

## نقش عامل های هندسی بر رفتار مهاربندهای کمانش ناپذیر با هسته شکاف دار

هاشم جهانگیر ۱، محمدحسن دانشور خرم ۲، منصور قلعه‌نوی ۳\*

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه آزادی اسلامی، واحد اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشیار گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای و استهلاک انرژی‌های حاصل از اعمال نیروهای شدید به سازه مانند زلزله، همواره مورد توجه پژوهش‌گران قرار دارد. مهاربندهای کمانش‌ناپذیر، یکی از سیستم‌های استهلاک انرژی هستند که همانند سایر سیستم‌های مهار جانبی سازه‌ها، به کاهش پاسخ‌های سازه در برابر بارهای وارده کمک می‌کنند. این مهاربندها به طور کلی از یک المان محوری به عنوان هسته تشکیل می‌شوند که با تسلیم و جاری شدن به جذب انرژی کمک می‌کند. علاوه بر آن، بخشی دیگر از این مهاربندها، هسته را در بر می‌گیرد و از کمانش آن در برابر بارهای فشاری جلوگیری می‌کند. در مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سنتی، به منظور دستیابی به کرنش یکنواخت در حالت کششی و فشاری، هسته‌ی مهاربند را یکنواخت می‌سازند. همچنین، بخش نگه‌دارنده‌ی هسته از پروفیل‌های توخالی که با ملات پر شده‌اند ساخته می‌شود. کاستی این مهاربندها را می‌توان در وزن زیاد آن به علت مواد پرکننده پیرامون هسته، نبود امکان بازرسی چشمی هسته و جایگزینی و تعمیر آن پس از ایجاد خسارت دانست. در این پژوهش، مهاربند کمانش‌ناپذیر نوینی با هسته‌ی سوراخ‌دار معرفی می‌شود که کاستی‌های مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سنتی را ندارد. حالت‌های مختلف هسته‌ی این مهاربندها با تعداد و نوع سوراخ‌های متفاوت ارزیابی شدند و با توجه به رفتار چرخه‌ای آن‌ها، چگونگی توزیع تنش، تغییرشکل هسته و وضعیت مهاربند پس از کمانش، بهینه‌ترین شکل هندسی این مهاربندها انتخاب و پیشنهاد شدند.

کلمات کلیدی: بارهای جانبی، مهاربندهای نوین کمانش ناپذیر، هسته های سوراخ دار، عامل های هندسی، انرژی جذب شده

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.101904.1359	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2018.101904.1359	۱۳۹۸/۰۶/۱۰	۱۳۹۷/۰۱/۲۲	۱۳۹۷/۰۱/۲۲	۱۳۹۶/۱۲/۰۷	۱۳۹۶/۰۸/۰۳
منصور قلعه‌نوی ghalehnovi@um.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

# Influence of geometric parameters on perforated core buckling restrained braces behavior

Hashem Jahangir<sup>1</sup>, Mohammad Hasan Daneshvar Khorram<sup>2</sup>, Mansour Ghalehnovi<sup>\*3</sup>

1- Ph.D. Student of structural engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Ph.D Student of structural engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

3- Associate Professor of civil engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

## ABSTRACT

*Buckling Restrained Braces (BRBs) are installed in buildings to control lateral displacements caused by seismic events. Although, conventional BRBs have various advantages comparing to ordinary bracing systems, their high weight and dimensions because of the restraining units is a dominant drawback. In this paper, a new developed type of BRB named perforated core buckling restrained brace is investigated which resolved conventional BRBs shortcoming. Its core consists of a perforated steel yielding plate which is guided and partially stabilized by the restraining unit. The core is mechanized to obtain two yielding lateral bands which are connected by several equidistant stabilizing bridges. At first part of the paper, the hysteretic behaviour of the tested braces and a large scale brace has been analysed and verified with an FEM model which considers the interaction between the core and the encasing member. The model reproduces the hysteretic response during the first cycles and the influence of friction on the axial strain distribution along the yielding core. In the second part, geometrical parameters such as number of holes and their section in the core of brace were studied and through hysteretic behaviour, stress distribution, core deformation and its condition under ultimate loads, the optimized core is selected and suggested.*

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 25 October 2017

**Revise Date:** 26 February 2018

**Accept Date:** 11 April 2018

## Keywords:

*Lateral Loads,  
Innovative BRBs,  
Perforated core,  
Geometrical Parameters,  
Absorbed Energy*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.101904.1359

\*Corresponding author: Mansour Ghalehnovi

Email address: ghalehnovi@um.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از ابزارهای جذب انرژی روشی مناسب برای بهبود پاسخهای سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای است [۱]. مهاربندهای کمانش‌ناپذیر رایج‌ترین ابزارها برای جذب انرژی‌های وارد بر سازه به علت نیروهای زلزله وارد بر آن‌ها می‌باشند. این گونه از مهاربندها همانند مهاربندهای معمول در سازه نصب می‌شوند تا دریف‌های بین طبقه‌ای را کاهش دهند. بیشتر مهاربندهای کمانش‌ناپذیر از میله‌ای نازک به عنوان هسته‌ی خود که نقش جاری شدن و جذب انرژی‌های وارد بر سازه به صورت نیروی محوری و هم‌چنین، از قلافی برای نگهداری هسته و مقاومت در برابر نیروهای فشاری وارده از طرف هسته، ساخته می‌شوند [۲]. به منظور دستیابی به میدان کرنش یکنواختی در برابر کشش و فشار، سطح مقطع هسته‌ی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر را یکنواخت در نظر می‌گیرند. سطح مقطع‌های مستطیل‌شکل، دایره‌ای و صلیبی‌شکل رایج‌ترین مقطع‌ها در پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه هستند [۳ و ۴]. برای قلاف نیز، به طور معمول از پروفیل‌های قوطی‌شکل که با ملات پر می‌شوند استفاده می‌شود [۵ و ۶]. در این حالت، ماده‌ی غیرپیوستگی باید به هسته اضافه شود تا امکان افزایش حجم آن تحت بار فشاری را فراهم کند و هم‌چنین، انتقال بار محوری از هسته به المان‌های کناری را تأمین کند [۷]. این راه حل، بسیار مفید است و رفتار رفت و برگشت مناسبی نیز دارد، اگرچه وزن مهاربند در این حالت افزایش یافته و هم‌چنین، بازرسی چشمی هسته‌ی مهاربند پس از اتفاق افتادن خسارت را غیر ممکن می‌کند. استفاده از بتن پیش‌ساخته در پروفیل‌های فولادی، امکان بازرسی و جایگزینی پس از وقوع خسارت را فراهم می‌کند. در همه‌ی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر فولادی، نیازی به استفاده از ملات و لایه‌ی غیرپیوستگی ندارند و در این مهاربندها امکان بازرسی و جایگزینی به کمک تعیین ابعاد منطبق با قلاف استفاده شده که از قطعه‌های مختلف تشکیل شده‌اند و به کمک جوش یا پیچ به هم متصل شده‌اند فراهم می‌شود.

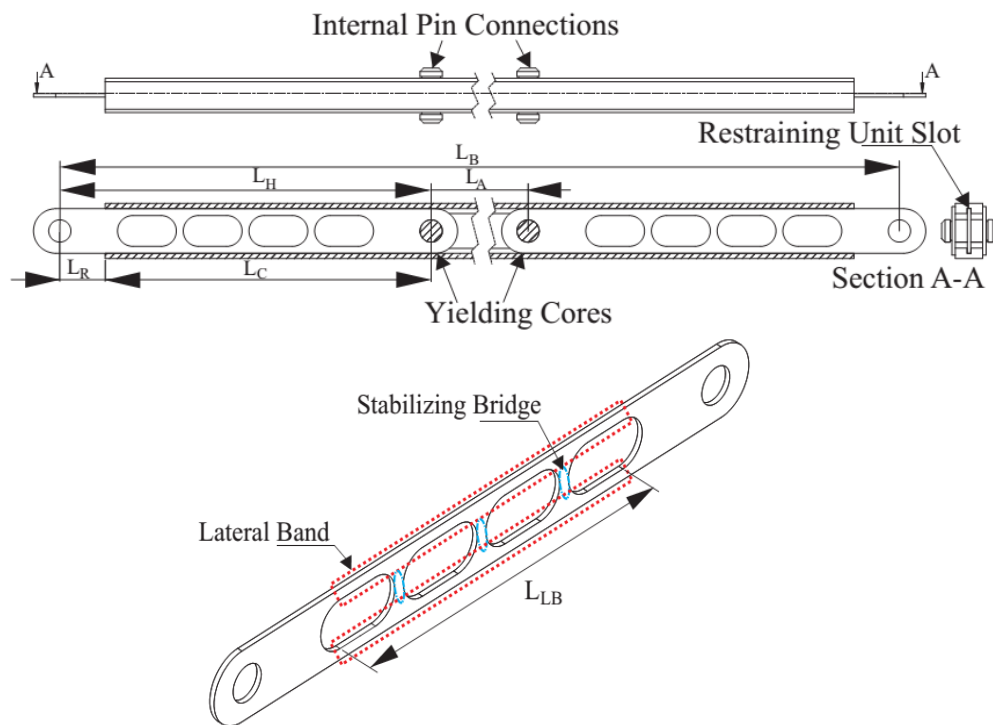
در راستای بهبود کاستی‌های مهاربندهای کمانش‌ناپذیر پژوهش‌های فراوانی انجام شده است. در برخی از آن‌ها از بتن پیش‌ساخته در مقاطع فولادی به عنوان بخش نگهدارنده استفاده شده است [۸ و ۹]. این امر، چگونگی بازرسی و جایگزینی هسته‌ی مهاربند را ممکن می‌سازد. به منظور کاهش وزن این مهاربندها در برخی دیگر از پژوهش‌ها از هسته‌ی آلومینیومی به عنوان جایگزینی برای هسته‌های فولادی استفاده شده است [۱۰]. با معرفی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر فولادی که در آن‌ها نیازی به استفاده از ملات و ماده‌ی غیرچسبده نیست، امکان بازرسی هسته و جایگزینی آن پس از خسارت با ساخت بخش نگهدارنده با چندین قطعه که به هم جوش یا پیچ شده‌اند، فراهم می‌شود [۱۱ و ۱۲]. Piedrafita و همکارانش [۱۳] مهاربند کمانش‌ناپذیر نوینی ارائه کردند که در برش جاری می‌شود و از میله‌ای نازک که با بخش نگهدارنده‌ی شکاف‌دار پوشش داده شده‌است، تشکیل می‌شود. نصب و بازرسی این مهاربند آسان است، ولی وزن بالایی دارد و ساز و کار آن در مقایسه با دیگر مهاربندهای معمول کمانش‌ناپذیر پیچیده می‌باشد. Dusicka و همکارانش [۱۴] مهاربند کمانش‌ناپذیر سبک وزنی طراحی کردند که دارای هسته‌ی آلومینیومی و بخش نگهدارنده‌ی شیشه‌ای است. در پژوهشی دیگر، Piedrafita و همکارانش [۱۳] مهاربند کمانش‌ناپذیر نوینی پیشنهاد کردند که هسته‌ی لاغر آن در اثر نیروی برشی تسلیم می‌شود. هسته‌ی این مهاربند به راحتی سر هم می‌شود و قابل بازرسی است. کاستی این مهاربند این است که وزن بیشتری نسبت به مهاربندهای دیگر دارد و هم‌چنین نسبت به آن‌ها رفتار پیچیده‌تری دارد و گران‌تر است. مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با جوش کاری یا با پیچ‌هایی به کمک ورق‌های اتصال به قاب‌های سازه متصل می‌شوند. Chou و همکارانش [۱۵] مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در مورد رفتار مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با ورق‌های اتصال تکی و دوتایی انجام دادند. نتیجه‌ی آزمایش‌ها نشان می‌دهند که ورق‌های اتصال تکی نیروی محوری مهاربند را بهتر به سازه منتقل می‌کنند و اتصال به کمک ورق‌های دوتایی پایداری بیشتری نسبت به ورق‌های اتصال تکی دارند. Palmer و همکارانش [۱۶] آزمایش‌های مختلفی را روی اتصال‌های پیچی و مفصلی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر به سازه انجام دادند. در هر کدام از این حالت‌ها، خسارت‌های ایجاد شده در اتصال در اثر جابجایی‌های بزرگ ایجاد شدند ولی در محدوده‌ی مجاز از نظر آیین‌نامه قرار داشتند.

