



کد مقاله: ۱۲۶-

۲

## بررسی تاثیر بازشو بر رفتار دیوار برشی با فولاد مقاومت پایین

جواد واتقی امیری<sup>۱</sup>، مهدی دهستانی<sup>۲</sup>، محمد تقی زادگان<sup>۳</sup>

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، [vaseghi@nit.ac.ir](mailto:vaseghi@nit.ac.ir)

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

### چکیده

با توجه به این که ساختمان‌ها همواره در معرض خطر زلزله و باد قرار داشته‌اند، برای مقابله با نیروهای جانبی به ویژه نیروی زلزله سیستم‌های سازه‌ای مختلفی به وجود آمد که می‌توان به سیستم نوین دیوار برشی فولادی اشاره کرد. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود Abaqus یک قاب یک طبقه و یک دهانه با سیستم دیوار برشی فولادی با فولاد St37 ساخته شد و ضخامت دیوار برشی معادل آن با فولاد LYP بدست آمد و اثر افزایش مساحت بازشو بر آنها با یکدیگر مقایسه شد. سپس برای بررسی شکل مناسب بازشو، بازشوه‌های مربعی، دایره‌ای و لوزی در دیوار برشی با فولاد مقاومت پایین ایجاد شد و مقاومت و سختی آنها با یکدیگر مقایسه شد و برای تعیین نسبت بهینه‌ی پهنا به ارتفاع بازشوهایی با مساحت ثابت و نسبت پهنا به ارتفاع مختلف بررسی شد. در انتها مشخص شد بازشو اثر کم‌تری بر روی دیوار برشی با فولاد مقاومت پایین نسبت به فولاد معمولی دارد و بازشوه‌های لوزی سختی و مقاومت بیش‌تری نسبت به سایر اشکال دارند و نسبت بهینه‌ی پهنا به ارتفاع برابر ۰/۸ می‌باشد.

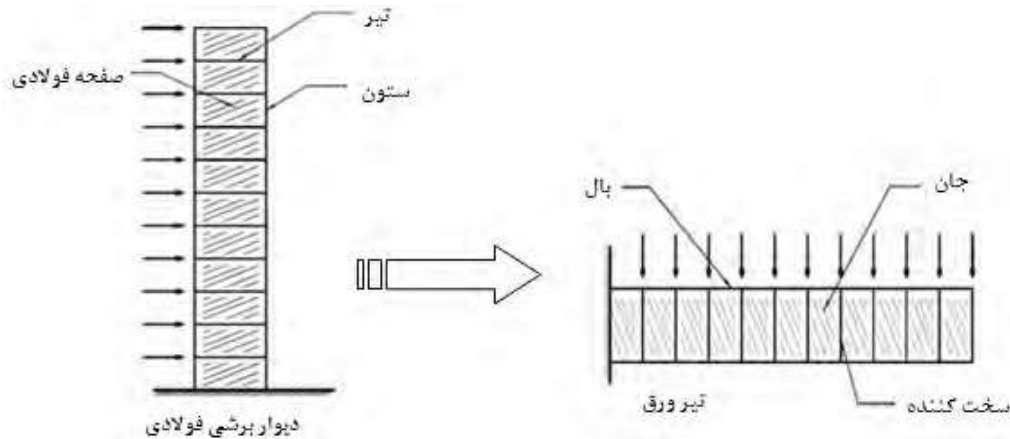
**کلمات کلیدی:** دیوار برشی فولادی، فولاد با نقطه تسلیم پایین، بازشو، مقاومت، سختی

### ۱- مقدمه

نگاه به گذشته نشان می‌دهد ساختمان‌ها همواره در معرض خطر زلزله و باد قرار داشته‌اند که گاهی سبب آسیب‌های جبران ناپذیری شده‌اند. لذا توجه به سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی کاملاً ضروری می‌باشد [۱]. با نیروهای جانبی مؤثر بر یک سازه به طرق مختلفی مقابله می‌شود که اثر زلزله بر ساختمان‌ها از سایر اثرات وارد بر آنها کاملاً متفاوت می‌باشد. ویژگی اثر زلزله در این است که نیروهای ناشی از آن به مراتب شدیدتر و پیچیده‌تر از سایر نیروهای مؤثر می‌باشد. محققین همواره در پی یافتن سیستم سازه‌ای ایده‌آل برای مقابله در برابر نیروهای جانبی بوده‌اند. برای مقابله با نیروهای جانبی تاکنون سیستم‌های سازه‌ای مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله آن می‌توان به سیستم دیوار برشی فولادی اشاره کرد [۲].

