نقش عامل‌های هندسی بر رفتار مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با هسته شکاف‌دار

هاشم جهانگیر[1]، محمدحسن دانشور خرم[2]، منصور قلعه‌نوی[3]*

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. مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سنتی از یک هسته‌ی یکنواخت و بخش نگهدارنده که از ملات پر شده است ساخته می‌شوند که وزن زیاد به علت مواد پرکننده پیرامون هسته، نبود امکان بازرسی چشمی هسته و جایگزینی و تعمیر آن پس از ایجاد خسارت را می‌توان از کاستی‌های این گونه از مهاربندها 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 یک تا پنج شکاف و با شکل‌های لوبیایی و مستطیلی به کمک عامل‌هایی مانند رفتار چرخه‌ای آن‌ها، چگونگی توزیع تنش، تغییرشکل هسته و وضعیت مهاربند پس از کمانش ارزیابی شدند. در حالت کلی، نتیجه‌ی مقایسه و ارزیابی این عامل‌ها نشان دادند که در همه‌ی حالت‌ها، رفتار هسته‌های لوبیایی‌شکل نسبت و هسته‌های مستطیل‌شکل برتری دارند و مناسب‌تر می‌باشند. از طرف دیگر، بین حالت‌های مختلف مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار لوبیایی‌شکل، به علت طول کمانشی بهینه، مهاربندهای چهارتایی رفتار مناسب‌تری از خود نشان دادند. از این رو، از بین مهاربندهای بررسی شده در این پژوهش، مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار لوبیایی‌شکل چهارتایی برای مقاوم‌سازی و تحمل بارهای جانبی در سازه‌ها پیشنهاد می‌شوند.

کلمات کلیدی: بارهای جانبی، مهاربندهای نوین کمانش‌ناپذیر، هسته‌های سوراخ‌دار، عامل‌های هندسی، انرژی جذب‌شده.

***نویسنده مسئول: منصور قلعه‌نوی**
پست الکترونیکی: ghalehnovi@um.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

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 به‌صورت 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، به‌طور 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 تامین 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 کمانش ناپذیر 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.

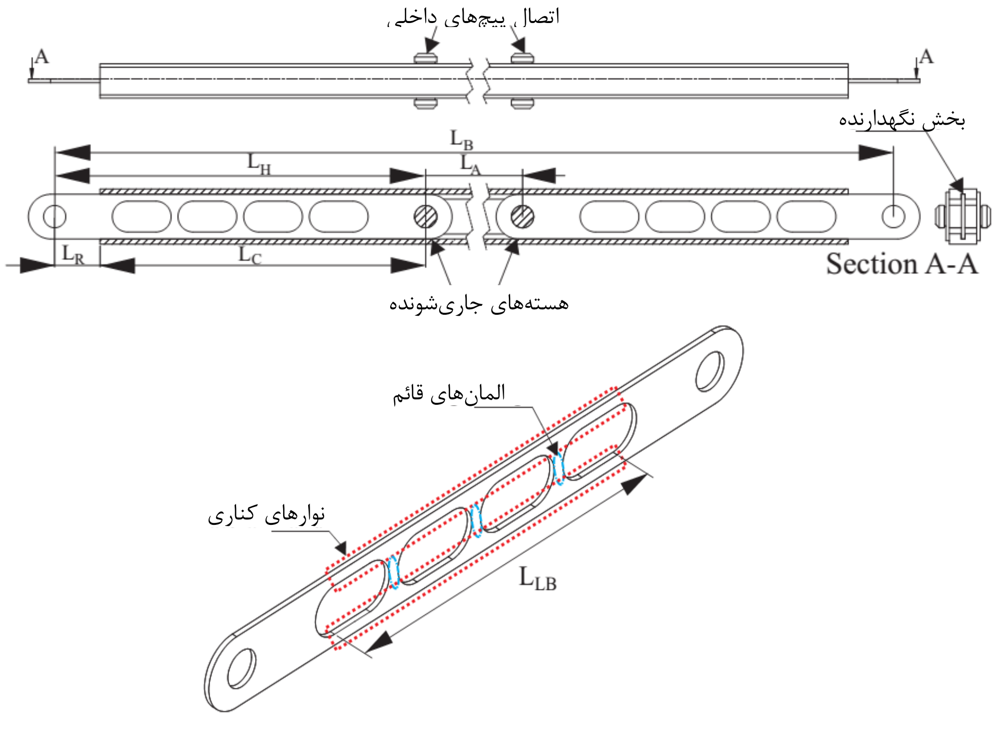
در راستای بهبود کاستی‌های مهاربندهای کمانش‌ناپذیر پژوهش‌های فراوانی انجام شده است. در برخی از آن‌ها از بتن پیش‌ساخته در مقاطع فولادی به عنوان بخش نگه‌دارنده استفاده شده است [۸ و ۹]. این امر، چگونگی بازرسی و جایگزینی هسته‌ی مهاربند را ممکن می‌سازد. به منظور کاهش وزن این مهاربندها در برخی دیگر از پژوهش‌ها از هسته‌ی آلومینیمی 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 غیرچسبنده نیست، امکان بازرسی هسته و جایگیزینی 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 ارایه 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 جوش‌کاری 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 ارایه 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 امده از آن با نتیجه‌های به دست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. سپس، به‌منظور دست یابی 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 قطعه قطعه خالی شده هستند تا نیروی حاصل از جاری‌شدن هسته را به پیرامون مهاربند و بخش کناری هسته منتقل کنند. این مهاربند از دو ورق فولادی به عنوان نوارهای کناری[1] که به کمک بخش نگهدارنده[2] فولادی پایدار شده‌اند، تشکیل می‌شود. به منظور انتقال نیروی محوری، هسته و واحد نگهدارنده به کمک پیچ‌های داخلی[3] به هم وصل می‌شوند. هسته‌ی مهاربند به گونه‌ای از نظر هندسی طراحی می‌شود که نوارهای کناری در فاصله‌هایی برابر به کمک المان‌های قائم[4] به هم متصل شوند [۱۷].



