

## بررسی پارامتری عملکرد چرخه‌ای مهاربندهای کمانش تاب PCBRB

حمید صابری<sup>۱\*</sup>، وحید صابری<sup>۲</sup>، علی خیرالدین<sup>۳</sup>، ساعد حبیب زاده<sup>۴</sup> و حمیدرضا میرزایی<sup>۵</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۹	
<b>واژگان کلیدی:</b> مهاربند کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار، بارگذاری چرخه‌ای، تحلیل عددی، شکل‌پذیری، مقاومت نهایی.	در این تحقیق پارامترهای مؤثر بر رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار PCBRB نظیر ضخامت مقطع، جنس مصالح و هندسه سوراخ‌های هسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی و تحلیل عددی ۸ نمونه هسته مهاربند PCBRB با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS تحت بار چرخه‌ای انجام گرفت؛ یک نمونه مرجع با ضخامت ۱۰ میلی‌متر که دقیقاً مطابق نمونه آزمایشگاهی مدل‌سازی و صحت‌سنجی شد، چهار نمونه با تغییر در ضخامت هسته، دو نمونه با تغییر در هندسه هسته و یک نمونه با تغییر در جنس مصالح مصرفی هسته. نتایج بیانگر آن است که با افزایش ضخامت؛ افزایش ظرفیت باربری تجربه می‌گردد. مدل با ضخامت ۱۵ میلی‌متر به دلیل سختی و اینرسی بیشتر نیروی بیشتری تحمل می‌نماید؛ ولی به دلیل شکل‌پذیری کمتر در زمان رسیدن به تنش تسلیم؛ افت مقاومت بیشتری دارد؛ تا جایی که در ناحیه کششی دچار افت مقاومت می‌گردد. مدل با سوراخ‌های دایره‌ای دارای بهترین عملکرد است، به طوری که در مقایسه با مدل‌ها با سوراخ‌های بیضی و مستطیل در ناحیه فشاری (ربع سوم) بسیار دیرتر کمانش کرده و سطح زیر منحنی تنش و کرنش بزرگ‌تری تشکیل داده و ظرفیت باربری و اتلاف انرژی بیشتری دارد. مدل با هندسه سوراخ‌های هسته مستطیل دارای عملکرد پایینی است. به طوری که در ناحیه فشاری نمودار چرخه‌ای (ربع سوم) حتی به نیمی از ظرفیت باربری و مقاومت نهایی مدل با هندسه هسته دایره‌ای نمی‌رسد. هسته مهاربند با مصالح آلومینیم در طول بارگذاری نیروی کمتری نسبت به هسته با مصالح فولادی تحمل می‌نماید؛ اما این کمبود را در کمانش موضعی دیرتر؛ به‌خصوص در ناحیه فشاری جبران می‌نماید.

### ۱- مقدمه

طراحی سازه‌ها به گونه‌ای که برای مقابله با زلزله‌های شدید رفتار کاملاً الاستیک داشته باشند از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. در نتیجه در طراحی سازه‌ها از روش‌هایی مانند کنترل غیرفعال سازه‌ها در برابر زلزله استفاده می‌شود.

در این روش برخی از اعضای سازه‌ای خسارت‌هایی را در هنگام زلزله‌های شدید متقبل می‌شوند تا بدین وسیله تلاش‌های وارد بر اعضای اصلی سازه مانند ستون‌ها کاهش یافته و لذا سازه از آسیب‌های عمده در امان باشد. امروزه استفاده از مهاربندهای میرا کننده انرژی در سازه‌ها به

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: saberi.hamid@gmail.com

۱. استادیار دانشکده عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

۲. استادیار دانشکده عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

۳. استاد دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

۵. کارشناس ارشد سازه، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

منظور اتلاف انرژی زلزله مورد توجه فراوان قرار گرفته است. مزیت اصلی استفاده از این مهاربندها، جذب انرژی زلزله از اجزایی مجزا از قاب سازه است. این امر منجر به کاهش آسیب‌های سازه اصلی در هنگام وقوع زلزله گردیده و دارای مزیت فراوان اقتصادی می‌باشد. در میان انواع مختلف مهاربندها، مهاربندهای کمانش ناپذیر به دلیل هزینه کم، قابلیت اطمینان بالا و فقدان اجزای مکانیکی در آن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر به دلیل عدم کمانش و اتلاف انرژی زیاد یکی از روش‌های مؤثر در کنترل غیرفعال سازه است. با این حال با تمام تحقیقات انجام شده و اطلاعات در دسترس، هنوز راهی طولانی برای دستیابی به دانش تحلیل و طراحی مهاربندهای کمانش ناپذیر با حداکثر کارایی و بهره‌وری، برای جامعه مهندسی باقی مانده است. این مهم سبب گردیده، محققان زیادی در سراسر جهان برای رسیدن به سطح مهمی از تکامل در این فناوری فعالیت نمایند. یکی از این دستاوردها، نوع جدیدی از مهاربندها با عنوان مهاربند کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار PCBRB<sup>1</sup> است. هسته این نوع مهاربند متشکل از صفحه فولادی سوراخ‌داری است که به وسیله بخش تکیه‌گاهی ثابت می‌شود. این هسته به گونه‌ای طراحی شده که دو بخش جانبی تسلیم (به شکل نوار) با فاصله ثابت ایجاد می‌نماید که به وسیله پل یا تسمه‌هایی به هم متصل می‌شوند و نوارهای جانبی به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا با نیروی محوری جاری شوند. در این تحقیق به بررسی پارامترهای مؤثری شامل: ضخامت مقاطع، جنس مصالح و هندسه سوراخ‌های هسته (نوارهای جانبی و پل‌های تثبیت کننده)، بر تغییرات عملکرد چرخه‌ای مهاربند مقاوم در برابر کمانش با هسته سوراخ‌دار پرداخته می‌شود.

تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که هر یک از این تحقیقات سعی در بهینه‌سازی عملکرد مهاربندهای کمانش ناپذیر داشته است. زهرایی و رنایی در سال ۲۰۰۵ با یک پژوهش در مورد استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر در مقاوم‌سازی لرزه‌ای اتصالات خورجینی توسط مدل‌سازی یک اتصال خورجینی، رفتار غیرخطی لنگر-دوران این اتصال تعیین گردید و قاب خورجینی دارای اتصال مذکور مورد تحلیل غیرخطی تحت شتاب

نگاشت‌های مقیاس شده قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که به علت سختی و مقاومت کم اتصال خورجینی، این قاب در اثر تغییر مکان‌های جانبی زیاد و تشدید پدیده P- $\Delta$  همچنین تشکیل مفصل پلاستیک در محل پای ستون‌ها دچار فروریزش می‌گردد. در نهایت با استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر این قاب خورجینی آسیب‌پذیر، در برابر بارگذاری زلزله محاسبه و مقاوم‌سازی گردید. مزیت مقاوم‌سازی به این روش در مقایسه با تبدیل قاب به یک قاب خمشی، حجم مقاوم‌سازی کمتر به‌ویژه عدم نیاز به تقویت تیرهای خورجینی و در مقایسه با مهاربندهای هم‌محور متعارف ظرفیت شکل‌پذیری بیشتر است [۱]. شریعتمدار و عباس زاده در سال ۲۰۰۹ به مدل‌سازی مهاربندهای مقید شده در برابر کمانش تحت اثر بارهای دینامیکی پرداختند. مدل‌سازی مهاربندهای کمانش ناپذیر به صورت واقعی-کامل علاوه بر وقت گیر بودن، زمان تحلیل و حجم اطلاعات خروجی را زیاد می‌کند، به منظور جلوگیری از معایب فوق مدل ساده فولاد هسته-فنر در این پژوهش آنها ارائه شد. آن‌ها دریافتند ایجاد فنر در هر دو جهت عرضی مقطع مانع از کمانش فولاد هسته می‌شود و تسلیم فشاری در هسته فولادی همانند نمونه واقعی رخ می‌دهد [۲]. در پژوهش دیگر، عبدالله زاده و محمدی در سال ۲۰۱۲ ضریب رفتار قاب‌های دوگانه فلزی با مهاربندهای هم‌محور بزرگ مقیاس را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند با افزایش تعداد طبقات، نرخ کاهش ضریب کاهش ناشی از شکل‌پذیری در مقایسه با نرخ کاهش ضریب کاهش ناشی از اضافه مقاومت، سریع‌تر بوده و این امر اهمیت بیشتر پارامتر ضریب کاهش ناشی از شکل‌پذیری را در محاسبه ضریب رفتار بیان می‌کند [۳]. جیا و همکارانش در سال ۲۰۱۳، یک قاب کامپوزیتی مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش BRBCF<sup>2</sup> و یک قاب کامپوزیت CF<sup>3</sup> که دارای اجزای توخالی مدور و پر شده از بتن بودند؛ طراحی و تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی آزمایش کردند. نتایج تحقیق نشان داد که آزمایش BRBCF در مقایسه با آزمایش CF عملکرد مناسب‌تری را به نمایش گذاشته و کاهش مقاومتی در طول آزمایش چرخه‌ای شبه استاتیکی اتفاق نیفتاده و دارای شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی قابل قبولی بود [۴].