سیستم دیوار برشی فولادی برای تحمل نیروهای جانبی زلزله و باد در ساختمان‌های بلند سیستمی تقریباً جدید در این عرصه می‌باشد. این پدیده نوین که در جهان به سرعت رو به گسترش می‌باشد، در ساخت ساختمان‌های جدید و همچنین تقویت ساختمان‌های موجود به خصوص در کشورهای زلزله‌خیزی همچون آمریکا و ژاپن به کار گرفته شده است [۳].

از حدود دو دهه پیش مطالعات قابل توجهی در زمینه‌ی دیوار برشی فولادی انجام گرفت. دیوار برشی فولادی شامل ورق فولادی است که توسط تیرها و ستون‌ها احاطه شده‌است [۴]. به علت شباهت رفتار این سیستم‌ها با تیروورها از نظر مقاومت برشی روابط مشابهی برای این سیستم در نظر گرفته می‌شود [۵]. مطابق شکل ۱ در این سیستم ورق فولادی نقش جان و ستون‌ها نقش بال و تیرها نقش سخت‌کننده را بازی می‌کنند [۶]. اولین کار جدی برای بررسی مقاومت پانل‌های برشی پس از کماتش جان آن‌ها توسط واگنر در سال ۱۹۳۱ انجام گرفت. وی براساس آزمایش‌هایی که روی پانل‌های برشی نازک آلومینیومی انجام داد، تئوری میدان کشش را ارائه نمود [۷]. اساس مطالعاتی که در ۲۰ سال اخیر به طور جدی مورد توجه قرار گرفته، بهره‌گیری از میدان کششی قطری است که پس از کماتش ورق فولادی در آن ایجاد می‌گردد [۵].



شکل ۱: تشابه دیوار برشی با تیر ورق [۶]

اخیرا روش‌های جدید و تکنولوژی‌های بدست آمده در زمینه فلزات، صفحات فولادی جدید را در دسترس ما گذاشته‌است. این نوع فولاد دارای تنش تسلیم کمتر و افزایش طول بالا می‌باشد و توانایی تغییر شکل دادن و جذب انرژی بیشتری را قبل از شکستن از خود نشان می‌دهد. یکی دیگر از ویژگی‌های آن پایین بودن نقطه تسلیم است که این باعث افزایش ناحیه پلاستیک آن می‌شود و باعث جذب بیشتر انرژی می‌شود [۳].

دیوار برشی فولادی، ساخته شده از فولاد با نقطه تسلیم پایین، عامل موثری برای جذب انرژی است. با طراحی و ساخت مناسب دیوارهای برشی فولادی می‌توان در جذب و تلف کردن مقدار زیادی از انرژی لرزه‌ای بهره برد.

در طراحی سازه‌ها به غیر از سازه‌های بلند و مهم، تامین فضاهای مناسب داخلی و ملاحظات معماری از مهمترین اهداف طراحی است که پس از آن، مهندس طراح مقید به ایجاد سازه مناسب در چارچوب فضاهای تعیین شده خواهد بود. اعمال چنین نیازهای معماری و زیباسازی را می‌توان یکی از عوامل ایجاد بازشو در دیوارهای برشی فولادی به حساب آورد. همچنین ملاحظات غیر سازه‌ای از قبیل موقعیت و مسیر سیستم‌های تاسیساتی می‌توانند از دیگر عوامل موثر در ایجاد بازشو در دیوارهای برشی فولادی باشند. با توجه به این که در زمان مقاوم‌سازی سازه‌ها، موقعیت این تاسیسات پیش از اجرای دیوار برشی فولادی از قبل مشخص می‌باشند، لذا این گزینه هنگام مقاوم‌سازی سازه‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد.

