سوم



شکل ۱۴ - نمودار سختی- بار نمونه‌های سری سوم

نتایج حاصل از این ضریب پیشنهادی مستقل از دهانه پانل بوده و در نسبت‌های بازشو بزرگ با خطای زیادی همراه بود بنابراین با توجه به خطای بالای این ضریب در بازشوه‌های بزرگ صبوری در تحقیقات بعدی [۳]، ضریب کاهش اصلاحی  $1-A/A_0$  را پیشنهاد نمود (  $A_0$  مساحت ورق و  $A$  مساحت بازشو) که نتایج حاصل غیر محافظه کارانه می‌باشد. عباسی موسوی با انجام یک سری مطالعات تئوریک توسط نرم افزار ANSYS بر روی دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو دایره‌ای در مرکز دیوار ضریب کاهش  $1-D/b$  را که  $D$  قطر بازشو و  $b$  عرض پانل می‌باشد را برای اصلاح مقاومت و ضریب کاهش  $(1-D/Z)$  را که  $Z = 4A/P$  (  $A$  مساحت پانل و  $P$  محیط پانل) برای اصلاح سختی اولیه دیوارها در اثر وجود بازشو ی دایره‌ای در مرکز پانل ارائه نمود [۶]. ضریب مقاومت پیشنهادی توسط موسوی در دهانه‌های کوچک دارای خطای بسیار بزرگی

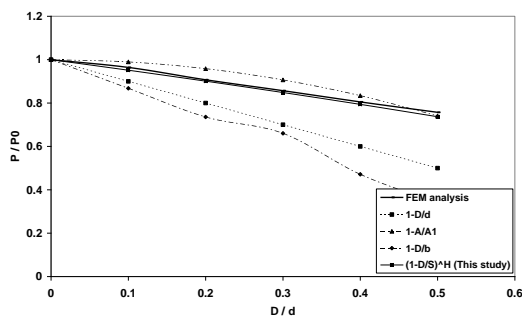
سپاسگزاری‌ها

در انتها نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از مسئولین محترم دانشکده فنی دانشگاه ارومیه بخاطر حمایت مالی این تحقیق، و همچنین از جناب آقای دکتر هدایت ولادی استادیار گروه عمران دانشگاه تبریز بخاطر مشاوره‌های ارزنده‌شان در جهت پیشبرد تحقیق و نیز از آقای جعفر عظیم زاده کارشناس آزمایشگاه تحقیقات سازه دانشکده فنی دانشگاه ارومیه بعلت همکاری در آماده سازی مدلها و انجام آزمایش‌ها، اعلام دارند.

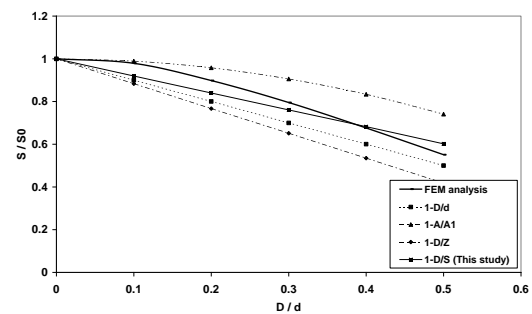
۱- کاهش مقاومت دیوار برشی فولادی با افزایش قطر بازشو دایره‌ای را می‌توان با اعمال ضریب اصلاح  $(1-D/H)^S$  محاسبه نمود که در این رابطه  $S=b/H$  (D قطر بازشو، H قطر پانل و b عرض پانل) می‌باشد.

۲- کاهش سختی اولیه دیوار برشی فولادی با افزایش قطر بازشو دایره‌ای را می‌توان با اعمال ضریب اصلاح  $1-D/H$  محاسبه نمود (D قطر بازشو و H قطر پانل).

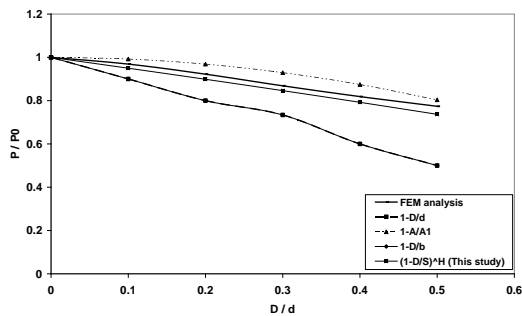
۳- به ازای نسبت عرض به ضخامت (نسبت لاغری پانل) ثابت ۱،۸۱۶، درصد کاهش مقاومت نمونه‌های تحلیلی در نسبت‌های بازشو مختلف تقریباً یکسان بوده است.