در این پژوهش، مهاربند کمانش‌ناپذیر نوینی ارائه می‌شود. این مهاربند، مطابق با مهاربندهای رایج، زیر بار محوری جاری می‌شود ولی، هسته‌ی سنگین مهاربندهای معمول در این مهاربند به کمک ورق‌ی که قطعه قطعه سوراخ‌دار شده است، جایگزین می‌شود. پس از بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده از این گونه‌ی نوین مهاربندهای کمانش‌ناپذیر، الگوی عددی از آن‌ها ساخته می‌شود و نتیجه‌های به دست آمده از آن با نتیجه‌های به دست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. سپس، به منظور دست‌یابی به طرحی بهینه برای تعداد و

نوع سوراخ‌های هسته در این مهاربند، این الگو تحت بارگذاری رفت و برگشت قرار می‌گیرد. نتیجه‌های این تحلیل شامل نمودارهای چرخه‌ای رفتار مهاربندها، توزیع تنش و چگونگی تغییر در آن‌ها و همچنین وضعیت هسته پس از وقوع کمانش، منجر به انتخاب هندسه‌ی مناسب برای هسته‌ی مهاربند پیشنهاد شده خواهد شد.

## ۲- مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سوراخ‌دار

مهاربندهای نوین کمانش‌ناپذیر سوراخ‌دار، مطابق شکل ۱، دارای هسته‌ای قطعه‌قطعه خالی شده هستند تا نیروی حاصل از جاری شدن هسته را به پیرامون مهاربند و بخش کناری هسته منتقل کنند. این مهاربند از دو ورق فولادی به عنوان نوارهای کناری<sup>۱</sup> که به کمک بخش نگهدارنده<sup>۲</sup> فولادی پایدار شده‌اند، تشکیل می‌شود. به منظور انتقال نیروی محوری، هسته و واحد نگهدارنده به کمک پیچ‌های داخلی<sup>۳</sup> به هم وصل می‌شوند. هسته‌ی مهاربند به گونه‌ای از نظر هندسی طراحی می‌شود که نوارهای کناری در فاصله‌هایی برابر به کمک المان‌های قائم<sup>۴</sup> به هم متصل شوند [۱۷].



شکل ۱: بخش‌های مختلف مهاربند کمانش‌ناپذیر سوراخ‌دار [۱۷]

حفره‌های موجود در هسته‌ی مهاربند به کمک برش آب<sup>۵</sup> ایجاد می‌شوند تا تغییری در ویژگی‌های مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن ایجاد نکنند. نوارهای کناری هسته‌ی مهاربند به گونه‌ای طراحی می‌شوند که، مطابق با مهاربندهای کمانش‌ناپذیر معمول، در برابر بار محوری جاری شوند. از طرف دیگر، المان‌های قائم هسته به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در برابر بارهای وارده در محدوده الاستیک باقی بمانند. این المان‌ها به همراه واحد نگهدارنده، نقش پایدار نگه داشتن نوارهای کناری در برابر بارهای فشاری را ایفا می‌کنند. المان نگهدارنده با جوش دادن چهار

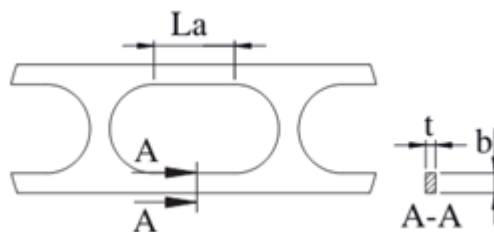
1 Lateral Band  
2 Restraining Unit  
3 Internal Pin  
4 Stabilizing Bridge  
5 Water Jet

میله‌ی مستطیل شکل به یکدیگر ساخته می‌شود تا حالت قوطی شکل پیدا کند. دو عدد از این میله‌ها دارای شکاف‌هایی هستند و در روبه‌روی هم قرار می‌گیرند تا هسته‌ی مهاربند را پوشش دهند. روی هم گذاری مهاربند با فشار دادن هسته‌ی روغن کاری شده به درون واحد نگهدارنده و قرار دادن آن‌ها در محل تعیین شده به کمک پیچ‌های داخلی انجام می‌شود. طراحی نوارهای کناری هسته‌ی مهاربند بر پایه‌ی توزیع یکنواخت تنش انجام می‌شود. نیروی جاری شدن،  $F_y$  و نیروی نهایی،  $F_u$  برای هسته می‌توانند به ترتیب به کمک رابطه‌های زیر به دست آیند [۱۷]:

$$F_y = 2f_y tb \quad (۱)$$

$$F_u = 2\beta f_u tb \quad (۲)$$

در این رابطه‌ها،  $t$  و  $b$  مطابق با شکل ۲، به ترتیب ضخامت و عرض نوارهای کناری هستند [۱۷].



شکل ۲: ضخامت و عرض نوارهای کناری در هسته‌ی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سوراخ‌دار [۱۷]

در رابطه‌های (۱) و (۲)،  $f_y$  و  $f_u$  به ترتیب مقاومت‌های جاری شدن و نهایی مصالح هستند. هم‌چنین،  $\beta$  ضریب سخت‌شوندگی آزمایشگاهی است که بیشینه‌ی نیروی فشاری در اثر اندرکنش بین هسته و واحد نگهدارنده بوجود می‌آید را در بر دارد [۱۸]. جابجایی جاری شدن،  $\delta_{c,y}$ ، می‌تواند به کمک قانون هوک با در نظر گرفتن ضریب کشسانی فولاد،  $E$ ، به دست آید:

$$\delta_{c,y} = \frac{F_y L_{LB}}{Etb} \quad (۳)$$

در این رابطه،  $L_{LB}$  طول نوارهای کناری در هسته‌ی مهاربند (شکل ۱) می‌باشد. از آن‌جا که جابجایی نهایی در بیشتر موردها در محدوده پلاستیک و در خود هسته‌ی مهاربند اتفاق می‌افتد، جابجایی نهایی مهاربند،  $\delta_{b,u}$ ، می‌تواند به عنوان جابجایی نهایی هسته‌ی مهاربند،  $\delta_{c,u}$ ، برآورد شود. جابجایی نهایی هسته‌ی مهاربند از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\delta_{c,u} = \mu_c \delta_{c,y} \quad (۴)$$

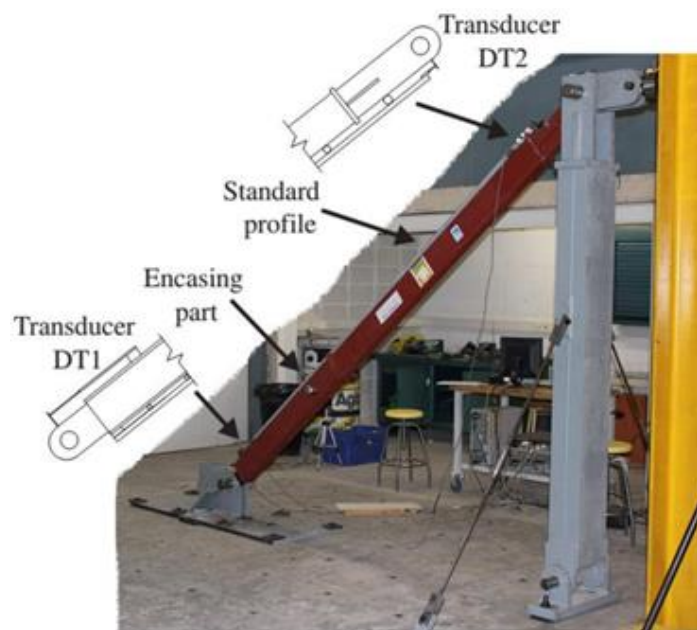
در این رابطه،  $H_c$ ، ضریب شکل‌پذیری هسته‌ی مهاربند می‌باشد. هسته‌ی مهاربندها باید بر پایه‌ی بیشینه شکل‌پذیری ۸ طراحی شوند تا با دریافت بین طبقه‌ای به دست آمده از آزمایش‌ها مطابقت داشته باشند.

به منظور تعیین  $L_a$ ، فرض بر این است که کمانش موضعی بیرون صفحه‌ای رخ نمی‌دهد. رابطه‌ی اولییر،  $\frac{\pi^2 EI}{kL_a}$ ، در حالی که چرخش دو انتهای مهاربند در ناحیه‌ی جاری شده صفر فرض شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این صورت این طول را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$L_a = \sqrt{\frac{\pi^2 E_t t b^3}{3F_{\max}}} \quad (5)$$

در این رابطه،  $I$ ، ممان اینرسی نوار کناری هسته‌ی مهاربند،  $I = \frac{tb^3}{12}$  و  $E_t$  ضریب کشسانی مماسی متناظر با نیروی بیشینه در آزمون کشش می‌باشد [۱۸].

