

## Numerical Analysis of Corrugated Steel Plate Shear Walls System With Several Rectangular Openings

Arman Mamazizi<sup>1\*</sup>, Masoud Khalighi<sup>1</sup>, Mohammad Shaho Allahveisi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan

2-MSc student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan

### ABSTRACT

Corrugated steel plate shear wall system (CSPSW) is one of the lateral load resisting systems, which in some cases has better seismic performance than the steel plate shear wall system. In this study, the seismic performance of the corrugated steel shear wall system was investigated. The variables of the present study are the angle of corrugated steel plate (0 to 30 degrees), percentage of steel plate openings (10, 20, and 30), and the number of openings (1, 2, 3, and 4). Abaqus finite element software was used for modeling and analysis. A total of 91 steel shear wall models were subjected to 100 mm displacement and were analyzed by the pushover method. The behavior of steel materials is considered as elastoplastic. The results showed that as the angle of corrugation increased, the yield and ultimate strength increased. The initial stiffness decreased with increasing angle of corrugation. Secondary stiffness also increased initially but decreased afterward, but the ductility decreased. With the increase in the percentage of openings, the yield, and ultimate strength decrease. The initial and secondary stiffness decreased, and the ductility first decreased and then increased. As the number of openings increases, the yield and ultimate strength decrease first and then increase.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 14 September 2020

**Revise Date:** 15 November 2020

**Accept Date:** 20 January 2021

### Keywords:

Steel Plate Shear Wall,  
Corrugated Plate,  
Seismic Performance,  
Corrugated Angle.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.248272.2239>

\*Corresponding author: Arman Mamazizi

Email address: s.mamazizi@uok.ac.ir

## بررسی عددی عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی کنگره‌دار دارای چندین بازشو

آرمان مام عزیزی<sup>۱\*</sup>، مسعود خلیقی<sup>۱</sup>، محمد شاهو الله ویسی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

### چکیده

سیستم دیوار برشی فولادی با ورق کنگره دار یکی از سیستم های باربر جانبی می باشد که در بعضی از موارد عملکرد بهتری نسبت به سیستم دیوار برشی فولادی با ورق ساده دارد. در این تحقیق به بررسی عملکرد جانبی سیستم دیوار برشی فولادی کنگره دار پرداخته شد. متغیرهای تحقیق حاضر زاویه کنگره ورق فولادی (۰ تا ۳۰ درجه)، درصد بازشو ورق فولادی (۱۰، ۲۰ و ۳۰) و تعداد بازشو (۱، ۲، ۳ و ۴) می باشد. از نرم افزار اجزاء محدودی *Abaqus* جهت مدل سازی و تحلیل استفاده شد. تعداد ۹۱ مدل دیوار برشی فولادی تحت تحلیل پوش آور تا جابجایی ۱۰۰ میلی متر قرار گرفتند. رفتار مصالح فولادی به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه کنگره مقاومت اولیه، ثانویه و نهایی دچار کاهش می شود. سختی اولیه که به صورت شیب اولیه ی نمودار بار- جابجایی تعریف می شود با افزایش زاویه کنگره کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز تا زاویه کنگره ی ۱۰ درجه افزایش اما پس از آن کاهش یافته است. مقدار شکل پذیری افزایش می یابد. با افزایش درصد بازشو مقاومت و سختی اولیه کاهش پیدا کرده اما شکل پذیری برای دیوارهای بدون کنگره کاهش و در دیوارهای کنگره دار افزایش می یابد. با افزایش تعداد بازشو نیز مقاومت، سختی اولیه و شکل پذیری تا سه بازشو کاهش و سپس افزایش پیدا می کند.

کلمات کلیدی: دیوار برشی صفحه فولادی، ورق کنگره دار، عملکرد جانبی، زاویه کنگره.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۳۹۹/۰۶/۲۴	۱۳۹۹/۰۸/۲۵	۱۳۹۹/۱۱/۰۱	۱۳۹۹/۱۱/۰۱	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.248272.2239">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.248272.2239</a>
*نویسنده مسئول:		آرمان مام عزیزی			
پست الکترونیکی:		s.mamazizi@uok.ac.ir			

## ۱- مقدمه

سیستم دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در سه دهه اخیر به سرعت در دنیا مورد توجه قرار گرفته و از این سیستم برای ساخت و مقاوم سازی ساختمان های مهمی در دنیا به ویژه در کشورهای زلزله خیزی چون ژاپن و آمریکا استفاده شده است. از جمله ساختمان های ساخته شده با این سیستم می توان به بیمارستان ۶ طبقه در لوس آنجلس در اوایل دهه ۸۰ میلادی، مرکز درمانی پرتلند در سال ۲۰۰۸، ساختمان بین المللی لاس وگاس در سال ۲۰۰۹ و ساختمان اداری ۳۵ طبقه در کوبه اشاره نمود. همچنین ساختمان های بسیاری با استفاده از دیوارهای برشی فولادی تقویت شده اند که دو نمونه مهم از آنها ساختمان مرکز درمانی در چارلستون و ساختمان کتابخانه ای ایالتی اورگان در آمریکا می باشد. سیستم دیوار برشی فولادی از ورق فولادی که توسط تیرها و ستون ها احاطه شده تشکیل شده است که به تیرها و ستون ها عناصر مرزی گفته می شود [۱].

دیوار برشی فولادی مشابه تیرورق طره ای عمل می نماید که در آن ستون ها به منزله بال های تیرورق، تیرهای طبقات همانند سخت کننده های آن و ورق های فولادی به عنوان جان تیرورق است [۱]. ساخت دیوار برشی با ورق فولادی کنگره دار یا ورق فولادی ساده به عنوان یک سیستم باربرجانبی مؤثر به طور گسترده ای توسط مهندسان محاسب مورد استقبال واقع شده است. علت استقبال گسترده از این سیستم، سختی اولیه زیاد، میزان جذب انرژی بالا و توانایی سازگاری با بازشوها است [۲]. دیوار برشی فولادی که به طور اصولی طراحی شده باشد، دارای قابلیت شکل پذیری، سختی اولیه و ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بالایی است. این ویژگی موجب اهمیت بیشتر این سیستم در مناطق با خطر لرزه خیزی بالا می شود. دیوارهای برشی فولادی بسیار سبک تر از دیوارهای برشی بتن مسلح رایج است که باعث کاهش بارهای ثقلی و جانبی وارد بر سازه می شوند [۱]. همچنین هزینه ساخت آن ها کمتر، مدت زمان اجرای آن ها کمتر و می توان گفت با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای سازه ای از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه تر است. در سال های اخیر استفاده از ورق های فولادی کنگره دار به عنوان دیوار برشی مورد توجه قرار گرفته است. از مزایای ملموس استفاده از ورق کنگره دار به عنوان دیوار برشی می توان بهبود سختی درون صفحه و بیرون صفحه، مقاومت، شکل پذیری، حلقه های هایستریزیس پایدار و ظرفیت بالا برای جذب انرژی پلاستیک به ویژه در ساختمان های بلندمرتبه را نام برد. بنابراین با توجه به نکات فوق الذکر و همچنین خطر لرزه خیزی بالای کشور ایران، انجام پژوهش های گسترده تری در مورد رفتار اشکال مختلف این نوع از سیستم باربر جانبی (دیوار برشی صفحه فولادی با ورق کنگره دار) از اهمیت و ضرورت بیشتری برخوردار می باشد. با توجه به تحقیقات انجام شده اکثر مطالعات به بررسی رفتار دیوار برشی فولادی کنگره دار با یک بازو پرداخته اند. لذا نوآوری این تحقیق در بررسی رفتار دیوار برشی فولادی با ورق جان کنگره دار دارای یک تا چهار بازو می باشد.

## ۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

سید احمد [۳] در سال ۲۰۰۱ رفتار تیرورق های فولادی و کامپوزیتی با جان فولادی کنگره دار را مورد بررسی قرار داد. این مطالعه بر مزایای استفاده از ورق های فولادی کنگره دار در مقایسه با ورق های معمولی (صاف) سنتی در ساخت تیرورق های پل تمرکز دارد. در این مطالعه رفتار خمشی و ظرفیت باربری تیرورق های با ورق های فولادی کنگره دار بررسی شد. براساس نتایج به دست آمده، بال ها به تنهایی مقاومت خمشی تیر را بدون هیچگونه تأثیری از جان کنگره دار تأمین می کنند. قلی زاده و یدالهی [۴] در سال ۲۰۱۲ به مقایسه عملکرد لرزه ای دیوارهای برشی ورق ساده و کنگره دار فولادی با استفاده از تحلیل اجزاء محدود پرداختند. نتایج کار آن ها نشان داد که رفتار ورق فولادی کنگره دار نسبت به ورق ساده بهتر بوده زیرا دارای ظرفیت باربری، شکل پذیری، سختی و قابلیت اتلاف انرژی زیادی می باشد. امامی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۳ به بررسی رفتار چرخه ای دیوار برشی فولادی کنگره دار دوزنقه ای و همچنین دیوار برشی فولادی فاقد سخت کننده پرداختند. مجموعه ای از مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس ۲/۱ بر روی یک نمونه از دیوار برشی فولادی یک طبقه تک دهانه ای با ورق جان کنگره دار دوزنقه ای و دیوار برشی فولادی فاقد سخت کننده انجام گرفت. این مطالعه آزمایشگاهی به منظور مقایسه سختی، مقاومت، شاخص شکل پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی بر روی سه نوع مختلف از دیوار برشی فولادی که عبارتند از: فاقد سخت کننده (نمونه ی اول)، کنگره دار دوزنقه ای شکل با خطوط قائم (نمونه ی دوم) و کنگره دار دوزنقه ای شکل با خطوط افقی (نمونه ی سوم) انجام شد. برطبق نتایج به دست آمده، ورق جان فولادی کنگره دار، سختی خارج از صفحه و مقاومت برشی الاستیک بالایی دارد. با

