



## بررسی پارامتری عملکرد چرخه ای مهاربندهای کمانش تاب با هسته های متفاوت

وحید صابری<sup>۱\*</sup>، حمید صابری<sup>۲</sup>، عباسعلی صادقی<sup>۲</sup> و سیده وحیده هاشمی<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیر انتفاعی ایوان کی، سمنان، ایران (s.aberi.vahid@gmail.com).

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیر انتفاعی ایوان کی، سمنان، ایران.

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۲۳)

### چکیده

مهاربند کمانش تاب (BRB) نوعی میراگر با قابلیت استهلاک انرژی بالا است. این میراگر شامل هسته‌ی فولادی لاغر، پوشش بتنی که جهت نگهداری هسته‌ی فولادی به صورت پیوسته و جلوگیری از کمانش آن تحت فشار محوری طرح شده، و لایه‌ای میانی که مانع از اندرکنش‌های ناخواسته بین هسته‌ی فولادی و غلاف بتنی می‌شود، می‌باشد. قاب‌های مهاربندی شده‌ای که از BRB استفاده می‌کنند، به عنوان قاب‌های مهاربندی شده‌ی کمانش تاب، شناخته می‌شوند که مزیت‌های فراوانی در مقایسه با قاب‌های مهاربندی معمولی دارند. در این تحقیق، اثر شکل هندسی و تعداد سوراخ در هسته‌ی مهاربند کمانش تاب از طریق شبیه‌سازی عددی با روش اجزا محدودی مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد ۶ نوع هسته‌ی دارای سوراخ مستطیل و دایره‌ای شکل با مساحت‌های برابر به صورت بدون سوراخ و دارای یک، سه و پنج سوراخ با جزئیات کامل در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و نتایج حاصله در قالب مدها خرابی، شدت خسارات و نیز منحنی‌های هیستریزیس مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای اطمینان از روش و فرضیات مدل‌سازی، یک نمونه‌ی آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. نتایج این مطالعه حاکی از تأثیر قابل ملاحظه‌ی اثر تعداد بیشتر سوراخ و استفاده از سوراخ دایره‌ای شکل به جای مستطیل شکل بر عملکرد چرخه‌ای مهاربندهای کمانش تاب می‌باشد.

### کلمات کلیدی

مهاربند کمانش تاب، هسته‌ی مهاربند، شکل هندسی، سوراخ، مد خرابی، منحنی هیستریزیس.



# The Parametric Investigation of Cyclic Performance of the Buckling Restrained Braces with Different Cores

Vahid Saberi <sup>1\*</sup>, Hamid Saberi <sup>2</sup>, Abbasali Sadeghi <sup>3</sup>, Seyede Vahide Hashemi<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran  
(saberi.vahid@gmail.com).

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran.

<sup>3</sup> Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

<sup>4</sup> Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

(Date of received: 10/06/2020, Date of accepted: 13/09/2020)

## ABSTRACT

*The Buckling Restrained Brace (BRB) is a type of high energy dissipation damper. The damper includes a thin steel core, a concrete cover designed to maintain the steel core and prevent it from buckling under axial compression, and a middle layer that prevents unwanted interactions between the steel brace core and the concrete sheath. Braced frames that use the BRB are known as buckling restrained braced frames, which have many advantages over conventional braced frames. In this study, the effect of geometric shape and number of holes on the core of the buckling restrained brace has been investigated by numerical simulation with finite element method. Six brace core types with rectangular and circular shaped with equal area with and without holes. The holes are placed one, three and five with full details in ABAQUS software and results in terms of failure modes, severity of damage and Hysteresis curve have been studied. To verify the modeling method and assumptions, an experimental sample is verified. The results of this study indicate the significant effect of more holes and the use of circular rather than rectangular holes on the cyclic performance of buckling restrained brace.*

## Keywords:

*Buckling Restrained Brace, Brace Core, Geometric Shape, Hole, failure Mode, Hysteresis Curve.*



## ۱- مقدمه

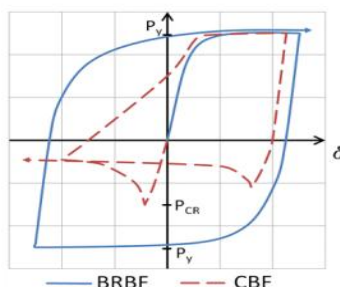
بررسی میزان آسیب‌پذیری سازه‌های موجود و همچنین ساخت سازه‌های ایمن‌تر بحثی است که در سه دهه‌ی اخیر پیشرفت فراوانی داشته است. با توجه به اهمیت بحث اقتصادی و عدم امکان تخریب سازه‌های موجود، تقویت نقاط ضعف این سازه‌ها بحث مهمی است. از طرف دیگر با بررسی میزان و نقاط ضعف سازه‌های پیشین می‌توان راهکار مناسبی برای ساخت سازه‌های ایمن‌تر در آینده ارائه داد. از آنجایی که میزان خطرپذیری لرزه‌ای کشور ایران بسیار بالا است، پس وجود سازه‌های ایمن و ساخت سازه‌های ایمن در آینده اهمیت بسیار بالایی دارد. استفاده از مهاربند فولادی برای جذب انرژی سازه در طی وقوع لرزه چندین سال پیش مطرح شد و در طی سی سال اخیر تحقیق در مورد عضو فشاری که بتواند پیش از کمانش به‌طور یکنواخت و در تمام طول خود جاری‌شده بیش‌ازپیش رونق گرفته است. این عضو فشاری می‌بایستی طوری عمل کند که تا حد ممکن انرژی اعمالی در طی حرکات زمین را مستهلک کند. از سوی دیگر به‌منظور جلوگیری از کمانش موضعی مهاربند می‌بایستی از روشی دیگر استفاده شود؛ بنابراین ایده استفاده از یک غلاف بتنی مطرح شد تا از یک طرف بار فشاری توسط هسته تحمل و از سوی دیگر با استفاده از غلاف بتنی از کمانش موضعی هسته جلوگیری شود [۱]. ایده‌ی استفاده از عضو فولادی تسلیم‌شونده برای جذب انرژی بیش از ۳۰ سال پیش مطرح شد. رویکرد جدید این بود که عضو فشاری قبل از کمانش جاری شود. نکته مهم این است که تسلیم به شکل موضعی رخ ندهد و توزیع آن در سراسر عضو مناسب و یکنواخت باشد به‌طوری‌که انرژی مستهلک‌شده طی یک بارگذاری رفت و برگشتی مانند زلزله به حداکثر خود برسد. تحقیقاتی که در این باره صورت گرفت بر مبنای جلوگیری از کمانش مهاربند فشاری با استفاده از پوشش بتن در اطراف آن بود. در این نوع مهاربندها تحمل بار فشاری توسط هسته فولادی بوده و پوشش بتنی فقط از کمانش هسته فولادی که باعث توزیع جانبی فشار داخلی در پوشش بتنی می‌گردد، جلوگیری می‌کند. برای اینکه نیروی فشاری محوری از جانب هسته فولادی به پوشش بتنی انتقال پیدا نکند، لایه‌ای نازک از ماده‌ای مخصوص در سطح مشترک فولاد و بتن قرار داده می‌شود. این لایه با جلوگیری از اصطکاک بین هسته و بتن، نیروی فشاری ناشی از تغییر شکل جانبی فولاد هسته را به‌صورت یک بار گسترده عرضی به بتن منتقل می‌کند. و نهایتاً این نحوه انتقال نیرو در عضو کمانش تاب باعث شده است که این نوع مهاربند به‌صورت مقید در برابر کمانش را مهاربند نچسبیده بنامند [۲]. به‌منظور اطمینان از نحوه ساخت مدل نرم‌افزاری، در این مرحله نمونه‌ی آزمایشگاهی برگرفته از تحقیق ژیا و همکاران [۳] با مدل نرم‌افزاری مقایسه گردیده است. پس از اطمینان از صحت نحوه مدل‌سازی، به ساخت مدل در سایر مراحل پرداخته می‌شود. مهاربندهای کمانش تاب به‌طور معمول از یک هسته فولادی که در یک غلاف فولادی پر شده با بتن می‌باشد ساخته شده‌اند. عضو هسته فولادی بر اساس مقاومت محوری و با ظرفیت تسلیم فشاری و کششی بدون در نظرگیری گسیختگی، کمانشی ناحیه‌ای یا کلی ناشی از خمش طراحی می‌شود و همچنین غلاف‌های فولادی و بتنی مقاومت خمشی و منحنی کافی را فراهم ساخته و از کمانش کلی مهاربند جلوگیری می‌کنند.