شکل ۱: بخش‌های مختلف مهاربند کمانش‌ناپذیر سوراخ‌دار [۱۷]

حفره‌های موجود در هسته‌ی مهاربند به کمک برش آب[5] 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 جوش‌دادن چهار میله‌ی مستطیل‌شکل به یکدیگر ساخته می‌شود تا حالت قوطی‌شکل پیدا کند. دو عدد از این میله‌ها دارای شکاف‌هایی هستند و در روبه‌روی هم قرار می‌گیرند تا هسته‌ی مهاربند را پوشش دهند. روی‌هم گذاری مهاربند با فشار دادن هسته‌ی روغن‌کاری‌شده به

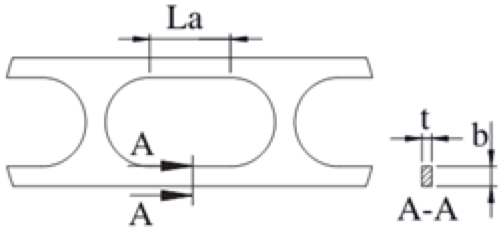
[1] Lateral Band
[2] Restraining Unit
[3] Internal Pin
[4] Stabilizing Bridge
[5] Water Jet

درون واحد نگهدارنده و قرار دادن آن‌ها در محل تعیین‌شده به کمک پیچ‌های داخلی انجام می‌شود. طراحی نوارهای کناری هسته‌ی مهاربند بر پایه‌ی توزیع یکنواخت تنش انجام می‌شود. نیروی جاری‌شدن، F_y، و نیروی نهایی، F_u، برای هسته می‌توانند به‌ترتیب به کمک رابطه‌های زیر به دست آیند [۱۷]:

$$F_y = 2 f_y tb \tag{۱}$$

$$F_u = 2\beta f_u tb \tag{۲}$$

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 جاری‌شدن و نهایی مصالح هستند. هم‌چنین، β 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:

$$\delta_{c,y} = \frac{F_y L_{LB}}{Etb} \tag{۳}$$

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:

$$\delta_{c,u} = \mu_c \delta_{c,y} \tag{۴}$$

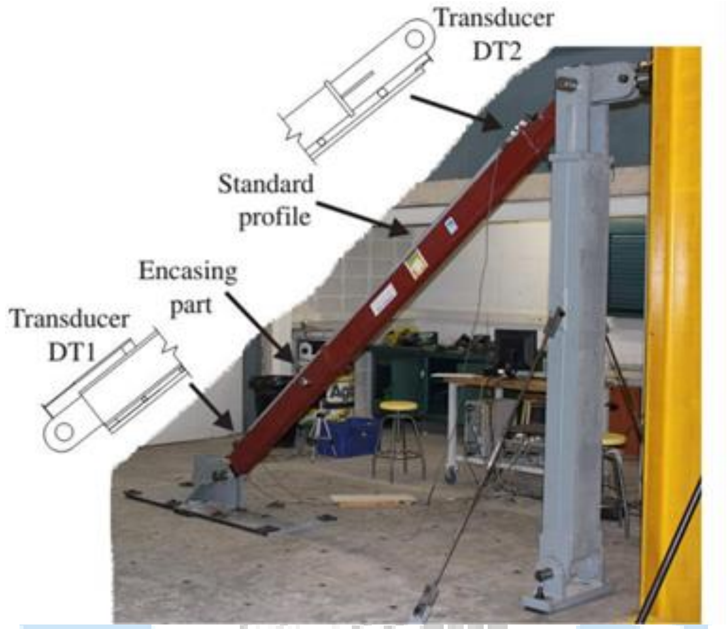
در این رابطه، μ_c، ضریب شکل‌پذیری هسته‌ی مهاربند می‌باشد. هسته‌ی مهاربندها باید بر پایه‌ی بیشینه شکل‌پذیری ۸ طراحی شوند تا با دریفت بین طبقه‌ای به‌دست آمده از آزمایش‌ها مطابقت داشته باشند.

به منظور تعیین L_a فرض بر این است که کمانش موضعی بیرون‌صفحه‌ای رخ نمی‌دهد. رابطه‌ی اویلر، $\frac{\pi^2 EI}{kL_a}$، 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:

$$L_a = \sqrt{\frac{\pi^2 E_t tb^3}{3F_{max}}} \tag{۵}$$

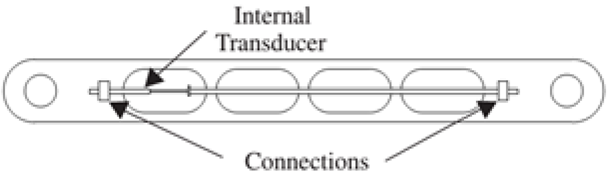
در این رابطه، I، ممان اینرسی نوار کناری هسته‌ی مهاربند، $I = \frac{tb^3}{12}$ و E_t ضریب کشسانی مماسی متناظر با نیروی بیشینه در آزمون کشش می‌باشد [۱۸].