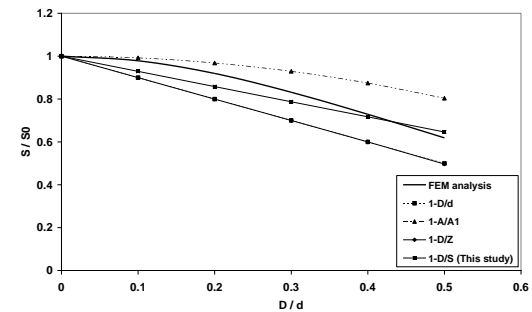
۱۵- الف) نمونه‌های سری اول



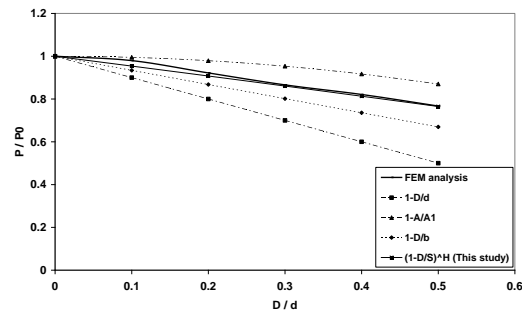
۱۵- الف) نمونه‌های سری اول



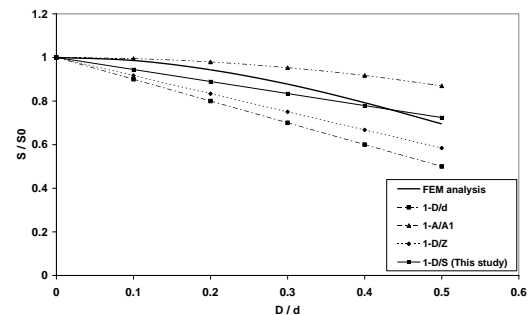
۱۶- ب) نمونه‌های سری دوم



۱۶- ب) نمونه‌های سری دوم



۱۷- ج) نمونه‌های سری سوم



۱۷- ج) نمونه‌های سری سوم

شکل ۱۵: مقایسه نتایج حاصل از ضریب کاهش سختی پیشنهادی با ضرایب کاهش شکل ۱۶: مقایسه نتایج حاصل از ضریب کاهش مقاومت پیشنهادی با ضرایب کاهش سختی قبلی برای نمونه‌های اجزای محدود

- [1] Roberts, T.M. and Sabouri-ghomi, S. "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Steel Plate Shear panels", *Thin-walled Structures*, Vol. 14, pp. 145-162, 1991.
- [2] Roberts, T.M. and Sabouri-ghomi, S. "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Perforated Steel Plate Shear panels", *Thin-walled Structures*, Vol. 14, pp. 139-151, 1992.
- [۳] صبوری سعید، سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادچاپ انگیزه‌پائیز ۱۳۸۰.
- [4] Deylami, A. and Daftari, H. "Non-Linear Behavior of Steel Shear Wall with Large Rectangular Opening", *Proceeding on CD-Rom, 12th World Conference on Earthquake Eng, NewZealand, Paper No.408, 2000.*
- [5] Darren Vian and Michel Bruneau. "Testing of Special LYS Steel Plate Shear Wall", *13th World Conference on Earthquake Eng, Paper No.978, 2004.*
- [۶] عباسی موسوی، سید مهدی بررسی رفتار خرابی دیوارهای برشی فولادی بازشوداریا یانامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ۱۳۸۱.
- [7] Kharrazi, M.H.K. "Analytical Method for Analysis and Design of Steel Plate Walls", *Report to Steel Structures Education Foundation (CISC), Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2005.*
- [۸] ولیزاده، هادی بررسی آزمایشگاهی رفتار دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو با سختندهای مورب، پاینامه کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ۱۳۸۱.
- [9] American Society for Testing and Material, ASTM, A370-97a, 2001.
- [10] FEMA 356, (Federal Emergency Management Agency), "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", *American Society of Civil Engineering, 2000.*
- [11] Kharrazi, M.H.K., Helmut, G.L. and, Ventura, E. "Implementation of M-PFI method in design of steel plate walls", *Journal of Construction steel research*, 64, 465-479, 2008.
- [12] Hibbit, Karlsson, and Sorenson, Inc., (HKS), 2003b. *ABAQUS/Explicit User's Manual. Version 6.4, Hibbitt, Karlsson, & Sorenson Inc., Pawtucket, Rhode Island.*
- [13] Elgaaly, M. "Thin steel plate shear walls behavior and analysis", *Thin-Walled Structures* Vol. 32, pp. 151-80, 1998.