<sup>3</sup> Composite frame

<sup>1</sup> Perforated core buckling restrained brace

<sup>2</sup> Buckling restrained braced composite frame

آسیب‌های قابل توجهی در قاب رخ داد [۸]. پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ پژوهشی در زمینه مهاربندهای کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار PCBRB انجام دادند. آن‌ها دو نوع نمونه PCBRB با استفاده از سه پروتکل بارگذاری مختلف طراحی و آزمایش کردند. نتایج تحقیق نشان داد نمونه‌های با فاصله کمتر میان پل‌های تثبیت کننده نوارهای عرضی، واکنش پایداری نشان دادند در حالی که نمونه‌های با فاصله بیشتر میان پل‌های تثبیت کننده، در برابر کمانش موضعی بیشتر در خطر بوده و بنابراین دارای شکل‌پذیری کمتری بوده و احتمال افت فزاینده ظرفیت فشاری ایجاد شده ناشی از کمانش موضعی بودند [۹]. بین و یانگ در سال ۲۰۱۴ در تحقیقی به بررسی مکانیسم کمانش در هسته فولادی مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش بارمحوری، حالت کمانشی توسعه می‌یابد. فرمول حداکثر نیروی برخورد و حداکثر گشتاور خمشی مهاربند به دست آمده و نتایج تحلیلی توسط تجزیه و تحلیل اجزاء محدود تأیید شد. در مقایسه با نتایج تحلیل‌های متعارف، تعداد نقاط برخورد یا امواج کمانش بسیار کمتر بوده و برای انتهای مفصلی، نیروی برخورد در حالت پایین‌تر کاملاً برابر است در حالی که نیروی برخورد برای حالت‌های بالاتر ۱/۴ پایین‌تر است. برای انتهای ثابت، نیروی برخورد نصف روش‌های متعارف است [۱۰]. دهکردی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ پژوهشی در مورد ارزیابی مهاربندهای فولادی همگرا، واگرا و کمانش‌گریز در بهسازی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی انجام دادند. در حالت تقویت سازه‌ها با مهاربندهای کمانش‌گریز، سازه‌ها دارای سختی قابل قبول بودند و مهاربندها در مقایسه با مهاربندهای همگرا دچار کمانش نگردیدند. ساختمان‌های تقویت شده با این مهاربندها دارای منحنی ظرفیت متقارن و پایداری می‌باشند و سطح عملکرد قابل قبولی دارند. در نتیجه طرح تقویت با مهاربندهای کمانش‌گریز، معایب مهاربندهای همگرا را برطرف نموده و از سختی و شکل‌پذیری قابل قبولی برخوردار بودند [۱۱]. روح‌پرور و حاجی کاظمی در سال ۲۰۱۷، در تحقیقی قابلیت و امکان به‌کارگیری مصالح FRP<sup>۵</sup> به‌عنوان پوسته‌ی بادبند کمانش ناپذیر جهت جلوگیری از کمانش بادبند را

اوزگور و فنلی در سال ۲۰۱۳، یک سیستم جدید قاب مهاربند مقاوم در برابر کمانش هیبرید (ترکیبی) با استفاده از مواد فولاد مختلف، از جمله فولاد کربن A36، فولاد با کارایی بالا HPS<sup>۱</sup> و نقطه تسلیم پایین LYP<sup>۲</sup> در هسته فولادی طراحی کرده و آنالیز استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی بر روی انواع مدل‌ها انجام داده و به مقایسه رفتار لرزه‌ای مهاربندهای کمانش ناپذیر شکل‌پذیر BRBF<sup>۳</sup> استاندارد و ترکیبی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد، سیستم‌های BRBF هیبرید ترکیبی بهبود قابل توجهی از نظر مشکل آسیب ناشی از کاهش قابل توجه در جابجایی باقی مانده، بیش از سیستم‌های BRBF استاندارد داشته‌اند [۵]. جونکسیان و بین در سال ۲۰۱۳، در تحقیقی به بحث در خصوص روش طراحی پایدار، یکپارچه و عملی برای اتصالات لولایی به صورت پین در مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش پرداختند. در این تحقیق، روش ضریب تشدید لنگر MAF<sup>۴</sup> برای ساده‌سازی تابع ممان خمشی BRB<sup>۵</sup> با اتصالات لولایی (پین) مرسوم پیشنهاد و سپس با مطالعه‌ی پارامتریک بر روی پارامترهای کلیدی مؤثر بر MAF پرداخته و تابع ساده شده‌ی پیشنهاد شده است [۶].

پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳، در تحقیقی، مدلی جدید از مهاربند ماژولی MBRB<sup>۶</sup> طراحی کردند که تحت برش تسلیم شده که بخش اولیه اتلاف انرژی برشی SBDU<sup>۷</sup> در داخل یک هسته ماژولی قرار می‌گیرند. نتایج تحقیق نشان داد، در نمونه‌های آزمایش شده تحت سه پروتکل بارگذاری، زمانی که ضخامت SBDU بیشتر شود، تغییر شکل پلاستیک مهاربندهای کمانش ناپذیر نیز یکنواخت‌تر می‌شود [۷]. کیت و همکارانش در سال ۲۰۱۳، در تحقیقی به ارزیابی آزمایشگاهی قاب‌های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش مسطح و سه‌بعدی تمام مقیاس با بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که رفتار هیستریک BRBF برای تغییر شکل غیر ارتجاعی بسیار مناسب است، با این حال رخداد آسیب‌های شدید و ناپایداری در جابجایی‌های بزرگ محتمل است. در اکثر موارد، این رفتار ناخواسته، ناشی از تغییر شکل غیر ارتجاعی تیرها و ستون‌ها در مفاصل بود. در جابجایی‌های بزرگ،

<sup>5</sup> Buckling restrained brace

<sup>6</sup> Modular buckling restrained brace

<sup>7</sup> Shear basic dissipation units

<sup>8</sup> Fiber reinforced polymers

<sup>1</sup> High performance steel

<sup>2</sup> Lower yield point

<sup>3</sup> Buckling restrained brace frame

<sup>4</sup> Moment amplification factor

مهاربندها دارد. لذا بررسی این پارامترها ضمن ایجاد درک صحیحی از محدوده تأثیرپذیری رفتار این مهاربندها با تغییر این پارامترها، مهندسین طراح را در انتخاب نوع مهاربند بهینه یاری می‌نماید. در این مقاله پس از تأیید صحت شیوه مدل‌سازی عددی با مقایسه نتایج مدل‌های آزمایشگاهی پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] اقدام به مدل‌سازی ۸ نمونه مهاربند PCBRB شامل یک نمونه مرجع، چهار نمونه با تغییر در ضخامت هسته، دو نمونه با تغییر در هندسه هسته و یک نمونه با تغییر در جنس مصالح مصرفی هسته گردید؛ و به بررسی و مقایسه‌ای نتایج تحلیل عددی، از جمله ظرفیت محوری، استهلاک انرژی و تغییرات تنش در مقطع هسته‌ها می‌پردازیم

### ۳- روش تحقیق و صحت سنجی

#### ۳-۱- معرفی مهاربند کمانش ناپذیر با هسته‌ی

##### سوراخ‌دار PCBRB

هسته‌ی سوراخ‌دار PCBRB از یک صفحه‌ی مسطح تشکیل می‌شود که دارای دو نوار عرضی متصل شده به وسیله‌ی پل‌های تثبیت‌کننده‌ی عرضی هم فاصله‌ی مختلف است (شکل ۱). نوارهای عرضی برای تسلیم شدن تحت نیروهای محوری به مانند BRB قدیمی طراحی شده‌اند، در حالی که پل‌های تثبیت‌کننده برای الاستیک ماندن طراحی می‌شود. واحد نگه‌دارنده از چندین پروفیل U شکل فولادی تشکیل می‌شود که برای تشکیل یک پروفیل حرفه‌ای جوش خورده‌اند تا دو هدایت‌کننده‌ی طولی برای هسته ایجاد کنند. هدایت‌کننده‌ها، پل‌های تثبیت‌کننده، نوارهای عرضی را تحت فشردگی پایدار نگه می‌دارند. PCBRB به وسیله‌ی دو مفصل به سازه اصلی متصل می‌شود. پین دیگر داخلی؛ هسته و واحد نگه‌دارنده را برای پیشگیری از خارج شدن واحد نگه‌دارنده از مرکز به هم متصل می‌کند (شکل ۲). ابعاد کلیدی هسته PCBRB در شکل (۳) نشان داده شده است.

#### ۳-۲- جزئیات نمونه و مکانیسم شکست نمونه I.3

مهاربند توسط اتصال پین در آزمایشگاه نصب گردید. حداکثر تغییر شکل مهاربند بر پایه آیین‌نامه AISC341-05 و آیین‌نامه EN15129[22] برای ارتفاع طبقه ۳ متر محاسبه گردید. بارگذاری بر روی مهاربند توسط جک هیدرولیکی قابل کنترل ۳۰۰ کیلو نیوتن بارگذاری گردید و

مورد آزمایش قرار دادند. بررسی سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها، نشان داد که ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌ی بادبندی که با پوسته GFRP<sup>۱</sup> حول محور قوی در کل طول آزاد هسته محصور شده بود، نسبت به سایر نمونه‌های بدون پوسته از افزایش قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار است [۱۲]. غلام و مارنانی در سال ۲۰۱۷ به بررسی رفتار مهاربندهای کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار در ساختمان‌های فولادی با تغییر در فاصله سوراخ‌ها پرداختند. هدف اصلی تحلیل عددی مطالعه رفتار مهاربند کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار تحت بار چرخه‌ای و نحوه اندرکنش جزء محصور کننده و هسته بود. بدین منظور ۱ مدل عددی که به ترتیب دارای ۴ و ۳ سوراخ لوبیایی ولی فواصل متفاوت بودند، تحت بار چرخه‌ای تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفته و نمودار چرخه‌ای آنها استخراج و کانتورهای تنش فون میزس و کرنش پلاستیک برای آنها ثبت شد. نتایج بررسی حاکی از آن بود که بررسی توزیع کرنش پلاستیک نمونه‌ها نشان داد که باند کناری در بیشینه بار فشاری دارای توزیع یکنواخت کرنش پلاستیک بوده و با افزایش بارگذاری فشاری از مقدار صفر تا ۴/۹ میلی‌متر افزایش یافته است. با افزایش فاصله خالص بین سوراخ‌ها در هسته مهاربند، سبب لهیدگی جزئی محوری هسته قبل از کمانش و حذف مدل‌ها از دامنه انتخاب می‌گردد. همچنین با کاهش فاصله خالص بین سوراخ‌ها در هسته مهاربند، تغییر شکل درون صفحه باند کناری بیشتر شده و سیستم شکل‌پذیری و جذب انرژی بالاتری را تأمین می‌کند [۱۳].

پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] بر روی دو نمونه مهاربند کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار با استفاده از سه پروتکل بارگذاری انجام شد. در تحقیق حاضر بر پارامترهای مؤثر بر رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار نظیر ضخامت مقطع، جنس مصالح و هندسه سوراخ‌های هسته تمرکز شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

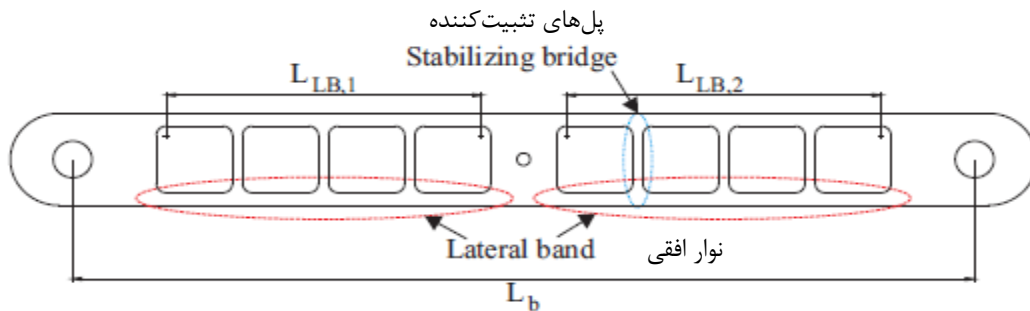
#### ۲- مبانی نظری تحقیق

با توجه به اینکه تغییر در پارامترهای طرح یک PCBRB از جمله ضخامت هسته، جنس هسته و هندسه سوراخ‌های هسته، تأثیر بسیار زیادی در رفتار چرخه‌ای این‌گونه

<sup>۱</sup> Glass fiber reinforced polymer

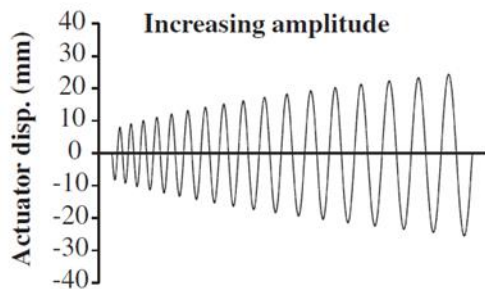
I.3 در نوع الگوی بارگذاری آن‌ها می‌باشد.

برای مکانیسم شکست مورد آزمایش قرار گرفت. شکل (۴) جزئیات نمونه I را نشان می‌دهد. تفاوت نمونه I.1 و I.2 و



شکل ۱- هسته PCBRB، شامل نوارهای عرضی و پل‌های تثبیت‌کننده، پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹]

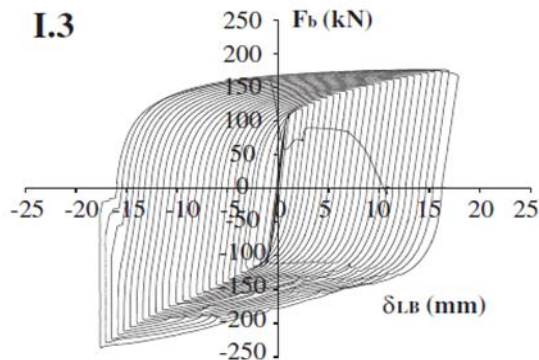
شکل (۵) الگوی بارگذاری برای نمونه I.3 در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] را نشان می‌دهد. ماهیت بارگذاری از نوع تغییر مکان به صورت افزایشی است.



شکل ۵- جزئیات آزمایشگاهی نمونه I

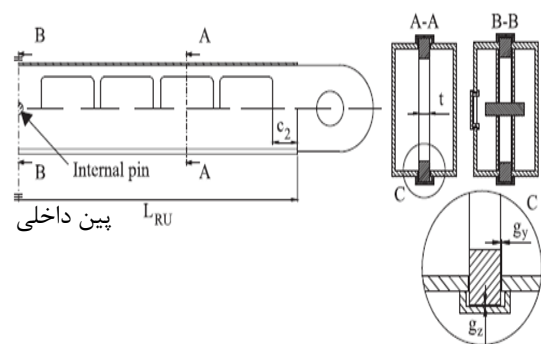
در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹]

در شکل (۶) پاسخ آزمایشگاهی نمودار چرخه‌ای نمونه شماره I.3 در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] را نشان می‌دهد که در آن نیرو برحسب کیلو نیوتن و تغییرات طول نوارهای افقی یا Lateral Band که قبلاً در شکل (۱) نمایش داده شده است.

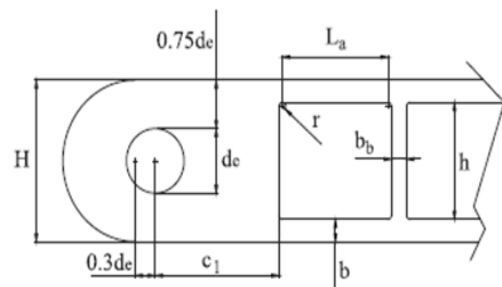


شکل ۶- پاسخ آزمایشگاهی نمونه I.3

در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹]

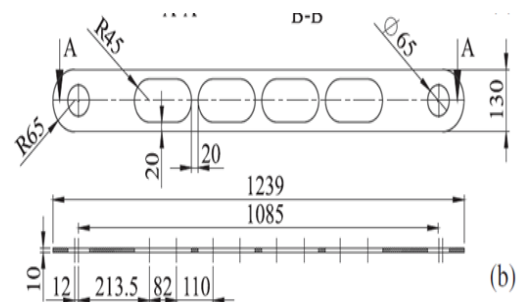


شکل ۲- جزئیات جداگانه یک PCBRB پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹]



شکل ۳- ابعاد کلیدی هسته PCBRB

پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹]



شکل ۴- جزئیات آزمایشگاهی نمونه I

در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹]

در مقادیر حداکثر ظرفیت محوری مشاهده شد و هر دو مدل در طول بارگذاری چرخه‌های کاملاً پایدار را نشان می‌دهند.

جدول ۱ جزئیات نمونه‌های عددی مهارنده کمانش ناپذیر با هسته سوراخ‌دار را نشان می‌دهد. پارامترهای داخل جدول قبلاً در شکل (۳) نشان داده شده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها Oval بیانگر هندسه بیضی شکل سوراخ هسته مهارنده، Steel بیانگر جنس فولادی هسته مهارنده، پارامتر T نشان دهنده ضخامت هسته مهارنده، Aluminium بیانگر جنس آلومینیومی هسته مهارنده، Rectangular بیانگر هندسه مستطیل شکل سوراخ هسته مهارنده و Circle بیانگر هندسه دایره‌ای شکل سوراخ هسته مهارنده است. ابعاد در نظر گرفته شده در جدول ۱ بر اساس ابعاد شکل (۴) است. تفاوت آن با نمونه صحت سنجی شده I.3، در هندسه سوراخ‌های هسته مهارنده است. در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] مقاله تبدیل به هندسه دایره‌ای شکل با مساحت مساوی بیضی می‌باشد. همچنین ضخامت هسته مهارنده در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] ۱۰ میلی‌متر می‌باشد که برای مقایسه بهتر در این مقاله ضخامت بین ۵-۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شکل (۷) مکانیسم شکست نمونه I.3 را نشان می‌دهد. EX در شکل منطقه خارجی و In منطقه داخلی از مهارنده در آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۷- مکانیسم شکست نمونه I.3

در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹]

### ۳-۳- شیوه مدل‌سازی عددی و معتبر سازی آن

برای مدل‌سازی عددی، ابتدا شیوه مدل‌سازی عددی با مقایسه نتایج با نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی می‌شود. برای این منظور نمونه I.3 در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] به صورت عددی توسط نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد؛ و نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. مشخصات هندسی نمونه عددی و نمونه آزمایشگاهی کاملاً منطبق است. در حین آنالیز، نیروی محوری ایجاد شده تحت جابجایی وارد شده قرائت شده و در نهایت نمودار چرخه‌ای نیرو- جابجایی ترسیم گردیده و با نقطه‌یابی نقاط حداکثر نمودار چرخه‌ای در ناحیه کششی و ناحیه فشاری، نسبت به ترسیم نمودار پوش نقاط حداکثر برای این مهارندها اقدام گردید. انطباق نسبتاً خوبی بین نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی، اختلاف ۸ درصدی

جدول ۱- جزئیات نمونه‌های عددی PCBRB در پژوهش حاضر

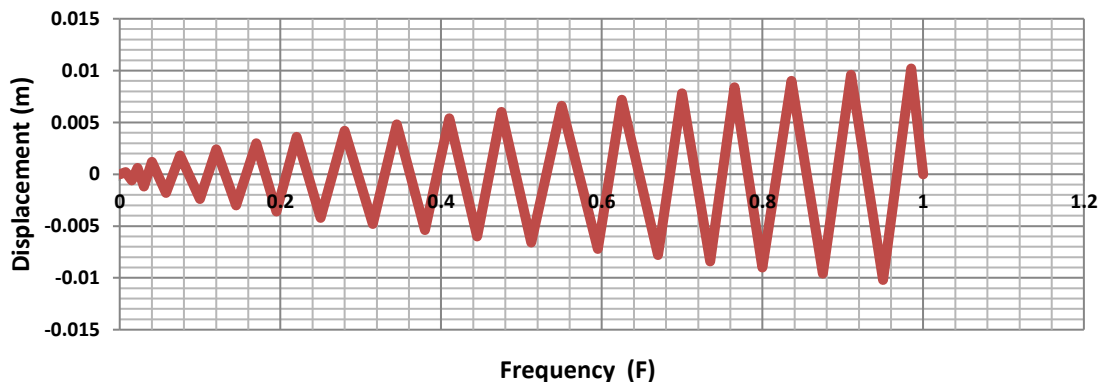
Model Name:	bb (mm)	de(mm)	r(mm)	Lb/۲ (mm)	c1(mm)	t(mm)	b(mm)	H(mm)	h(mm)	La (mm)
PCBRB - OVAL-STEEL-T=۵	۳۰	R۶۵	R۴۵	۱۰۸۵	۲۱۳,۵	۵	۲۰	۱۳۰	۹۰	۸۰
PCBRB - OVAL-STEEL-T=۷,۵	۳۰	R۶۵	R۴۵	۱۰۸۵	۲۱۳,۵	۷,۵	۲۰	۱۳۰	۹۰	۸۰
PCBRB - OVAL-STEEL-T=۱۰	۳۰	R۶۵	R۴۵	۱۰۸۵	۲۱۳,۵	۱۰	۲۰	۱۳۰	۹۰	۸۰
PCBRB - OVAL-STEEL-T=۱۲,۵	۳۰	R۶۵	R۴۵	۱۰۸۵	۲۱۳,۵	۱۲,۵	۲۰	۱۳۰	۹۰	۸۰
PCBRB - OVAL-STEEL-T=۱۵	۳۰	R۶۵	R۴۵	۱۰۸۵	۲۱۳,۵	۱۵	۲۰	۱۳۰	۹۰	۸۰
PCBRB - ALUMINIUM-T=۱۰	۳۰	R۶۵	R۴۵	۱۰۸۵	۲۱۳,۵	۱۰	۲۰	۱۳۰	۹۰	۸۰
PCBRB - RECTANGULAR-STEEL-T=۱۰	۳۰	R۶۵	.	۱۰۸۵	۲۱۳,۵	۱۰	۲۰	۱۳۰	۹۰	۱۵۰
PCBRB - CIRCLE-STEEL-T=۱۰	۳۰	R۶۵	R۴۰	۱۰۸۵	۱۶۰	۱۰	۲۵	۱۳۰	۹۰	.