## ۲- مهاربند کمانش تاب

سیستم‌های مهاربندی همگرای رایج دارای مشکل ذاتی تفاوت رفتار در کشش و فشار می‌باشند. این مهاربندهای معمولی می‌بایستی تغییر مکان‌های بزرگ ناشی از زلزله را به‌صورت رفت و برگشتی در کشش به‌صورت محوری و در فشار به‌صورت مقاومت پس از کمانش تحمل نمایند. کمانش مهاربندها در فشار باعث کاهش شدید مقاومت، سختی و ظرفیت اتلاف انرژی در آن‌ها می‌شود. قاب‌های مهاربندی مقید شده در برابر کمانش، نوع خاصی از قاب‌های مهاربندی شده هم‌محور می‌باشند، که از کمانش کلی مهاربند و کاهش مقاومت و سختی در آن‌ها جلوگیری شده است. المان‌های مهاربندی توانایی جاری شدن و تأمین رفتار یکسان در کشش و فشار و در نتیجه جذب انرژی در سیکل‌های پایدار را دارا می‌باشند. مطابق شکل (۱)، مهاربندهای معمولی بر اساس رفتار فشاری



فولاد طراحی می‌شوند، بدین معنی که کمانش مهاربند پیش از جاری شدن فولاد در فشار رخ ندهد. در نتیجه‌ی این طراحی تمامی ظرفیت فولاد به خصوص در کشش مورد استفاده نخواهد بود و این امر از توجیه اقتصادی این نوع مهاربند به شدت می‌کاهد. نکته‌ی قابل توجه دیگر در مورد مهاربندهای معمولی این است که در سیکل‌های بارگذاری منحنی هیستریزیس رفتاری مناسبی از خود نشان نمی‌دهد و میزان شکل‌پذیری پایینی در مقایسه با سیستم‌های قاب خمشی دارد. این شرایط و رفتار نامناسب مهاربند معمولی با استفاده از قاب مهاربندی شده کمانش تاب قابل ارتقاء خواهد بود [۴]



شکل ۱: رفتار چرخه‌ای پایدار مهاربند کمانش تاب در مقابل مهاربند معمولی [۴].

از مزیت‌های دیگر سیستم مهاربندی مقید شده در برابر کمانش، این است که می‌توان این مهاربندها را به صورت مهاربندهای قطری تک، در یک جهت قرارداد و مانند سیستم مهاربندی همگرای ویژه، نیاز به تحمل ۷۰٪ نیروی زلزله به تنهایی در یک جهت به صورت کششی یا فشاری نمی‌باشد. در صورت به کار بردن این سیستم در قاب‌های همگرای شورون (۷ و ۸)، به علت رفتار یکسان مهاربند در کشش و فشار، نیروی نامتعادل در تیر متصل شونده، به شدت کاهش یافته و می‌توان از تیرهای با مقاطع ضعیف‌تری نسبت به سیستم مهاربندی همگرای ویژه استفاده کرد. سیستم‌های قاب مهاربند کمانش تاب می‌توانند سختی الاستیکی فراهم کند که با قاب‌های مهاربندی شده واگرا قابل مقایسه است. تست‌های آزمایشگاهی متنوع با مقیاس واقعی نشان داده است که با طراحی و جزئیات بندی مناسب المان‌های قاب مهاربند کمانش تاب رفتار متقارن و چرخه‌ای پایدار در نیروهای کشش و فشاری به همراه تحمل تغییر شکل‌های بزرگ غیرخطی قابل مشاهده است. مهاربندهای کمانش تاب طوری ساخته می‌شوند که هسته بتواند در راستای طولی مستقل از ساز و کار جلوگیری از کمانش عمل کند. به بیان دیگر، تمام نیروی محوری که به مهاربند وارد می‌شود توسط هسته تحمل می‌شود. با جلوگیری از کمانش هسته، این المان می‌تواند در فشار همانند کشش جاری شده و بدین ترتیب توانایی جذب انرژی آن به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. تاکنون آزمایش‌های متعددی بر روی انواع مختلف مهاربندهای کمانش تاب انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان داده که مهاربندهای کمانش تاب رفتار چرخه‌ای پایدار، منظم و نسبتاً متقارنی دارند و منحنی چرخه‌ای آن‌ها نزدیک به منحنی چرخه‌ای دوخطی ایده‌آل است [۴].

### ۳- تاریخچه‌ی تحقیق

مطالعه‌ی رفتار مهاربندهای کمانش تاب در سال ۱۹۷۱ برای اولین بار توسط یاشینو و همکاران انجام شد. آن‌ها آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی دو نمونه‌ی به اصطلاح مهاربند با دیوار برشی انجام دادند، این آزمایش شامل یک مهاربند که در بردارنده‌ی صفحه‌ی فلزی صاف که داخل پانل بتن مسلح با و بدون مواد غیر چسبنده قرار گرفته، صورت پذیرفته است. در نمونه‌ی آزمایشگاهی با مواد غیر چسبنده جابجایی جانبی ۱۵ میلی‌متر بین دو طرف و پانل محصور، بیشتر به وقوع پیوسته است. همچنین میزان جذب انرژی و ظرفیت تغییر شکل افزایش پیدا کرده است [۵]. در سال ۲۰۱۱، یو و همکاران، از مدل‌های عددی برای پیش‌بینی پاسخ‌های دینامیکی



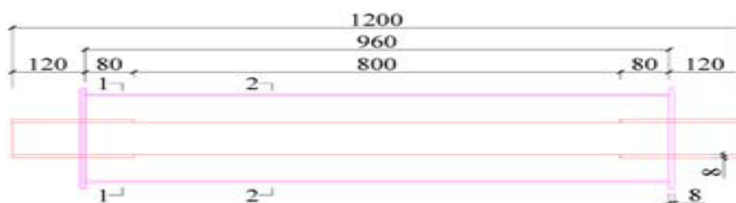
سازه‌های مجهز به مهاربندهای کمانش تاب استفاده کردند. این مطالعات عددی قبل از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور پیش‌بینی رفتار قاب‌های مهاربندی کمانش تاب استفاده شده است. یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی برای بررسی مقاومت مهاربندها در اتصالات انتهایی استفاده گردیده است. نتایج آزمون‌های دینامیکی روی مهاربندهای کمانش تاب همراه با میراگرهای متصل به آن نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس تجزیه و تحلیل‌های عددی و مقایسات صورت گرفته با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی تکنیک‌های مدل‌سازی غیرخطی برای بررسی رفتار قاب‌های مهاربندی کمانش تاب توصیه گردیده است [۶]. در سال ۲۰۱۲، هویدایی و رافضی به بررسی رفتار کمانش کلی مهاربندهای کمانش تاب تمام فلزی پرداختند. یکی از الزامات اساسی برای رفتار مکانیکی مناسب مهاربندهای کمانش تاب تحت زلزله‌های شدید جلوگیری از کمانش کلی تا زمانی است که مقطع تغییرشکل پلاستیک و شکل‌پذیری زیادی را متحمل شود. این مقاله به بررسی اجزا محدود مقطع مهاربند تمام فلزی اختصاص دارد. مهاربند پیشنهاد شده دارای مقطع هسته یکسان اما دارای مکانیسم‌های جلوگیری کننده از کمانش متفاوت است. هدف این مطالعه انجام مطالعات تحلیلی بر روی مهاربندهای کمانش تاب با مقادیر متفاوت فاصله بین هسته و عنصر ممانعت کننده از کمانش می‌باشد. نتایج نشان داد که سختی خمشی این نوع مهاربندها می‌تواند به طرز چشمگیری رفتار کمانش کلی مهاربند را تحت تأثیر قرار دهد. بعلاوه، حداقل نسبت بار کمانش اولر به مقاومت تسلیم هسته برای مقاصد طراحی پیشنهاد شد. این نسبت پارامتری اساسی است که کمانش مهاربندها را کنترل می‌کند [۷]. در سال ۲۰۱۳، پیدرافیتا و همکاران مهاربندی جدید برای ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله ارائه دادند. نمونه‌ای تمام‌مقیاس از مهاربند پیشنهاد شده تحت تغییرمکان‌های چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت و پاسخ هیستریزس نمونه‌ها برداشت شد. مهم‌ترین پارامترها نیروی تسلیم و تغییرمکان تسلیم بودند که می‌توان به صورت جملاتی ریاضی رفتار آن‌ها را تخمین زد. روش طراحی پیشنهادی این نوع مهاربندها می‌تواند با در نظر گرفتن تغییرشکل جانبی اولیه و فاصله بین هسته تسلیم‌پذیر و قسمت مقیدکننده، کمانش این نوع مهاربندها را تعیین کند. رفتار هیستریزس این نوع مهاربندها نیز با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود تعیین شد [۸]. در سال ۲۰۱۴، قوان‌گو و همکاران به بررسی تأثیر پارامترهای مدل مهاربند کمانش تاب بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ای پرداختند. در این تحقیق به بررسی حساسیت مدل‌های موجود در مورد مهاربندهای کمانش تاب به منظور فراهم نمودن وسیله‌ای جهت ارزیابی تأثیر پارامترهای ثابت این نوع مهاربندها بر رفتار سازه‌ای، پرداخته شد. با مدل‌سازی موردی یکی از آزمایش‌های قبلی، تأثیر کمانش‌های کلی و موضعی بر پارامترهای ثابت این نوع مهاربندها مشخص شد. مطالعه صورت گرفته راه را برای کاربرد این نوع مصالح و نحوه‌ی طراحی آن‌ها هموار کرده است [۹]. در سال ۲۰۱۴، ژائو و همکاران، تحقیقات وسیعی در مورد رابطه‌ی بین رفتار خمشی مهاربندهای کمانش تاب و جزئیات انتهایی آن‌ها انجام داده‌اند. آن‌ها با انجام آزمایش‌ها و تحلیل بر روی مهاربندهای کمانش تاب که به صورت سنتی ساخته شدند و مهاربندهایی که در انتهای اتصالشان به ورق اتصال، دارای غلاف می‌باشند، رفتار خمشی این مهاربندها در دو حالت مورد بررسی قرار دادند و در انتها یک ضریب تأثیر لنگر خمشی را ارائه نمودند [۱۰]. در سال ۲۰۱۵، اشتري و همکاران برای رفع معایب موجود در مهاربندهای کمانش تاب از جمله تغییرشکل‌های ماندگار سازه پس از پایان بارگذاری و همچنین هزینه‌بر بودن تعویض اعضا پس از خرابی و جاری شدن هسته فولادی، به جای استفاده از فولاد در هسته جاری شونده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی استفاده کردند. این آلیاژها به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی از قبیل خاصیت فوق ارتجاعی و بازگرداندگی می‌توانند پس از تحمل تغییرشکل‌های بزرگ، حالت اولیه خود را بازیابی کنند [۱۱]. در سال ۲۰۱۶، پنگ پن و همکاران نیز مطالعاتی روی ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های بتنی بهسازی شده با مهاربندهای کمانش تاب انجام دادند [۱۲]. در سال ۲۰۱۶، کوآن شن و همکاران، با انجام ۷ تست به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری بر روی مهاربندهای کمانش تاب تمام فولاد، تأثیر ماده نچسبی که بین هسته فولادی و غلاف فولادی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی و بارگذاری چرخه‌ای بر روی نمونه‌ها به این نتیجه رسیدند که نمونه‌هایی که دارای ماده‌ی نچسب به ضخامت کمتری هستند، جذب