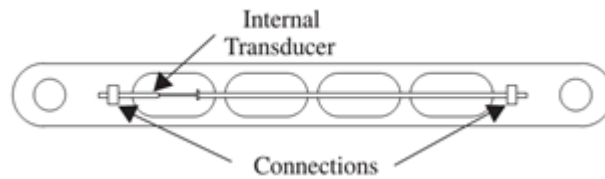
در این پژوهش، الگوی عددی چند نمونه از مهاربندهای نوین کمانش‌ناپذیر، در نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی شدند و رفتار آن‌ها تحت بارهای رفت و برگشتی ارزیابی شدند. سپس، شکل‌های مختلف هندسی هسته‌ی مهاربند الگوسازی می‌شوند و حالت بهینه‌ی آن‌ها انتخاب می‌شود. به منظور اطمینان هرچه بیشتر از نتیجه‌های به دست آمده، نمونه‌های عددی بر اساس آزمایش یکی از پژوهش‌های پیشین مدل‌سازی شدند. برای این منظور از نمونه‌های آزمایشگاهی پژوهش Piedrafita و همکارانش [۱۷] استفاده شد. این آزمایش‌ها روی چند نمونه مهاربند کمانش‌ناپذیر شکافدار انجام شده‌اند. آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش در آزمایشگاه گروه پژوهشی AMADE در دانشگاه Girona صورت گرفته است. شکل ۳، دستگاه آزمون این آزمایش‌ها را که اتصال مهاربند به المان‌های پیرامونی خود در آن بر پایه‌ی آیین‌نامه‌ی AISC341-05 [۱۹] طراحی شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۳: دستگاه آزمایش، بخش نگهدارنده و ابزارهای اندازه‌گیری جابجایی [۱۷]

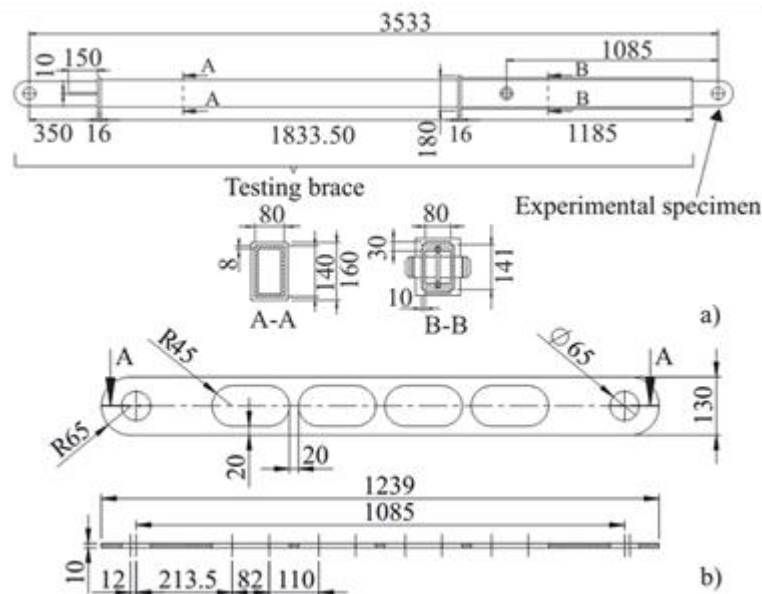
اتصال مهاربند به ستون‌های کناری اتصال مفصلی است. تغییرشکل بیشینه الگوهای بارگذاری آیین‌نامه‌های AISC341-05 [۱۹] و EN15129 [۲۰] برای طبقه‌ای به ارتفاع ۳m با در نظر گرفتن ۱٪ دریفت بین طبقه‌ای به عنوان جابجایی طرح لرزه‌ای محاسبه شدند. نمونه‌های آزمایشگاهی به کمک جکی هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰۰kN بارگذاری شدند. اگرچه، مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با دو هسته در دو انتهای مهاربند طراحی شدند، آزمایش‌ها بر روی مهاربندهایی با یک هسته و با در نظر گرفتن نیمی از جابجایی طرح، نتیجه‌های مشابهی را رقم خواهند زد. این دستگاه آزمایش، هزینه‌های آزمون را به شدت کاهش می‌دهد. با در نظر گرفتن این عامل‌ها، مهاربندهایی با یک هسته‌ی جذب‌کننده‌ی انرژی ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند. نیمی از این مهاربندها همان‌طوری بودند که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند و

نیمه‌ی دیگر از مقطعی قوطی شکل با اتصال خارجی به صورت پیچی ساخته شده اند. مقطع قوطی شکل و واحد نگهدارنده به کمک ورقی به هم جوش داده شده‌اند. یک مبدل داخلی<sup>۶</sup>، مطابق شکل ۴، نقش اندازه‌گیری تغییر شکل هسته را بر عهده دارد [۱۷].



شکل ۴: ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل هسته‌ی مهاربند [۱۷]

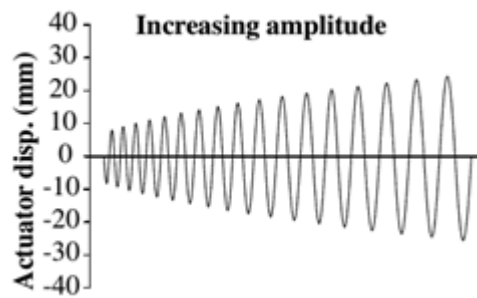
دو مبدل بیرونی، DT1 و DT2 در شکل ۳ به منظور اندازه‌گیری تغییر شکل مهاربند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مبدل DT1 تغییر شکل‌های هسته و پیچ داخلی را اندازه‌گیری می‌کند و مبدل DT2 وظیفه‌ی اندازه‌گیری تغییر شکل‌های الاستیک بقیه‌ی بخش‌های مهاربند را بر عهده دارد. هسته‌ی مهاربندها به کمک راهنمای فولاد S275JR [۲۱] ساخته شدند. ویژگی‌های مکانیکی هسته‌ی مهاربندها بر پایه‌ی آزمون‌های کششی استاندارد [۲۲] به دست آمده است. شکاف در هسته‌ی مهاربندها به کمک برش آب ایجاد شدند تا تغییری در اثر گرما در ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها بوجود نیاید. در پژوهش Piedrafita و همکارانش، مطابق شکل ۵، مهاربند طراحی و ساخته شدند.



شکل ۵: نمونه‌های آزمایشگاهی مهاربندهای کماتش‌ناپذیر شکاف‌دار [۱۷]

در پژوهش Piedrafita و همکارانش، مطابق شکل ۶، نمونه‌ی آزمایشگاهی بر پایه‌ی الگوی چرخه‌ای افزایشی بارگذاری شدند.

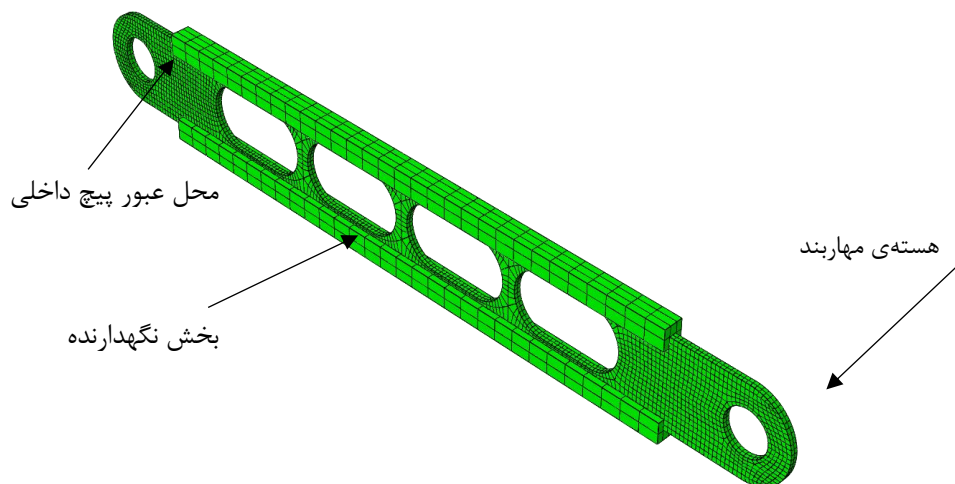
<sup>۶</sup> Internal Transducer



شکل ۶: الگوهای بارگذاری نمونه‌ی آزمایشگاهی [۱۷]

### ۳- الگوی عددی

هدف الگوسازی عددی در این پژوهش، مطالعه‌ی رفتار مهاربند در طول چرخه‌های نخست بارگذاری و هم‌چنین، بررسی اندرکنش بین هسته و واحد نگهدارنده می‌باشد. علاوه بر این، اثر شکل‌های هندسی مختلف هسته‌ی مهاربند بر روی رفتار کلی آن‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. برای این منظور از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است [۲۳]. الگوی عددی ساخته‌شده، مطابق شکل ۷، شامل هسته، بخش شکافدار واحد نگهدارنده و اتصال پیچ بیرونی می‌شود.



شکل ۷: بخش‌های مختلف الگوی عددی

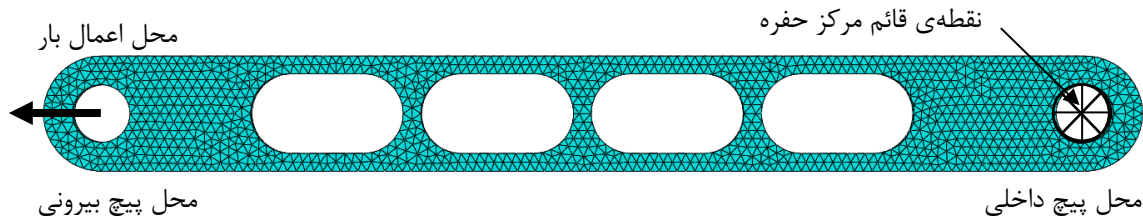
همه‌ی بخش‌های این الگو به کمک المان C3D8R ساخته شده‌اند. از الگوی بارگذاری مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی برای الگوهای عددی نیز استفاده شده است. مصالح استفاده شده در الگوی عددی به کمک الگوی ترکیبی جنبشی و ایزوتروپیک در نرم‌افزار ABAQUS به این نرم‌افزار معرفی شده‌اند. داده‌های مورد استفاده در این الگو از نتیجه‌های آزمون کششی انجام شده روی نمونه‌های آزمایشگاهی و به شرح جدول ۱ به نرم‌افزار معرفی شده‌اند.