جدول ۲- مصالح استفاده شده در مدل سازی

Stress (Mpa)	۲۶۷	۳۹۷	۴۷۶	۵۴۸	۵۵۵
Strain(mm/mm)	۰	۰,۰۳	۰,۰۸	۰,۱۷	۰,۲۱

می باشد. برای به دست آوردن پاسخ چرخه‌ای مناسب تر در فاز خطی و غیرخطی در این پژوهش مقدار جابجایی دو برابر و با نرخ ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. شکل (۸) ماهیت بارگذاری چرخه‌ای را نشان می دهد.

در جدول ۲ مشخصات مکانیکی مصالح مدل سازی شده شامل تنش و کرنش نشان داده شده است. در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] مقدار جابجایی حداکثر ۴/۸ میلی متر در بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۸- بارگذاری چرخه‌ای استاندارد طبق پروتکل آزمایش

شکل ۹ و ۱۰ نمونه مدل سازی هسته مهاربند کمانش- ناپذیر را در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] و پژوهش حاضر، در نرم افزار اجزا محدود آباکوس را نشان می دهد.

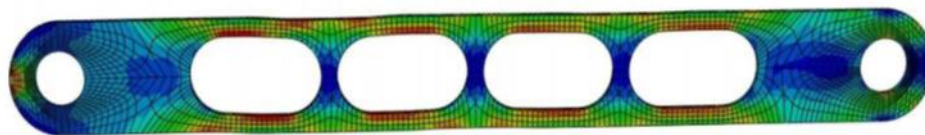
جدول ۳ جزئیات بارگذاری چرخه‌ای شامل فرکانس و تغییر مکان اعمال شده را نشان می دهد. نرخ تغییر مکان و فرکانس توسط نرم افزار اکسل در شکل (۸) استخراج شده است.

جدول ۳- جزئیات بارگذاری چرخه‌ای (فرکانس و جابجایی اعمال شده)

Frequency (f)	Displacement (m)	Frequency (f)	Displacement (m)	Frequency (f)	Displacement (m)
۰	۰	۰,۱۹۵	-۰,۰۰۳۶	۰,۵۹۵	-۰,۰۰۷۲
۰,۰۰۷۵	۰,۰۰۰۲	۰,۲۲	۰,۰۰۳۶	۰,۶۲۵	۰,۰۰۷۲
۰,۰۱۵	-۰,۰۰۰۶	۰,۲۵	-۰,۰۰۴۲	۰,۶۷	-۰,۰۰۷۸
۰,۰۲۲	۰,۰۰۰۶	۰,۲۸	۰,۰۰۴۲	۰,۷	۰,۰۰۷۸
۰,۰۳	-۰,۰۰۱۲	۰,۳۱۵	-۰,۰۰۴۸	۰,۷۳۵	-۰,۰۰۸۴
۰,۰۴	۰,۰۰۱۲	۰,۳۴۵	۰,۰۰۴۸	۰,۷۶۵	۰,۰۰۸۴
۰,۰۵۷۵	-۰,۰۰۱۸	۰,۳۸	-۰,۰۰۵۴	۰,۸	-۰,۰۰۹
۰,۰۷۵	۰,۰۰۱۸	۰,۴۱	۰,۰۰۵۴	۰,۸۳۶	۰,۰۰۹
۰,۱	-۰,۰۰۲۴	۰,۴۴۵	-۰,۰۰۶	۰,۸۷۵	-۰,۰۰۹۶
۰,۱۲	۰,۰۰۲۴	۰,۴۷۵	۰,۰۰۶	۰,۹۱	۰,۰۰۹۶
۰,۱۴۵	-۰,۰۰۳	۰,۵۱۲	-۰,۰۰۶۶	۰,۹۵	-۰,۰۱۰۲
۰,۱۷	۰,۰۰۳	۰,۵۵	۰,۰۰۶۶	۰,۹۸۵	۰,۰۱۰۲
				۱	۰



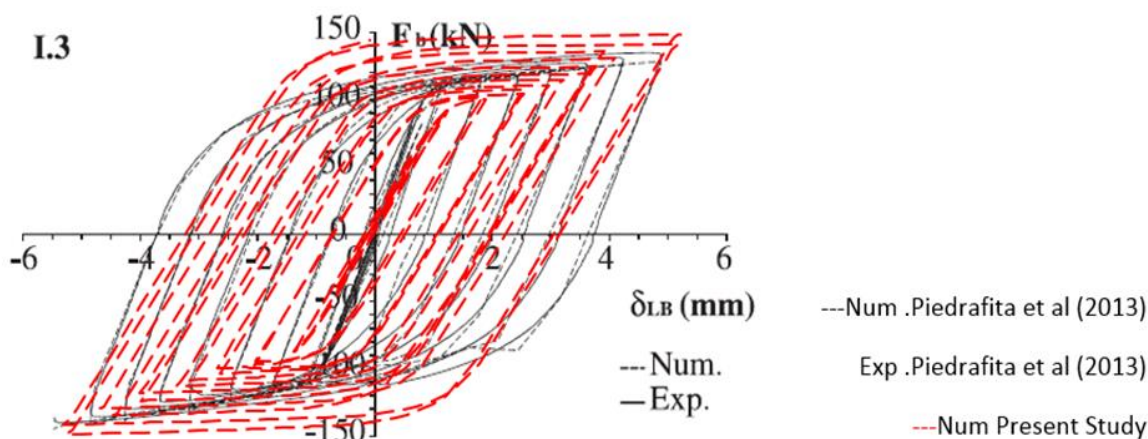
شکل ۹- مدل سازی نمونه پژوهش آزمایشگاهی در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۷]



شکل ۱۰- مدل سازی هسته مهاربند در نرم افزار آباکوس در این پژوهش

هسته سوراخ دار نمونه آزمایشگاهی I.3 و نمودار مدل عددی در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] و همچنین مدل عددی پژوهش حاضر را نشان می دهد.

نمونه I.3 برای صحت سنجی مدل آزمایشگاهی در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ نمودار چرخه ای مهاربند کمانش ناپذیر با



شکل ۱۱- نمودار چرخه ای مدل آزمایشگاهی و عددی در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] و مدل عددی در پژوهش حاضر

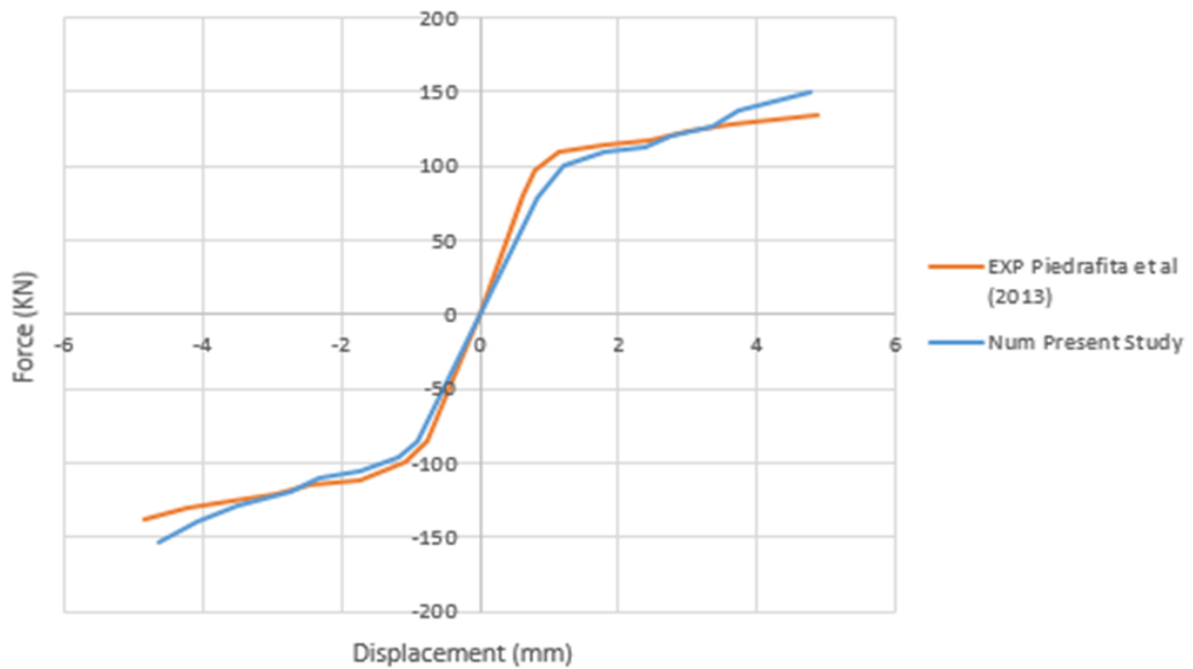
ضخامت، تغییر جنس مصالح و تغییر هندسه سوراخ های هسته از بیضی به مستطیل و دایره؛ اقدام به افزایش میزان جابجایی بیش از ۲ برابری تا حداکثر ۱۰ میلی متر گردید؛ تا هم در محدوده خطی و هم در محدوده غیرخطی پاسخ هیستریک مهاربندها مشخص گردد. شکل (۱۳)، نمودار چرخه ای را برای تمامی مدل ها نشان می دهد؛ که در آنها محور افقی جابجایی در راستای طولی؛ و محور قائم؛ نیروی محوری تحمل شده توسط مهاربندها می باشد. این نمودارها به درستی؛ کاهش مقاومت و افت ظرفیت ناشی از کمانش را در مهاربندها نشان می دهد. شکل (۱۴) و (۱۵) به ترتیب نمودار چرخه ای مقایسه ای و نمودار پوش مقایسه ای نتایج مدل عددی با هندسه سوراخ دایره ای و مستطیلی با ضخامت ۱۰ میلی متر را نشان می دهد.