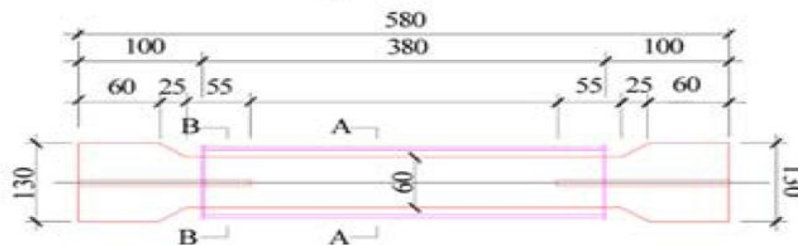
انرژی کمتری دارند. همچنین یک ضریب برای تأثیر ماده‌ی نچسب در مهاربندهای کمانش تاب تمام فولاد ارائه نمودند [۱۳]. در سال ۲۰۱۸، سانژینگ و همکاران با به کار بردن آلیاژ حافظه‌دار در قاب‌های با مهاربندهای شورون هشتی کمانش تاب، عملکرد قاب‌های با مهاربندهای کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار را مطالعه کردند. در این تحقیق عدم توانایی مهاربندهای کمانش تاب در مهار دریافت‌های پسماند بیان شده است، همچنین از توانایی این مهاربندها در کاهش دریافت طبقات تحت تحلیل‌های لرزه‌ای عنوان شده است [۱۴]. در این تحقیق، به‌عنوان نوآوری به ارزیابی پارامتری اثر تعداد و شکل سوراخ در مهاربند کمانش تاب از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش اجزای محدودی پرداخته شده است. تعداد ۶ نمونه در حالت‌های هسته بدون سوراخ، هسته با یک، سه، پنج سوراخ به‌صورت دایره‌ای به مساحت ثابت و هسته با یک، سه و پنج سوراخ به شکل مستطیل با مساحت ثابت با جزئیات کامل در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و نتایج حاصله در قالب مدهای خرابی، شدت خسارات و نیز منحنی‌های هیستریزس نیرو-جابجایی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

#### ۴- صحت سنجی

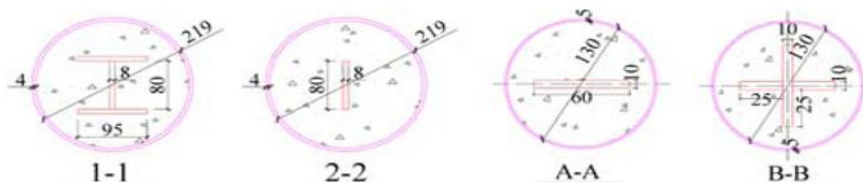
برای صحت سنجی نرم‌افزار ابتدا نمونه‌ی آزمایشگاهی برگرفته از تحقیق ژیا و همکاران [۳] توسط نرم‌افزار اجزا محدودی ABAQUS [۱۵] شبیه‌سازی و منحنی هیستریزس آن‌ها با هم مقایسه شده است. در این تحقیق، بارگذاری شبه استاتیک بر روی مهاربند کمانش تاب انجام گرفت و نوع جدیدی از مهاربندهای کمانش تاب را با هسته دابل فولادی و غلاف دوگانه فولادی پر شده از بتن معرفی گردید. این نوع مهاربند کمانش تاب با هسته دابل دارای صفحه‌ی اتصال همانند اتصال مهاربند دابل T شکل است. همچنین نوع جدید مهاربند کمانش تاب را معرفی شد که از ورق فولادی جوش داده شده و با مواد نچسب پوشیده شده است. مهاربند کمانش تاب شامل یک سیلندر فولادی به‌عنوان هسته‌ی جذب‌کننده انرژی و یک غلاف فولادی پر شده با ملات به‌عنوان غلاف مهارکننده می‌باشد. یک مدل جدید از اتصال پیچی مهاربند کمانش تاب فولادی زاویه‌دار معرفی گردید و رفتار چرخه‌ای آن مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیق ژیا و همکاران [۳] چهار نمونه‌ی کوچک از مهاربندهای کمانش تاب ساخته شده از فولاد Q235 که بر اساس مشخصات فنی سازه‌های بلند فولادی چین طراحی شده است و همچنین آئین‌نامه چین برای سازه‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فولاد Q235، با مقاومت تسلیم اسمی  $f_{yn}$  به میزان 235Mpa، برای عضو باربر و غلاف فلزی خارجی مورد استفاده قرار گرفته است. بتن پرکننده C30 به‌عنوان عضو حفاظتی جانبی است. شکل (۲) الی (۴) مشخصات ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمونه مهاربند کمانش تاب ۱ [۳].

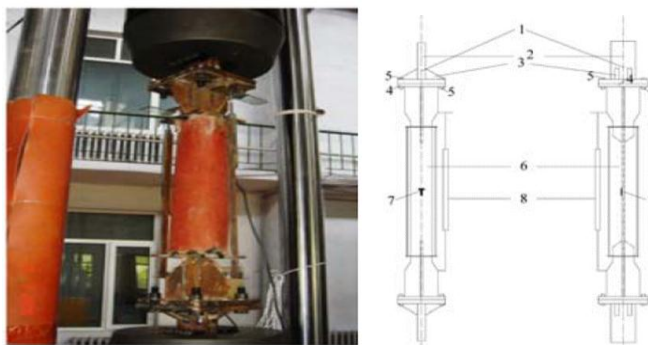


شکل ۳: نمونه مهاربند کمانش تاب [۳].



شکل ۴: مقطع نمونه‌های مهاربند کمانش تاب (۲و۳)

در تحقیق ژیا و همکاران [۳] عرض و ضخامت هسته‌ی داخلی مهاربند کمانش تاب شماره یک، برابر با  $80 \times 8$  mm و ضخامت\*عرض نمونه مهاربند کمانش تاب شماره دو، برابر با  $60 \times 10$  mm می‌باشد. در نتیجه مساحت مقاطع که با  $A_i$  نشان داده شده به ترتیب  $640 \text{ mm}^2$  و  $600 \text{ mm}^2$  می‌باشد. میانگین مساحت مقاطع بخش‌های نچسبیده هر دو مهاربند کمانش تاب تقریباً برابر با یکدیگر ولی میزان ممان سختی آن‌ها متفاوت است. ابعاد غلاف فلزی خارجی  $219 \times 4$  mm برای نمونه‌ی یک و  $130 \times 5$  mm برای نمونه‌ی دو است. با در نظرگیری میزان تغییر شکل اولیه به اندازه  $7.33 \text{ mm}$  میزان حداکثر لنگر نمونه‌های یک و دو به ترتیب  $1094 \text{ kN.m}$  و  $1610 \text{ kN.m}$  و ظرفیت غلاف نمونه‌های یک و دو برای خمش برابر  $15167 \text{ KN.mm}$  و  $52670 \text{ KN.mm}$  می‌باشد؛ بنابراین لنگر نمونه‌های مهاربند کمانش تاب کمتر از ظرفیت مقاوم بتن است. ضخامت دیواره‌ی غلاف بتنی نمونه‌های ۲و۱ به ترتیب  $4$  و  $5$  میلی‌متر است که به ترتیب از  $1/2$  میلی‌متر و  $0/9$  میلی‌متر بزرگ‌تر است. بار کمانشی برای عضوهای مهار نشده با مقطع H شکل بسیار بزرگ‌تر از بار تسلیم این قسمت و همچنین بار نهایی تسلیم بخش مهار شده است. نسبت عرض به ضخامت بخش آزاد و بال‌های مقطع H شکل و مقطع صلیبی  $5/4$  و  $2/5$  برای نمونه‌های ۲و۱ است و هر دو کوچک‌تر از  $1/2$  می‌باشند؛ بنابراین پایداری کلی و ناحیه‌ای قسمت‌های مهار نشده بر طبق آیین‌نامه‌ی چین برای طراحی سازه‌های فولادی مورد تأیید است. در صورتی که تمامی این نتایج را مدنظر قرار داده و فاصله‌ی کافی بین هسته‌ی داخلی و بتن پرکننده غلاف فلزی در نظر گرفته شود، طراحی نمونه‌ی مهاربند کمانش تاب مورد تأیید خواهد بود. مطابق شکل (۵)، نمونه‌ی آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای ارائه شده است.



شکل ۵: نمونه‌ی آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب [۳].