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 مدل سازی 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]

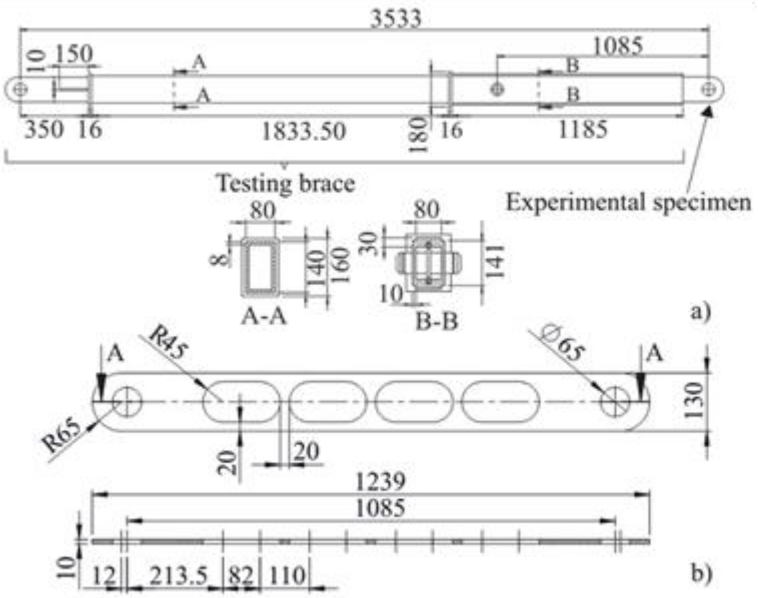
اتصال مهاربند به ستون‌های کناری اتصال مفصلی است. تغییرشکل بیشینه الگوهای بارگذاری آیین‌نامه‌های AISC341-05 [۱۹] و EN15129 [۲۰] برای طبقه‌ای به ارتفاع ۳m با در نظر گرفتن ۱٪ دریفت بین طبقه‌ای به عنوان جابجایی طرح لرزه‌ای محاسبه شدند. نمونه‌های آزمایشگاهی به کمک جکی هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰۰kN بارگذاری شدند. اگرچه، مهاربندهای کمانش ناپذیر 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 ازمایش قرار گرفتند. نیمه‌ی این مهاربندها همان‌طوری بودند که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند و نیمه‌ی دیگر از از مقطعی قوطی‌شکل با اتصال خارجی به‌صورت پیچی ساخته شده اند. مقطع قوطی‌شکل و واحد نگهدارنده به کمک ورقی به‌هم جوش داده شده‌اند. یک مبدل داخلی[1]، مطابق شکل ۴، نقش اندازه‌گیری تغییرشکل هسته را بر عهده دارد [۱۷].



شکل ۴ : ابزار اندازه‌گیری تغییرشکل هسته‌ی مهاربند [۱۷]

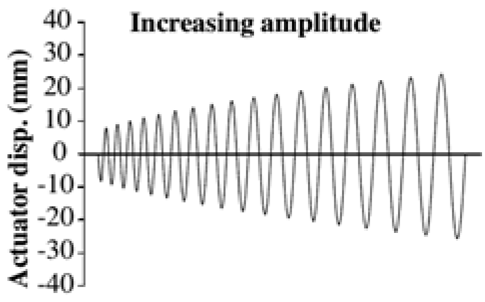
[1] Internal Transducer

دو مبدل بیرونی، DT1 و DT2 در شکل ۳ به منظور اندازه‌گیری تغییرشکل مهاربند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مبدل DT1 تغییرشکل‌های هسته و پیچ داخلی را اندازه‌گیری می‌کند و مبدل DT2 وظیفه‌ی اندازه‌گیری تغییرشکل‌های 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 مهربندها 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 کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار [۱۷]

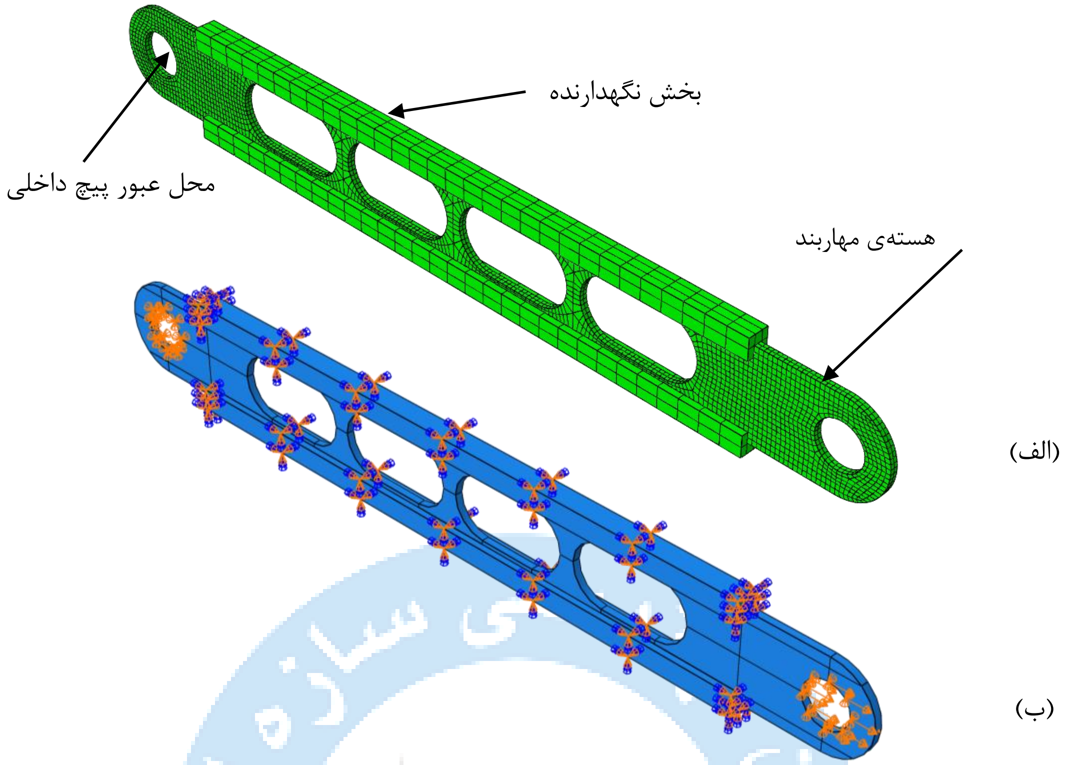
در پژوهش Piedrafita و همکارانش، مطابق شکل ۶، نمونه‌ی آزمایشگاهی بر پایه‌ی الگوی چرخه‌ای افزایشی بارگذاری شدند.