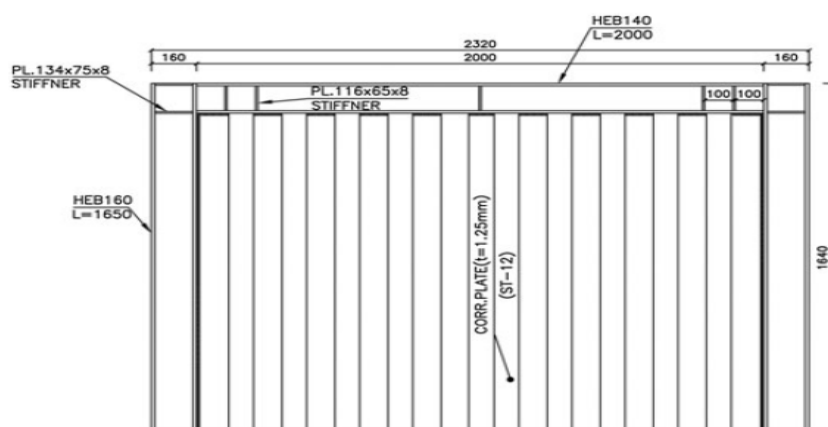
طراحی مناسب دیوار برشی فولادی کنگره‌دار، ورق فولادی کنگره‌دار می‌تواند در سطح نیروی پیش تعیین‌کننده عمل کند و انرژی لرزه‌ای را از طریق تغییرشکل پلاستیک بدون آسیب رساندن در حلقه‌های هیسترتیک، از بین ببرد. علاوه بر این، با توجه به اثر آکاردئونی ورق‌های کنگره‌دار، نسبت شکل‌پذیری و انعطاف‌پذیری سیستم دیوار برشی فولادی کنگره‌دار بسیار زیاد است. همچنین نتایج کار آن‌ها نشان داد که قابلیت استهلاک انرژی دیوارهای برشی فولادی دارای کنگره‌های افقی یا قائم بیشتر از دیوارهای برشی فولادی با ورق ساده است. علوی و ناطقی [۶] در سال ۲۰۱۳ رفتار لرزه ای دیوارهای برشی فولادی در صورت قطری سخت شده با سوراخ مرکزی را مورد بررسی قرار داده و آن را با مدل‌های بدون سوراخ مقایسه کردند. سه نمونه یک طبقه دیوار برشی فولادی با مقیاس یک دوم تحت بارگذاری چرخه ای شبه استاتیکی قرار گرفتند. یک نمونه بدون سخت‌کننده و دو نمونه دارای سخت‌کننده قطری بودند که در یکی از آنها بازشوی دایره ای به قطر یک سوم عمق پانل تعبیه شده بود. نتایج کار آنها نشان داد که نسبت شکل‌پذیری نمونه سوراخ‌دار در حدود ۱۴ درصد بیشتر از نمونه بدون سخت‌کننده می‌باشد. آنها در آخر فرمولی برای تخمین مقاومت برشی دیوار برشی ورق فولادی سوراخ‌دار و با سخت‌کننده قطری پیشنهاد دادند. فرزام پور و یکرنگ نیا [۷] در سال ۲۰۱۴ به بررسی رفتار دیوار برشی فولادی کنگره‌دار با بازشوهای مستطیلی پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که بازشوهای مستطیلی در دیوار برشی فولادی کنگره‌دار سختی اولیه را افزایش می‌دهد ولی مقاومت نهایی دیوار برشی فولادی کنگره‌دار را کاهش می‌دهد. حسین پور و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵ با انجام تحلیل‌هایی در نرم افزار اجزاء محدودی ANSYS، مدل‌های مختلفی از دیوارهای فولادی یک طبقه بدون سخت‌کننده با ورق‌های کنگره‌دار سینوسی و دوزنقه ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که در دیوارهای با ابعاد یکسان، ورق‌های کنگره‌دار دوزنقه ای، شکل‌پذیری و مقاومت نهایی بیشتری نسبت به ورق‌های کنگره‌دار سینوسی از خود نشان می‌دهند. صبوری‌قمی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ به بررسی رفتار سازه‌های پانل‌های برشی فولادی پرداختند. سه نمونه در مقیاس یک سوم با دو عدد بازشو و به صورت جداگانه تحت بارهای چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. در مطالعات نظری برای تعیین سختی برشی و مقاومت نهایی پانل‌های برشی فولادی دارای دو عدد بازشو، از مدل اندرکنش ورق-قاب استفاده شد. مطابق نتایج به‌دست آمده، تغییر در فاصله بازشو از ستون‌ها اثر چندانی بر روی مقاومت برشی ستون و همچنین مکان مفاصل پلاستیک تشکیل شده در پایین و بالای ستون ندارد. فرزام‌پور و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۵ یک مطالعه پارامتری دقیق و عددی مقایسه‌ای میان دیوارهای برشی فولادی با ورق کنگره‌دار و ورق ساده، در دو حالت با و بدون بازشو انجام دادند. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از: ضخامت ورق جان، زاویه کنگره، اندازه و مکان بازشو. رفتارهای مد نظر سازه برای مقایسه عبارتند از: سختی اولیه، مقاومت نهایی، قابلیت جذب انرژی، رابطه نیرو - جابجایی. نتایج نشان داد که استفاده از دیوار برشی فولادی کنگره‌دار دوزنقه‌ای شکل باعث افزایش سختی جانبی اولیه، قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری می‌شود. همچنین، دیوار برشی فولادی کنگره‌دار، مقاومت نهایی و نقطه فروپاشی سازه را نسبت به دیوار برشی فولادی ساده به تأخیر می‌اندازد، که این یکی از ویژگی‌های مطلوب برای مقاومت لرزه‌ای سازه است. دینگ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷ عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی کنگره‌دار به ویژه دیوارهای با بازشو را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند؛ آزمایش شبه استاتیکی در مقیاس واقعی بر روی پنج نمونه از دیوارهای برشی فولادی کنگره‌دار با و بدون بازشو انجام شد. نتایج نشان داد که سختی اولیه دیوارهای برشی فولادی کنگره‌دار نسبت به وجود بازشو حساس است. به طور تخمینی پیش‌بینی شد که افزایش سطح بازشو باعث کاهش نمایی سختی اولیه می‌شود. همچنین کاهش محسوس مقاومت در نمونه‌های دارای بازشو به دلیل آسیب‌دیدگی شدید در اطراف بازشو، به ویژه در نواحی گوشه در مرحله گسیختگی مشاهده شد. ژائو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۷ به مقایسه رفتار چرخه ای دیوارهای برشی فولادی با ورق کنگره‌دار (CoSPSW) با دیوارهای برشی ورق فولادی بدون سخت‌کننده (SPSW) پرداختند. تحلیل‌های پوش‌آور و چرخه ای غیرخطی بر روی گروهی از مدل‌های CoSPSW و SPSW انجام گرفت. همچنین مطالعه ای پارامتریک بر روی آرایش‌های مختلف پانل و قاب، و همچنین اثرات بارهای ثقلی صورت گرفت. نتایج نشان داد که CoSPSW با کنگره عمیق دارای سختی جانبی، مقاومت جانبی و اتلاف انرژی بیشتری نسبت به SPSW است، در حالی که CoSPSW با کنگره سطحی دارای سختی جانبی و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به SPSW است اما مقاومت جانبی آن از SPSW کمتر می‌باشد. همچنین مشاهده شد که برای تمامی حالات، CoSPSW‌ها دارای منحنی‌های هاسترزیس پایدار تقریباً بدون باریک‌شدگی نسبت به SPSW‌ها بوده و حساسیت کمتری با تأثیرات بارهای ثقلی یا قاب‌های مرزی ضعیف‌تر دارند. اشرفی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۸ به بررسی عددی دیوار برشی فولادی کنگره‌دار با کنگره‌های افقی و قائم پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که ظرفیت باربری در

دیوار برشی فولادی با کنگره افقی بیشتر از دیوار برشی فولادی با کنگره قائم می باشد. همچنین مقاومت دیوار برشی فولادی کنگره دار با افزایش طول کنگره افزایش یافته ولی با افزایش عمق کنگره ظرفیت باربری کاهش می یابد. کائو و هوانگ [۱۳] در سال ۲۰۱۸ به بررسی عددی و آزمایشگاهی رفتار هیسترتیک دیوار برشی فولادی کنگره دار پرداختند. دیوار برشی فولادی کنگره دار در دو طبقه با دو دهانه منفرد بدون کمانش الاستیک به صورت چرخه ای مورد آزمایش قرار گرفت. ظرفیت کمانش غیرالاستیک و مد شکست در دیوار برشی فولادی کنگره دار بررسی شد. نتایج نشان داد که از طریق طراحی مناسب پارامترهای مربوط به صفحات فولادی موج دار، می توان از کمانش الاستیک دیوار برشی فولادی موج دار جلوگیری شود و این دیوار برشی از سختی اولیه، مقاومت، میزان جذب انرژی و شکل پذیری بالایی برخوردار است. در نهایت، قابلیت کارایی روش های طراحی موجود برای دیوار برشی فولادی مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد مدل اندرکنش قاب- ورق می تواند مقاومت برشی و سختی اولیه دیوار برشی فولادی کنگره دار را با دقت خوبی پیش بینی کند. تونگ و لین ژو [۱۴] در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار برشی دیوار برشی فولادی کنگره دار از طریق روش اجزاء محدود با در نظر گرفتن خصوصیات غیرخطی و هندسی مصالح و تحلیل بیش از ۳۰۰ مدل پرداختند. مقایسه رفتار برشی دیوار برشی فولادی کنگره دار با مقادیر مختلف سختی نشان داد که سیستم با سخت کننده می تواند تغییر مکان های برون صفحه دیوار برشی فولادی کنگره دار را مهار کرده و همچنین شکل پذیری و مقاومت برشی این نوع از دیوارهای برشی فولادی را ارتقاء دهد. بر این اساس، برخی از توصیه های طراحی که می تواند مراجع ارزشمندی برای طراحی کاربردی دیوار برشی فولادی کنگره دار باشد، در این تحقیق ارائه شد. روابط کمانش الاستیک برشی دیوار برشی فولادی کنگره دار با ورق جان دبل با استفاده از روش اجزاء محدود و روش عددی صحت سنجی شد. همچنین روابط پیشنهادی با دقت خوبی بارهای کمانش الاستیک برشی وارد بر این سیستم ها را پیش بینی می کنند. فرزام پور و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی به تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی کنگره دار با تیر با مقطع کاهش یافته پرداختند. در این پژوهش یک روش طراحی گام به گام بر مبنای روش تحلیلی اندرکنش قاب-ورق ارائه شد. برای اطمینان از اینکه مفاصل پلاستیکی در دو انتهای تیر و نه در وسط دهانه یا ستون ها تشکیل می شوند، در اتصال دیوار برشی فولادی از تیر با مقطع کاهش یافته (اتصال استخوانی) استفاده شد. معادلات تحلیلی برای برآورد مقاومت دیوار برشی فولادی کنگره دار با تیر با مقطع کاهش یافته بر اساس تشکیل مفصل پلاستیکی قاب با در نظر گرفتن اندرکنش قاب-ورق بر روی پانل کنگره دار پیشنهاد شد. مقاومت دیوار برشی فولادی کنگره دار با تیر با مقطع کاهش یافته بدست آمده از معادلات تحلیلی با نتایج عددی مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد که معادلات تحلیلی با دقت بیش از ۹۵٪ مقاومت سیستم را تخمین می زند. فرزام پور و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۸ رفتار دیوار برشی فولادی کنگره دار با یک بازشوی مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحلیل نشان داد که زاویه کنگره ۳۰ درجه مقاومت نهایی را کاهش داده در شرایطی که سختی و شکل پذیری اولیه را افزایش داده است. قمری و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۹ رفتار عددی قاب فولادی با دیوار برشی فولادی با شکل های مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که برای دیوار برشی فولادی به شکل دوزنقه با زاویه قرار گیری در طرفین بیشتر از ۱۰۵ درجه تاثیر قابل توجهی بر سختی دیوار ندارد. همچنین در حالت دیوار با شکل مستطیل جذب انرژی بیشتری نسبت به دیوار با شکل دوزنقه دارد. مرادی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۰ به بررسی عددی رفتار دیوار برشی فولادی با ضخامت های مختلف دیوار با بازشو مستطیلی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که وجود بازشو با ابعاد مستطیلی موجب کاهش ظرفیت باربری، سختی و جذب انرژی می شود. همچنین نتایج نشان داد که نسبت سطح بازشو به سطح دیوار تا ۱۵٪ تاثیر زیادی در ظرفیت باربری و جذب انرژی ندارد. همچنین ضخامت دیوار تاثیر مستقیمی بر سختی دیوار دارد به نحوی که قرار گرفتن بازشو در دیوار با ضخامت بیشتر موجب کاهش بیشتر سختی در دیوار می شود. گرجی آذرندریان و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۰ به بررسی رفتار عددی و آزمایشگاهی رفتار هیسترتیک اتصالات در دیوار برشی فولادی با مقاومت کم پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل نشان دادند که اتصالات تاثیر کمی در سختی اولیه دیوار برشی فولادی دارند. همچنین نتایج عددی تطابق خوبی در زمینه پیش بینی کمانش خارج از صفحه و سختی و محل تشکیل مفصل پلاستیک با مدل آزمایشگاهی داشتند. زمانی و خطیبی [۲۰] در سال ۲۰۲۰ به بررسی عددی رفتار دیوار برشی فولادی با بازشوهای دایره ای و بیضوی پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل نشان دادند که استفاده از بازشوی بیضوی با نسبت قطر کوچک به بزرگتر برابر با ۰/۵ ظرفیت باربری را ۱۵ درصد افزایش و سختی، نسبت شکل پذیری و جذب انرژی را به ترتیب ۲۸٪، ۳٪ و ۸٪ افزایش می دهد. همچنین نتایج نشان دادند که در

حالت بیضی با قطر کوچکتر از ۶۰ میلی متر نسب به بازشو دایره ای با همان قطر مقاومت اولیه و نهایی را به ترتیب ۶ و ۱۵ درصد افزایش می دهد.