جدول ۱: ویژگی مصالح مورد استفاده در الگوی عددی

۵۵۵	۵۴۸	۴۷۶	۳۹۷	۲۶۷	تنش (MPa):
۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۳	۰	کرنش (mm/mm):

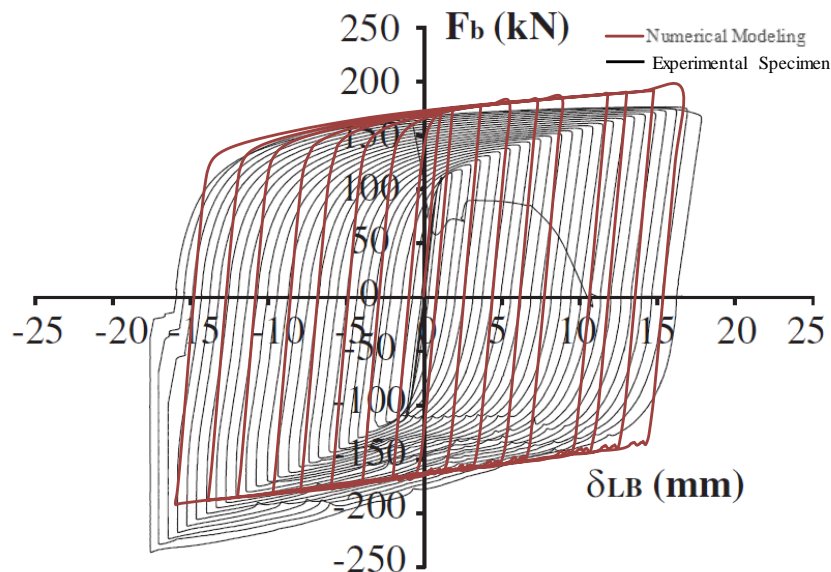


بخش شکاف دار واحد نگهدارنده، مطابق شکل ۸، با بستن نقطه‌های بیرونی آن مدل سازی شده است. برای شبیه سازی اتصال پیچ درونی در نمونه‌ها، نقطه‌ای قائم در مرکز حفره‌ی مربوط به پیچ در نظر گرفته شده است. سپس، دیگر نقطه‌های این حفره به نقطه‌ی مرکزی کوپل شدند. اتصال‌های بیرونی به کمک پیچ و اندک‌نش آن بین این المان و هسته در نظر گرفته شدند. شبیه سازی در حالت کنترل جابجایی انجام شده است. بارگذاری به پیچ اتصال بیرونی اعمال شده است.



شکل ۸: محل اعمال بار، پیچ‌های داخلی و بیرونی در هسته‌ی مهاربند

از قانون عمومی تماس برای الگوسازی تماس بین المان‌ها استفاده شده است. اصطحکاک نیز به کمک قانون نمایی که انتقال همواری بین ضریب‌های اصطحکاک ایستا و جنبشی را با مقدارهای به ترتیب برابر  $0.2$  و  $0.1$  ایجاد می‌کند، در الگوی عددی در نظر گرفته شدند. الگوی عددی ساخته شده توانایی شبیه سازی چرخه‌های نمونه‌های آزمایشگاهی را دارد. این امر در شکل ۹ نشان داده شده است.

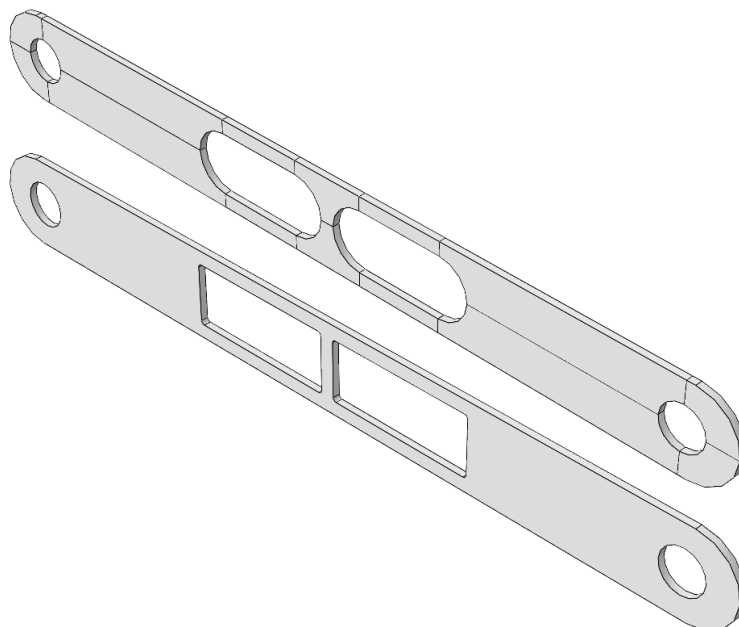


شکل ۹: نمودار چرخه‌ای نمونه‌ی آزمایشگاهی و الگوی عددی مهاربند شکاف دار لوبیایی چهارتایی

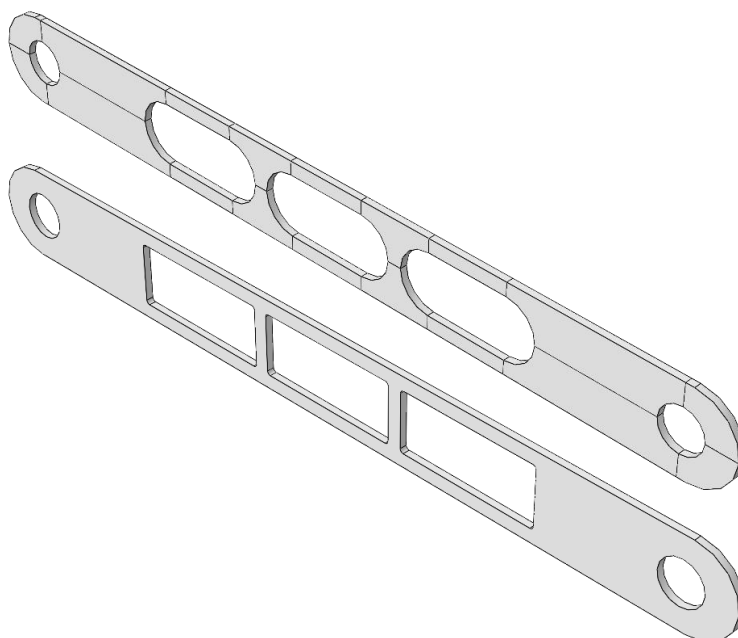
#### ۴- اثر شکل هندسی هسته‌ی مهاربند

به منظور بررسی اثر شکل‌های هندسی مختلف هسته‌ی مهاربند بر رفتار کلی مهاربندهای کم‌انرژی‌ناپذیر شکاف دار و انتخاب بهینه‌ترین حالت بین آن‌ها، در این پژوهش علاوه بر الگوی عددی صحت‌سنجی شده با نمونه‌های آزمایشگاهی، چند الگوی عددی دیگر با ویژگی‌های هندسی

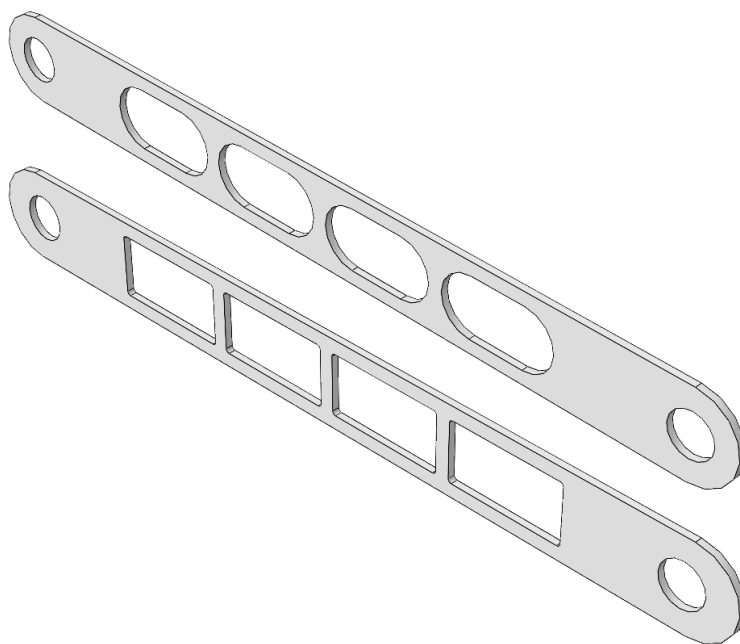
متفاوت مدل سازی شدند و رفتار آن ها در برابر بارهای رفت و برگشت مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش، مهاربندهایی با دو، سه و چهار شکاف در هسته در دو حالت بیضی شکل (لوبیایی) و مستطیلی الگوسازی شده اند. شکل های ۱۰ تا ۱۳ هسته ی این مهاربندها را نشان می دهند.



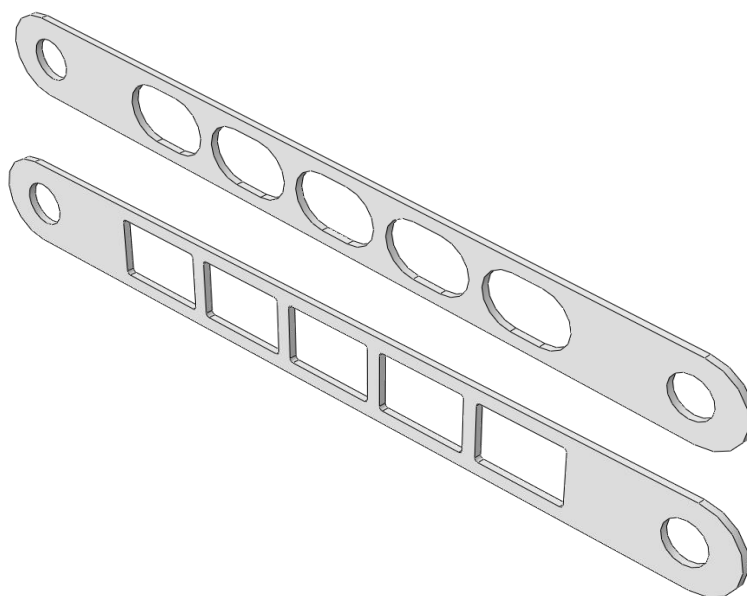
شکل ۱۰: هسته ی مهاربندهای شکاف دار لوبیایی و مستطیلی دوتایی