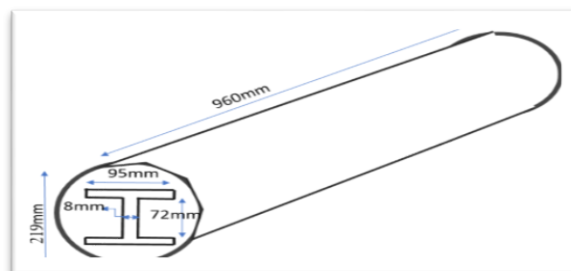
۱-۴- مشخصات نمونه‌ی مورد مطالعه

از نرم‌افزار اجزای محدودی ABAQUS [۱۵] برای شبیه‌سازی استفاده شده است. المان پوسته از نوع S4R (المان پوسته چهار نقطه‌ای) از میان المان‌های موجود در برنامه‌ی ABAQUS برای مدل‌سازی نمونه انتخاب شده است. S4R یک المان چهار گره‌ای با انحنا دو طرفه با انتگرال‌گیری کاهش یافته می‌باشد. مصالح فولادی به کار رفته در مدل‌ها به صورت ایزوتروپیک می‌باشند. مقدار مدول الاستیسیته تمامی مصالح فولادی برابر ۲۰۵ گیگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمستطیل در نظر گرفته شده. مدل شامل ۳ قسمت: هسته، غلاف بتنی، غلاف فولادی می‌باشد. مشخصات تنش- کرنش فولاد مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است

جدول ۱: مشخصات تنش-کرنش فولاد مورد استفاده

المان	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش پلاستیک
هسته فولادی	۲۸۰	۴۸۰	۰/۱
غلاف فولادی	۳۵۱	۵۱۰	۰/۱۵

مشخصات هندسی نمونه‌ی مورد مطالعه مطابق شکل (۶) می‌باشد. مدل از سه بخش غلاف فولادی خارجی، مقطع پرکننده میانی بتنی و تیر I شکل داخلی تشکیل شده است. ضخامت غلاف خارجی برابر با ۰/۴ سانتی‌متر است. بتن پرکننده C30 فرض شده است.



شکل ۶: مشخصات هندسی نمونه‌ی مورد مطالعه.





در این تحقیق، مصالح بتنی به کار رفته در مدل به صورت ایزوتروپیک می باشد. مقدر مدول الاستیسیته برابر ۲۶۴۸۰ مگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۱۶۷ و چگالی آن برابر ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. رفتار بتن به صورت آسیب بتن پلاستیک تعریف شده است. این مدل رفتار بتن را در فشار و سخت شدگی در کشش نشان می دهد. به منظور تعریف رفتار آسیب پلاستیک بتن در نرم افزارهای اجزا محدود نیاز به تعریف ۵ پارامتر می باشد که در جدول (۲) و مشخصات تنش- کرنش بتن مصرفی در جدول (۳) نیز ارائه گردیده است.

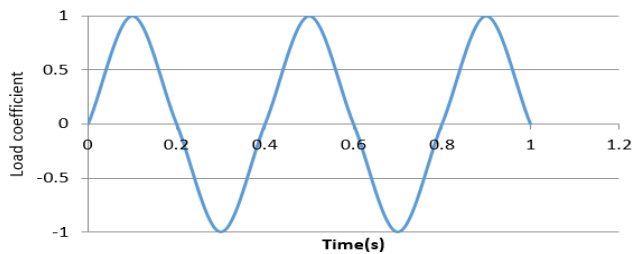
جدول ۲: مشخصات رفتار الاستوپلاستیک بتن

ویسکوزیته ( $\mu$ )	(Kc)	$(\frac{f_{ba}}{f_{co}})$	گریز از مرکز (E)	زاویه اتساع داخلی ( $\psi$ )
۰	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۱

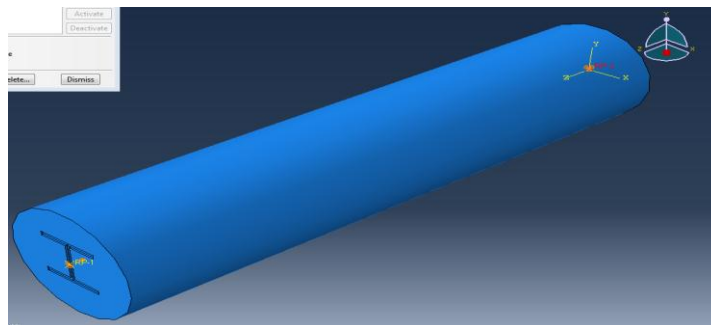
جدول ۳: مشخصات تنش- کرنش بتن مورد استفاده

کرنش ترک خوردگی	تنش کششی	کرنش فشاری	تنش فشاری
۰	۰	۰	۰
۰/۰۰۰۱	۰/۳	۰/۰۰۰۴	۰/۱۲۹۹
۰/۰۰۰۳	۰/۵۵	۰/۰۰۰۸	۰/۲۴۲۹
۰/۰۰۰۴	۰/۷	۰/۰۰۱۲	۰/۳۴۱۲
۰/۰۰۰۵	۰/۸	۰/۰۰۱۶	۰/۴۲۶۷
۰/۰۰۰۸	۰/۹	۰/۰۰۲	۰/۵۰۱۲
۰/۰۰۱	۰/۹۳	۰/۰۰۲۴	۰/۵۶۶
۰/۰۰۲	۰/۹۵	۰/۰۰۳۶	۰/۷۱۴
۰/۰۰۳	۰/۹۷	۰/۰۰۵	۰/۸۲۴۳
۰/۰۰۵	۰/۹۹	۰/۰۱	۰/۹۶۹۱

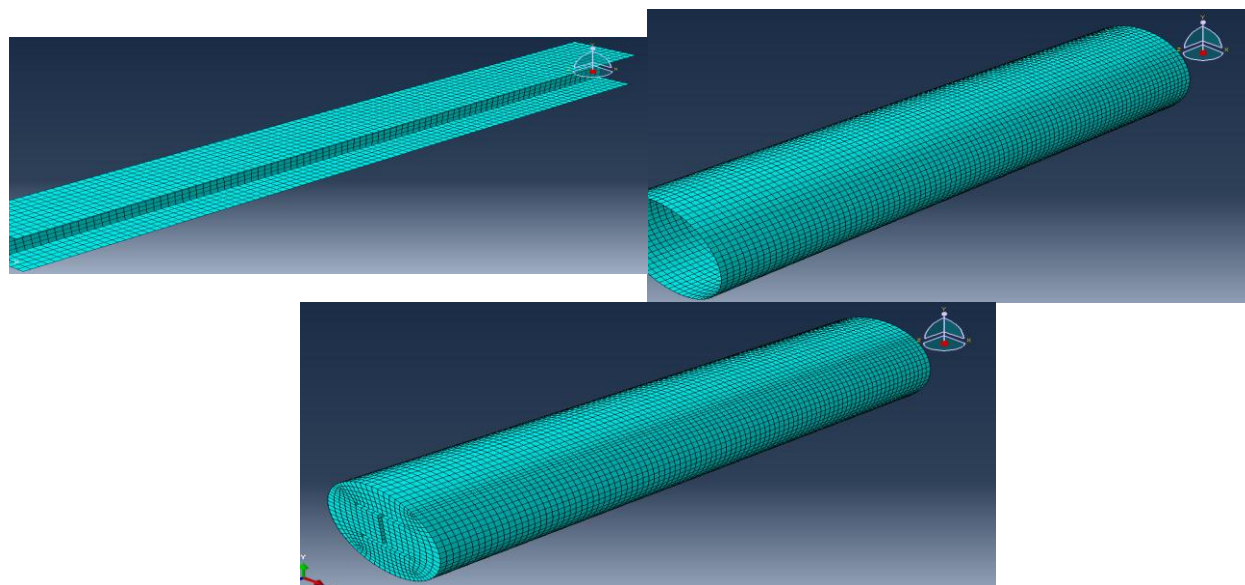
برای تحلیل دینامیکی غیرخطی از روش آنالیز صریح استفاده شده و اثرات غیرخطی هندسی نیز در نظر گرفته شده است. سطوح تماس بین هسته و غلاف بتنی با تعریف اندرکنش از نوع رفتار عادی و تماس سخت و برای اندرکنش بین غلاف بتنی و فولادی از نوع قید مهارى شبیه سازی شده است. شرایط انتهایی دو سر مدل همانند دستگاه آزمایش دو سر مفصل دارای جابه جایی چرخه ای طبق پروتکل بارگذاری آزمایشگاه نشان داده شده در شکل (۷) در راستای محور Y می باشد. سازه ها برای همه ی المان ها ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. شکل های (۸) و (۹) به ترتیب مدل شبیه سازی شده و مدل مش بندی شده ی نمونه ی مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۷: پروتکل بارگذاری در نرم افزار ABAQUS.



شکل ۸: مدل شبیه سازی شده نمونه ی مورد مطالعه.



شکل ۹: مدل مش بندی غلاف فولادی، هسته داخلی و بتن پرکننده.