به منظور بررسی دقیق تر صحت سنجی نمودار پوش نمودارهای چرخه ای نمونه آزمایشگاهی در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] و مدل عددی پژوهش حاضر در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

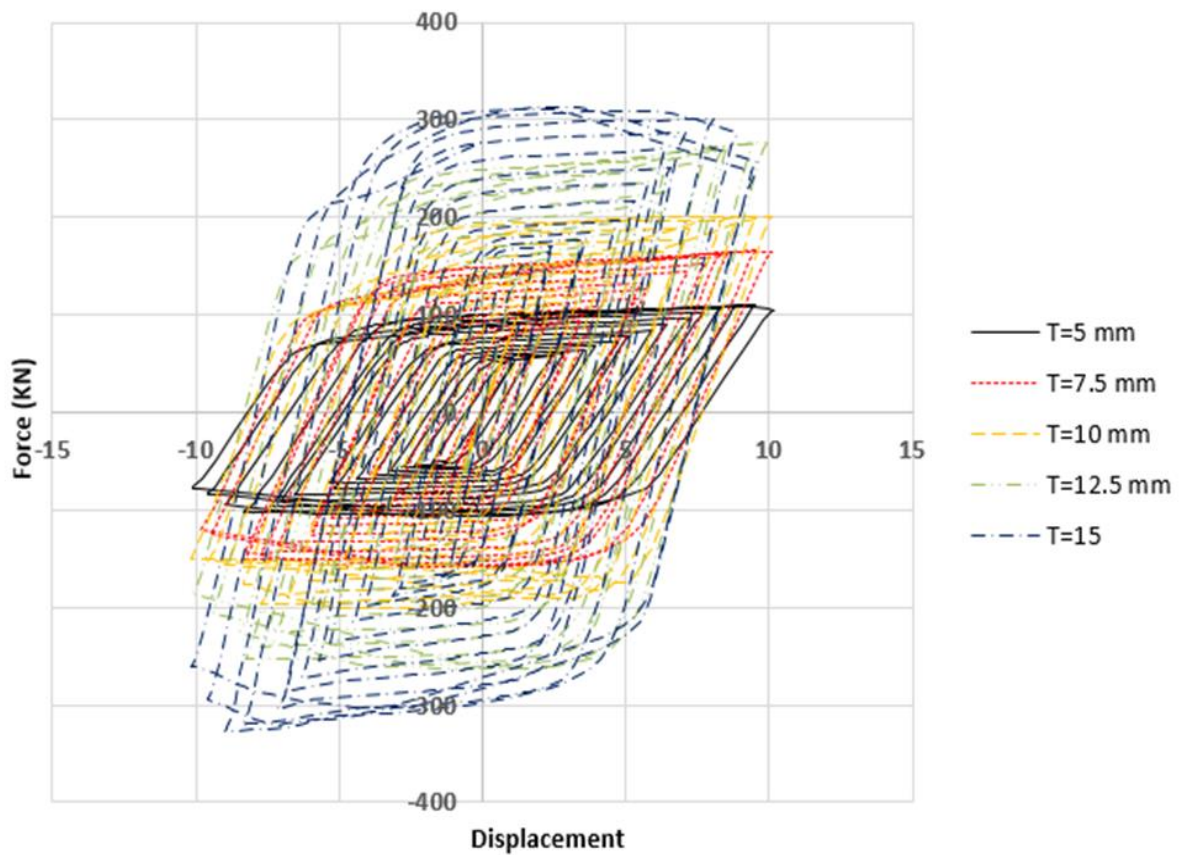
#### ۴- بررسی پارامتریک مدل های عددی PCBRB

نمونه مورد استفاده برای صحت سنجی (مدل آزمایشگاهی I.3 در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹]) نشان دهنده چرخه های پایدار هسته این مهاربند با ضخامت ۱۰ میلی متر و شکل سوراخ های هسته بیضی؛ تحت بارگذاری چرخه ای بر اساس تغییر شکل دوره ای با قرار افزایش دامنه تا جابجایی حداکثر ۴/۸ میلی متر است. لذا جهت بررسی دقیق تر رفتار چرخه ای مهاربند PCBRB در هنگام ایجاد تغییرات پارامتریک (افزایش و یا کاهش

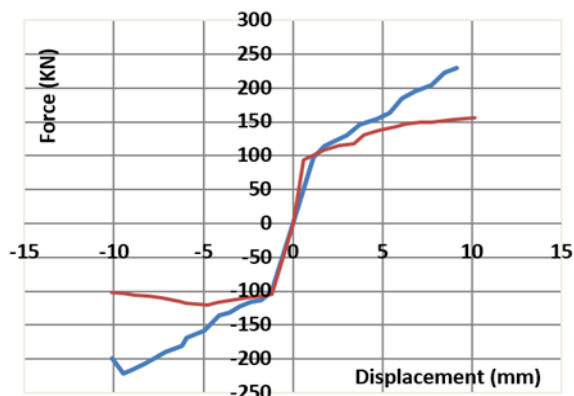




شکل ۱۲- مقایسه پوش نمودار چرخه‌ای آزمایشگاهی در پژوهش پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۹] و مدل عددی پژوهش حاضر

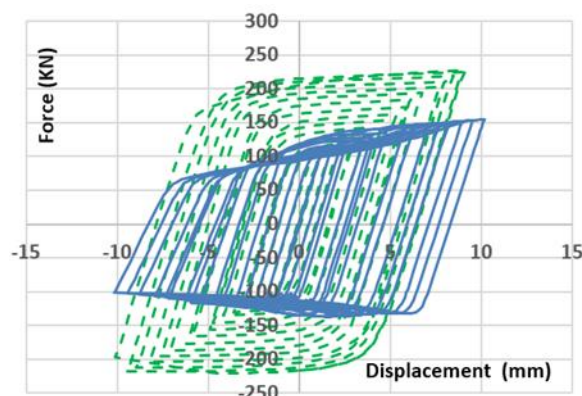


شکل ۱۳- نمودار چرخه‌ای نتایج مدل عددی با هندسه سوراخ‌های هسته بیضی و ضخامت ۵-۱۵ میلی‌متر



— PCBRB-Circle-Steel-T=10 mm  
— PCBRB-Rectangular-Steel-T=10 mm

شکل ۱۵- نمودار پوش نتایج مدل عددی با هندسه سوراخ دایره و مستطیل شکل و ضخامت ۱۰ میلی‌متر



- - - PCBRB-Circle-Steel-T=10 mm  
— PCBRB-Rectangular-Steel-T=10 mm

شکل ۱۴- نمودار چرخه‌ای نتایج مدل عددی با هندسه سوراخ دایره و مستطیل شکل و ضخامت ۱۰ میلی‌متر

تحمل می‌نماید؛ اما این کمبود را در کمانش دیرتر جبران می‌نماید. شکل (۱۷) و (۱۸) به ترتیب نمودار چرخه‌ای و پوش نتایج عددی هسته مهاربند با مصالح آلومینیومی و مصالح فولادی و هندسه سوراخ بیضی و ضخامت ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. با مشاهده این دو شکل تأثیر نوع مصالح بر پاسخ مهاربند مشهود است.

مشخصات مکانیکی آلومینیوم در مدل‌سازی عددی در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همچنین جدول ۴ مقادیر تنش و کرنش اعمال شده در نرم‌افزار آباکوس برای مصالح آلومینیوم را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مشخصات مکانیکی آلومینیوم مدل‌سازی عددی

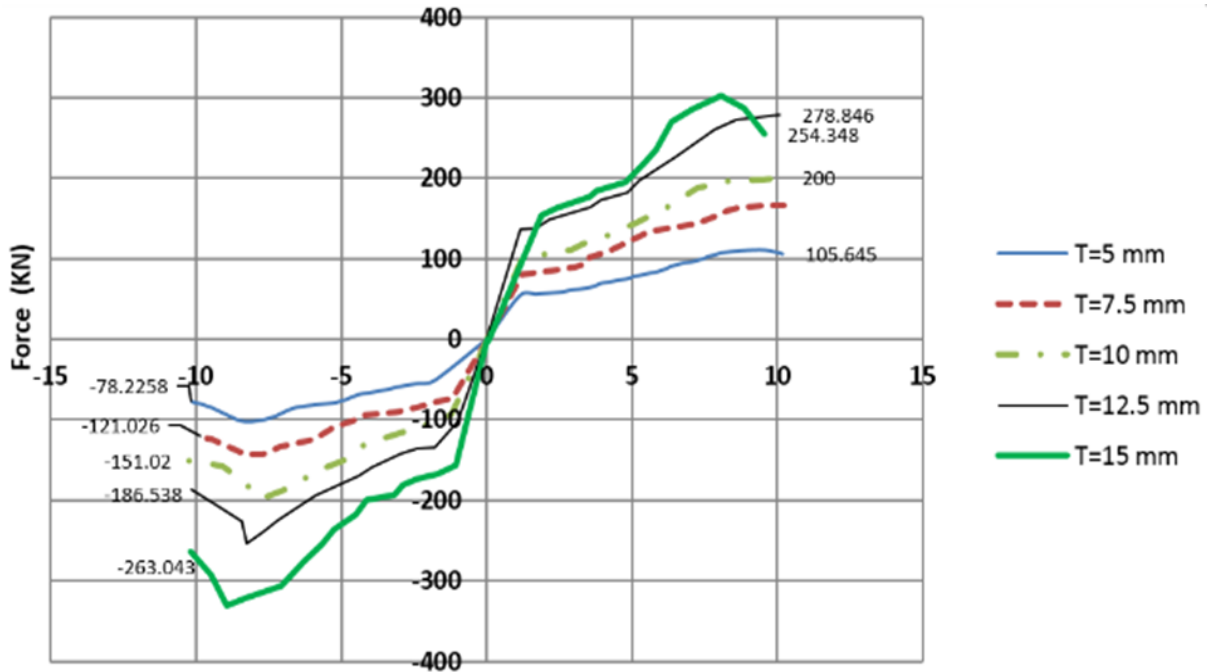
Stress	Strain
۳۵۰	۰
۳۶۸,۷۱	۰,۰۰۱
۳۷۶,۵	۰,۰۰۲
۳۹۱,۹۸	۰,۰۰۵
۴۰۳,۱۵	۰,۰۰۸
۴۱۲,۳۶	۰,۰۱۱
۴۲۲,۸۷	۰,۰۱۵
۴۴۴,۱۷	۰,۰۲۵
۴۶۱,۵	۰,۰۳۵
۵۰۷,۹	۰,۰۷
۵۸۱,۵	۰,۱۵
۶۴۹,۱۷	۰,۲۵
۷۰۴,۲۲	۰,۳۵
۷۲۸,۷۸	۰,۴
۷۵۱,۸۵	۰,۴۵
۷۷۳,۶۸	۰,۵
۷۹۴,۴۴	۰,۵۵
۸۱۴,۲۸	۰,۶