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. شرایط مرزی و محل اعمال بار نیز در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



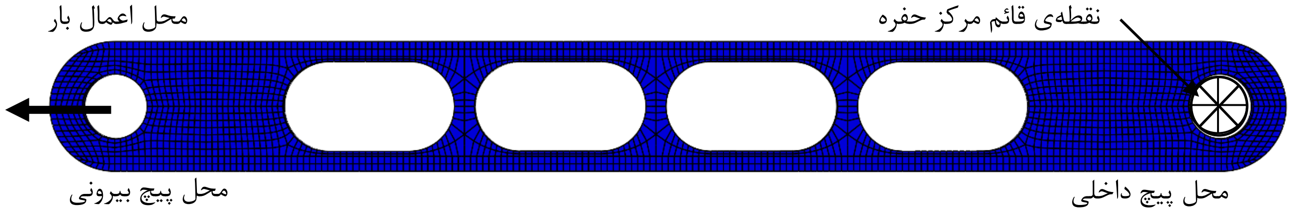
شکل ۷ : الف) بخش‌های مختلف الگوی عددی؛ ب) شرایط مرزی و چگونگی اعمال بار

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.

جدول۱ : ویژگی مصالح مورد استفاده در الگوی عددی

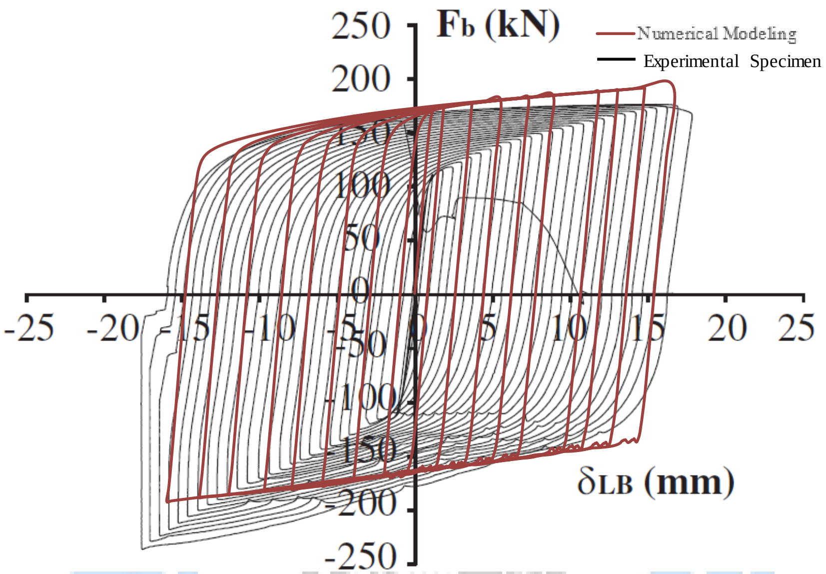
تنش (MPa):	۲۶۷	۳۹۷	۴۷۶	۵۴۸	۵۵۵
کرنش (mm/mm):	۰	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۲۱

بخش شکاف‌دار واحد نگهدارنده، مطابق شکل ۸، با بستن نقطه‌های بیرونی آن مدل‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی 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. شبیه‌سازی در حالت کنترل جابجایی انجام شده است. بارگذاری به پیچ اتصال بیرونی اعمال شده است.