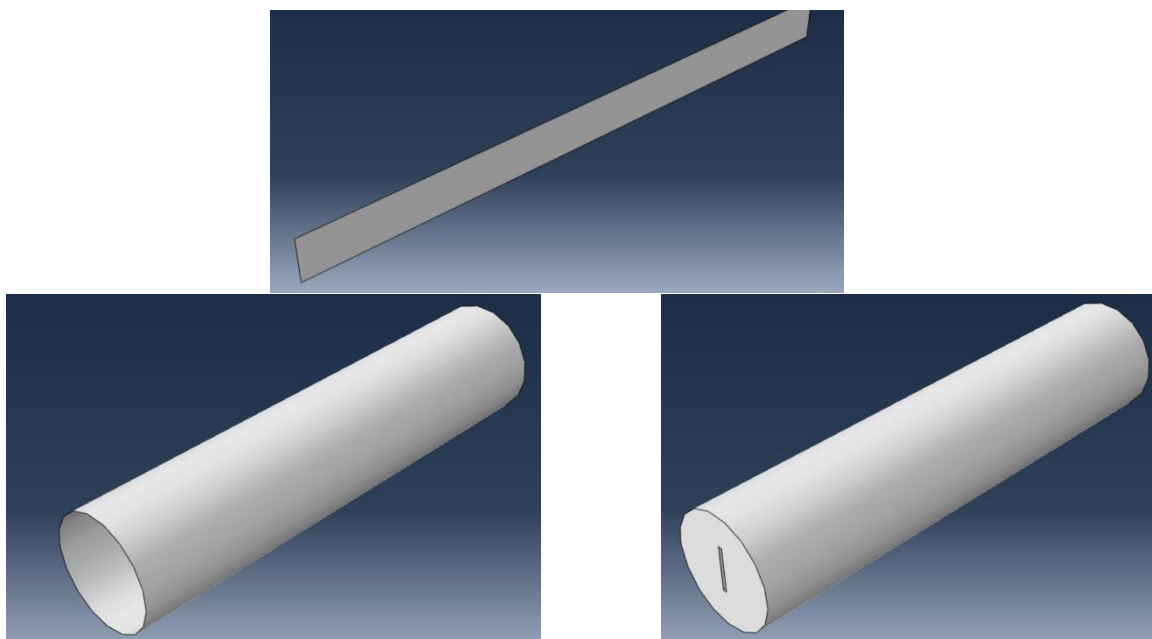


شکل ۱۰: مقایسه‌ی منحنی هیستریزیس نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار اجزا محدودی ABAQUS.

مطابق شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که تقریباً منحنی هیستریزیس نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار مشابه هم می‌باشند، این امر صحت مدل‌سازی را نشان می‌دهد. مقدار حداکثر تنش در نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر با ۲۹۸ مگاپاسکال می‌باشد و در نمونه‌ی عددی مقدار بیشینه‌ی تنش آن ۲۸۵ مگا پاسکال است که اختلاف آن‌ها تقریباً ۴/۵ درصد شده است.

### ۵- مدل سازی

در این بخش، مشخصات ابعادی مدل پایه‌ای در نظر گرفته‌شده برای انجام مطالعه‌ی پارامتریک و نیز خصوصیات مکانیکی مصالح تشکیل‌دهنده اجزای مختلف مدل ارائه گردیده است. در این بخش مشخصات ابعادی مدل پایه‌ای در نظر گرفته‌شده برای انجام مطالعه پارامتریک و نیز خصوصیات مکانیکی مصالح تشکیل‌دهنده اجزای مختلف مدل ارائه می‌گردد. شکل (۱۱) نمایی از مدل پایه را که عبارت است از غلاف فولادی، هسته داخلی و بتن پرکننده نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱: نمایی از مدل غلاف فولادی، هسته داخلی و بتن پرکننده جهت تحلیل اجزا محدودی.



در این تحقیق به بررسی پاسخ دینامیکی نمونه‌ای از مهاربند کمانش تاب از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس پرداخته می‌شود. در ادامه ۶ مدل که شامل هسته با یک سوراخ دایره‌ای شکل  $C_1$ ، سه سوراخ دایره‌ای شکل  $C_2$ ، پنج سوراخ دایره‌ای شکل  $C_3$  و یک سوراخ مستطیل شکل  $R_1$  سه سوراخ مستطیل شکل  $R_2$  و پنج سوراخ مستطیل شکل  $R_3$  که مساحت همگی سوراخ‌ها برابر می‌باشند مدل‌سازی و منحنی‌های هیستریزیس تمامی مدل‌ها ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است نمونه‌ی مرجع که بدون سوراخ تعبیه شده با علامت  $M$  نام‌گذاری شده است. هسته‌ی مهاربند از یک تسمه به طول ۹۶۰ میلی‌متر به عرض ۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر هست. غلاف بتنی به طول ۹۶۰ میلی‌متر و قطر ۲۱۹ میلی‌متر و غلاف فلزی به طول ۹۶۰ میلی‌متر به قطر ۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر می‌شوند. لازم به ذکر است تمام سوراخ‌ها برابر و مقدار ۳۱۴ میلی‌متر مستطیل می‌باشد. مطابق جدول (۴)، نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق ارائه شده‌اند.

جدول ۴: معرفی نمونه‌های مورد مطالعه

شکل هندسی	نمونه
	$M$ مرجع (بدون سوراخ)
	$C_1$ یک سوراخ دایره‌ای شکل
	$C_2$ سه سوراخ دایره‌ای شکل
	$C_3$ پنج سوراخ دایره‌ای شکل
	$R_1$ یک سوراخ مستطیل شکل



	<b>R<sub>2</sub></b> سه سوراخ مستطیل شکل
	<b>R<sub>3</sub></b> پنج سوراخ مستطیل شکل

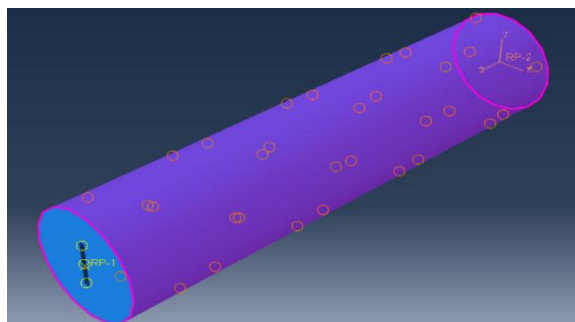
رفتار بتن شامل رفتار غیرخطی شدید ترک خوردگی بتن غلاف و پلاستیسیته شدید پروفیل‌های فولادی بوده است. مصالح تشکیل‌دهنده مهاربند از نوع ST37 بوده که مدول الاستیسیته آن برابر ۲۱۰ گیگاپاسکال می‌باشد. همچنین جرم حجمی و ضریب پواسون فولاد به ترتیب برابر ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. منحنی تنش-کرنش فولاد به صورت ۳ خطی ایده‌آل با مقاومت‌های تسلیم و نهایی به ترتیب ۲۸۲ مگاپاسکال و ۴۵۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مصالح بتنی غلاف‌های در بردارنده مهاربند فولادی که به صورت استوانه‌ای دارای قطر ۳۰ سانتی‌متر بوده و بتن تشکیل‌دهنده آن دارای جرم حجمی و ضریب پواسون به ترتیب ۲۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۲ می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته بتن برابر ۲۸ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقاومت‌های فشاری و کششی بتن به ترتیب برابر ۳۰ مگاپاسکال و ۳ مگاپاسکال فرض شده است. همچنین رفتار بین غلاف بتنی و هسته فولادی در مهاربند از نوع اصطکاکی با ضریب اصطکاک ۰/۳ می‌باشد. مشخصات مصالح مورد استفاده مطابق جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: مشخصات مصالح مورد استفاده.

مشخصات	استوانه‌ی بتنی	
$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	۲۴۵۰	
E(GPa)	۲۸	
$\nu$	۰/۳	
Concrete Damage Plasticity	Dilation Angle	۳۲
	Eccentricity	۰/۱
	$F_{bo}/f_{co}$	۱/۱۲
	K	۰/۶۷
	Viscosity Parameter	۰
تیر فولادی		
$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	۷۸۵۰	
E(GPa)	۲۰۰	
$\nu$	۰/۳	
$f_y$ (MPa)	۲۳۵	



لازم به ذکر است که به غیر از مقطع بتنی که به صورت جامد تعریف شده است، سایر مقاطع به حالت پوسته تعریف شده اند. مطابق شکل (۱۲)، در همه نمونه ها اندرکنش در حالت مماسی با ضریب اصطکاک  $0/3$  و در حالت عمودی به صورت تماس سخت تعریف شده است.

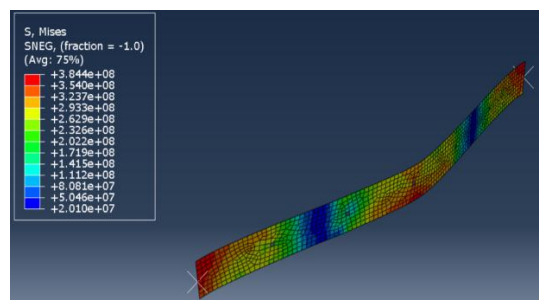
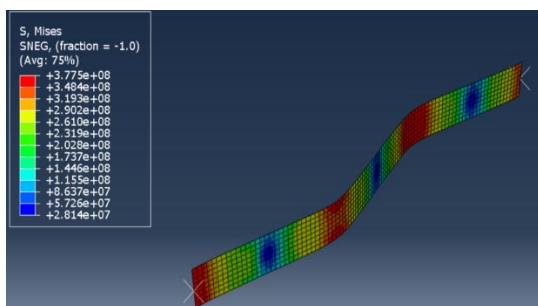


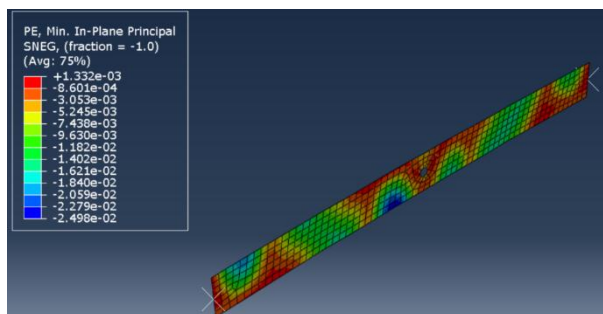
شکل ۱۲: تعریف اندرکنش در هسته‌ی مهاربند کمانش تاب.