در همین راستا صبوری و رابرتز با انجام یک سری کارهای آزمایشگاهی بر روی دیوارهای برشی فولادی با بازشو دایروی در مرکز دیوار، رابطه‌ای خطی برای کاهش سختی و مقاومت دیوار ارائه نمودند [8]. همچنین برنو و ویان در مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه Buffalo سه نمونه دیوار برشی فولادی با مقاومت تسلیم کم را طراحی نمودند. این نمونه‌ها در دانشگاه تایوان تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. یکی از نمونه‌ها به صورت دهانه‌ی ساده‌ی یک طبقه، شامل پانلی با ۲۰ عدد سوراخ دایره‌ای به قطر ۲۰۰ میلی‌متر بود [9]. موسوی و

همکاران این نمونه را در نرم افزار اجزا محدود Ansys مدل کردند و روابطی برای تعیین میزان کاهش سختی و مقاومت دیوارهای برشی فولادی با بازشو ارائه نمودند [10].

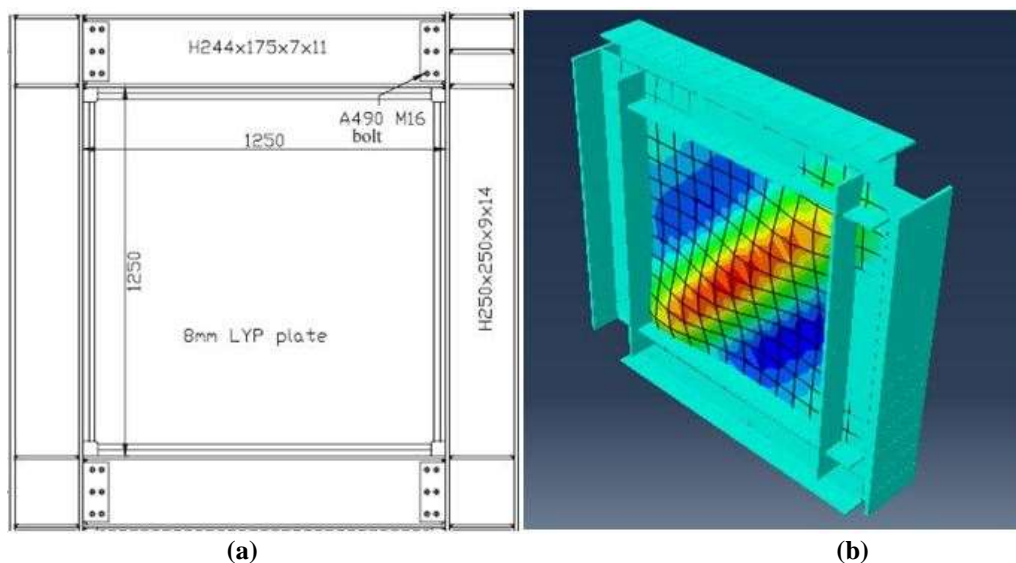
این تحقیق با یک تحلیل عددی با نرم افزار اجزا محدود Abaqus به بررسی اثر مقاومت فولاد بر کاهش مقاومت و سختی ناشی از بازشو در دیوار برشی فولادی می پردازد. همچنین اثر شکل بازشو و نسبت ابعاد بازشو بر رفتار دیوار برشی فولادی بررسی می شود و نسبت بهینه ابعاد تعیین می شود.

## ۲- صحت سنجی مدل اجزا محدود

قبل از اینکه به بررسی و مقایسه مدل های اصلی پرداخته شود، لازم است از صحت مدلسازی اطمینان حاصل شود. برای این کار نتایج یکی از آزمایش های واقعی که در زمینه دیوار برشی فولادی انجام گرفته است، با نتایج مدلسازی مطابقت داده می شود. آزمایش مورد نظر بر روی یک دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دهانه با فولاد با نقطه تسلیم پایین در دانشگاه ملی تایوان توسط شنگ جین چنگ و همکارش انجام گرفته است [۱۱].