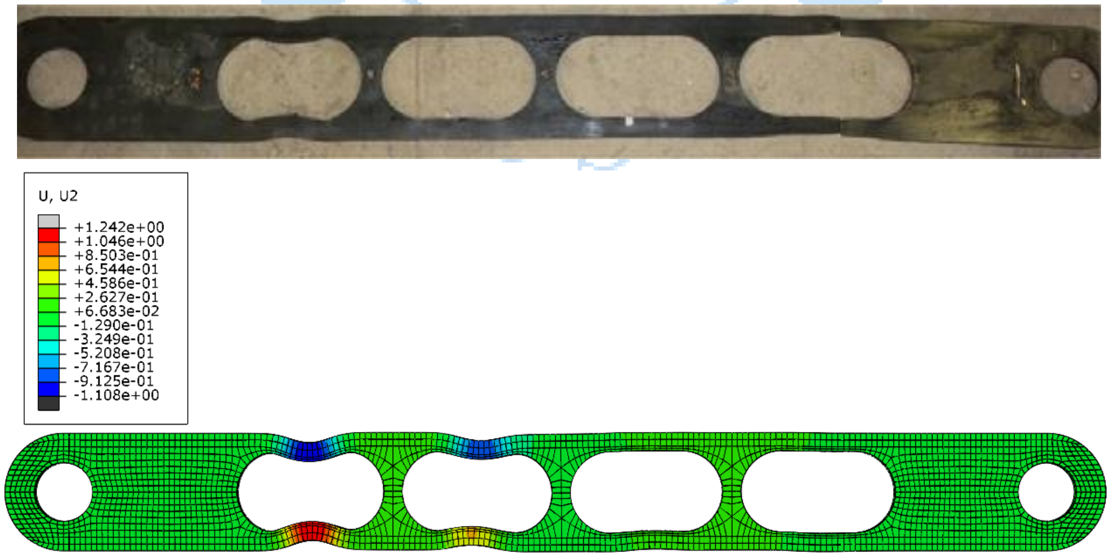


شکل ۸ : محل اعمال بار، پیچ‌های داخلی و بیرونی در هسته‌ی مهاربند

نسبت اندازه‌ی بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین المان مش‌بندی‌شده[1] در بخش نگهدارنده که رفتار کشسان را تجربه می‌کند و از اهمیت کم‌تری نسبت به بخش هسته برخوردار است برابر ۲/۷۳ می‌باشد. این نسبت در بخش هسته‌ی مهاربندها و در حاشیه‌های حفره‌ها برابر ۱/۴۲ و در دیگر بخش‌های هسته‌ی مهاربندها که در فاصله‌ی دورتری از حفره‌های قرار دارند، برابر ۱ در نظر گرفته شده است. 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 ۰/۲ و ۰/۱ ایجاد می‌کند، در الگوی عددی در نظر گرفته شدند. الگوی عددی ساخته‌شده توانایی شبیه‌سازی چرخه‌های نمونه‌های آزمایشگاهی و هم‌چنین برآورد چگونگی تغییرشکل هسته‌ی مهاربند را دارد. این امر در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.



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

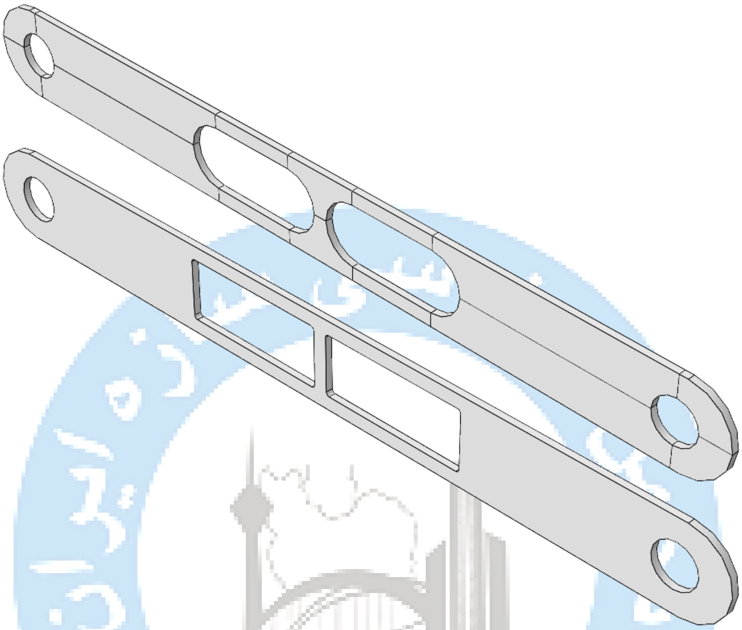


شکل ۱۰: تغییر شکل هسته‌ی مهاربند در نمونه‌ی آزمایشگاهی و الگوی عددی با چهار شکاف لوبیایی