شکل ۱۱: هسته ی مهاربندهای شکاف دار لوبیایی و مستطیلی سه تایی



شکل ۱۲: هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی چهارتایی

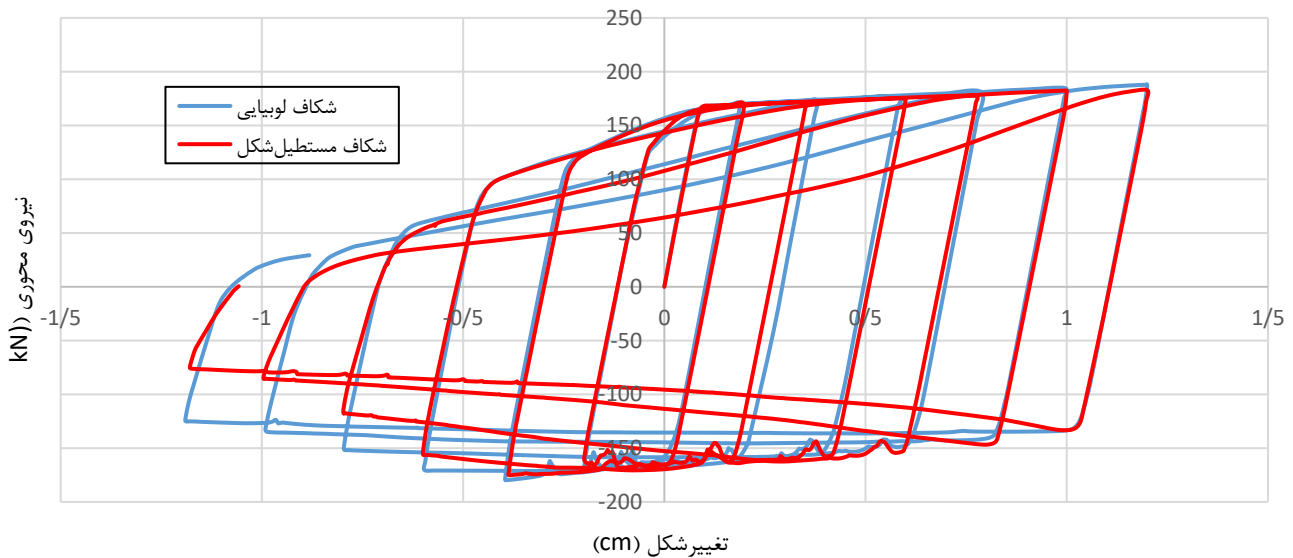


شکل ۱۳: هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی پنج‌تایی

بخش نگهدارنده برای همه‌ی مهاربندهای الگوسازی شده یکسان می‌باشد. هم‌چنین، برای دستیابی به هدف مقایسه‌ی رفتاری نمونه‌ها، بارگذاری در همه‌ی آن‌ها با الگوی رفت و برگشت و نرخ همانند انجام می‌شود. نمودارهای چرخه‌ای پاسخ مهاربندها به بارهای رفت و برگشت، چگونگی توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندها، سیر تکاملی تغییرشکل‌ها در آن‌ها و هم‌چنین، وضعیت هسته پس از کمانش برای حالت‌های مختلف هندسی هسته‌ی مهاربندها با هم مقایسه خواهند شد و بهترین آن‌ها انتخاب و پیشنهادهایی در این زمینه ارائه می‌شود.

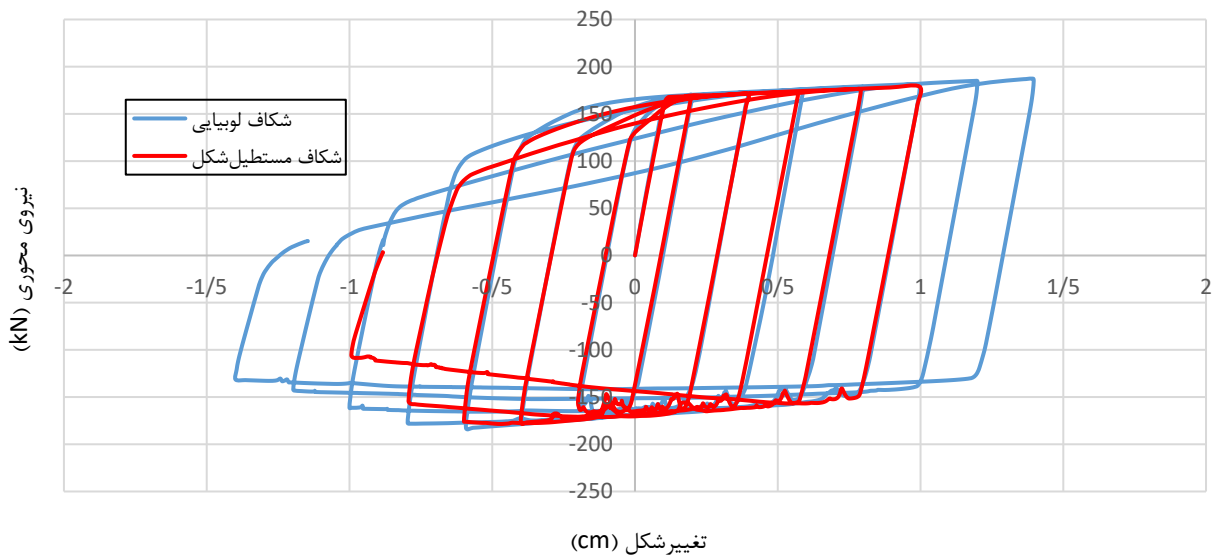
#### ۴-۱- نمودارهای چرخه ای

به منظور بررسی رفتار دینامیکی مهاربندها در برابر بارهای رفت و برگشت، نمودارهای چرخه‌ای الگوی عددی آن‌ها در حالت‌های شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی دوتایی، سه‌تایی و چهارتایی تحت الگوی بار مشابه الگوی عددی صحت‌سنجی شده قرار گرفتند. شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نتیجه‌های به دست آمده از این تحلیل را نشان می‌دهند.



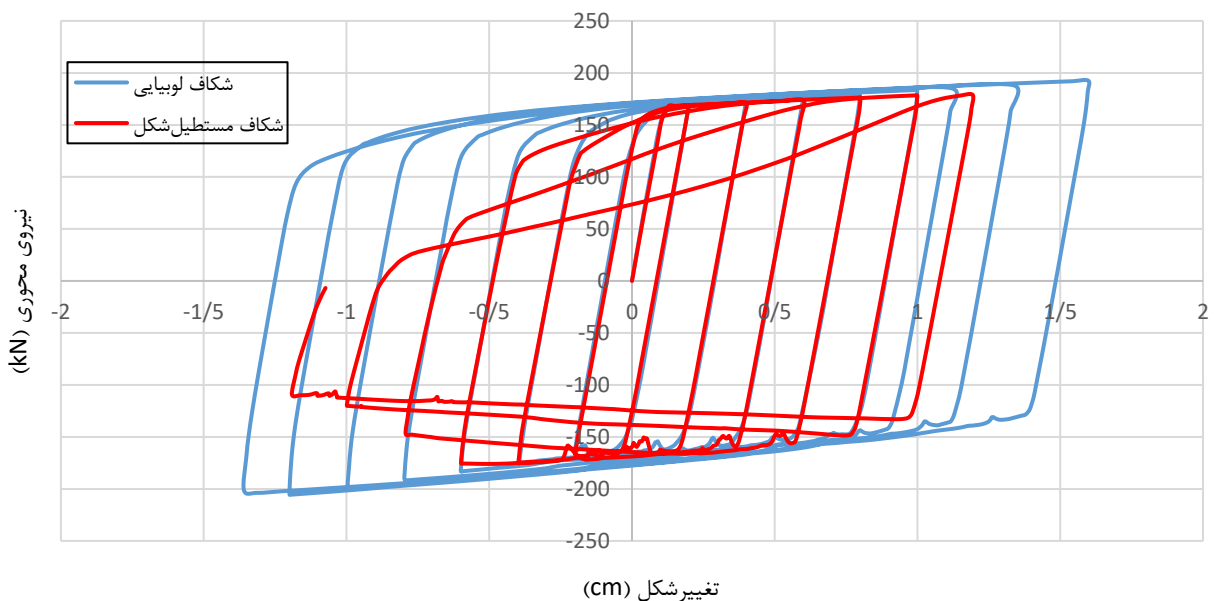
شکل ۱۴: نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار دوتایی

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار دوتایی لوبیایی شکل و مستطیلی در چرخه‌های نخست بارگذاری مشابه عمل کرده‌اند. از این تشابه به مرور و در چرخه‌هایی نهایی کاسته شده است و در پایان، نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار لوبیایی شکل در مقایسه با گونه‌ی مستطیلی سطح بیشتری دارد که این امر نشان‌دهنده‌ی میزان جذب انرژی بیشتر هسته‌ی لوبیایی شکل است. بررسی بیشتر این نمودار نشان می‌دهد که در چرخه‌های فشاری، مقدار نیروی تحمل‌شده در مهاربند مستطیل شکل نسبت به مهاربند لوبیایی کم‌تر است. علت این کاهش مقاومت در مهاربند مستطیل شکل را می‌توان در کمانش موضعی زود هنگام ایجاد شده در هسته‌ی مستطیل شکل دانست. در ادامه نمودار چرخه‌ای مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی و چهارتایی مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند. شکل ۱۵ نمودارهای مربوط به مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی را نشان می‌دهد.