### ۳- اعتبار سنجی

برای اعتبار سنجی مدل نرم افزاری از مدل آقاین امامی و مفید [۲۱] که تعداد سه نمونه آزمایشگاهی در مقیاس واقعی را تحت آزمایش قرار دادند استفاده شده است. نمونه های آن ها شامل دیوار برشی فولادی ساده، دیوار برشی فولادی کنگره دار افقی و دیوار برشی فولادی کنگره دار قائم بود که تحت بارگذاری بارگذاری چرخه ای قرار داشتند. نتایج آن ها به صورت منحنی های بار-جابجایی چرخه ای و پوش منحنی های چرخه ای ارائه شد. مشخصات هندسی مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین در جداول ۱ تا ۳ خصوصیات مصالح در نظر گرفته شده نشان داده شده است.



شکل ۱: مشخصات هندسی مدل جهت اعتبارسنجی [۱۵].

جدول ۱: مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده در ورق های کنگره دار

Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)	Plastic Strain
185449.44	0.30	207.81	0.000
		313.01	0.039
		357.26	0.077
		386.49	0.111
		466.64	0.300
		457.46	0.322

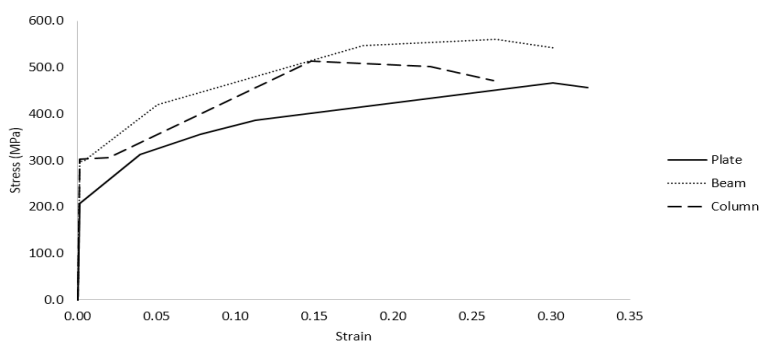
جدول ۲: مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده در ستون ها

Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)	Plastic Strain
185449.44	0.30	302.99	0.000
		306.33	0.018
		513.40	0.147
		502.54	0.222
		471.65	0.262
		302.99	0.000

جدول ۳: مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده در تیرها

Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)	Plastic Strain
182383.00	0.30	297.98	0.000
		299.65	0.003
		419.88	0.049
		546.79	0.179
		560.15	0.264
		541.78	0.300

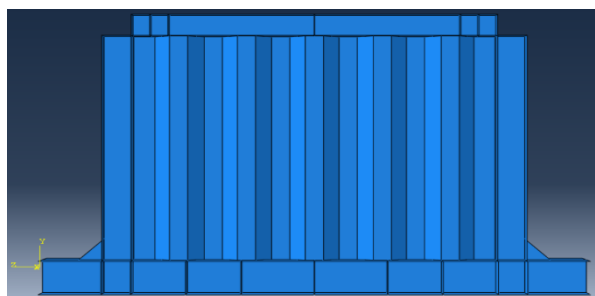
در شکل ۲ منحنی تنش-کرنش برای مصالح فولادی در نظر گرفته شده آورده شده است.



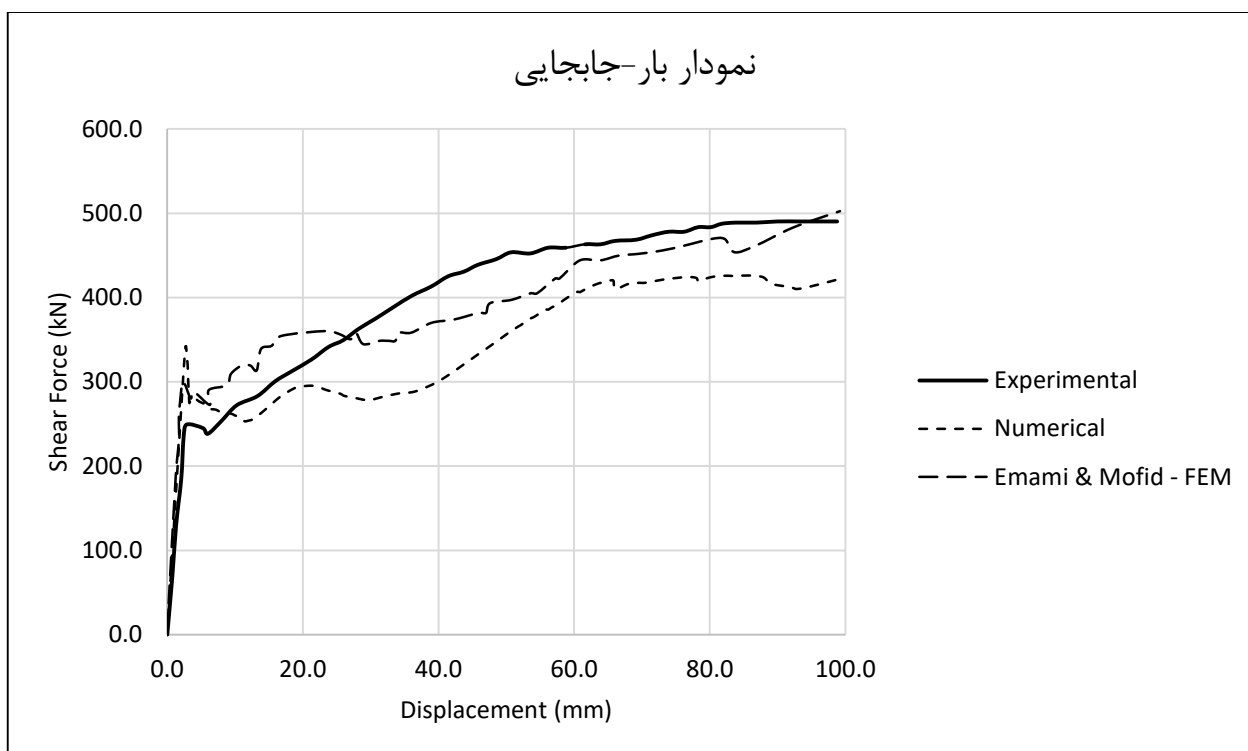
شکل ۲: منحنی تنش-کرنش برای مصالح فولادی [۱۵].

جهت مدل سازی از المان صفحه ای چهارضلعی کاهش یافته با تابع درون یابی خطی که در نرم افزار آباکوس با S4R نام گذاری شده است، استفاده شده است. تحلیل استاتیکی با نرخ بارگذاری ۱ میلی متر بر ثانیه انجام گرفت. اندازه مش بندی ۵۰ میلی متر انتخاب شد. مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس ترتیب در شکل ۳ نشان داده شده است. دو نوع شرط مرزی در مدل سازی در نظر گرفته شده است: شرط مرزی تکیه گاهی که در آن بال تحتانی تیر تکیه گاهی به صورت کاملاً گیردار مقید شده است، و شرط دیگر آنکه جان تیر فوقانی در برابر حرکت خارج از صفحه مقید شده است. در شکل ۴ نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی و FEM مقایسه شده اند. مشاهده می شود که سه منحنی تطابق مناسبی با یکدیگر دارند.

پس از انتخاب نوع المان، اندازه شبکه بندی از مهمترین پارامترها در تحلیل های اجزاء محدودی بوده که به شدت بر روی نتایج تحلیل تأثیرگذار است. در این مبحث به طور معمول با ریزتر کردن شبکه بندی، تغییر در مقادیر یک متغیر میدان را بررسی می کنند. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت مش می توان گفت که اندازه شبکه بندی ۵۰ میلی متر از نظر دقت عددی، زمان تحلیل و حجم فایل تولید شده بهینه بوده، لذا برای مدل های دیگر نیز از اندازه ۵۰ میلی متر برای شبکه بندی استفاده شده است.



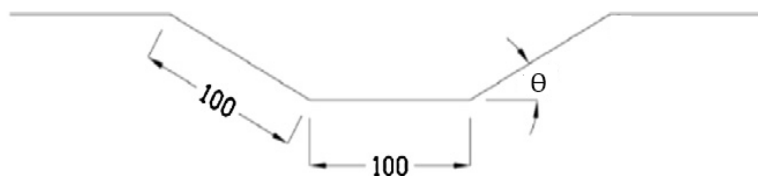
شکل ۳: مدل ساخته شده جهت اعتبارسنجی.



شکل ۴: نتایج اعتبارسنجی.

#### ۴- دیوارهای برشی فولادی کنگره‌دار مورد مطالعه

در این قسمت دیوارهای برشی فولادی کنگره‌دار مورد بررسی معرفی شده‌اند. این دیوارها توسط اجزای مرزی افقی و قائم محصور شده‌اند. مشخصات هندسی ورق فولادی و اجزای مرزی از مرجع [۱۲] گرفته شده است. مقاطع در نظر گرفته شده برای تیرهای فوقانی و تحتانی به ترتیب IPB140 و IPB220 و برای ستون‌ها IPB160 می‌باشد. سخت‌کننده‌هایی نیز در تیرهای فوقانی و تحتانی در نظر گرفته شده‌اند. طول، ارتفاع و ضخامت ورق‌های فولادی کنگره‌دار به ترتیب ۲۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۱/۲۵ میلی‌متر می‌باشد. زاویه ورق کنگره نیز از ۰ تا ۳۰ درجه با گام ۵ درجه متغیر می‌باشد. در مرجع [۲] درصد بازشوها برای دیوار برشی فولادی کنگره‌دار با یک بازشو ۵، ۱۰ و ۲۰ انتخاب شده است، اما در این تحقیق بازشوها با مساحت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد مساحت ورق فولادی کنگره‌دار به صورت یک تا چهار بازشو در نظر گرفته شده است. با توجه به تعداد متغیرها (۷ زاویه کنگره، ۳ درصد بازشو و ۴ برای تعداد بازشو) تعداد مدل‌ها ۸۴ محاسبه شده که اگر ۷ مدل مربوط به بدون بازشو هم لحاظ شود، تعداد کل مدل‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق به عدد ۹۱ می‌رسد. به عنوان نمونه مدل M-V-05-10-1 نشان دهنده مدل دارای کنگره عمودی با زاویه کنگره ۵ درجه با ۱۰ درصد بازشو و ۱ عدد بازشو می‌باشد.