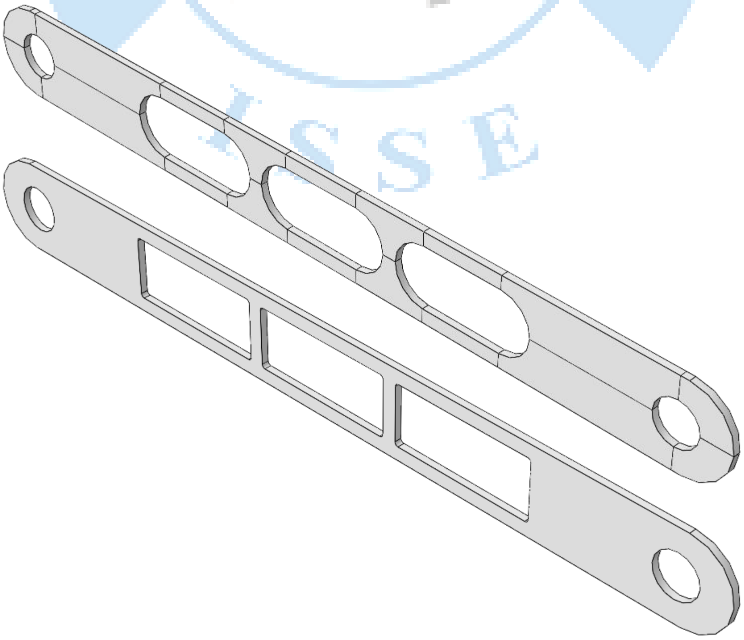
[1] Element aspect ratio

۴- اثر شکل هندسی هسته‌ی مهاربند

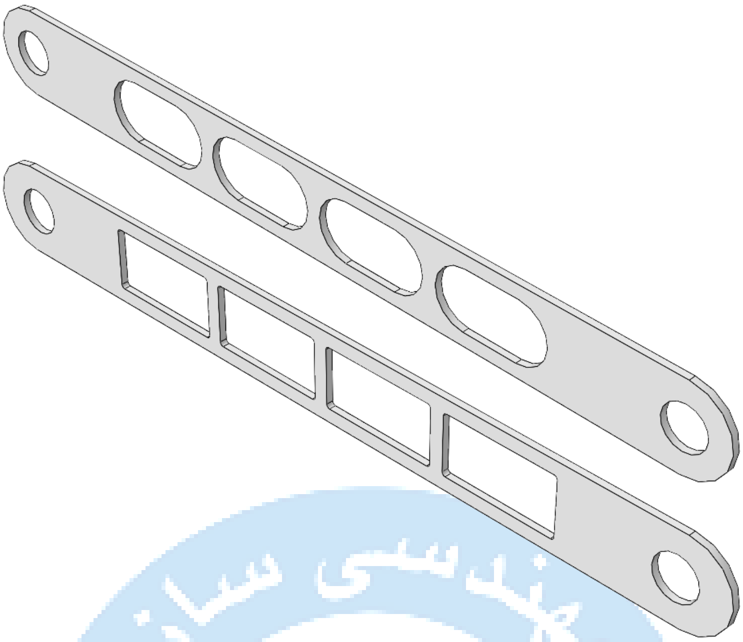
به منظور بررسی اثر شکل‌های هندسی مختلف هسته‌ی مهاربند بر رفتار کلی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار و انتخاب بهینه‌ترین حالت بین آن‌ها، در این پژوهش علاوه بر الگوی عددی صحت‌سنجی شده با نمونه‌های آزمایشگاهی، چند الگوی عددی دیگر با ویژگی‌های هندسی متفاوت مدل‌سازی شدند و رفتار آن‌ها در برابر بارهای رفت و برگشت مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش، مهاربندهایی با دو، سه و چهار شکاف در هسته در دو حالت بیضی‌شکل (لوبیایی) و مستطیلی الگوسازی شده‌اند. شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ هسته‌ی این مهاربندها را نشان می‌دهند.



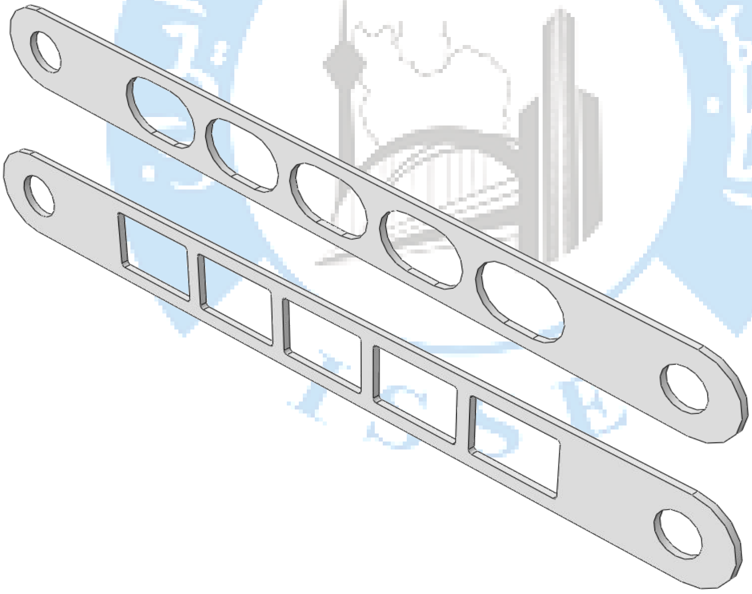
شکل ۱۱ : هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی دوتایی