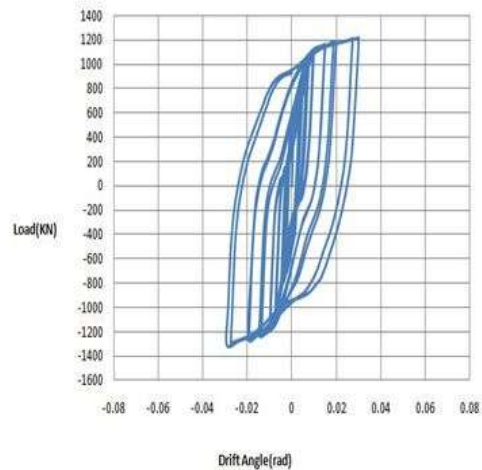
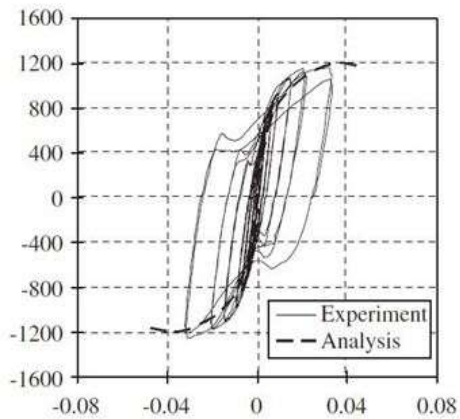
نمونه آزمایشگاهی مطابق شکل 2a یک ورق فولادی با مقاومت تسلیم پایین به ضخامت 8 میلی متر و به ابعاد 1.25\*1.25 متر می باشد، که اتصال بین تیر وستون آن گیردار می باشد که تحت بارگذاری چرخه ای تا دوران 0.03 رادیان قرار گرفته است [۱۱].

برای مدلسازی ورق از المان shell(S4R) و برای تیر و ستون از المان Beam(B31) استفاده شده است. اتصال ورق به تیر وستون و تیر و ستون به یکدیگر گیردار می باشد. همچنین برای مدل کردن کماتش ورق باید یک نقص در مدل ایجاد نمود که این کار با اعمال یک بار ناچیز عمود بر صفحه انجام شد.



شکل ۲: (a) مشخصات مدل آزمایشگاهی - (b) مدلسازی نرم افزار

با توجه به نمودار هیستریزس حاصل از مدلسازی انجام شده در نرم افزار Abaqus6.11 و نمودار هیستریزس حاصل از نتایج آزمایشگاهی، دقت مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود.



(a)

(b)

شکل ۳: (a) نمودار هیستریزس نتایج آزمایشگاهی - (b) نمودار هیستریزس مدلسازی

### ۳- تاثیر مقاومت فولاد بر رفتار دیوار برشی فولادی با بازشو

در این قسمت هر نمونه از سیستم دیوار برشی فولادی با اتصال گیردار را تا دوران 0.03 رادیان و به صورت مونوتونیک بارگذاری کرده و نمودار نیرو-تغییر مکان آن رسم می‌شود. ابتدا نمودار نیرو-تغییر مکان ورق فولاد معمولی (St37) بدون بازشو با ضخامت ۵ میلی‌متر رسم می‌شود، سپس ضخامت معادل آن با ورق فولاد با مقاومت پایین (LYP) بدون بازشو تعیین می‌گردد. سپس با افزایش مساحت بازشو سختی و مقاومت دو سیستم با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

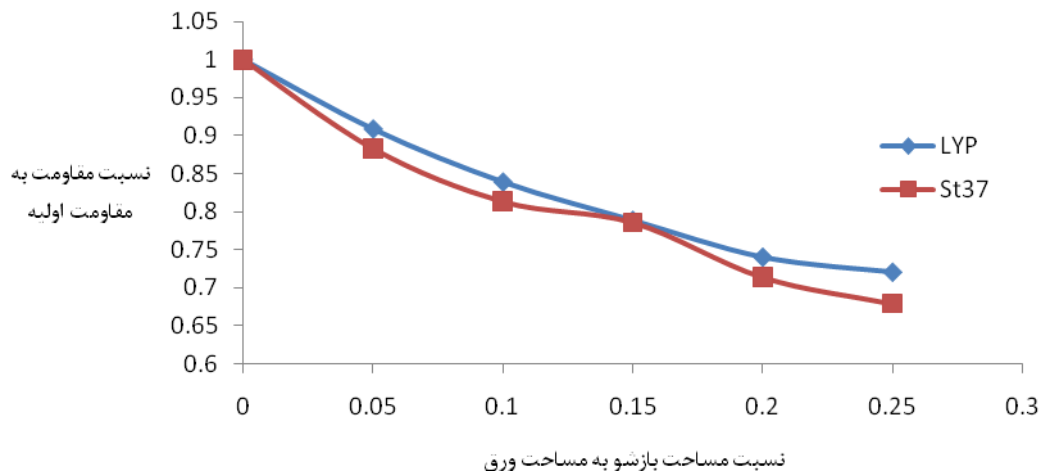
جدول ۱: مشخصات فولاد

Steel	E(GPa)	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)
St37	۲۱۰	۲۳۵	۳۷۰
LYP	۲۱۰	۱۰۰	۲۷۰