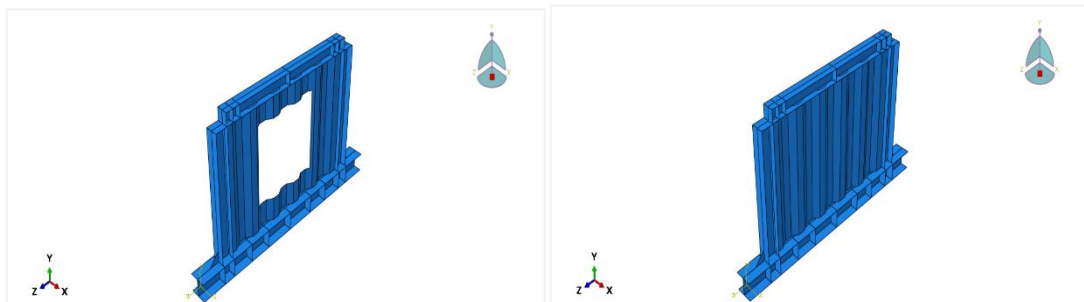


شکل ۵: مشخصات هندسی کنگره.

در شکل‌های ۶ تا ۱۰ شکل سه بعدی پنج مدل نشان داده شده است. شکل ۶ مربوط به مدل با ورق کنگره‌دار بدون بازشو و با زاویه کنگره ۳۰ درجه و با ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۷ نیز مدل دیوار برشی فولادی با ورق کنگره‌دار دارای یک بازشو و با

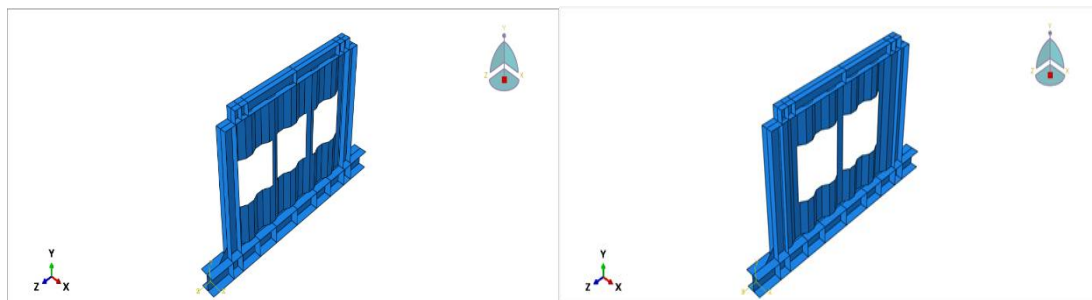


درصد بازشو ۳۰٪ و زاویه کنگره ۳۰ درجه و ضخامت ورق ۱/۲۵ میلی متر نشان داده شده است. مدل شکل ۸ نیز مشابه مدل شکل ۹ است با این تفاوت که درصد بازشو ۳۰٪ در بین دو بازشو تقسیم شده است. در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب مدل های M-V-25-30-3 و M-V-15-20-4 نشان داده شده اند. بازشوها به صورت مربعی فرض شده است، لذا با بدست آوردن مساحت بازشوها و تقسیم آن بر تعداد بازشو، ابعاد بازشو بدست آمده است.



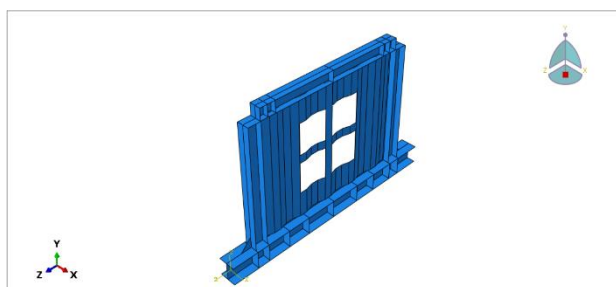
شکل ۷: نمایی از مدل M-V-30-30-1.

شکل ۶: نمایی از مدل M-V-30-0-0.



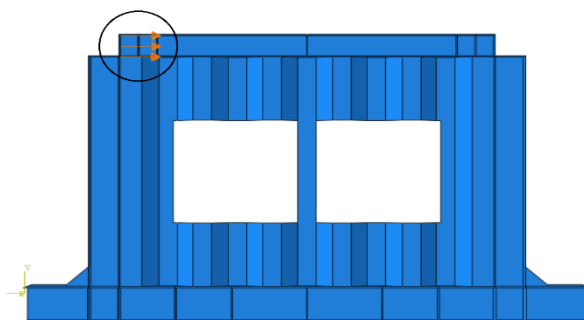
شکل ۹: نمایی از مدل M-V-25-30-3.

شکل ۸: نمایی از مدل M-V-30-30-2.

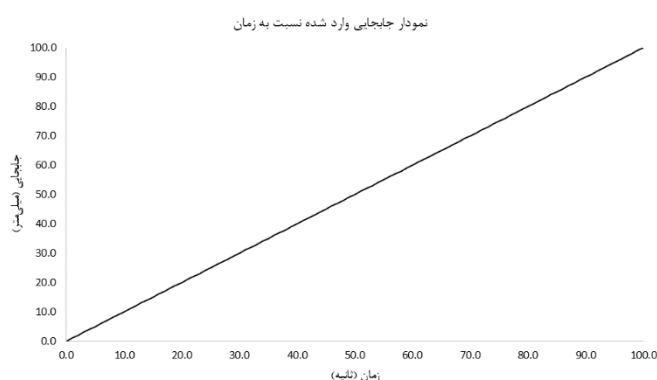


شکل ۱۰: نمایی از مدل M-V-15-20-4.

از مهم ترین موضوعات در هر تحلیل اجزاء محدودی انتخاب نوع المان مورد استفاده است. از المان صفحه ای چهارضلعی کاهش یافته با تابع درون یابی خطی که در نرم افزار آباکوس با S4R نام گذاری شده است، در تحقیق حاضر استفاده شده است. دلیل استفاده از المان های پوسته ای خطی در سرعت بخشیدن به اجرای تحلیل می باشد. با توجه به اینکه از تحلیل بارافزون استفاده شده است، بارگذاری از نوع جابجایی بوده و آهنگ افزایش آن ۱ میلی متر بر ثانیه تا ۱۰۰ میلی متر می باشد. در شکل ۱۱ محل اثر این جابجایی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۲ نمودار جابجایی وارد شده بر حسب زمان نشان داده شده است.



شکل ۱۱: نمایی از مدل M-V-25-30-2.



شکل ۱۲: نمودار جابجایی وارد شده بر حسب زمان.

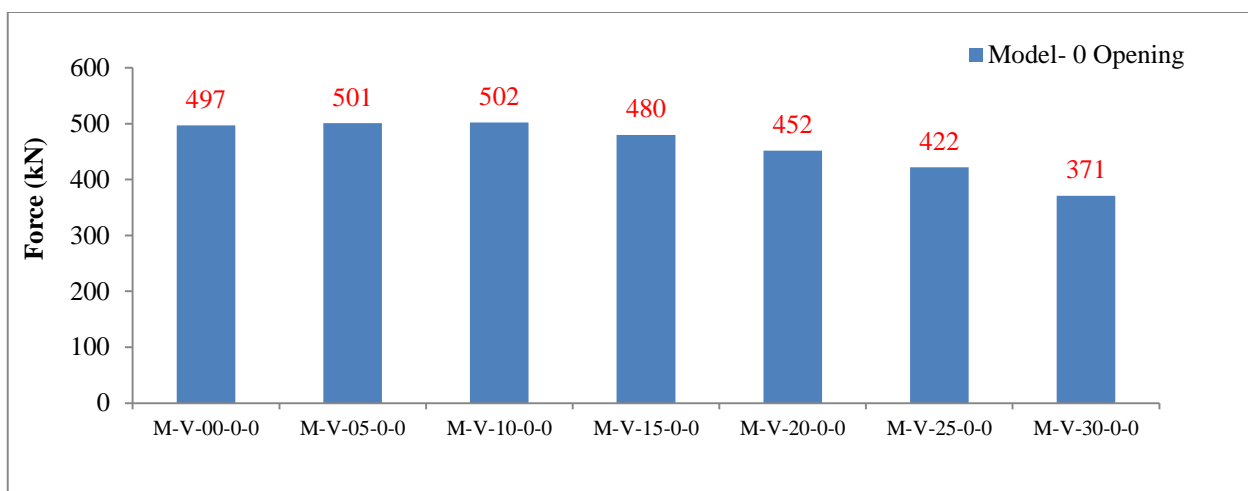
## ۵- نتایج تحلیل

در این بخش به بررسی عملکرد جانبی دیوارهای برشی فولادی کنگره دار پرداخته شده است. منظور از عملکرد جانبی بررسی مقادیر سختی اولیه و ثانویه، مقاومت تسلیم و نهایی و نسبت شکل پذیری می باشد. متغیرهای در نظر گرفته شده در این بخش شامل درصد بازشو (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد)، زاویه کنگره ورق فولادی (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه) و تعداد بازشو (۰، ۱، ۲، ۳ و ۴) می باشد. نمودارهای مقاومت، سختی و شکل پذیری برای مدل های بدون بازشو بر اساس زاویه کنگره در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۳ مقاومت نهایی ( $F_u$ ) نیز با افزایش زاویه کنگره تا ۱۰ درجه افزایش ناچیزی یافته اما پس از آن کاهش می یابد. مقدار کاهش قابل توجه می باشد، به طوری که ملاحظه می شود با افزایش زاویه کنگره از ۱۰ درجه به ۳۰ درجه، مقاومت نهایی ۲۶٪ کاهش می یابد. همچنین مقدار سختی اولیه از زاویه صفر تا ۲۰ درجه ۸۰٪ کاهش می یابد اما پس از آن از زاویه ۲۰ تا ۳۰ درجه ۴۱ درصد افزایش می یابد. مقدار سختی ثانویه نیز از زاویه کنگره ۰ تا ۳۰ درجه به مقدار ۷۰٪ کاهش می یابد. مقدار شکل پذیری دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ درجه، در حدود ۵۱٪ دیوار برشی بدون کنگره (دیوار برشی ساده) می باشد. همچنین با مقایسه مدل بدون کنگره و مدل با زاویه کنگره ۲۵ درجه مشاهده می شود که شکل پذیری به میزان ۷۲٪ دچار کاهش می شود. در رابطه ۱ شکل پذیری آورده شده است.