شکل ۱۲ : هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی سه‌تایی

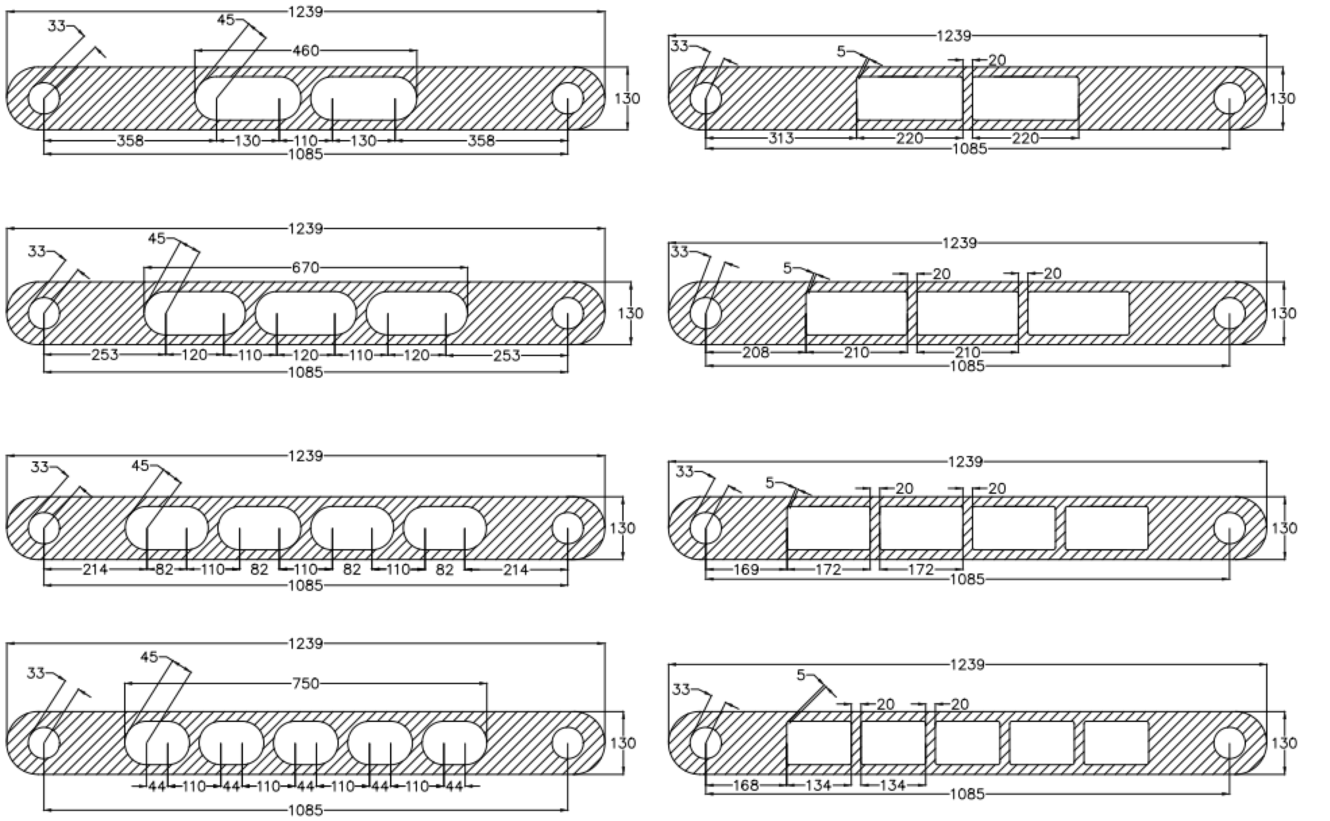


شکل ۱۳ : هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی چهارتایی



شکل ۱۴ : هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی پنج‌تایی

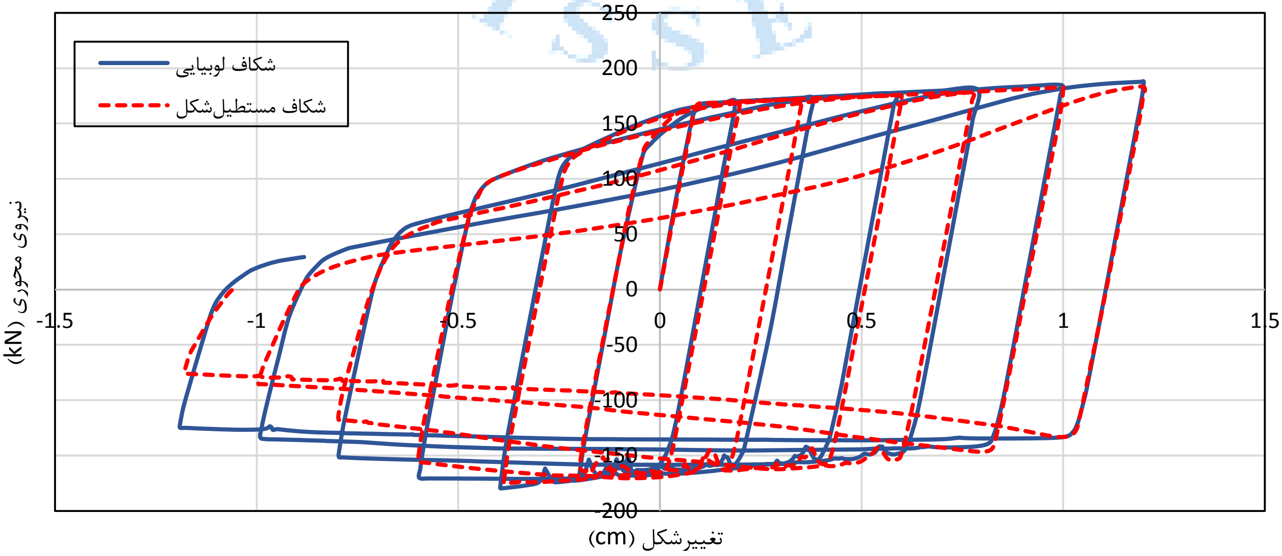
ویژگی‌های هندسی هسته‌ی مهاربندهای نشان داده‌شده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ شامل طول و عرض کلی هسته، طول و عرض و شعاع گردشدگی گوشه‌های هر یک از حفره‌ها و فاصله‌ی آزاد بین حفره‌ها از یکدیگر در شکل ۱۵ گزارش شده است. بخش نگهدارنده برای همه‌ی مهاربندهای الگوسازی‌شده یکسان می‌باشد. هم‌چنین، برای دست‌یابی به هدف مقایسه‌ی 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 بهینه‌ترین آن‌ها انتخاب و پیشنهادهایی در این زمینه ارایه می‌شود.