#### ۱-۴- نتایج نمونه‌ها با تغییر در ضخامت هسته

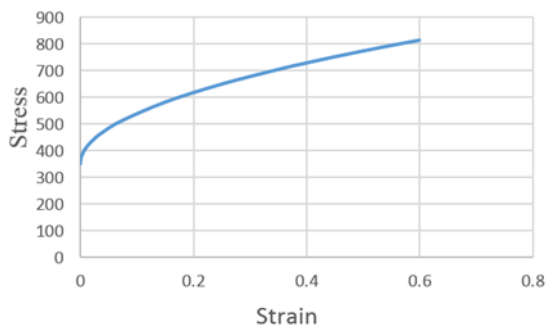
پوش نمودار چرخه‌ای همه مدل‌ها با تغییرات ضخامت (۵-۷/۵-۱۰-۱۲/۵-۱۵) میلی‌متر، نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، افزایش تحمل نیرو تجربه می‌گردد. از طرفی در مدل با ضخامت ۱۵ میلی‌متر به دلیل افزایش ضخامت سختی بیشتر است. ولی به دلیل شکل‌پذیری و پلاستیک‌شدگی کمتر در زمان رسیدن به تنش تسلیم؛ افت مقاومت بیشتری دارد؛ به گونه‌ای که در ناحیه کششی دچار افت مقاومت گردیده است. نمونه با ضخامت ۵ میلی‌متر، به نسبت دیگر مدل‌ها با ضخامت بالاتر، جذب انرژی پایینی دارد. شکل (۱۶) نمودار پوش نتایج مدل عددی با هندسه سوراخ بیضی با ضخامت ۵-۱۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

#### ۲-۴- نتایج (مدل‌ها با هسته فولادی و آلومینیومی)

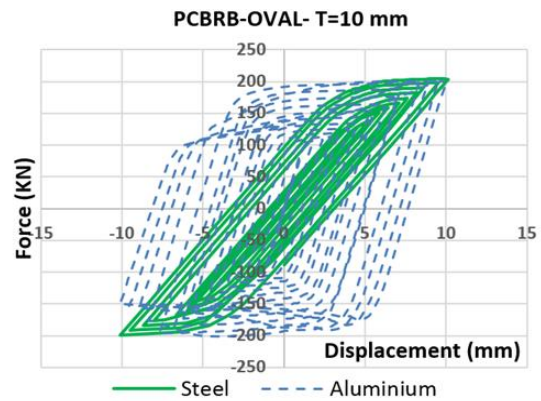
مقایسه چرخه‌ای نمونه با هسته فولادی و آلومینیومی بیانگر آن است که هسته آلومینیومی دارای سختی کمتر ولی شکل‌پذیری بیشتری نسبت به هسته فولادی است. ضمناً پس از ورود به ناحیه پلاستیک هسته با مصالح آلومینیوم (علی‌رغم شیب کلی ملایم) به دلیل شکل‌پذیری بیشتر؛ افت مقاومت کمتری نسبت به هسته با مصالح فولادی دارد؛ و به عکس هسته با مصالح فولادی به دلیل سختی بیشتر در ابتدا مقاومت بیشتری نشان داده و پس از رسیدن به نقطه تنش تسلیم دچار افت مقاومت بیشتر؛ به دلیل تردی مصالح می‌گردد. هسته مهاربند با مصالح آلومینیوم در طول بارگذاری نیروی کمتری نسبت به هسته با مصالح فولادی



شکل ۱۶- نمودار پوش نتایج مدل عددی با هندسه سوراخ‌های هسته بیضی و ضخامت ۵-۱۵ میلی‌متر  
منحنی تنش- کرنش



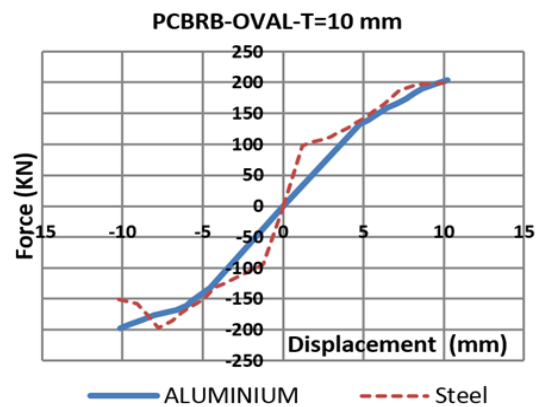
شکل ۱۹- منحنی تنش-کرنش مدل عددی با مصالح آلومینیومی



شکل ۱۷- نمودار چرخه‌ای مدل عددی با هسته آلومینیومی و فولادی

### ۳-۴- نتایج (مدل‌ها با تغییر در هندسه سوراخ‌های هسته)

نتایج رفتار هیستریک مدل‌ها با تغییر در هندسه سوراخ‌های هسته نشان می‌دهد که مدل با سوراخ‌های دایره‌ای دارای بهترین عملکرد است؛ به طوری که در مقایسه با مدل‌های بیضی و مستطیل؛ در ناحیه فشاری بسیار دیرتر کمانش کرده و سطح زیر منحنی تنش و کرنش بزرگ‌تری تشکیل داده و به تبع ظرفیت باربری و بیشتری دارد. نتایج نشان می‌دهد مدل با هندسه سوراخ‌های هسته مستطیل دارای عملکرد پایینی است. به طوری که در ناحیه فشاری نمودار چرخه‌ای حتی به نیمی از ظرفیت باربری مدل با هندسه



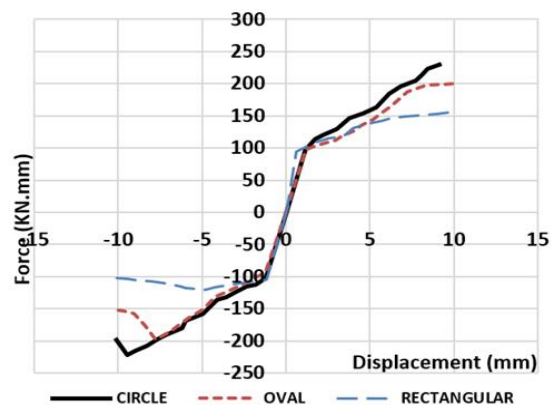
شکل ۱۸- نمودار پوش مدل عددی با هسته آلومینیومی و فولادی

سوراخ‌دار با پارامترهای مختلف مانند جنس مصالح، ضخامت هسته مهاربند، و هندسه سوراخ هسته مهاربند را در فاز خرابی نشان می‌دهد. با تغییر مکان متناظر با خرابی نمونه‌ها می‌توان دریافت نمونه هسته مهاربند با سوراخ دایره‌ای دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به مدل‌های دیگر در فاز خرابی است.

در فاز کششی، حداکثر جابجایی نمونه مهاربند کمانش ناپذیر با هندسه سوراخ دایره‌ای در هسته، به اندازه ۵۴ درصد افزایش نسبت به میانگین جابجایی ۷ نمونه دیگر دارد. مقدار ظرفیت نیرو ۱۲ درصد نسبت به میانگین ۷ مدل دیگر افزایش داشته است.

در فاز فشاری، حداکثر جابجایی نمونه مهاربند کمانش ناپذیر با هندسه سوراخ دایره‌ای در هسته، به اندازه ۱۸ درصد کاهش نسبت به میانگین جابجایی ۷ نمونه دیگر دارد. مقدار ظرفیت نیرو ۱۳ درصد نسبت به ۷ مدل دیگر افزایش داشته است.

هسته دایره‌ای نمی‌رسد. شکل (۲۰) نمودار مقایسه‌ای پوش چرخه‌ای ۳ هندسه مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰- مقایسه پوش نمودار چرخه‌ای مدل‌های با هندسه سوراخ‌های هسته بیضی، مستطیل و دایره

#### ۴-۴- نتایج (بررسی مدل‌ها در فاز خرابی)

جدول ۵ نتایج حداکثر جابجایی و نیرو در نواحی کششی و فشاری مدل‌های عددی مهاربند کمانش ناپذیر با هسته

جدول ۵- خلاصه نتایج ماکزیمم جابجایی و نیرو در نواحی کششی و فشاری، مدل‌های عددی مهاربند PCBRB با پارامترهای مختلف

نام مدل	ناحیه کششی		ناحیه فشاری	
	حداکثر جابجایی mm	حداکثر نیرو KN.mm	حداکثر جابجایی mm	حداکثر نیرو KN.m
PCBRB - OVAL-TEEL-T= 5	۹,۵۴	۱۱۰,۴۸	-۸,۳	-۱۰۳,۲۲
PCBRB - OVAL-STELL-T= 7.5	۱۰,۲	۱۶۶,۵۴	-۷,۶۹	-۱۴۲,۵۶
PCBRB - OVAL-STELL-T=10	۱۰,۰۴	۲۰۰	-۷,۷۵	-۱۹۷,۲۷
PCBRB - OVAL-STELL-T= 12.5	۱۰,۰۵	۲۷۸,۸۴	-۸,۲۷	-۲۵۳,۸۴
PCBRB - OVAL-STELL-T=15	۸,۰۴	۳۰۲,۱۷	-۸,۹۳	-۳۳۰,۴۳
PCBRB - ALUMINIUM-T=10	۱۰,۲۱	۲۰۳,۲۶	-۱۰,۱۶	-۱۹۷,۸۲
PCBRB - RECTANGULAR-STELL-T=10	۱۰,۱۴	۱۵۶,۲	-۴,۷۷	-۱۲۰
PCBRB - CIRCLE-STELL-T=10	۹,۱۵	۲۳۰	-۹,۴۵	-۲۲۱,۴۲

مقایسه شده است. جدول ۶ نرخ شکل پذیری نمونه‌های عددی را نشان می‌دهد.