جدول ۲: مشخصات قاب

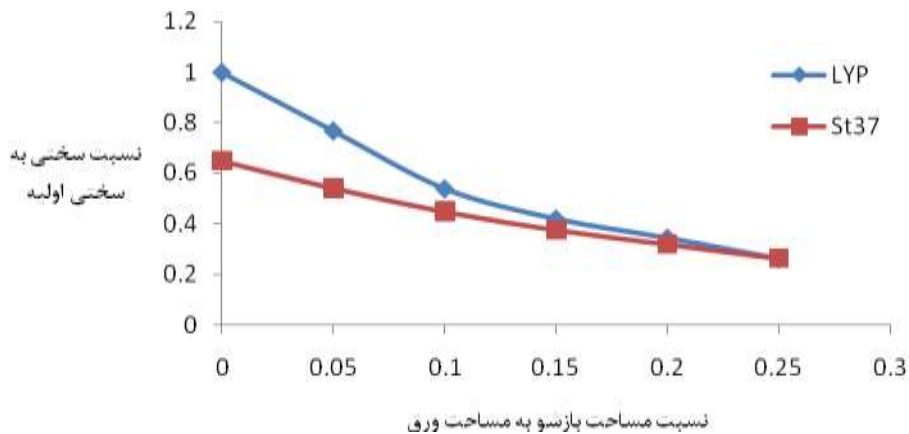
ورق فولادی	ستون	تیر	قاب
5mm(St37)	IPB240	IPB220	۱
11mm(LYP)	IPB240	IPB220	۲

در شکل ۴ نمودار نسبت مقاومت بازشو با مساحت‌های ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵ درصد مساحت ورق فولادی به مقاومت اولیه سیستم می‌باشد. مشاهده می‌شود که افزایش مساحت بازشو سبب کاهش مقاومت سیستم می‌شود و این کاهش مقاومت در دیوار برشی با فولاد معمولی بیش‌تر از دیوار برشی با فولاد مقاومت پایین می‌باشد.



شکل ۴: اثر مساحت بازشو بر مقاومت دیوار برشی فولادی

در شکل ۵ نمودار نسبت سختی بازشو با مساحت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ درصد مساحت ورق فولادی به سختی اولیه سیستم دیوار برشی فولادی با فولاد مقاومت پایین می‌باشد. مشاهده می‌شود که افزایش مساحت بازشو سبب کاهش سختی سیستم می‌شود و سختی دیوار برشی با فولاد معمولی کم‌تر از دیوار برشی با فولاد مقاومت پایین می‌باشد.