$$\mu = (\Delta_u / \Delta_y) \quad (1)$$

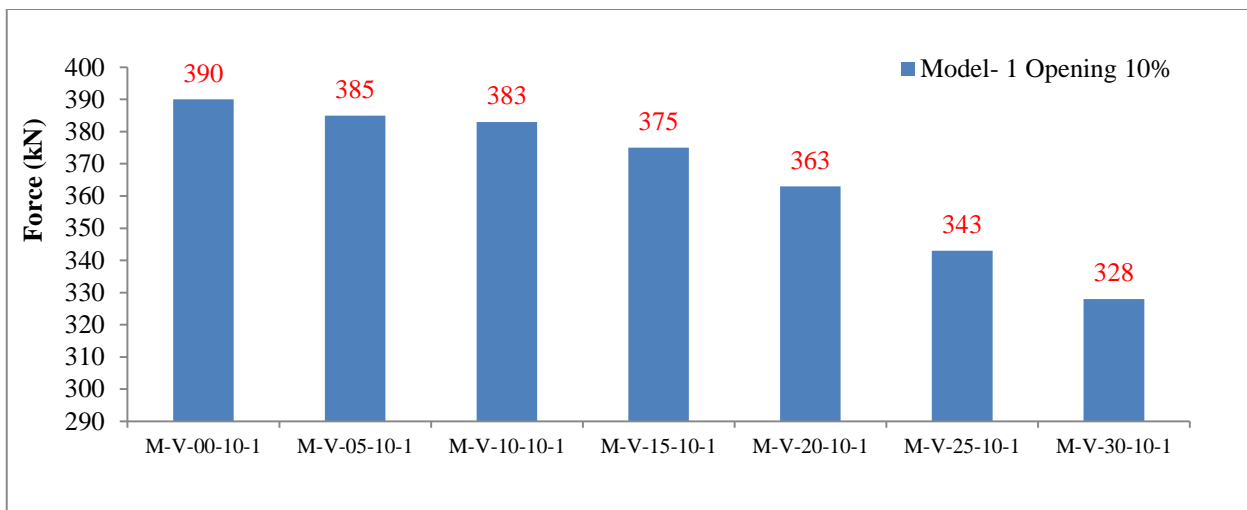
که در این رابطه  $\Delta_u$  برابر با تغییر مکان نهایی و  $\Delta_y$  تغییر مکان تسلیم می باشد.



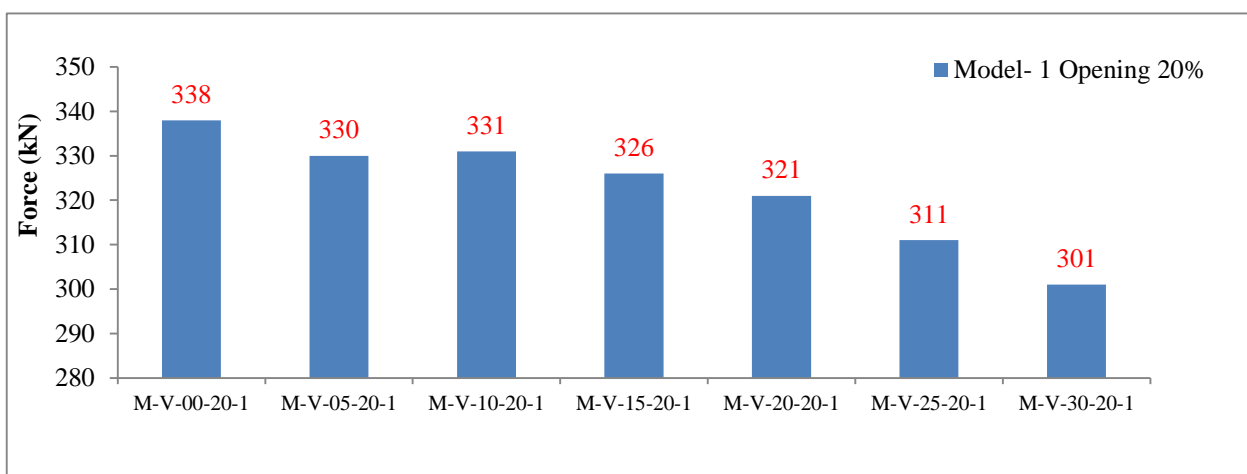
شکل ۱۳: نمودار مقاومت برای مدل بدون بازشو، متغیر زاویه کنگره.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با یک بازشو (۱۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کنگره‌دار کردن دیوار برشی فولادی با زاویه کنگره ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه مقدار مقاومت تسلیم به میزان ۸٪ کاهش می‌یابد اما در زاویه کنگره‌های بیشتر افزایش می‌یابد، بیشترین افزایش به میزان ۴۱٪ و در زاویه کنگره ۳۰ درجه اتفاق می‌افتد. مقاومت نهایی نیز با افزایش زاویه کنگره، روندی کاملاً کاهشی را از خود نشان می‌دهد. بیشترین مقدار کاهش مربوط به زاویه کنگره ۳۰ درجه و به مقدار ۱۶٪ می‌باشد. همچنین در مدل‌های یک بازشو با درصد بازشو ۱۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۲۸٪ کاهش می‌یابد. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۷۲٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۴۰٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۵۴٪ کاهش یافته که نسبت به مدل بدون بازشو ۱۸٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۴۳٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۲۱٪ کاهش یافته است.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با یک بازشو (۲۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۳۳۸ کیلو نیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۰ به مقدار ۳۰۱ کیلو نیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ درجه کاهش یافته است، که این کاهش به مقدار ۱۱ درصد می‌باشد. همچنین در مدل‌های یک بازشو با درصد بازشو ۲۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل یک بازشو با درصد بازشو ۱۰، ۳۵٪ و نسبت به مدل بدون بازشو ۵۳٪ کاهش می‌یابد. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۶۱٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل یک بازشو با درصد بازشو ۱۰، ۹٪ و نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۴۵٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۲۲٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل یک بازشو با درصد بازشو ۱۰، ۸٪ و نسبت به مدل بدون بازشو ۱۱٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۱۹٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل یک بازشو با درصد بازشو ۱۰، ۸٪ و نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۱۴٪ کاهش یافته است.



شکل ۱۴: نمودار مقاومت برای مدل‌های با یک بازشو (۱۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.

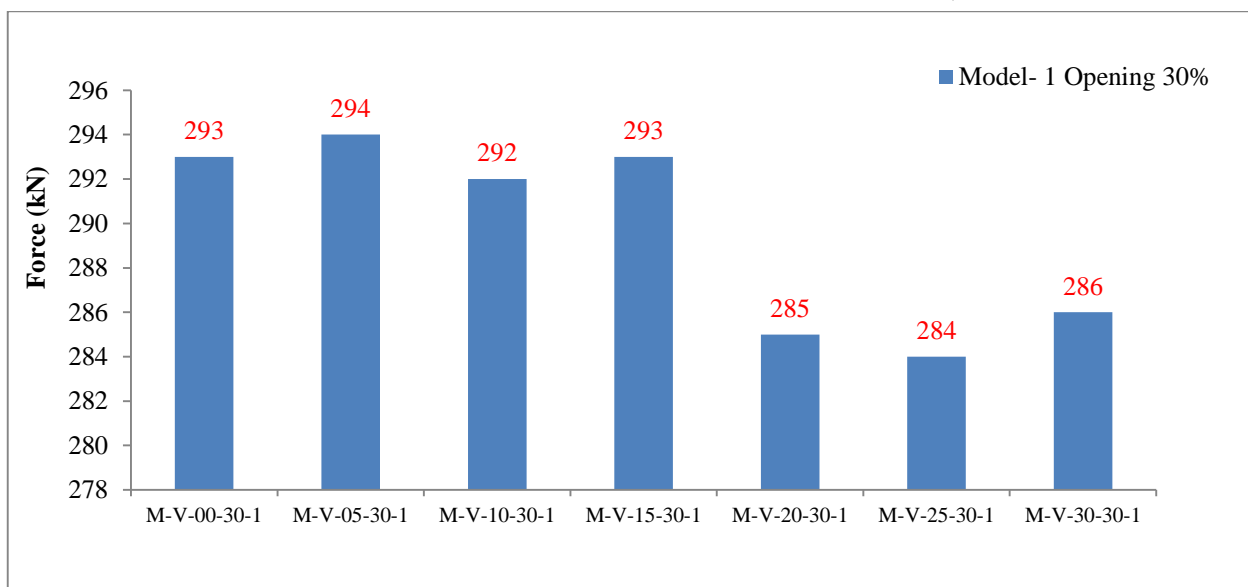


شکل ۱۵: نمودار مقاومت برای مدل‌های با یک بازشو (۲۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.

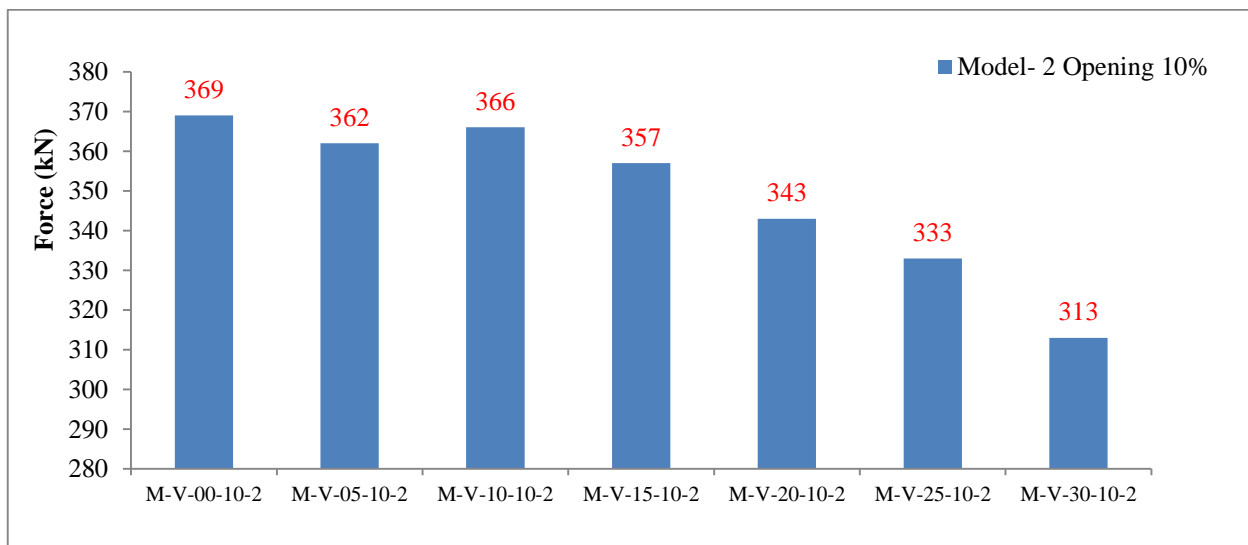
نمودار مقاومت برای مدل‌های با یک بازشو (۳۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۲۹۳ کیلو نیوتن در دیوار برشی باز زاویه کنگره ۰ به مقدار ۲۸۶ کیلو نیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ درجه کاهش یافته است، که این کاهش به مقدار ۲ درصد و نسبت به مدل بدون بازشو ۲۳٪ کاهش یافته است. همچنین در مدل‌های یک بازشو با درصد بازشو ۳۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل یک بازشو با درصد بازشوهای ۲۰ و ۱۰ به ترتیب ۱۵٪ و ۴۵٪ و نسبت به مدل بدون بازشو ۶۰٪ کاهش می‌یابد. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۷۴٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل یک بازشو با درصد بازشو ۲۰ و ۱۰ به ترتیب ۴۳٪ و ۴۸٪ و نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۶۸٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۴۶٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل یک بازشو با درصد بازشو ۲۰ و ۱۰ به ترتیب ۱۷٪ و ۹٪ و نسبت به مدل بدون بازشو ۲۶٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۵۵٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل یک بازشو با درصد بازشو ۲۰ و ۱۰ به ترتیب ۳۲٪ و ۲۶٪ و نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۴۱٪ کاهش یافته است.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با دو بازشو (۱۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۱۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۳۶۹ کیلو نیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۳۱۳ کیلو نیوتن رسیده که به میزان ۱۵٪ درصد

کاهش و نسبت به حالت با یک بازشو ۱۰ درصد ۵ درصد کاهش یافته است. همچنین در مدل های دو بازشو با درصد بازشو ۱۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل یک بازشو ۱۹٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۶۴٪ کاهش یافته که نسبت به حالت یک بازشو ۶٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۶۲٪ کاهش یافته که نسبت به مدل یک بازشو ۱۹٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۴۷٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل یک بازشو ۵٪ کاهش یافته است.