#### ۵- محاسبه انرژی مستهلک شده توسط هسته مهاربندها با پارامترهای مختلف

در مهندسی سازه مدل بوک-ون برای تشریح رفتار هیستریک سیستم‌ها به کار برده می‌شود [۱۴]؛ این معادلات در اوایل سال ۱۹۷۱ توسط «بوک» تعریف شد و

شکل ۲۱ نمودار مقایسه‌ای مدل‌ها در فاز خرابی، متناظر با جابجایی را در فاز کششی و فاز فشاری نشان می‌دهد.

#### ۴-۵- نتایج (بررسی شکل پذیری مدل‌ها)

شکل پذیری نمونه‌ها با دو خطی کردن پوش هیستریک بر اساس یکسان سازی انرژی، تغییر مکان جاری شدگی مشخص شده و سپس نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان جاری شدگی ملاک شکل پذیری سازه قلمداد و

مشخص است:  $m\ddot{u}(t)+c\dot{u}(t)+F(t)=f(t)$  که در آن  $m$  جرم،  $u(t)$  جابجایی،  $c$  ضریب میرایی خطی،  $F(t)$  نیروی بازجایی و  $f(t)$  نیروی خارجی است. بر طبق مدل «بوک-ون» نیروی بازگشتی برابر است با:

$$F(t)=ak_i u(t) + (1-a) k_i z(t) \quad (1)$$

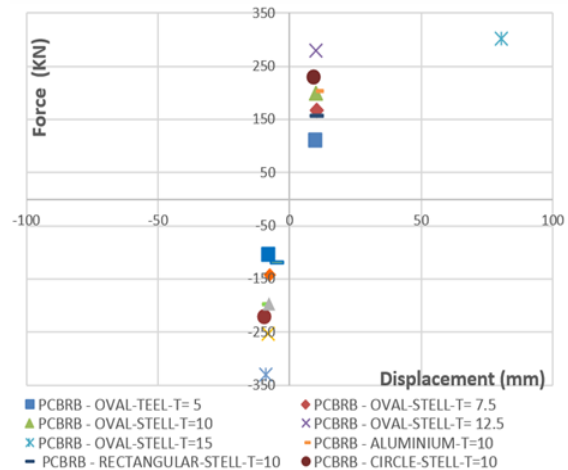
که در آن  $a=\frac{k_f}{k_i}$  نسبت پس از جاری شدن،  $k_f$  سختی پس از جاری شدن،  $\frac{f_y}{u_y}k_i$  سختی،  $f_y$  نیروی جاری شدن،  $u_y$  تغییر مکان جاری شدن و  $z(t)$  پارامتر هیستریک است که معمولاً به آن جابجایی هیستریک می‌گویند. انرژی جذب شده در سیستم تحت بار هیستریک در حقیقت انرژی مستهلک شده در سیستم است. این انرژی با اندازه‌گیری مساحت زیر نمودار جابجایی در کل نمودار به دست می‌آید. مقدار این انرژی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E(t)=\int_{u(0)}^{u(t)} \frac{F^h(u)}{m} du = (1-a) \frac{k_i}{m} \int_0^z z(T) \dot{U}(T) dT \quad (2)$$

$$E(t)=(1-a)w^2 \int_0^t z(T) \dot{U}(T) dT \quad (3)$$

و  $w^2 = \frac{k_i}{m}$  مربع فرکانس طبیعی در سیستم غیرخطی می‌باشد. انرژی مستهلک شده معیار اندازه‌گیری خوبی برای آسیب‌دیدگی سازه تحت تنش‌های برگشتی است که در حقیقت بازتاب تاریخچه بارگذاری است. جدول ۷ نشان دهنده نتایج انرژی مستهلک شده از محاسبه سطح زیر نمودار کلیه حلقه‌های چرخه‌ای مدل‌ها می‌باشد. از نتایج می‌توان دریافت که به دلیل ضخامت بیشتر مقطع؛ و به تبع اینرسی بالاتر نسبت به بقیه مدل‌ها؛ مدل با ضخامت ۱۵ میلی‌متر بیشترین انرژی کل را مستهلک نموده؛ اما بهترین عملکرد را در میان مدل‌ها با ضخامت ۱۰ میلی‌متر؛ مدل با سوراخ دایره‌ای با میزان ۳۹,۹۴ کیلوژول انرژی کل مستهلک شده داشته است. این مدل نسبت به مدل با ضخامت ۱۰ میلی‌متری با سوراخ‌های بیضی ۱۰ درصد، مدل با ضخامت ۱۰ میلی‌متری آلومینیومی ۴۳۰ درصد و مدل با ضخامت ۱۰ میلی‌متری با سوراخ‌های مستطیلی ۴۱ درصد انرژی کل بیشتری را مستهلک نموده است. شکل (۲۱) نمودار مقایسه‌ای استهلاک انرژی کل توسط مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با هسته سوراخ‌دار با تغییر در پارامترهای جنس مصالح، ضخامت هسته مهاربند و شکل

توسط «ون» در سال ۱۹۷۶ انواع مختلف آن توسعه یافت.



شکل ۲۱- نمودار مدل‌ها با پارامترهای مختلف

در فاز خرابی متناظر با جابجایی در فاز کششی و فشاری

جدول ۶- نرخ شکل‌پذیری مدل‌های عددی با دارمترهای مختلف

نام مدل	نرخ شکل‌پذیری
PCBRB-OVAL-STEEL-T=5 mm	۱,۸۶
PCBRB-OVAL-STEEL-T=7.5 mm	۲,۱۳
PCBRB-OVAL-STEEL-T=10 mm	۱,۹۶
PCBRB-OVAL-STEEL-T=12.5 mm	۱,۹۱
PCBRB-OVAL-STEEL-T=15 mm	۱,۵۸
PCBRB-Aluminium-T=10 mm	۱,۸۷
PCBRB - RECTANGULAR-STEEL-T=10mm	۵,۸۲
PCBRB - CIRCLE-STEEL-10-T=10mm	۱,۶۹

منحنی بوک-ون یا پوش چرخه‌ای، از اتصال نقاط اکسترمم هر حلقه هیستریک در طول بارگذاری چرخه‌ای به دست می‌آید که ملاک قضاوت در سختی و شکل‌پذیری سازه خواهد بود. با توجه به تنوع و گستردگی، این مدل به عنوان مدلی مؤثر شناخته شده است و در سیستم‌های چند درجه آزادی  $^1$ MDOF و ساختمان‌ها و قاب‌ها و همچنین سیستم‌های دو بعدی و سه بعدی پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است. از سیستم «بوک-ون» برای بررسی رفتار میراگرها و انواع جداسازهای لرزه‌ای و همچنین برای مستهلک کردن نیروها در سازه‌های فولادی و بتنی استفاده می‌شود.

بر اساس فرمول سیستم یک درجه آزادی  $^2$ SDOF

<sup>2</sup> Single Degree Of Freedom

<sup>1</sup> Multi Degree Of Freedom

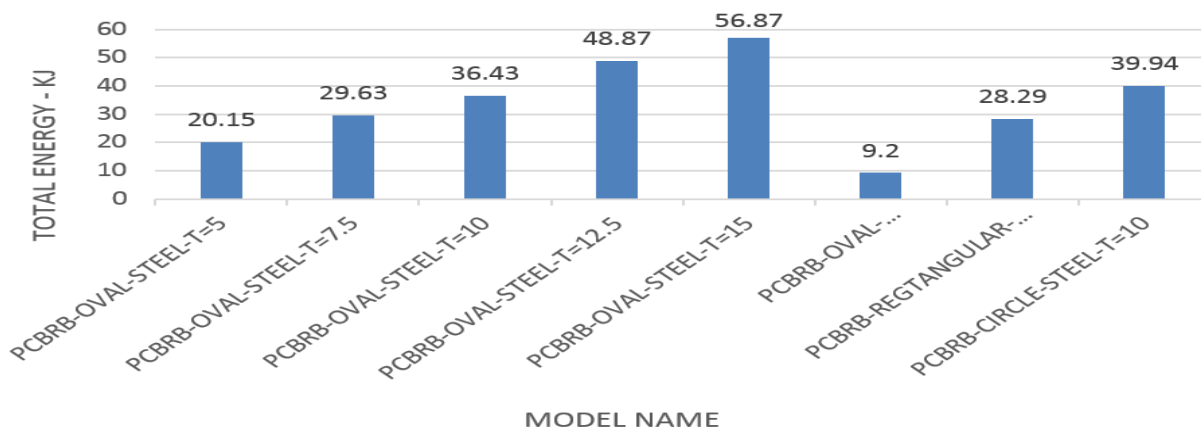


شکل پذیری و خاصیت خمیری مناسبتر؛ از سیکل‌های ابتدایی تا انتهایی دارای شیبی یکسره و صعودی بوده و توانایی استهلاک انرژی بهینه‌تری را در کلیه سیکل‌های بارگذاری به نمایش گذاشته است.