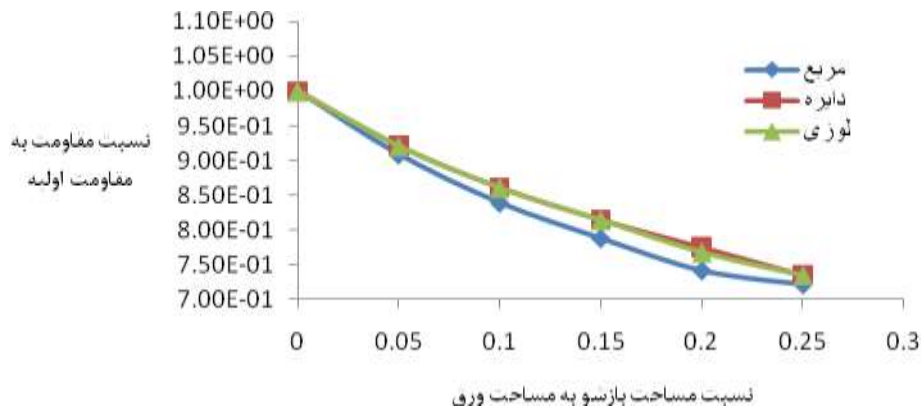


شکل ۵: اثر مساحت بازشو بر سختی دیوار برشی فولادی

#### ۴- تاثیر شکل بازشو بر رفتار دیوار برشی فولادی

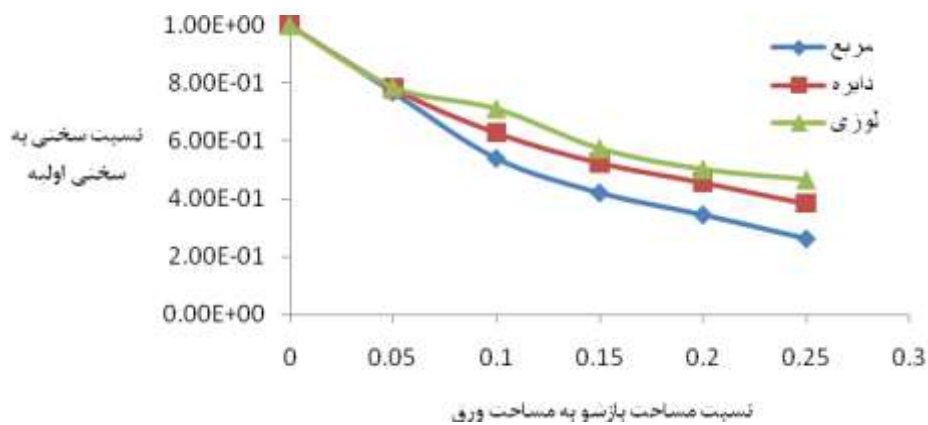
در این قسمت سه بازشو به شکل‌های مربع، دایره و لوزی در ورق فولادی با فولاد مقاومت پایین ایجاد می‌شود و با افزایش مساحت بازشو رفتار سیستم بررسی می‌شود.

در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش مساحت بازشو کاهش مقاومت در بازشوهای مربعی بیش‌تر از سایر شکل‌ها می‌باشد، همچنین مقاومت بازشوهای دایره‌ای و لوزی تقریباً برابر می‌باشند و مقاومت بازشو لوزی به میزان ناچیزی بیش‌تر است.



شکل ۶: اثر شکل بازشو بر مقاومت دیوار برشی فولادی با فولاد مقاومت پایین

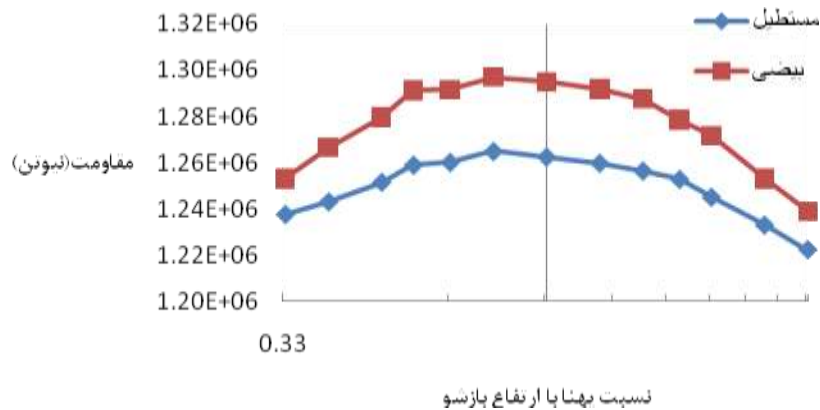
در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش مساحت بازشو کاهش سختی در بازشوهای مربعی بیش‌تر از سایر شکل‌ها می‌باشد، همچنین کاهش سختی بازشوهای دایره‌ای بیش‌تر از لوزی می‌باشند و سختی بازشو لوزی بیش‌تر از سایر شکل‌ها است. مشاهده می‌شود افزایش مساحت در نواحی قطری ورق سبب افزایش سختی و مقاومت می‌شود.



شکل ۷: اثر شکل بازشو بر سختی دیوار برشی فولادی با فولاد مقاومت پایین

## ۵- تاثیر نسبت ابعاد بازشو بر رفتار دیوار برشی فولادی

در این قسمت یک بازشو به مساحت  $0/16$  مترمربع به شکل‌های مستطیل و بیضی در دیوار برشی با فولاد مقاومت پایین ایجاد می‌شود و با تغییر نسبت ابعاد به یکدیگر رفتار سیستم بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود مقاومت بازشوهای بیضوی بیش‌تر از مقاومت بازشوهای مستطیلی است. همچنین هرچه نسبت پهنا به ارتفاع به  $1$  نزدیک می‌شود، مقاومت سیستم افزایش می‌یابد و در نسبت پهنا به ارتفاع  $0/8$  سیستم بیش‌ترین مقاومت را دارد.