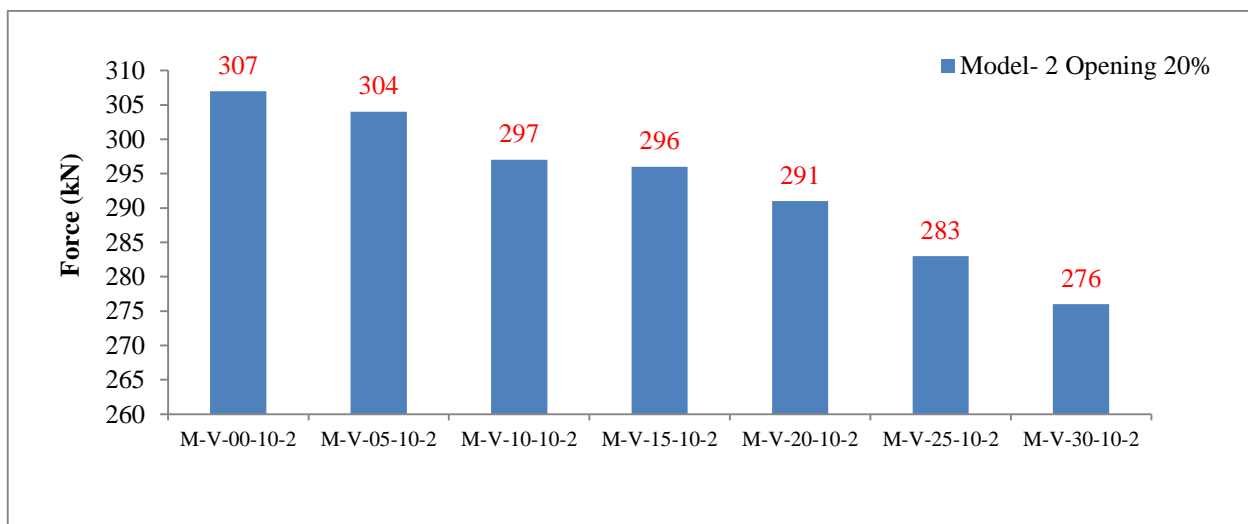
شکل ۱۶: نمودار مقاومت برای مدل‌های با یک بازشو (۳۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره



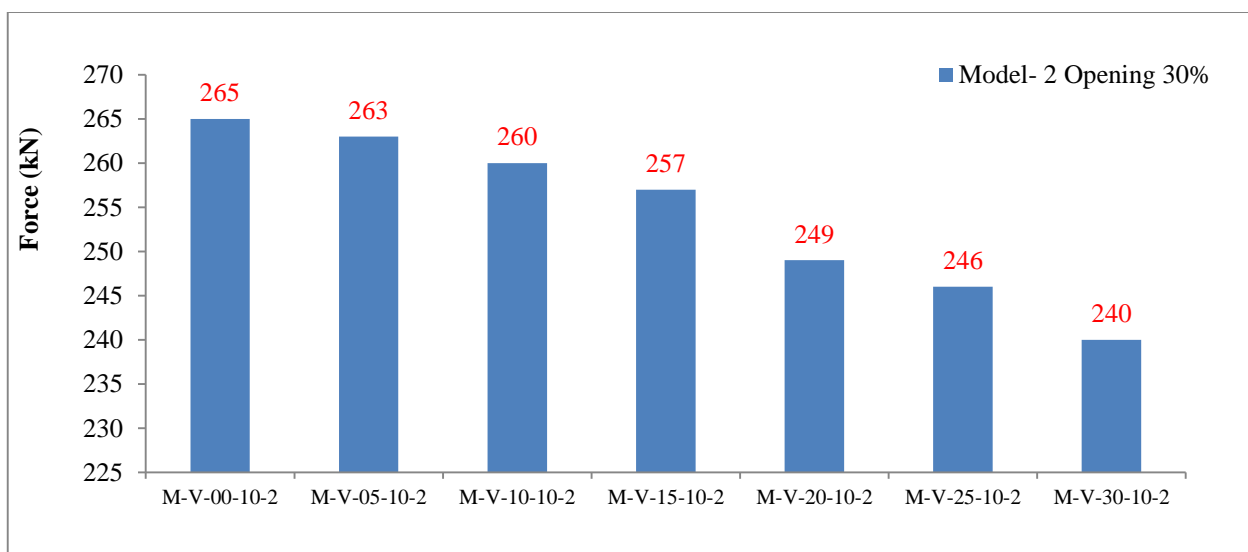
شکل ۱۷: نمودار مقاومت برای مدل‌های با دو بازشو (۱۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با دو بازشو (۲۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۳۰۷ کیلونیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۲۷۶ کیلونیوتن رسیده که به میزان ۱۰٪ درصد کاهش و نسبت به حالت با یک بازشو ۲۰ درصد ۹ درصد کاهش یافته است. همچنین در مدل های دو بازشو با درصد بازشو ۲۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل یک بازشو ۱۹٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۵۵٪ کاهش یافته که نسبت به حالت یک بازشو ۵٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره

۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۵۶٪ کاهش یافته که نسبت به مدل یک باز شو ۲۱٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۴۲٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل یک باز شو ۷٪ کاهش یافته است. نمودار مقاومت برای مدل‌های با دو باز شو (۳۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مشاهده می شود مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۲۶۵ کیلونیوتن در دیوار برشی باز زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۲۴۰ کیلونیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ درجه کاهش یافته است، که این کاهش به مقدار ۹ درصد و نسبت به مدل یک باز شو ۱۰٪ کاهش یافته است. همچنین در مدل های دو باز شو با درصد باز شو ۳۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل دو باز شو با درصد باز شوهای ۲۰ و ۱۰ به ترتیب ۱۷٪ و ۴۴٪ و نسبت به مدل بدون باز شو ۶۸٪ کاهش می یابد. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۲۲٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو باز شو با درصد باز شو ۲۰ و ۱۰ به ترتیب ۳۱٪ و ۱۵٪ و نسبت به حالت مدل بدون باز شو ۲۴٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۲۱٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو باز شو با درصد باز شو ۲۰ و ۱۰ به ترتیب ۱۸٪ و ۲۲٪ و نسبت به مدل بدون باز شو ۲۴٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۹٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو باز شو با درصد باز شو ۲۰ و ۱۰ به ترتیب ۱۹٪ و ۲۵٪ و نسبت به حالت مدل بدون باز شو ۳۵٪ کاهش یافته است.



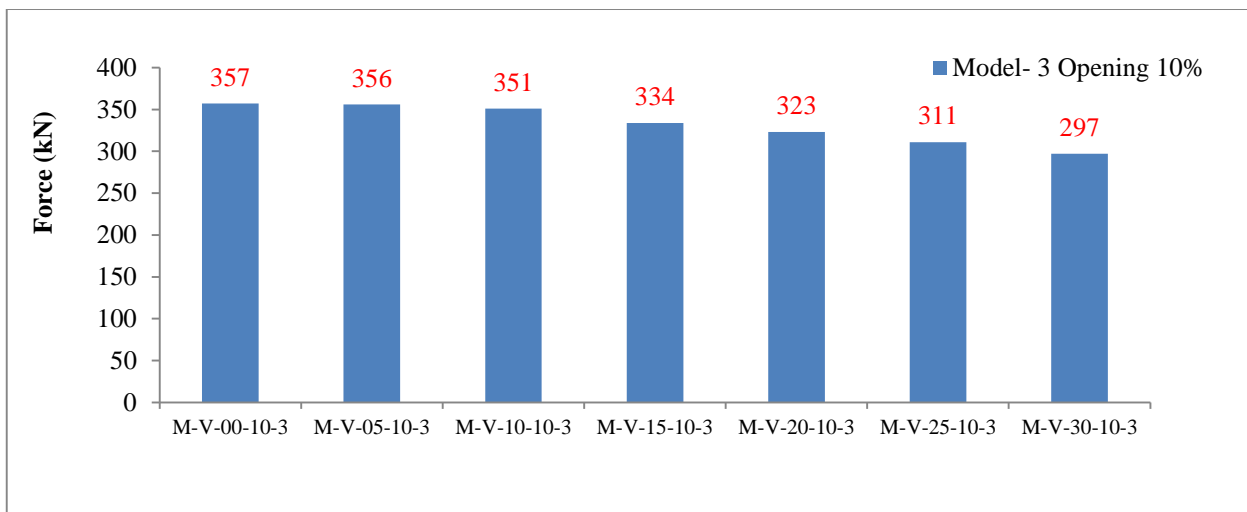
شکل ۱۸: نمودار مقاومت برای مدل‌های با دو باز شو (۲۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.