برای نمونه مرجع ابعاد مش  $0/01$ ،  $0/02$  و  $0/05$  متر مدل سازی شده تمامی نتایج نزدیک به یکدیگر می باشد بنابراین ابعاد مش برای تمامی مدل ها  $0/01$  متر در نظر گرفته شده است. به منظور مدل سازی پروفیل های فولادی از المان های صفحه ای مستطیلی با تابع شکل درجه اول و انتگرال گیری کاهش یافته استفاده شده است. همچنین از المان های سالیید مکعبی با تابع شکل درجه ای اول و انتگرال گیری کاهش یافته برای مدل سازی غلاف بتنی در مدل های با مهاربند کمانش تاب استفاده شده است. از آنجاکه شامل رفتار غیرخطی شدید در قالب ترک خوردگی بتن غلاف و پلاستیسیته شدید پروفیل های فولادی بوده و در مدل های دارای مهاربند کمانش تاب، رفتار المان های تماسی نیز حائز اهمیت می باشد، ابعاد اضلاع المان ها در بخش های مختلف مدل ها برابر  $2$  سانتی متر می باشد.

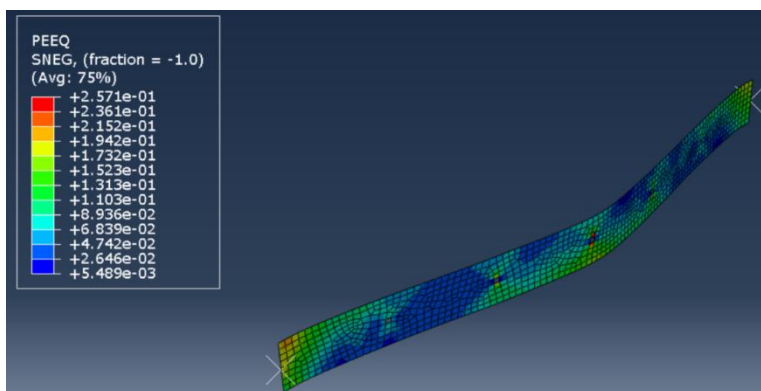
## ۶- مطالعه و بررسی نتایج

در این تحقیق، هسته‌ی مهاربند کمانش تاب با یک، سه و پنج سوراخ در حالت های دایروی و مربع شکل که همه‌ی نمونه ها دارای مساحت سوراخ برابری می باشند، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند. مجموعاً ۶ مدل با حالت مرجع مقایسه شده اند. کانتور تنش های وان مایسز و کانتور کرنش پلاستیک در مدل های اجزا محدودی ارائه شده است.



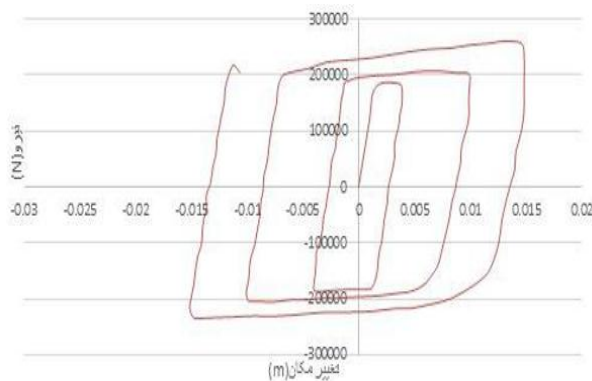


شکل ۱۳: کانتور تنش وان مایسز هسته‌ی مهاربند کماتش‌تاب.



شکل ۱۴: کانتور کرنش پلاستیک هسته‌ی مهاربند کماتش‌تاب.

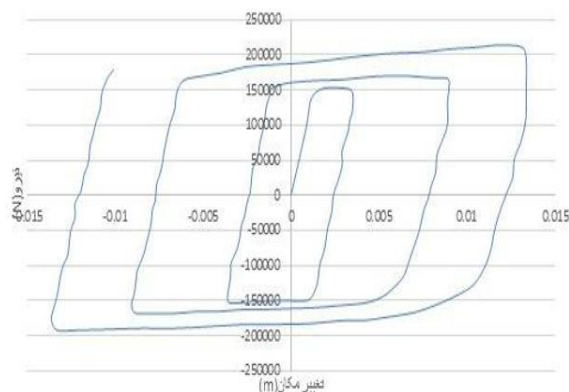
با بررسی شکل‌های (۱۳) و (۱۴) واضح است که بیشترین تغییر شکل و حداکثر تنش در مد اول اتفاق افتاده است. همچنین بیشترین تنش‌ها در اطراف سوراخ‌ها ایجاد شده و تمرکز تنش در این نواحی بیشتر می‌باشد. در نمونه‌ها با سوراخ‌های مربع شکل به علت زاویه‌دار بودن سوراخ‌ها تمرکز تنش بیشتری مشاهده می‌گردد، از این رو استفاده از سوراخ‌های دایره‌ای شکل توصیه می‌گردد. همچنین با افزایش تعداد سوراخ‌ها نتایج بهتری به دست آمده است. در ادامه منحنی‌های هیستریزیس تمامی نمونه‌ها ارائه شده است.



شکل ۱۵: منحنی هیستریزیس نمونه‌ی M.

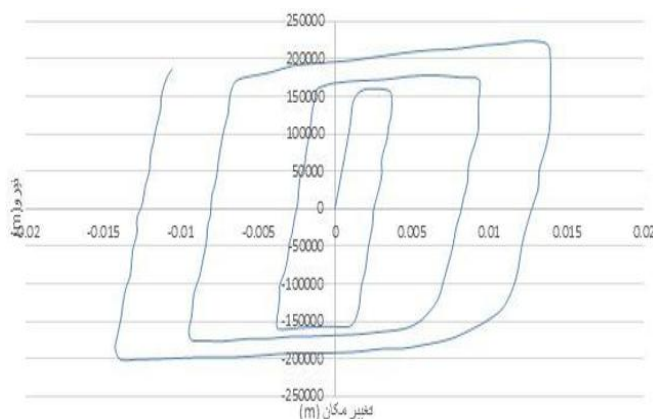


همان طور که در شکل (۱۵) مشخص است حداکثر نیرو برابر ۲۲۳ کیلو نیوتون می باشد و حداکثر تغییر مکان هسته مقدار ۱۶/۴ میلی متر می باشد و منحنی هیستریزیس پایدار است. مقدار انرژی میرا شده برابر ۱۷/۶۹۱۱ ژول می باشد.



شکل ۱۶: منحنی هیستریزیس نمونهی C1.

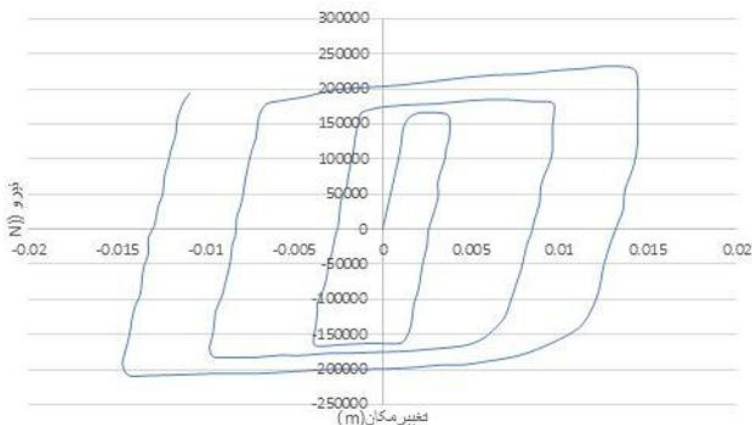
براساس شکل (۱۶) حداکثر نیرو برابر ۱۹۶ کیلو نیوتون می باشد و حداکثر تغییر مکان هسته مقدار ۱۴/۱ میلی متر می باشد و منحنی هیستریزیس پایدار است. تفاوت این نمودار با حالت بدون سوراخ در میزان ۱۴ درصد کاهش تنش و ۱۶ درصد کاهش در کرنش هسته می باشد. مقدار انرژی میرا شده این نمونه برابر ۱۲/۷۸۰۰ ژول می باشد که ۳۸ درصد کاهش انرژی نسبت به نمونهی M دارد.



شکل ۱۷: منحنی هیستریزیس نمونهی C2.

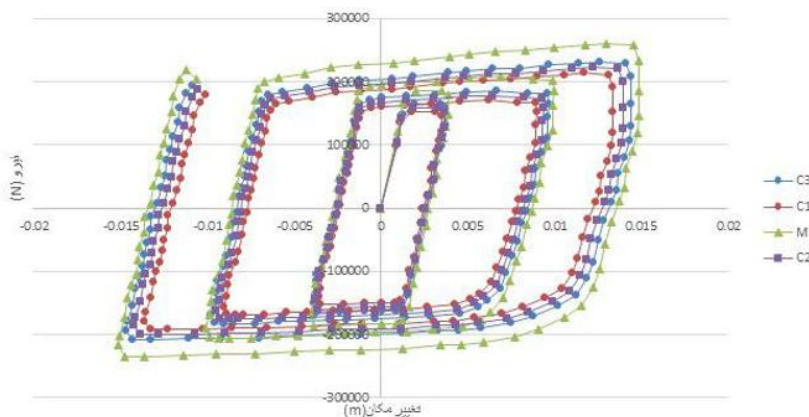
مطابق شکل (۱۷)، حداکثر نیرو برابر ۲۰۱ کیلو نیوتون می باشد و حداکثر تغییر مکان هسته مقدار ۱۴/۶ میلی متر می باشد و منحنی هیستریزیس پایدار است. تفاوت این نمودار با حالت بدون سوراخ در میزان ۱۱ درصد کاهش تنش و ۱۲ درصد کاهش در کرنش هسته می باشد. مقدار انرژی میرا شده این نمونه برابر ۱۳/۸۵۵۶ ژول می باشد که ۲۷/۶ درصد کاهش انرژی نسبت به نمونهی M دارد.