شکل ۸: اثر نسبت ابعاد بازشو بر مقاومت دیوار برشی فولادی با فولاد مقاومت پایین

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا یک قاب یک طبقه و یک دهانه با سیستم دیوار برشی فولادی با فولاد St37 ساخته شد و ضخامت دیوار برشی معادل آن با فولاد LYP بدست آمد و اثر افزایش مساحت بازشو بر آنها با یکدیگر مقایسه شد. سپس برای بررسی شکل مناسب بازشو، بازشوی مربعی، دایره‌ای و لوزی در دیوار برشی با فولاد مقاومت پایین ایجاد شد و مقاومت و سختی آنها با یکدیگر مقایسه شد و برای تعیین نسبت بهینه‌ی پهنا به ارتفاع بازشوهایی با مساحت ثابت و نسبت پهنا به ارتفاع مختلف بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد.

۱) افزایش مساحت بازشو سبب کاهش مقاومت سیستم می‌شود و شیب کاهش مقاومت در دیوارهای برشی با فولاد معمولی بیش‌تر از فولاد مقاومت پایین می‌باشد.

۲) افزایش مساحت بازشو سبب کاهش سختی سیستم می‌شود و سختی دیوار برشی با فولاد مقاومت پایین بیش‌تر از فولاد معمولی است ولی شیب کاهش سختی در دیوار برشی با فولاد معمولی کم‌تر است.

۳) مقاومت دیوارهای برشی با بازشوی لوزی و دایره‌ای بیش‌تر از مقاومت دیوارهای برشی با بازشو مربعی می‌باشد.

۴) سختی دیوارهای برشی با بازشو لوزی بیش‌تر از دیوارهای برشی با بازشو دایره‌ای است، همچنین سختی دیوارهای برشی با بازشو دایره‌ای بیش‌تر از دیوارهای برشی با بازشو مربعی می‌باشد.

۵) هر چه نسبت پهنا به ارتفاع به ۱ نزدیک‌تر شود، مقاومت سیستم افزایش می‌یابد و نسبت بهینه‌ی پهنا به ارتفاع برابر ۰/۸ می‌باشد.

## مراجع

- [۱] قلعه نوی، م.، میری، م.، همتی پورگشتی، ح. مقایسه سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی و دیوار برشی فولادی نازک با سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی و مهاربند ضربدری یا شورون به روش طراحی بر اساس سطوح عملکرد، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷.
- [۲] حبیب نژاد کورایم، ا.، محرمی، ح.، مزروعی، ع. بررسی اثر سختی ستون‌ها بر رفتار دیوارهای برشی فولادی جدار نازک، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۲، تیر ۱۳۹۰.
- [۳] سازگری، ا. ترمیم و تقویت سازه‌های بتنی توسط دیوار برشی فولادی، یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه هرمزگان، دی ۱۳۸۳.
- [۴] قلهکی، م.، رضایی فر، ا. اثر مقاومت افزون بر ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، اردیبهشت ۱۳۸۸.

- [5] ولادی، ه.، سازگری، ا.، جاوید، ص. بررسی تئوریک و آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷.
- [6] غلامپور، س.، سیدپور، س.، یدالهی، ی. بررسی پارامترهای موثر بر رفتار دیوار برشی فولادی سخت شده و سخت نشده. کنفرانس بین المللی سبک سازی و زلزله، کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۹.
- [7] Wagner H, Ballerstedt W. TENSION FIELDS IN ORIGINALLY CURVED, THIN SHEETS DURING SHEARING STRESS, NACA, 1935.
- [8] Roberts, T.M., "Seismic resistance of steel plate shear walls", *Engineering structures*, Vol. 17, No. 5, pp. 344-351, 1995
- [9] Bruneau, M., Berman, J., Garcia, D.L. and Vian, D., A Review of Steel Plate Shear Wall Design Requirements and Research, North American Steel Construction Conference, *ENGINEERING JOURNAL*, FIRST QUARTER, PP. 27-34, 2005.
- [10] عباسی موسوی، س.، عابدی، ک.، چناقلو، م.، بررسی رفتار دیوارهای برشی بازشودار و پارامترهای موثر بر آن.
- [11] Chen S, Jhang C. Cyclic behavior of low yield point steel shear walls, *Thin-Walled Structures*, 2006.