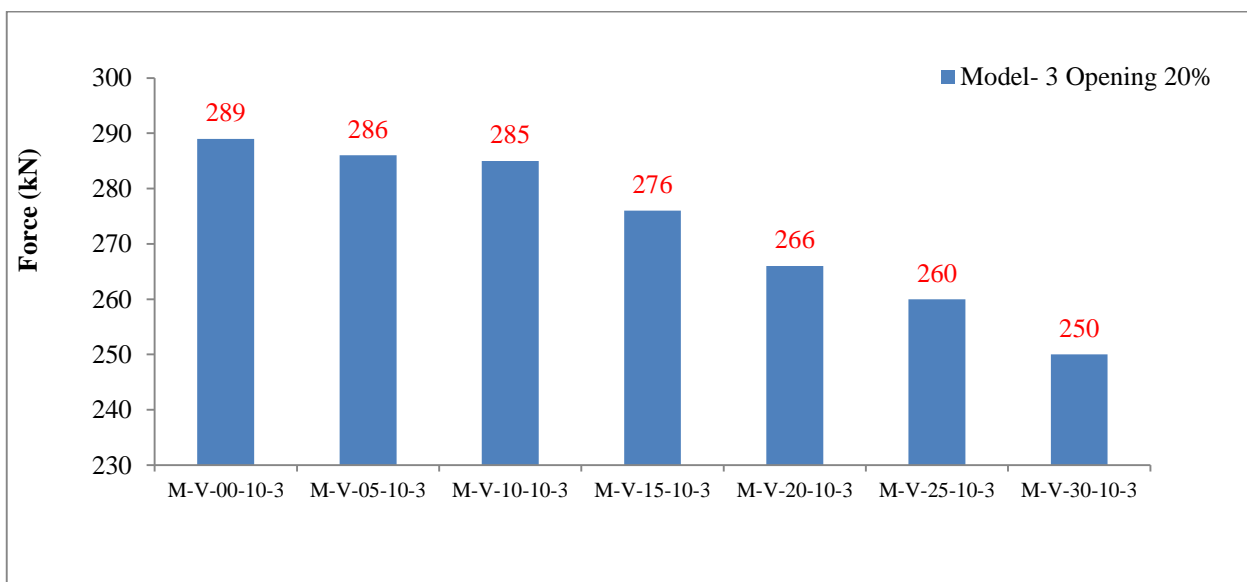
شکل ۱۹: نمودار مقاومت برای مدل‌های با دو بازشو (۳۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با سه بازشو (۱۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۲۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۳۵۷ کیلونیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۲۹۷ کیلونیوتن رسیده که به میزان ۱۷٪ درصد کاهش و نسبت به حالت با یک بازشو ۱۰ درصد ۸ درصد کاهش یافته است. همچنین در مدل‌های سه بازشو با درصد بازشو ۱۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو به ترتیب ۱۳٪ و ۳۶٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۶۴٪ کاهش یافته که نسبت به حالت دو و یک بازشو به ترتیب ۲۸٪ و ۳۴٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۵۸٪ کاهش یافته که نسبت به مدل دو و یک بازشو به ترتیب ۲۵٪ و ۳۱٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۳۱٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو به ترتیب ۱۳٪ و ۱۵٪ افزایش یافته است.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با سه بازشو (۲۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۲۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۲۸۹ کیلونیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۲۵۰ کیلونیوتن رسیده که به میزان ۱۳٪ درصد کاهش و نسبت به حالت با یک بازشو ۲۰ درصد ۱۴ درصد کاهش یافته است. همچنین در مدل‌های سه بازشو با درصد بازشو ۲۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو به ترتیب ۱۳٪ و ۲۸٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۲۹٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو به ترتیب ۱۸٪ و ۲۴٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۴۲٪ کاهش یافته که نسبت به مدل دو و یک بازشو به ترتیب ۱۹٪ و ۲۳٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۳۰٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو ۱۴٪ و ۱۷٪ افزایش یافته است.



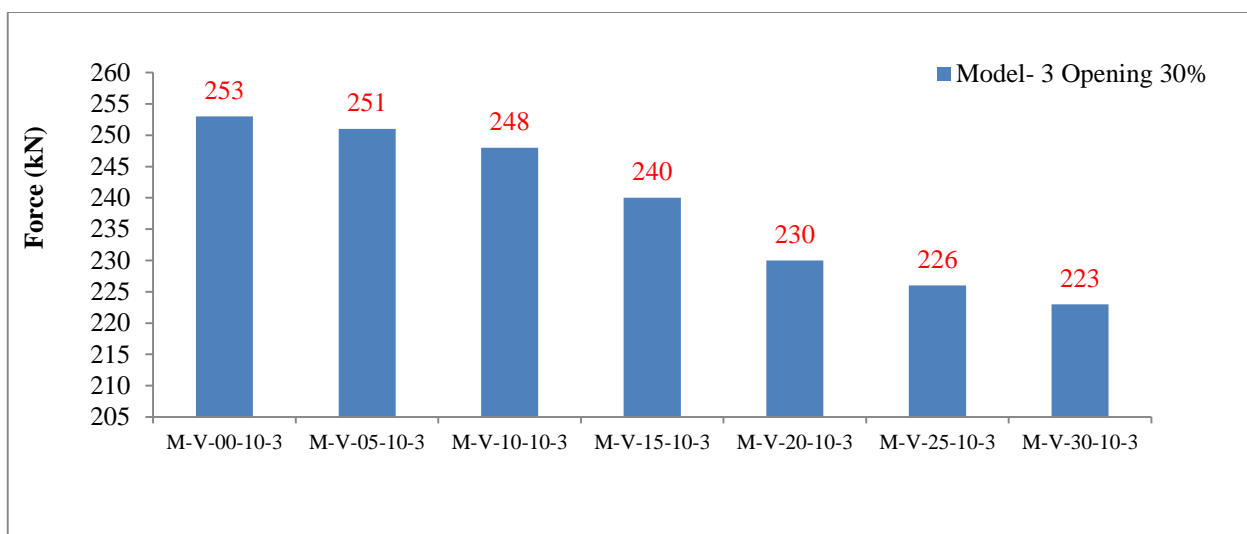
شکل ۲۰: نمودار مقاومت برای مدل‌های با سه بازشو (۱۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.



شکل ۲۱: نمودار مقاومت برای مدل‌های با سه بازشو (۲۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با سه بازشو (۳۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۲۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۲۵۳ کیلونیوتن در دیوار برشی باز زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۲۲۳ کیلونیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ درجه کاهش یافته است، که این کاهش به مقدار ۱۲ درصد و نسبت به مدل یک بازشو ۱۴٪ کاهش یافته است. همچنین در مدل‌های سه بازشو با درصد بازشو ۳۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو با درصد بازشوهای ۳۰ به ترتیب ۱۷٪ و ۳۳٪ و نسبت به مدل بدون بازشو ۷۳٪ کاهش می‌یابد. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۴۰٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو با درصد بازشو ۳۰ به ترتیب ۳۶٪ و ۴۰٪ و نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۵۱٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۲۶٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو با درصد بازشو ۳۰ به ترتیب ۳٪ و ۱۶٪ و نسبت به مدل بدون بازشو ۲۲٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۱۹٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل دو و یک بازشو با درصد بازشو ۳۰ به ترتیب ۴٪ و ۳۸٪ افزایش و نسبت به حالت مدل بدون بازشو ۴۳٪ افزایش یافته است.

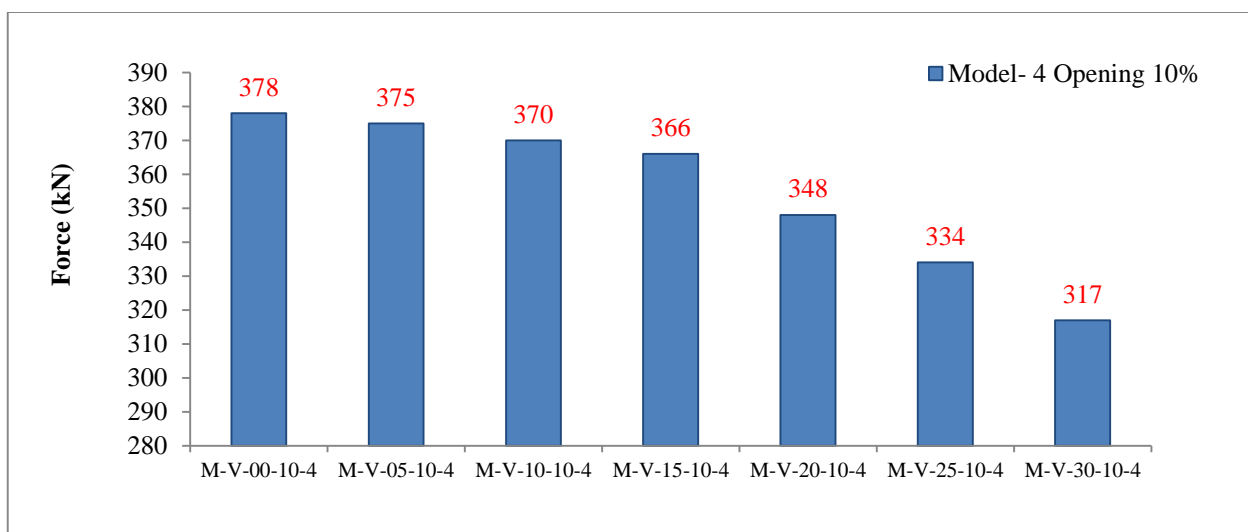




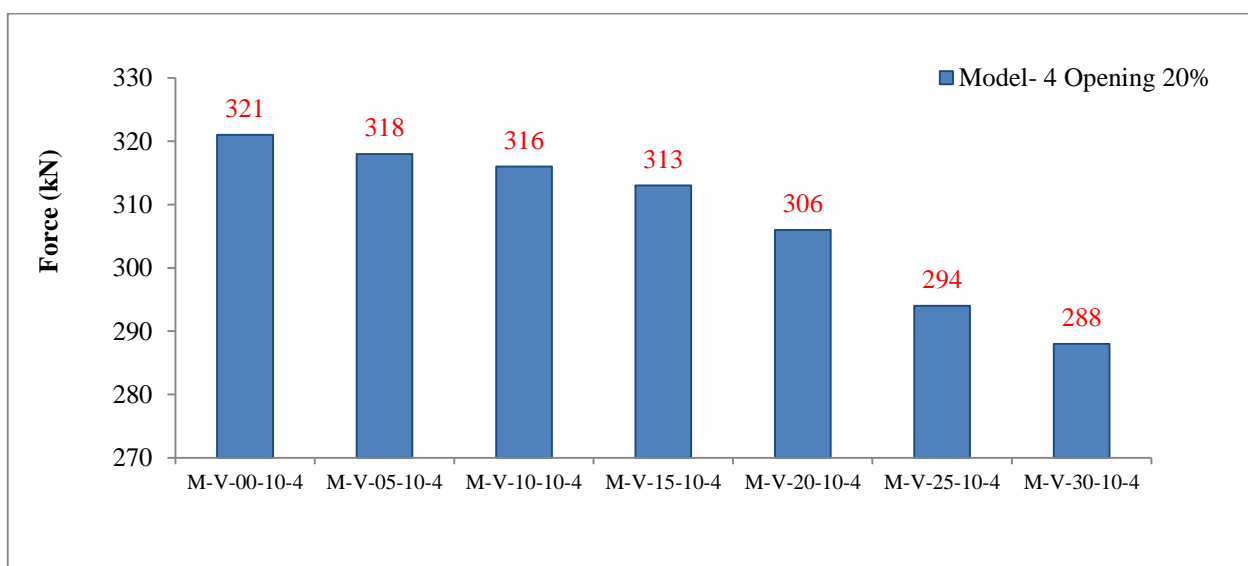
شکل ۲۲: نمودار مقاومت برای مدل‌های با سه بازشو (۳۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با چهار بازشو (۱۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۲۳ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۳۷۸ کیلونیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۳۱۷ کیلونیوتن رسیده که به میزان ۱۶٪ درصد کاهش و نسبت به حالت با یک بازشو ۱۰ درصد ۱۱ درصد کاهش یافته است. همچنین در مدل‌های چهار بازشو با درصد بازشو ۱۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۲۴٪، ۲۷٪ و ۳۸٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۶۹٪ کاهش یافته که نسبت به حالت سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۲۴٪، ۳۰٪ و ۳۸٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۴۹٪ کاهش یافته که نسبت به مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۲۷٪، ۳۴٪ و ۴۶٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۴۶٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۶٪، ۱۹٪ و ۲۶٪ افزایش یافته است.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با چهار بازشو (۲۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۲۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۳۲۱ کیلونیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۲۸۸ کیلونیوتن رسیده که به میزان ۱۰٪ درصد کاهش و نسبت به حالت با یک بازشو ۲۰ درصد ۸ درصد کاهش یافته است. همچنین در مدل‌های چهار بازشو با درصد بازشو ۲۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۲۱٪، ۲۳٪ و ۳۲٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۴۷٪ کاهش یافته که نسبت به حالت سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۱۸٪، ۲۵٪ و ۳۳٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۴۲٪ کاهش یافته که نسبت به مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۲۲٪، ۲۸٪ و ۳۴٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۲۸٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۵٪، ۱۴٪ و ۱۹٪ افزایش یافته است.