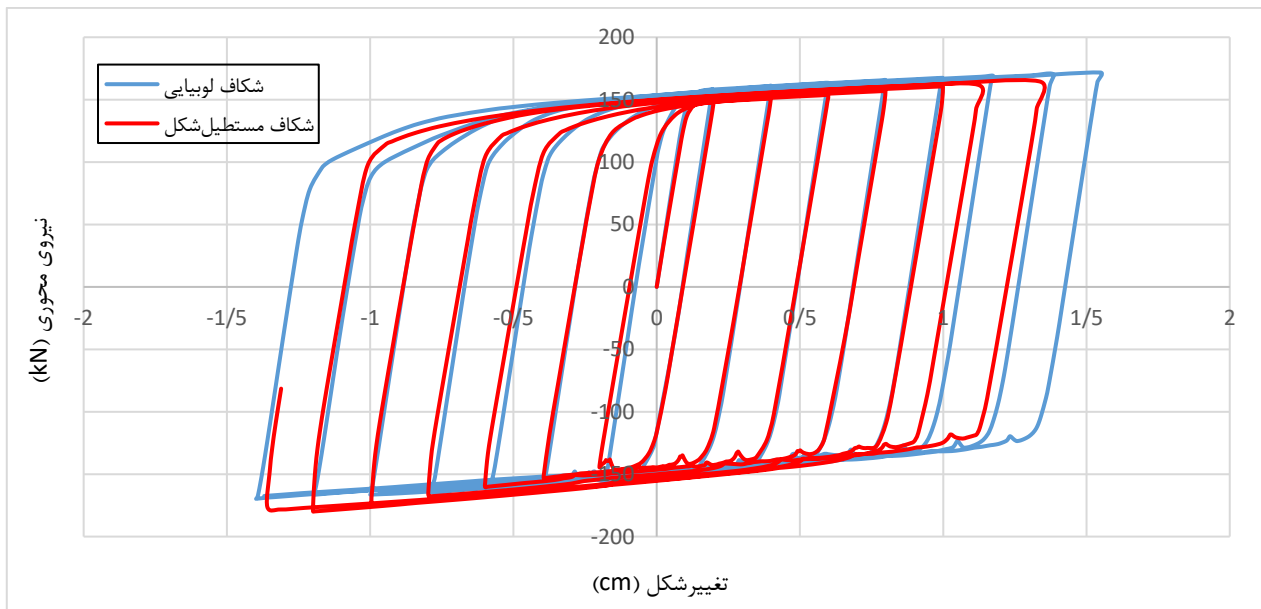
شکل ۱۵: نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار سه‌تایی

همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، مشابه نمودارهای چرخه‌ای مربوط به مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی، در مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی نیز، هسته‌های لوبیایی و مستطیل‌شکل در چرخه‌های نخست بارگذاری رفتار مشابهی دارند. پس از بارگذاری در چندین چرخه، به علت رخداد کماتش موضعی زود هنگام در هسته‌ی مستطیل‌شکل، چرخه‌های پاسخ این مهاربند در مقایسه با مهاربند با هسته‌ی لوبیایی دچار کاهش شدیدتری شده‌اند و دو مهاربند رفتار مشابهی ندارند. علاوه بر این، شکل بالا نشان می‌دهد که تغییر شکل نهایی مهاربند شکاف‌دار مستطیل‌شکل سه‌تایی زودتر از مهاربند متناظر به حد نهایی خود رسیده است و تعداد چرخه‌های پاسخ در مهاربند شکاف‌دار سه‌تایی لوبیایی شکل بیشتر است. از این رو، میزان جذب انرژی، مقاومت در برابر بارهای فشاری و همچنین شکل‌پذیری در مهاربند شکاف‌دار سه‌تایی لوبیایی شکل نسبت به مهاربند شکاف‌دار سه‌تایی مستطیل‌شکل بیشتر می‌باشد. نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار چهارتایی در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶: نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار چهارتایی

شکل ۱۶ نشان می‌دهد که مشابه نتیجه‌هایی که از نمودارهای چرخه‌ای مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی و سه‌تایی به دست آمد، برای مهاربندهای شکاف‌دار چهارتایی نیز، هسته با حفره‌های لوبیایی شکل در مقایسه با هسته با حفره‌های مستطیل شکل دارای تعداد چرخه‌های پاسخ بیشتر، مقدار مقاومت بالاتر در برابر بارهای فشاری، میزان شکل‌پذیری و جذب انرژی فراروان‌تری می‌باشد. نتیجه‌ی پاسخ چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار پنج‌تایی نیز در شکل ۱۷ نمایش داده شده است.



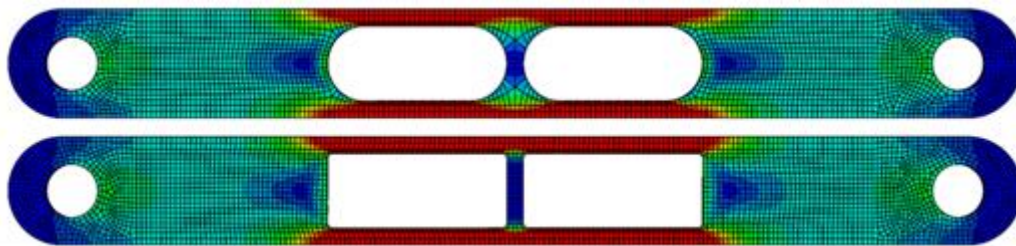
شکل ۱۷: نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار چهارتایی

بررسی رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با هسته‌ی سوراخ‌دار پنج‌تایی، مطابق شکل ۱۷ نشان می‌دهد که شکاف‌های لوبیایی و مستطیل شکل تفاوت چندانی باهم ندارند. تعداد چرخه‌های و میزان نیروی جذب‌شده در مهاربندهای مستطیل شکل اندکی کمتر است. هر دو مهاربند در حالت کششی و فشاری چرخه‌های پایداری دارند که نشان از عدم ایجاد کمانش در آنها است. ولی، مقایسه‌ی رفتار چرخه‌ای این مهاربندها با مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با هسته‌ی شکاف‌دار چهارتایی لوبیایی شکل نشان می‌دهد که نیروی جاری شدن و در نتیجه میزان جذب انرژی در مهاربندهای شکاف‌دار چهارتایی بیشتر است.

ارزیابی و مقایسه‌ی نمودارهای چرخه‌ای پاسخ مهاربندهای شکاف‌دار نشان دادند که در حالت کلی، به علت برتری‌های رفتاری مهاربندهای شکاف‌دار با حفره‌های لوبیایی شکل در هسته نسبت به مهاربندهای شکاف‌دار متناظر خود با حفره‌های مستطیل شکل، این گونه از مهاربندها می‌توانند برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بارهای جانبی پیشنهاد شوند. از بین مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی شکل، با توجه به رفتار آنها در برابر بارهای رفت و برگشت، مهاربندها با هسته‌ی چهار حفره‌ای به علت ایجاد کمانش دیر هنگام عملکرد مناسب‌تری دارند و نسبت به دیگر مهاربندها با هسته‌ی شکاف‌دار لوبیایی برای تحمل بارهای جانبی وارد بر سازه پیشنهاد می‌شوند.

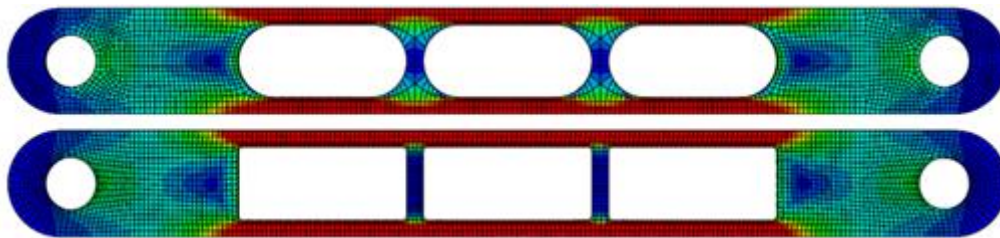
## ۲-۴- توزیع تنش

پس از بررسی رفتار و پاسخ چرخه‌ای مهاربندهای شکاف‌دار در بخش پیشین، در این بخش، چگونگی توزیع تنش در هسته‌ی این گونه از مهاربندها در دو حالت حفره‌های لوبیایی و مستطیل‌شکل و در سه دسته‌ی دوتایی، سه‌تایی و چهارتایی مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهند گرفت. شکل‌های ۱۸ تا ۲۱، چگونگی توزیع تنش‌های ون-مایسز<sup>۷</sup> در هسته‌ی مهاربندها در چرخه‌ی نهایی بارگذاری را نشان می‌دهند.



شکل ۱۸: توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی دوتایی

مطابق شکل ۱۸، مقدار تنش بیشینه‌ی ون-مایسز در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی و مستطیل‌شکل به ترتیب برابر  $2711 \text{ kg/cm}^2$  و  $2692 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد. هر دو مقدار این تنش‌ها از حد جاری شدن فولاد بیشتر هستند و در نتیجه هسته‌ی مهاربندها در نوارهای کناری شکاف‌های خود به حالت پلاستیک رسیده‌اند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تنش‌های بحرانی فقط در نوارهای کناری هسته‌ی مهاربند رخ داده‌اند و مقدار تنش در المان‌های قائم و دیگر بخش‌های هسته در حالت الاستیک قرار دارند. بیشتر بودن بیشینه تنش در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی شکل نسبت به مهاربند متناظر خود نشان‌دهنده‌ی مقاومت بیشتر آن در برابر بارهای محوری وارد شده بر آن می‌باشد. شکل ۱۹، توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی را نشان می‌دهد.

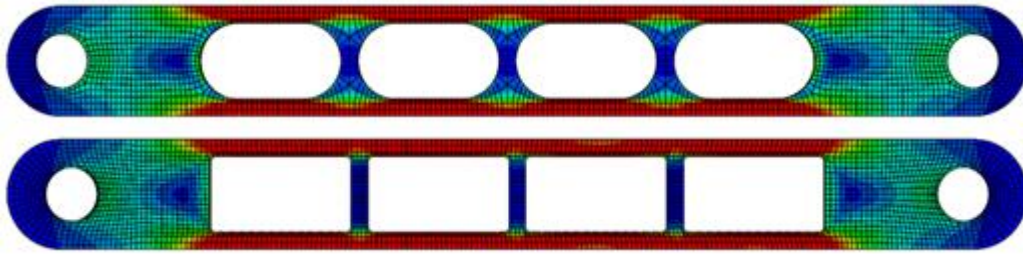


شکل ۱۹: توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی سه‌تایی

مشابه توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی، مطابق شکل ۱۹، در مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی نیز، تنش‌های بحرانی در نوارهای کناری رخ می‌دهد. مقدار تنش‌های بحرانی در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی لوبیایی و مستطیل‌شکل به ترتیب برابر  $2722 \text{ kg/cm}^2$  و  $2705 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد که از حد جاری شدن مصالح عبور کرده و وارد مرحله‌ی پلاستیک شده‌اند. مطابق انتظار، مقدار تنش بحرانی در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی شکل بیشتر از مهاربند متناظر مستطیل‌شکل خود است. این امر، توانایی بیشتر مهاربند با هسته‌ی شکاف‌دار لوبیایی شکل در تحمل بارهای محوری وارد شده بر آن در طی چرخه‌های بارگذاری را نشان می‌دهد. مشابه مهاربندهای کم‌انرژی‌ناپذیر شکاف‌دار دوتایی، در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی نیز، به‌جز نوارهای کناری، دیگر بخش‌ها در حالت الاستیک هستند و تنش بالایی ندارند. از طرف دیگر، مقایسه‌ی تنش‌های بیشینه در مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی و سه‌تایی نشان می‌دهد که تنش‌های بحرانی

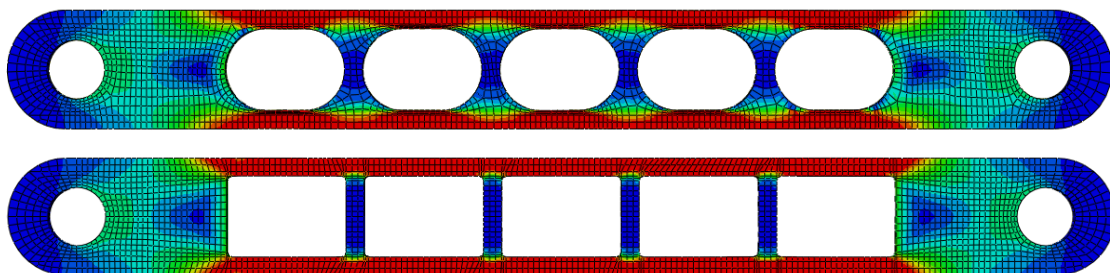
<sup>7</sup> Von Misses

در مهاربندهای شکافدار سه تایی مقدار بیشتری دارند که علت آن را می توان کوتاه تر شدن طول کمانشی در نوارهای کناری هسته‌ی مهاربندها و در نتیجه بیشتر بودن آستانه‌ی کمانشی هسته‌ی مهاربندهای شکافدار سه تایی نسبت به هسته‌ی مهاربندهای شکافدار دو تایی دانست. شکل ۲۰، توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکافدار چهار تایی را نشان داده است.