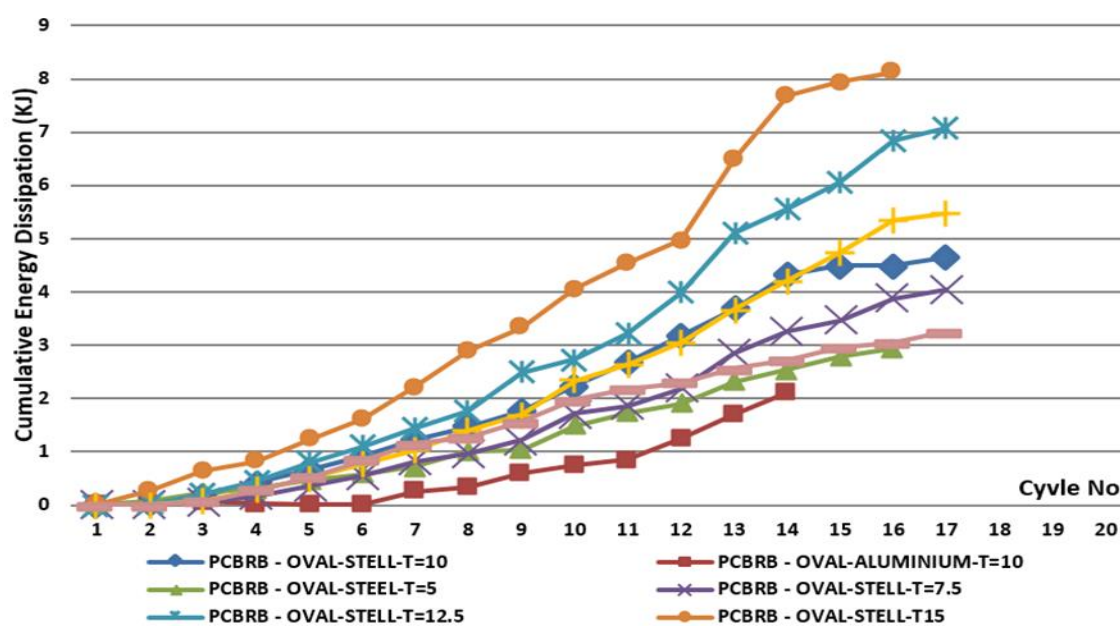
هندسه سوراخ هسته را نشان می‌دهد. شکل (۲۲) نشان‌دهنده شیب رشد استهلاک انرژی کلیه مدل‌ها در هر سیکل بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است؛ متقارن‌ترین شیب رشد؛ مربوط به مدل با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و سوراخ‌های دایره‌ای است؛ که به دلیل ویژگی

جدول ۷- خلاصه نتایج استهلاک انرژی کل هیستریک توسط مدل‌های عددی مهاربند PCBRB با پارامترهای مختلف

MODEL NAME:	PCBRB-OVAL-STEEL-T=5	PCBRB-OVAL-STEEL-T=7.5	PCBRB-OVAL-STEEL-T=10	PCBRB-OVAL-STEEL-T=12.5	PCBRB-OVAL-STEEL-T=15	PCBRB-OVAL-ALUMINIUM-T=10	PCBRB-RECTANGULAR-STEEL-T=10	PCBRB-CIRCLE-STEEL-T=10
E انرژی کل total (KJ)	۲۰,۱۵	۲۹,۶۳	۳۶,۴۳	۴۸,۸۷	۵۶,۸۷	۹,۲۰	۲۸,۲۹	۳۹,۹۴



شکل ۲۲- نمودار مقایسه‌ای نتایج استهلاک انرژی کل هیستریک توسط مدل‌های عددی مهاربند PCBRB با پارامترهای مختلف



شکل ۲۳- نمودار مقایسه تجمیع استهلاک انرژی مدل‌ها بر اساس تعداد سیکل‌های بارگذاری چرخه‌ای

## ۶- نتیجه‌گیری

عملکرد مورد انتظار از مهاربندهای کمانش ناپذیر این است که؛ عضو مهاربندی تا زمانی که به تغییر شکل پلاستیک کافی نرسیده کمانش کلی را تجربه نکند. در این تحقیق مهاربند PCBRB به عنوان نسل جدیدی از مهاربندهای تمام فولادی که در آن یک جزء فولادی سبک به عنوان هسته مهاربند؛ وظیفه مقاومت در برابر کمانش را در برابر بارهای چرخه‌ای به عهده دارد مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی و تحلیل عددی هشت نمونه مهاربند PCBRB با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس تحت بار چرخه‌ای انجام گرفت. یک نمونه مرجع، چهار نمونه با تغییر در ضخامت هسته، دو نمونه با تغییر در هندسه هسته و یک نمونه با تغییر در جنس مصالح هسته، مدل‌سازی شد. جهت معتبر سازی و صحت سنجی تحلیل، یک مدل عددی با ویژگی‌های یکسان در نرم‌افزار آباکوس با مدل آزمایشگاهی I.3 پژوهش توسط پیدرافیتا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ انجام گردید. نتایج نشان داد میانگین تفاوت نتایج ماکزیمم در ناحیه کششی و فشاری چرخه‌ای مدل‌های آزمایشگاهی و عددی به میزان ۸ درصد است. این نتیجه با توجه به درصد بالای مطابقت، امکان مدل‌سازی پارامتری را ایجاد نمود. نتایج رفتار چرخه‌ای مدل‌ها نشان داد، با افزایش ضخامت؛ افزایش مقاومت نهایی تجربه می‌گردد. مدل با ضخامت ۱۵ میلی‌متر به دلیل سختی بیشتر، نیروی

بیشتری تحمل می‌نماید. از سوی دیگر به دلیل شکل‌پذیری و خاصیت خمیری کمتر در زمان رسیدن به تنش تسلیم، افت مقاومت بیشتری دارد. تا جایی که در ناحیه کششی، حداکثر جابجایی ۸/۰۴ میلی‌متر و نیروی ۳۰۲/۱۷ کیلو نیوتن تا نیروی ۲۵۴/۳۴ کیلو نیوتن دچار افت مقاومت به میزان بیش از ۲۷ درصد گردید. مدل با هندسه سوراخ‌های هسته مستطیل با استهلاک انرژی به میزان ۲۸/۲۹ کیلوژول با حدود ۴۱ درصد کاهش راندمان استهلاک انرژی کل نسبت به مدل با سوراخ‌های دایره‌ای؛ دارای عملکرد پایینی بود، به طوری که در ناحیه فشاری نمودار چرخه‌ای با حداکثر جابجایی ۴/۷۷- و نیروی ۱۲۰- حتی به نیمی از ظرفیت باربری و مقاومت نهایی مدل با هندسه هسته دایره‌ای نرسید. هسته مهاربند با مصالح آلومینیم در طول بارگذاری نیروی کمتری نسبت به هسته با مصالح فولادی تحمل کرد، اما این کمبود را در کمانش موضعی دیرتر، به‌خصوص در ناحیه فشاری جبران نمود. مدل با سوراخ‌های دایره‌ای دارای بهترین عملکرد سازه‌ای نسبت به مدل‌های دیگر بود، به طوری که در ناحیه فشاری با ماکزیمم جابجایی ۹/۴۵- میلی‌متر و نیروی ۲۲۱/۴۲- در مقایسه با مدل بیضی با ماکزیمم جابجایی ۷/۷۵- و نیروی ۱۹۷/۲۷؛ بسیار دیرتر کمانش کرده و سطح زیر منحنی تنش و کرنش بزرگ‌تری تشکیل داده و ظرفیت باربری و استهلاک انرژی بالاتر به میزان ۳۹/۹۴ کیلوژول دارد.

## مراجع

- [۱] س. م. زهرایی، م. دهقانی رنایی، "استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر در مقاوم سازی لرزه‌ای قاب‌های خورجینی"، نشریه دانشکده فنی، دانشگاه تهران، جلد ۳۹، شماره ۳، ۱۳۸۴، صفحه ۲۹۹-۳۱.
- [۲] ه. شریعتمدار، ح. عباس زاده، "مدل سازی مهاربندهای مقید شده در برابر کمانش تحت اثر بارهای دینامیکی"، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۴، شماره ۱۸، ۱۳۸۸، صفحه ۱-۱۱.
- [۳] غ. عبدالله زاده، ش. محمدی، "ضریب رفتار قاب های دوگانه فولادی با مهاربندهای هم محور بزرگ مقیاس"، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۳۱، ۱۳۹۱، صفحه ۱-۱۳.
- [4] M. Jia, D. Lu, L. Guo, L. Sun, "Experimental research and cyclic behavior of buckling-restrained braced composite frame", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 95, 2014, pp. 90–105.
- [5] O. Atlayan, F.A. Charney, "Hybrid buckling-restrained braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 96, 2014, pp. 95–105.
- [6] J. Zhao, B. Wu, J. Ou, "A practical and unified global stability design method of buckling-restrained braces: Discussion on pinned connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 95, 2014, pp. 106–115.

[7] D. Piedrafita, X. Cahis, E. Simon, J. Comas, "A new modular buckling restrained brace for seismic resistant buildings", *Engineering Structures*, Vol. 56, 2013, pp. 1967–1975.

[8] K.D. Palmer, A.S. Christopoulos, D.E. Lehman, Ch.W. Roeder, "Experimental evaluation of cyclically loaded, large-scale, planar and 3-d buckling-restrained braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 101, 2014, pp. 415–425.

[9] D. Piedrafita, X. Cahis, E. Simon, J. Comas, "A new perforated core buckling restrained brace", *Engineering Structures*, Vol. 85, 2015, pp. 118–126.

[10] B. Wu, Y. Mei, "Buckling mechanism of steel core of buckling-restrained braces", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 107, 2015, pp. 61–69.

[۱۱] م. رئیسی دهکردی، م. علیزاده اسفیوخی، م. اقبالی، "ارزیابی کاربرد مهاربندهای فولادی همگرا، واگرا و کمانش گریز در بهسازی لرزه ای قاب های خمشی فولادی"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۷، ۱۳۹۵، صفحه ۹۵–۱۱۴.

[12] M.R. Rouhparvar, H. Hajikazemi, "Application of FRP Material in Buckling Restrained Braces", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 15, Issue 50, 2017, pp. 225–236.

[۱۳] ا. اسماعیل غلام، ج. عسگری مارنانی، "بررسی رفتار مهاربندهای کمانش ناپذیر با هسته سوراخ دار در ساختمان های فولادی با تغییر درفاصله سوراخ ها"، *دومین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، معماری و مدیریت بحران، دانشگاه علامه مجلسی*، ۱۳۹۶.

[14] S. Suroushnia, H. Najafi, M.H. Mamaghani, M. Mehrvand, *The Most Complete Practical Reference ABAQUS – Civil Special*, Negarandedanesh, 2015, pp. 203–204.