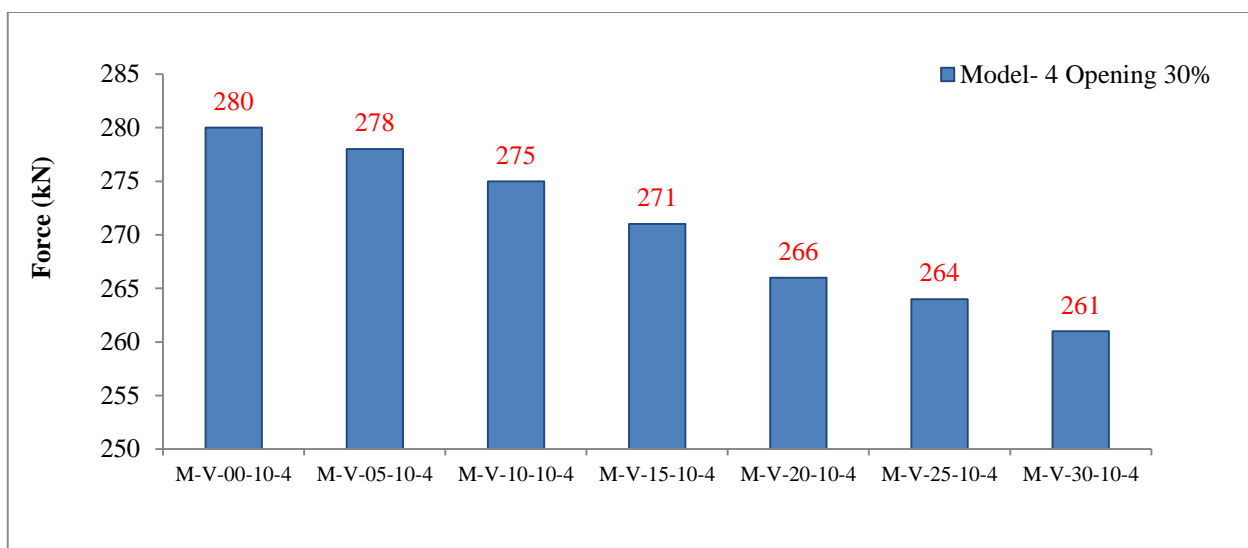


شکل ۲۳: نمودار مقاومت برای مدل‌های با چهار بازشو (۱۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.



شکل ۲۴: نمودار مقاومت برای مدل‌های با چهار بازشو (۲۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.

نمودار مقاومت برای مدل‌های با چهار بازشو (۳۰ درصد) بر اساس زاویه کنگره در شکل ۲۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که مقدار مقاومت نهایی از مقدار ۲۸۰ کیلونیوتن در دیوار برشی با زاویه کنگره ۳۰ به مقدار ۲۶۱ کیلونیوتن رسیده که به میزان ۷٪ درصد کاهش و نسبت به حالت با یک بازشو ۳۰ درصد ۴ درصد کاهش یافته است. همچنین در مدل‌های چهار بازشو با درصد بازشو ۳۰، مقدار سختی اولیه در حالت زاویه کنگره ۰ نسبت به حالت مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۱۸٪، ۲۰٪ و ۲۸٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار سختی اولیه ۴۱٪ کاهش یافته که نسبت به حالت سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۱۷٪، ۲۳٪ و ۳۱٪ کاهش یافته است. سختی ثانویه نیز در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ به مقدار ۳۷٪ کاهش یافته که نسبت به مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۱۹٪، ۲۶٪ و ۳۱٪ کاهش یافته است. در حالت زاویه کنگره ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۰ مقدار شکل پذیری ۲۸٪ کاهش یافته که نسبت به حالت مدل سه و دو و یک بازشو به ترتیب ۹٪، ۱۲٪ و ۱۷٪ افزایش یافته است.



شکل ۲۵: نمودار مقاومت برای مدل‌های با چهار بازشو (۳۰ درصد)، متغیر زاویه کنگره.

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی عملکرد جانبی دیوارهای برشی فولادی کنگره‌دار با یک، دو، سه و چهار بازشو پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر به شرح زیر است:

۱- با افزایش زاویه کنگره از ۰ تا ۳۰ درجه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با یک بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۱۱، ۱۶ و ۲۳ درصد نسبت به حالت بدون بازشو مقاومت نهایی کاهش پیدا کرده است. دلیل این کاهش افزایش کمناش خارج صفحه ورق می‌باشد. همچنین مقدار سختی اولیه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با یک بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۶۱، ۷۲ و ۷۴ درصد نسبت به حالت بدون بازشو کاهش پیدا کرده است. دلیل این کاهش افزایش کمناش خارج صفحه ورق می‌باشد. همچنین مقدار سختی ثانویه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با یک بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۲۱، ۲۱ و ۲۶ درصد نسبت به حالت بدون بازشو کاهش پیدا کرده است. دلیل این کاهش افزایش کمناش خارج صفحه ورق می‌باشد. همچنین مقدار شکل پذیری در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با یک بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۲۴، ۲۱ و ۴۱ درصد نسبت به حالت بدون بازشو کاهش پیدا کرده است.

۲- با افزایش زاویه کنگره از ۰ تا ۳۰ درجه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با دو بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۹، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۵، ۹ و ۱۰ درصد مقاومت نهایی کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار سختی اولیه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با دو بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۵۵، ۶۲ و ۶۲ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۲۱، ۲۱ و ۲۴ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار شکل پذیری در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با دو بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴۲، ۴۷ و ۳۹ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۷، ۵ و ۱۵ درصد کاهش پیدا کرده است.

۳- با افزایش زاویه کنگره از ۰ تا ۳۰ درجه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با سه بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۱۷،۱۳ و ۱۲ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۸،۱۴ و ۱۲ درصد مقاومت نهایی کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار سختی اولیه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با سه بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴،۲۹ و ۴۰ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴،۲۴ و ۴۰ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار سختی ثانویه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با سه بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۵۸،۴۲ و ۲۶ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۳۱،۲۳ و ۲۲ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار شکل پذیری در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با سه بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۳۱،۳۰ و ۱۹ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۵،۱۷ و ۳۸ به ترتیب ۱۵،۱۷ و ۳۸ درصد افزایش پیدا کرده است.

۴- با افزایش زاویه کنگره از ۰ تا ۳۰ درجه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با چهار بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۱۶،۱۰ و ۷ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۱۱،۸ و ۴ درصد مقاومت نهایی کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار سختی اولیه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با چهار بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۶۹،۴۷ و ۴۱ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۳۸،۳۲ و ۳۱ درصد سختی اولیه کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار سختی ثانویه در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با چهار بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴۹،۴۲ و ۳۷ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴۶،۳۴ و ۳۱ درصد سختی اولیه کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار شکل پذیری در حالت مدل دیوار برشی فولادی کنگره دار با چهار بازشو با درصدهای ۱۰،۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴۶،۲۸ و ۲۸ درصد نسبت به حالت یک بازشو برای بازشو با درصدهای ۱۵،۱۷ و ۳۸ به ترتیب ۲۶،۱۹ و ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده است.

## مراجع

- [1] Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C. E., & Kharrazi, M. H. (2005). Shear analysis and design of ductile steel plate walls. *Journal of Structural Engineering*, 131(6), 878-889.
- [2] Farzampour, A., Laman, J. A., & Mofid, M. (2015). Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 258-268.
- [3] Sayed-Ahmed, E. Y. (2001). Behaviour of steel and (or) composite girders with corrugated steel webs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(4), 656-672.
- [4] Gholizadeh, M., & Yadollahi, Y. (2012). Comparing steel plate shear wall behavior with simple and corrugated plates. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 147, pp. 80-85). Trans Tech Publications Ltd.
- [5] Emami, F., Mofid, M., & Vafai, A. (2013). Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *Engineering Structures*, 48, 750-762.
- [6] Alavi, E., & Nateghi, F. (2013). Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation. *Journal of Constructional Steel Research*, 89, 9-20.
- [7] Farzampour, A., & Yekrangnia, M. (2014). ON THE BEHAVIOR OF CORRUGATED STEEL SHEAR WALLS WITH AND WITHOUT OPENINGS. In *Second European conference on earthquake engineering and seismology*.
- [8] Hosseinpour, E., Baharom, S., & Yadollahi, Y. (2015). Evaluation of steel shear walls behavior with sinusoidal and trapezoidal corrugated plates. *Advances in Civil Engineering*, 2015.
- [9] Sabouri-Ghomi, S., Mamazizi, S., & Alavi, M. (2015). An investigation into linear and nonlinear behavior of stiffened steel plate shear panels with two openings. *Advances in Structural Engineering*, 18(5), 687-700.
- [10] Ding, Y., Deng, E. F., Zong, L., Dai, X. M., Lou, N., & Chen, Y. (2017). Cyclic tests on corrugated steel plate shear walls with openings in modularized-constructions. *Journal of constructional steel research*, 138, 675-691.
- [11] Q. Zhao, J. Sun, Y. Li, and Z. Li, "Cyclic analyses of corrugated steel plate shear walls," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 26, no. 16, p. e1351, 2017.

- [12] Ashrafi, H. R., Beiranvand, P., Pouraminian, M., & Moayeri, M. S. (2018). Examining the impact of sheet placement and changes in waves characteristics on behavior of wavy steel shear wall. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00180.
- [13] Cao, Q., & Huang, J. (2018). Experimental study and numerical simulation of corrugated steel plate shear walls subjected to cyclic loads. *Thin-Walled Structures*, 127, 306-317.
- [14] Tong, J. Z., & Guo, Y. L. (2018). Shear resistance of stiffened steel corrugated shear walls. *Thin-Walled Structures*, 127, 76-89.
- [15] Farzampour, A., I. Mansouri, C.-H. Lee, H.-B. Sim, and J. W. Hu. (2018). Analysis and design recommendations for corrugated steel plate shear walls with a reduced beam section. *Thin-Walled Structures*, vol. 132, pp. 658-666.
- [16] Farzampour, A., Mansouri, I., & Hu, J. W. (2018). Seismic behavior investigation of the corrugated steel shear walls considering variations of corrugation geometrical characteristics. *International Journal of Steel Structures*, 18(4), 1297-1305.
- [17] Ghamari, A., Akbarpour, A., & Ghanbari, A. (2019). Improving behavior of semi-supported steel plate shear walls. *Journal of Central South University*, 26(10), 2891-2905.
- [18] Moradi, M. J., Roshani, M. M., Shabani, A., & Kioumarsi, M. (2020). Prediction of the Load-Bearing Behavior of SPSW with Rectangular Opening by RBF Network. *Applied Sciences*, 10(3), 1185.
- [19] Azandariani, M. G., Gholhaki, M., & Kafi, M. A. (2020). Experimental and numerical investigation of low-yield-strength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading. *Engineering Structures*, 203, 109866.
- [20] Zamani Beydokhti, E., & Khatibi, H. (2020). Improving Cyclic Behavior of Steel Plate Shear Walls with Elliptical Perforations. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 53(1), 89-102.
- [21] Emami, F., & Mofid, M. (2014). On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), 94-104.