شکل ۲۰: توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکافدار لوبیایی و مستطیلی چهار تایی

مطابق شکل ۲۰، توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکافدار چهار تایی نیز رفتار مشابهی با مهاربندهای شکافدار دو تایی و سه تایی دارد. تنش‌های بحرانی در نوارهای کناری هسته‌ی مهاربندهای شکافدار چهار تایی لوبیایی و مستطیل شکل به ترتیب برابر  $2844 \text{ kg/cm}^2$  و  $2775 \text{ kg/cm}^2$  است. این تنش‌ها وارد محدوده‌ی پلاستیک شده‌اند و مقدار آن‌ها نسبت به تنش‌های بحرانی در هسته‌ی مهاربندهای شکافدار دو تایی و سه تایی بیشتر می‌باشد و از این رو، دارای مقاومت و آستانه‌ی کمانش بالاتری نسبت به آن‌ها هستند. توزیع تنش در مهاربندهای شکافدار پنج تایی نیز در شکل ۲۱ نمایش داده شده است.



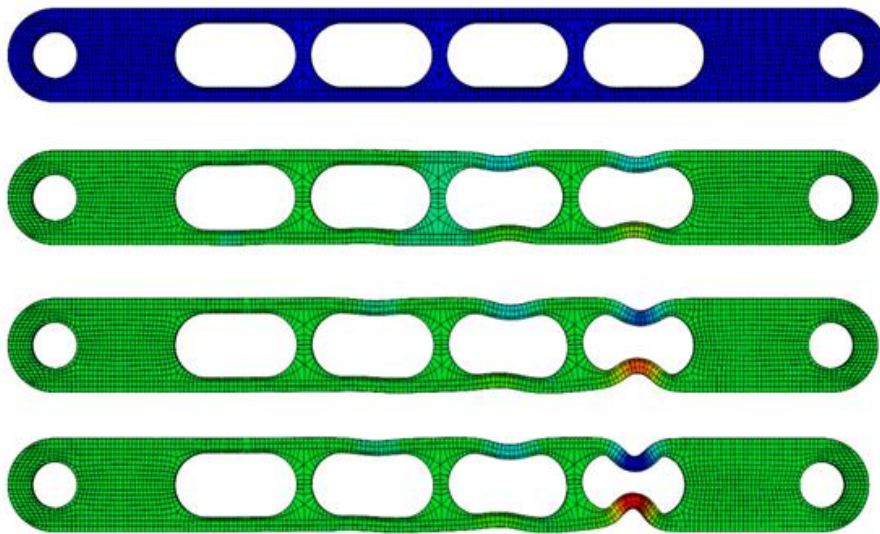
شکل ۲۱: توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکافدار لوبیایی و مستطیلی پنج تایی

مطابق با شکل ۲۱، ارزیابی توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکافدار پنج تایی نشان می‌دهد که تنش‌های بحرانی در نوارهای کناری هسته‌ی مهاربندهای شکافدار چهار تایی لوبیایی و مستطیل شکل به ترتیب برابر  $2787 \text{ kg/cm}^2$  و  $2751 \text{ kg/cm}^2$  است. مقدار این تنش‌ها در مقایسه با تنش‌های بحرانی در هسته‌ی مهاربندهای شکافدار دو تایی و سه تایی بیشتر و در مقایسه با هسته‌ی مهاربندهای شکافدار چهار تایی کم تر می‌باشد.

### ۳-۴- سیر تکاملی تغییر شکل ها

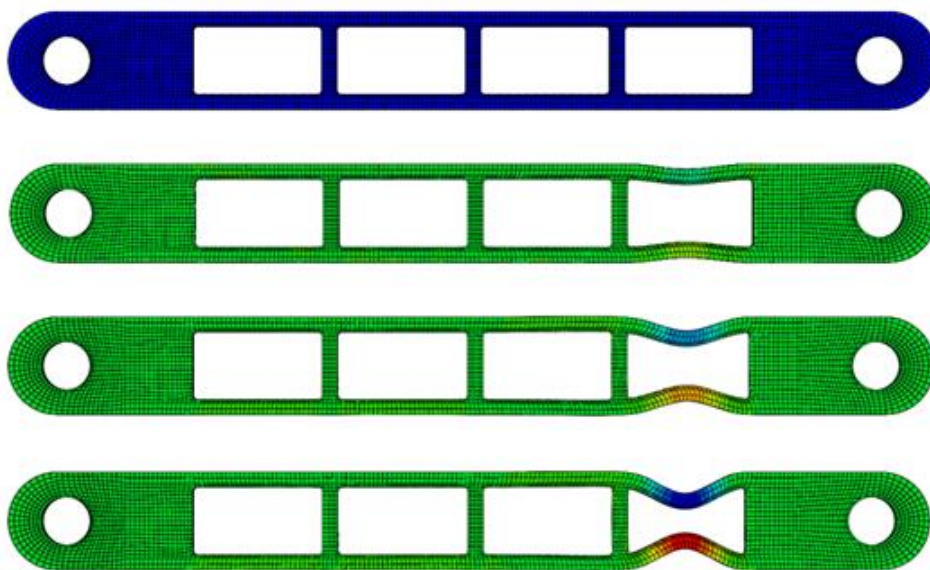
به منظور بررسی بیشتر رفتار مهاربندهای کمانش ناپذیر شکافدار، در این پژوهش، سیر تکاملی تغییر شکل آن‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ به عنوان نمونه، سیر تکاملی هسته‌ی مهاربندهای شکافدار چهار تایی در چرخه‌های مختلف بارگذاری را نشان داده شده است.





شکل ۲۲: سیر تکاملی تغییر شکل در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی چهارتایی

همان‌طور که در شکل ۲۲ دیده می‌شود، در چرخه‌های نخست، توزیع تغییر شکل به‌طور تقریبی یکنواخت است. پس از اعمال چندین چرخه‌ی بارگذاری، بخش‌های بیرونی تغییر شکل‌های کم‌تری نسبت به بخش‌های درونی دارند. استفاده از الگوی عددی بدون در نظر گرفتن اثر اصطحکاک در نمونه‌ها، چنین تفاوتی در توزیع تغییر شکل‌ها را نشان نمی‌دهد. از این رو، توزیع غیر یکنواخت تغییر شکل‌ها به علت اصطحکاک بین هسته و واحد نگهدارنده به‌وجود می‌آید. این توزیع غیر یکنواخت، با نوع شکست نمونه‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی دارد. در نمونه‌های آزمایشگاهی، کم‌اندش در بخش‌های خارجی نوارهای کناری رخ می‌دهد و شکست کششی نیز در بخش‌های درونی مشاهده می‌شود. از این رو، می‌توان بیان کرد برای دست‌یابی به الگوی عددی مناسب به‌منظور بررسی رفتار مهاربندهای کم‌اندش‌ناپذیر شکاف‌دار، در نظر گرفتن اصطحکاک در آن‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. به منظور بررسی بیشتر رفتار مهاربندهای شکاف‌دار، چگونگی سیر تکاملی تغییر شکل هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار مستطیل‌شکل چهارتایی در شکل ۲۳ نشان داده شده است.

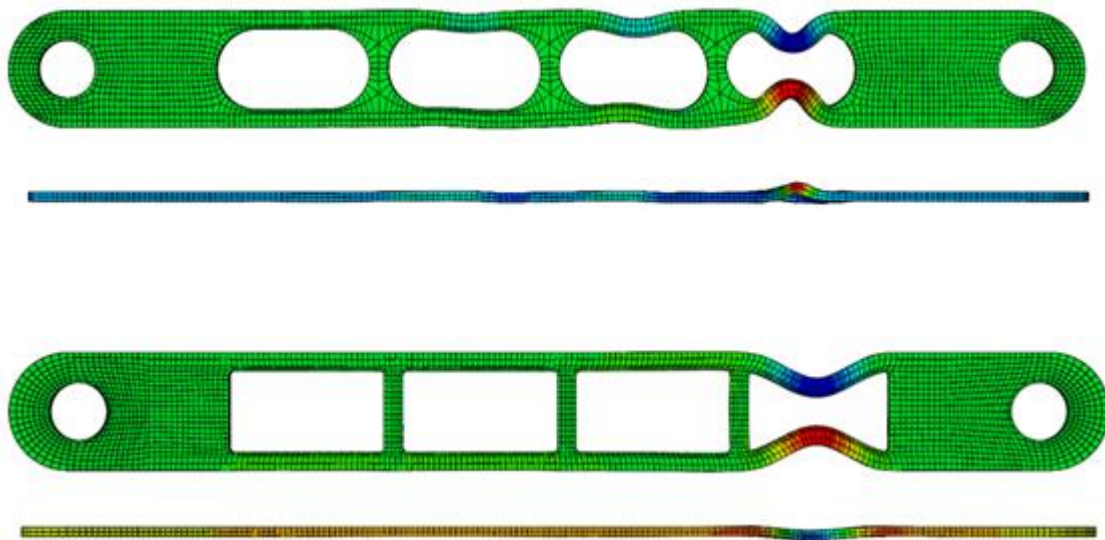


شکل ۲۳: سیر تکاملی تغییر شکل در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار مستطیلی چهارتایی

شکل ۲۳ نشان می‌دهد که اگرچه رفتار کلی سیر تکاملی تغییر شکل هسته‌ی مهاربند شکافدار لوبیایی و مستطیل شکل چهارتایی مشابه هستند، تفاوت‌های ظریفی بین آن‌ها وجود دارد. در هسته‌ی مهاربند شکافدار لوبیایی شکل، فقط حفره‌ی نخست دچار کمناش نشده و حفره‌ی مجاور نیز در تغییر شکل‌های ایجاد شده در هسته نقش دارد. این امر باعث می‌شود کمناش دیرتر رخ دهد و آستانه‌ی مقاومت کمناشی مهاربند بیشتر می‌شود. در حالی که در مهاربند کمناش ناپذیر شکافدار مستطیل شکل، کمناش فقط در یکی از حفره‌های کناری رخ می‌دهد و در نتیجه کمناش زود هنگام در آن رخ می‌دهد.