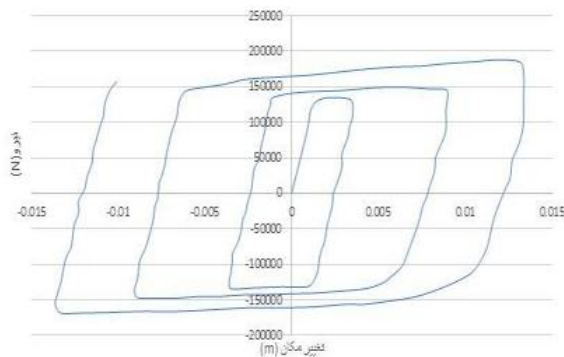
شکل ۱۸: منحنی هیستریزیس نمونه‌ی C3.

براساس شکل (۱۸)، حداکثر نیرو برابر ۲۰۷ کیلو نیوتون می‌باشد و حداکثر تغییر مکان هسته مقدار ۱۵/۴ میلی‌متر می‌باشد و منحنی هیستریزیس پایدار است. تفاوت این نمودار با حالت بدون سوراخ در میزان ۷/۵ درصد کاهش تنش و ۸ درصد کاهش در کرنش هسته است. مقدار انرژی میرا شده این نمونه برابر ۱۵/۰۵۵۱ ژول می‌باشد که ۱۷,۵ درصد کاهش انرژی نسبت به نمونه‌ی M دارد. در شکل (۱۹)، چهار حالت مقایسه شده‌اند.



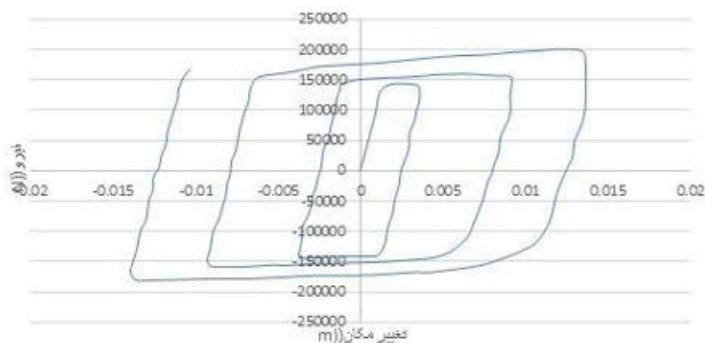
شکل ۱۹: مقایسه‌ی منحنی هیستریزیس نمونه‌ی M با نمونه‌های دایره‌ای شکل.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سوراخ‌ها، مساحت داخل منحنی‌های هیستریزیس افزایش یافته و جذب انرژی افزایش می‌یابد و عملکرد چرخه‌ای نمونه‌ها بهینه‌تر می‌گردد.



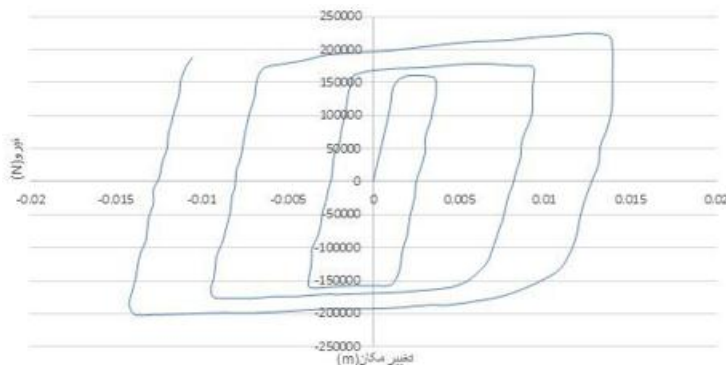
شکل ۲۰: منحنی هیستریزیس نمونه‌ی R<sub>1</sub>.

مطابق شکل (۲۰)، حداکثر نیرو برابر ۱۶۴ کیلو نیوتون می‌باشد و حداکثر تغییر مکان هسته مقدار ۱۳,۳ میلی‌متر می‌باشد و منحنی هیستریزیس پایدار است. تفاوت این نمودار با حالت بدون سوراخ در میزان ۳۶ درصد کاهش تنش و ۲۳ درصد کاهش در کرنش هسته می‌باشد. مقدار انرژی میرا شده این نمونه برابر ۸/۸۷۱۸۱ ژول می‌باشد که ۱۰ درصد کاهش انرژی نسبت به نمونه M دارد.



شکل ۲۱: منحنی هیستریزیس نمونه‌ی R<sub>2</sub>.

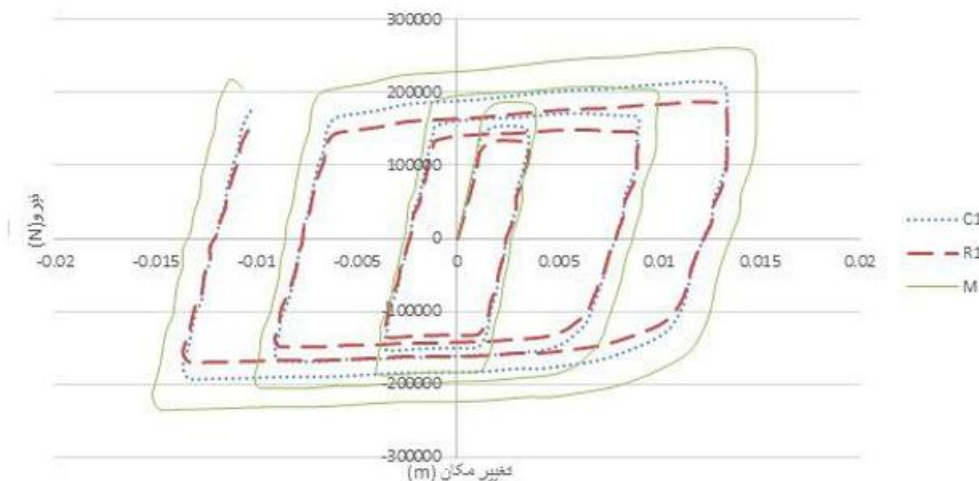
بر اساس شکل (۲۱)، حداکثر نیرو برابر ۱۸۰/۵ کیلو نیوتون می‌باشد و حداکثر تغییر مکان هسته مقدار ۱۴ میلی‌متر می‌باشد و منحنی هیستریزیس پایدار است. تفاوت این نمودار با حالت بدون سوراخ در میزان ۲۳/۵ درصد کاهش تنش و ۱۷ درصد کاهش در کرنش هسته می‌باشد. مقدار انرژی میرا شده این نمونه برابر ۱۱/۲۳۲۹ ژول می‌باشد که ۵۷/۴ درصد کاهش انرژی نسبت به نمونه M دارد.



شکل ۲۲: منحنی هیستریزیس نمونه R<sub>3</sub>.

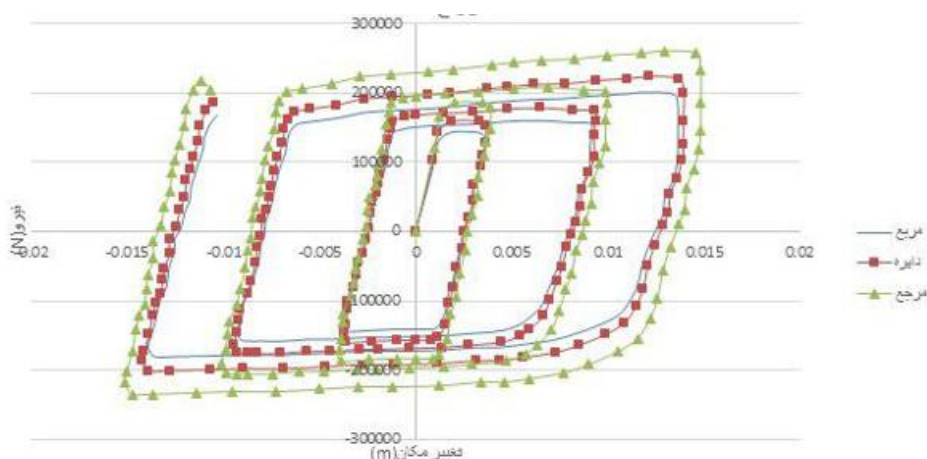


همان‌طور که در شکل (۲۲) مشخص است حداکثر نیرو برابر ۲۰۲ کیلو نیوتون می‌باشد و حداکثر تغییر مکان هسته مقدار ۱۴/۶ میلی‌متر می‌باشد و منحنی هیستریزس پایدار است. تفاوت این نمودار با حالت بدون سوراخ در میزان ۱۰ درصد کاهش تنش و ۱۲ درصد کاهش در کرنش هسته می‌باشد. مقدار انرژی میرا شده این نمونه برابر ۱۴/۰۱۱۳ ژول می‌باشد که ۲۶/۲ درصد کاهش انرژی نسبت به نمونه‌ی M دارد. در زیر مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نمونه با یک سوراخ دایروی و نمونه با یک سوراخ مستطیلی شکل با نمونه‌ی مرجع ارائه شده است.