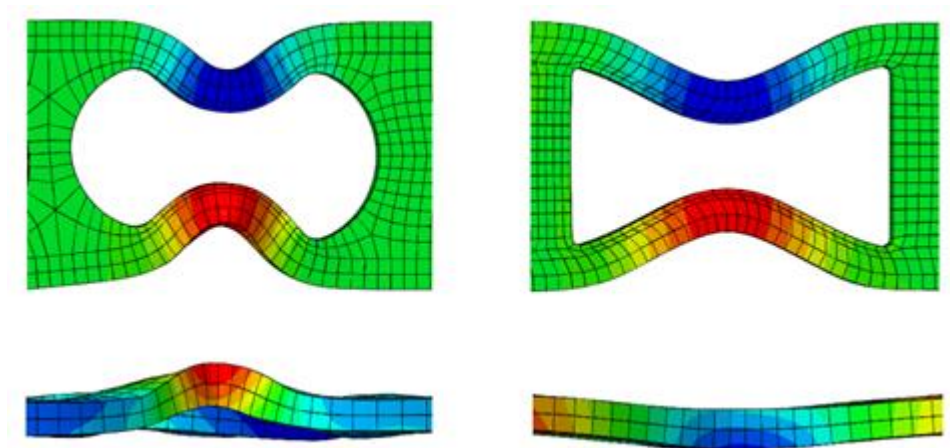
#### ۴-۴- وضعیت هسته پس از کمناش

همان‌طور که در بخش صحت‌سنجی به آن اشاره شد، در هسته‌ی مهاربندهای کمناش ناپذیر شکافدار به علت فاصله‌ی اندکی که بین هسته و بخش نگهدارنده وجود دارد، علاوه بر تغییر شکل‌های دورن صفحه‌ای،  $\delta_{IP}$ ، شاهد ایجاد تغییر شکل‌های بیرون از صفحه‌ی هسته‌ی مهاربند،  $\delta_C$ ، نیز خواهیم بود. در این بخش مقدار و چگونگی رفتار این گونه از تغییر شکل‌های هسته در الگوی عددی مهاربندهای کمناش ناپذیر شکافدار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به عنوان نمونه، شکل ۲۴ مقدار و چگونگی ایجاد تغییر شکل‌های بیرون صفحه در هسته‌ی مهاربندهای کمناش ناپذیر شکافدار چهارتایی را نشان داده است.



شکل ۲۴: تغییر شکل بیرون صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندهای شکافدار لوبیایی و مستطیلی چهارتایی

همان‌طور که در شکل ۲۴ دیده می‌شود، بر طبق انتظار، تغییر شکل‌های بیرون صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندها نیز در حفره‌ی بحرانی بیشینه هستند. بر خلاف تغییر شکل‌های دورن صفحه‌ای، نمی‌توان فرآیند و تفاوت رفتاری ویژه‌ای بین چگونگی ایجاد تغییر شکل‌های بیرون صفحه‌ای بین هسته‌ی مهاربندهای کمناش ناپذیر شکافدار لوبیایی و مستطیل شکل یافت. شکل ۲۵، نمای دقیق تری از چگونگی ایجاد تغییر شکل‌های بیرون صفحه‌ای در حفره‌ی بحرانی مهاربندها را نشان می‌دهد.



شکل ۲۵: تغییر شکل بیرون صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندهای شکافدار لوبیایی و مستطیلی چهارتایی در حفرة بحرانی

همان‌طور که در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود، تغییر شکل‌های بیرون صفحه‌ای در هسته‌ی مهاربندهای کمانش ناپذیر به صورت اتفاقی می‌تواند به سمت هر کدام از صفحه‌های کناری خود در بخش نگهداره‌ی هسته تمایل پیدا کند و چگونگی تغییر آن قابل پیش‌بینی نیست.

#### ۵-۴- انتخاب مهاربند بهینه

در بخش‌های پیشین، رفتار مهاربندهای کمانش ناپذیر شکافدار در قالب چندین الگوی عددی در دو حالت لوبیایی و مستطیل شکل و با دو، سه و چهار حفرة مورد ارزیابی قرار گرفتند. این ارزیابی با بررسی عامل‌هایی مانند نمودارهای چرخه‌ای پاسخ مهاربندها به بارهای رفت و برگشتی، چگونگی توزیع تنش‌های ون- مایسز در هسته‌ی مهاربندها در اثر بار محوری وارد شده بر آن‌ها، سیر تکاملی و تاریخچه‌ی زمانی تغییر شکل‌های دورن صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندها از لحظه‌ی شروع چرخه‌های بارگذاری تا لحظه‌ی کمانش و همچنین تغییر شکل‌های بیرون صفحه‌ای در حالت پس از کمانش، انجام شد. در حالت کلی، نتیجه‌ی مقایسه و ارزیابی این عامل‌ها نشان دادند که در همه‌ی حالت‌ها، رفتار هسته‌های لوبیایی شکل نسبت و هسته‌های مستطیل شکل برتری دارند و مناسب‌تر می‌باشند. از طرف دیگر، بین حالت‌های مختلف مهاربندهای کمانش ناپذیر شکافدار لوبیایی شکل، به علت طول کمانشی کم‌تر، مهاربندهای چهارتایی رفتار مناسب‌تری از خود نشان دادند. از این رو، از بین مهاربندهای بررسی شده در این پژوهش، مهاربندهای کمانش ناپذیر شکافدار لوبیایی شکل چهارتایی برای مقاوم‌سازی و تحمل بارهای جانبی در سازه‌ها پیشنهاد می‌شوند.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، گونه‌ای نوین از مهاربندهای کمانش ناپذیر با هسته‌ی سوراخدار به عنوان جایگزینی مناسب برای مهاربندهای کمانش ناپذیر سنتی پیشنهاد شد و رفتار آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از صحت‌سنجی الگوی عددی ساخته شده از این مهاربند با نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌های پیشین، به منظور دست‌یابی به طرحی بهینه برای تعداد و نوع سوراخ‌های هسته در این مهاربند، این الگو تحت بارگذاری رفت و برگشت قرار گرفت. نتیجه‌های این تحلیل شامل نمودارهای چرخه‌ای رفتار مهاربندها، توزیع تنش و چگونگی تغییر در آن‌ها و همچنین وضعیت هسته پس از وقوع کمانش، نشان دادند که مهاربندهای کمانش ناپذیر سوراخدار چهارتایی با حفرة‌های لوبیایی شکل رفتار مناسب‌تری دارند و می‌توان از آن‌ها برای بهسازی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها بهره جست.

مراجع

- [1] Soong, T. and Spencer, B., (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of the-art and state-of-the- practice." *Engineering Structures*, 24:243–259, 2002.
- [2] Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Akira Wada, A., and Fujimoto, M., (1988), "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube." *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, IV:719–724.
- [3] Black, C., Martin, N., and Aiken, I., (2002), "Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained unbounded braces." Technical report, Pacific earthquake engineering research center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- [4] Iwata., M., (2004). "Applications-design of buckling restrained braces in japan. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 3208.
- [5] Black, C., Makris, N., and Aiken, I., (2004), "Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces." *Journal of Structural Engineering*, 130:880–894.
- [6] Uang, C., Nakashima, M., and Tsai K., (2004), "Research and application of buckling restrained braced frames." *Steel Structures*, 4:301–313.
- [7] Tsai, K., Lai, Y., Hwang, V., and Lin, C., (2004), "Research and application of doublecore buckling restrained braces in Taiwan." 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 2179.
- [8] Chou C., Chen Y., (2010), "Subassemblage tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces." *Eng Struct*;32:2108–21 .
- [9] Iwata M., Murai M., (2006), "Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper." *Earthq Eng Struct Dynam*;35:1807–26.
- [10] Usami T., Wang CL., Funayama J., (2012), "Developing high performance aluminum alloy buckling restrained braces based on series of low cycle fatigue tests. *Earthq Eng Struct Dynam*;41:643–61 .
- [11] Chen C., (2002), "Recent advances of seismic design of steel buildings in Taiwan." *Int Train Prog Seis Des Build Struct*.
- [12] Park J., Lee J., Kim J., (2012), "Cyclic test of buckling restrained braces composed of square steel rods and steel tube." *Steel Compos Struct*;13:423.43.
- [13] Dusicka P, Asce M, Tinker J., (2013), "Global Restraint in Ultra-Lightweight BucklingRestrained Braces." *J Compos Constr*;17:139–50.
- [14] Piedrafita D, Cahis X, Simon E, Comas J., (2013), "A new modular buckling restrained brace for seismic resistant buildings." *Eng Struct*;56:1967–75.
- [15] Chou C, Liu H, Pham H., (2012), "Steel buckling-restrained braced frames with single and dual corner gusset connections: seismic tests and analyses." *Earthq Eng Struct Dynam* 2012;41:1137 56.
- [16] Palmer KD, Christopoulos AS, Lehman DE, (2014), "Roeder CW. Experimental evaluation of cyclically loaded, large-scale, planar and 3-d buckling-restrained braced frames. *J Constr Steel Res*;101:415–25.
- [17] Piedrafita D., Cahis, X., Simon, A., Comas, J., (2015), "A new perforated core buckling restrained brace" *Engineering Structures* 85; 118–126.
- [18] Black, C., Makris, N., and Aiken, I., (2004), "Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces." *Journal of Structural Engineering*, 130:880–894.
- [19] AISC341-05, (2005), "Seismic Provisions for Structural Steel".
- [20] EN15129, (2009), "Anti-seismic devices".
- [21] EN 10025 – 2, (2004), "Technical delivery conditions for non-alloy structural steels".
- [22] UNE-EN 1993-1-1 (2005), "Eurocode 3.1.1 General structural rules".
- [23] ABAQUS version 6.9: (2009), "ABAQUS User's Manual, SIMULIA World Headquarters," 166 Valley Street, Providence, RI 02909, USA.