شکل ۲۳: مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نمونه‌ی M با نمونه‌های مستطیلی شکل.

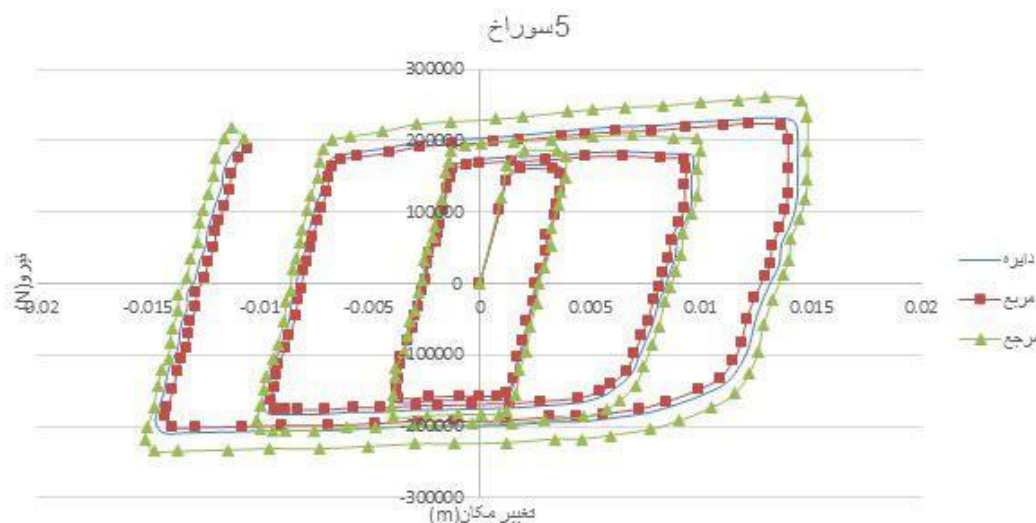
همان‌طور که در شکل (۲۳) ملاحظه می‌شود عملکرد چرخه‌ای هسته‌ی مهاربند زمانی که دارای سوراخ دایروی است بهتر از حالتی است که سوراخ مستطیل شکل باشد. تفاوت کاهش تنش بین دو نمونه با سوراخ دایروی و سوراخ مستطیل شکل زمانی که دارای یک سوراخ می‌باشند معادل ۱۹/۵ درصد و تفاوت در کرنش معادل ۶ درصد می‌باشد. در شکل (۲۴) مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نمونه با سه سوراخ دایروی و نمونه با سه سوراخ مستطیلی شکل با نمونه‌ی مرجع ارائه شده است.



شکل ۲۴: مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نمونه‌های M, C2, R2



مطابق شکل (۲۴)، عملکرد چرخه‌ای هسته‌ی مهاربند زمانی که دارای سه سوراخ دایروی است بهتر از حالتی است که دارای سه سوراخ مستطیلی شکل می‌باشد. تفاوت کاهش تنش بین دو نمونه با سوراخ دایروی و سوراخ مستطیلی شکل زمانی که دارای سه سوراخ می‌باشند معادل ۱۱ درصد و تفاوت در کرنش آن معادل ۴ درصد می‌باشد. در شکل (۲۵) مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نمونه با پنج سوراخ دایروی و نمونه با پنج سوراخ مستطیلی شکل با نمونه‌ی مرجع ارائه شده است.



شکل ۲۵: مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نمونه‌های  $M, C_3, R_3$ .

همچنین مطابق شکل (۲۵)، عملکرد چرخه‌ای هسته‌ی مهاربند زمانی که دارای پنج سوراخ دایروی است بهتر از حالتی است که دارای پنج سوراخ مستطیلی شکل می‌باشد. تفاوت کاهش تنش بین دو نمونه با سوراخ دایروی و سوراخ مستطیلی شکل زمانی است که دارای پنج سوراخ می‌باشند مقدار تنش معادل ۲/۵ درصد و تفاوت در کرنش معادل ۵ درصد می‌باشد.

## ۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی پاسخ‌های دینامیکی نمونه‌هایی از هسته‌ی مهاربند کمانش تاب از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدودی ABAQUS پرداخته شده است. تعداد ۶ مدل که شامل هسته با یک سوراخ دایره‌ای، سه سوراخ دایره‌ای، پنج سوراخ دایروی و یک و سه و پنج سوراخ مستطیل شکل که مساحت همگی سوراخ‌ها برابر می‌باشند مدل‌سازی و منحنی‌های هیستریزس تمامی مدل‌ها ارائه شده در نهایت نتایج حاصله در زیر ارائه گردیده‌اند.

- ۱- هسته‌ی مهاربندهای کمانش تاب مدل‌سازی شده همگی دارای منحنی هیستریزس پایدار و جذب انرژی مناسبی می‌باشند.
- ۲- در نمونه‌هایی از هسته‌ی مهاربند کمانش تاب که از سوراخ‌های دایروی استفاده شده، مساحت داخل منحنی‌های هیستریزس بیشتر از نمونه‌های دارای سوراخ مستطیلی شکل بوده است. این تفاوت در نمونه‌های  $C_1$  و  $R_1$  مقدار ۴۶/۵ درصد، در نمونه‌های  $C_2$  و  $R_2$  مقدار ۲۳/۳۴ و در نمونه‌های  $C_3$  و  $R_3$  ۷/۴۴ درصد به دست آمده است. به دلیل تمرکز تنش در گوشه‌های تیز سوراخ‌های مستطیلی شکل، این نمونه‌ها از جذب انرژی کمتری برخوردار می‌باشند به همین دلیل استفاده از سوراخ‌های دایروی به جای مستطیلی شکل توصیه می‌شود.



۳- در هر دو حالت استفاده از سوراخ‌های دایروی و سوراخ‌های مستطیلی شکل، زمانی که تعداد سوراخ‌ها در طول هسته بیشتر می‌شود، مساحت داخل منحنی‌های هیستریزیس بیشتر از حالتی است که از سوراخ‌های کمتر با مساحت برابر استفاده شده است. بدین منظور استفاده از سوراخ‌های بیشتر با مساحت کمتر به جای سوراخ کمتر با مساحت بیشتر توصیه می‌شود.

#### ۸- مراجع

- [۱] - یاراحمدی، ح. و سروش نیا، س.، ۱۳۹۰، بررسی ضریب رفتار قاب‌های مهاربندی شده با بادبند کمانش تاب زانویی، اولین کنفرانس بین المللی ساخت و ساز شهری در مجاورت گسل‌های فعال، تبریز، ایران.
- [2]- Tremblay, R., Degrange, G., Blouin, J., 1999, **Seismic rehabilitation of a four-storey building with a stiffened bracing system**, Proc., 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C. Canadian Association of Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., 549-554.
- [3]- Jia, M., Guo, L. & Lu, D., 2014, **Performance testing and comparison of buckling-restrained braces with H and crisscross cross section unrestrained segments**, International Journal of Steel Structure, 14, 745-753.
- [4]- Clark P, Aiken I, Tajirian F, Kasai K, Ko E, Kimura I., 1999, **Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices**, Design Procedures for Buildings Incorporating Hysteretic Damping Devices, 1, 1, 1-21.
- [5]- Yashino, T., Karino, Y., 1971, **Experimental Study on Shear Wall with Braces**, Architectural Institute of Japan, Structural Engineering, 11, 403-404, (in Japanese).
- [6]- Yu, Y. J., 2012, **A Type of Buckling Restrained Brace for Convenient Inspection and Replacement**, Journal of structural engineering, 12, 20-35.
- [7]- Hoveidae, N., Rafezy, B, 2012, **Overall Buckling Behavior of All Steel Buckling Restrained Braces**, Constructional Steel Research, 79, 3, 151-158.
- [8]- Piedrafita, D. Cahis, X. Simon, E., 2013, **A New Modular Buckling Restrained Brace for Seismic Resistant Buildings**, Engineering Structures, 56, 2, 1967-1975.
- [9]- Quan, G., Zona, A., Peng, Yi, Dall'Asta, A., 2014, **Effect of buckling-restrained brace model parameters on seismic structural response**, Constructional Steel Research, 98, 4, 100-113.
- [10]- Zhao, J., Wu, B., Wei, L., Jinping, O., 2014, **A practical and unified global stability design method of buckling-restrained braces: Discussion on pinned connection**, Journal of Constructional Steel Research, 95, 106-115.
- [۱۱]- اشتری، پ.، بیگدلی، ح.، قمی، ح.، ۱۳۹۴، بررسی رفتار لرزه‌ای بادبند‌های مقاوم در برابر کمانش BRB با هسته آلیاژ حافظه‌دار شکلی SMA، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ایران.
- [12]- Peng, P., Li, W., Xin, N., Kailai, D., Jiangbo, S., 2016, **Seismic performance of a reinforced concrete frame equipped with a double-stage yield buckling restrained brace**, The Structural Design of Tall and Specia, 26, 2, 153-170.
- [13]- Quan, Ch., Chun-Lin, W., Shaoping, M., Bin, Z., 2016, **Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces**, Engineering Structures, 111, 478-493.



- [14]- Canxing, Q., Yichen. Z., Han. L., Bing Q., Hetao, H., Li, T., 2018, **Seismic performance of Centrally Braced Frames with non-buckling braces**, Engineering Structures, 154, 1, 93-102.
- [15]-Abaqus, Abaqus/standard., 2012, Version 6.11, ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I.