شکل ۱۵ : ویژگی‌های هندسی هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی

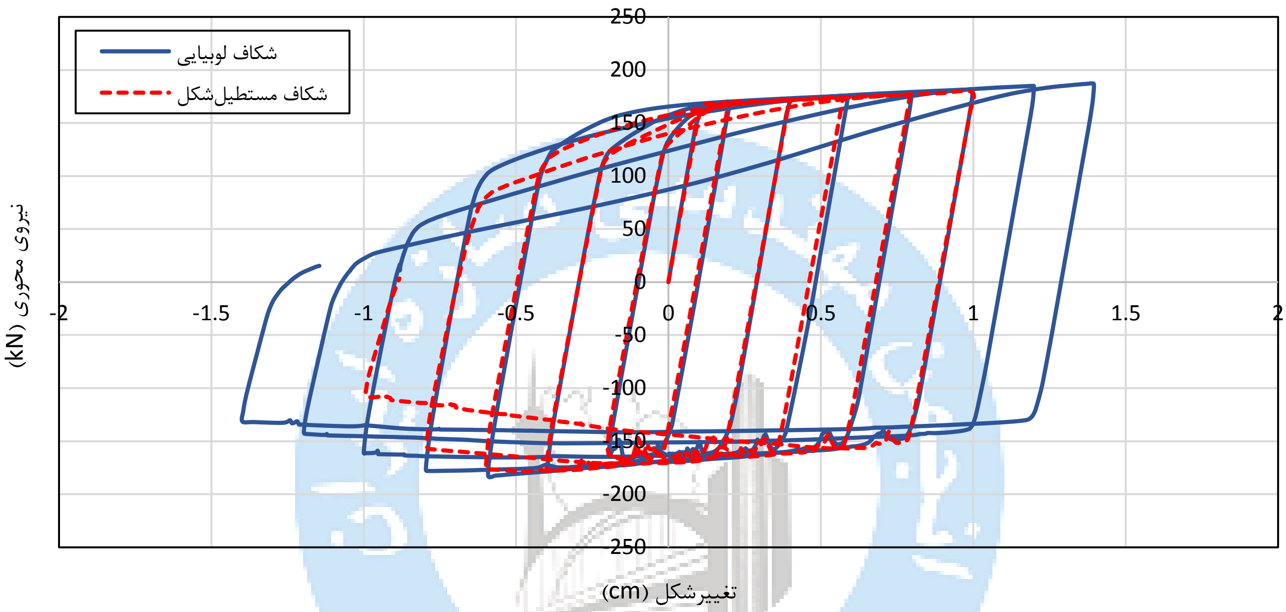
۴-۱- نمودارهای چرخه‌ای

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 ۱۶ تا ۱۹ نتیجه‌های به دست آمده از این تحلیل را نشان می‌دهند.



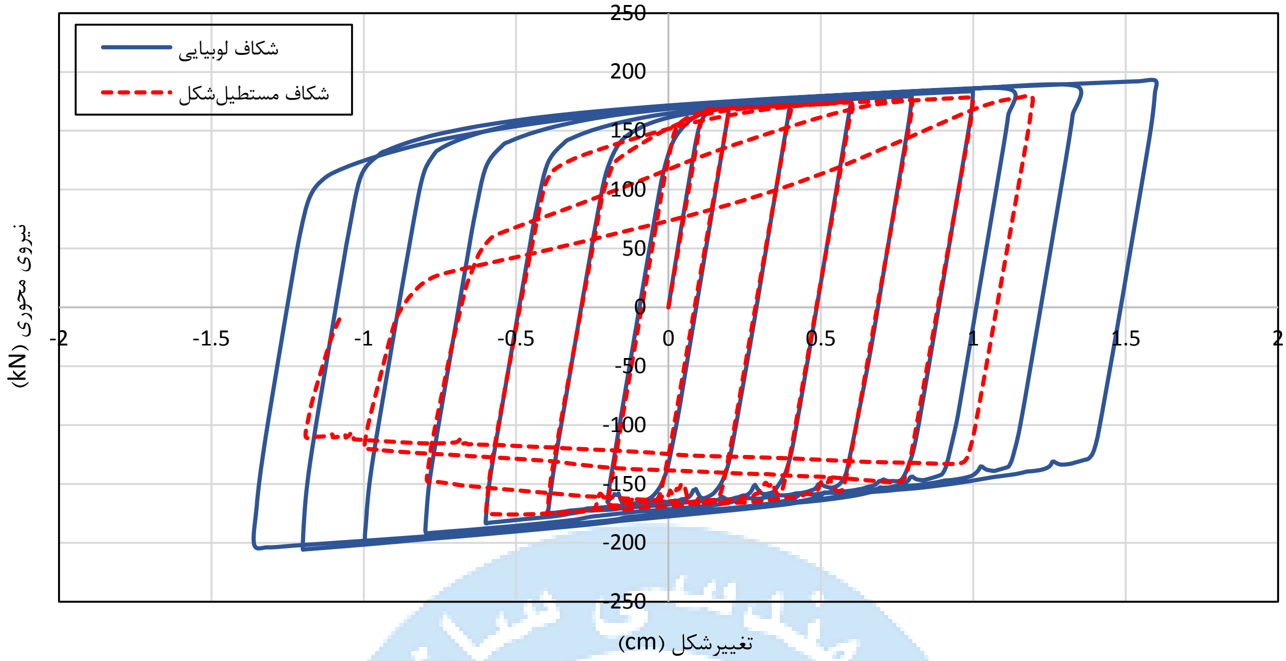
شکل ۱۶ : نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار دوتایی

شکل ۱۶ نشان می‌دهد که نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار دوتایی لوبیایی‌شکل 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 لوبیایی‌شکل در مقایسه با گونه‌ی مستطیلی سطح بیشتری دارد که این امر نشان‌دهنده‌ی میزان جذب انرژی بیشتر هسته‌ی لوبیایی‌شکل است. بررسی بیشتر این نمودار نشان می‌دهد که در چرخه‌های فشاری، مقدار نیروی تحمل‌شده در مهاربند مستطیل‌شکل نسبت به مهاربند لوبیایی کم‌تر است. علت این کاهش مقاومت در مهاربند مستطیل‌شکل را می‌توان در کمانش موضعی زودهنگام ایجاد شده در هسته‌ی مستطیل‌شکل دانست. در ادامه نمودار چرخه‌ای مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی و چهارتایی مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند. شکل ۱۷ نمودارهای مربوط به مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی را نشان می‌دهد.



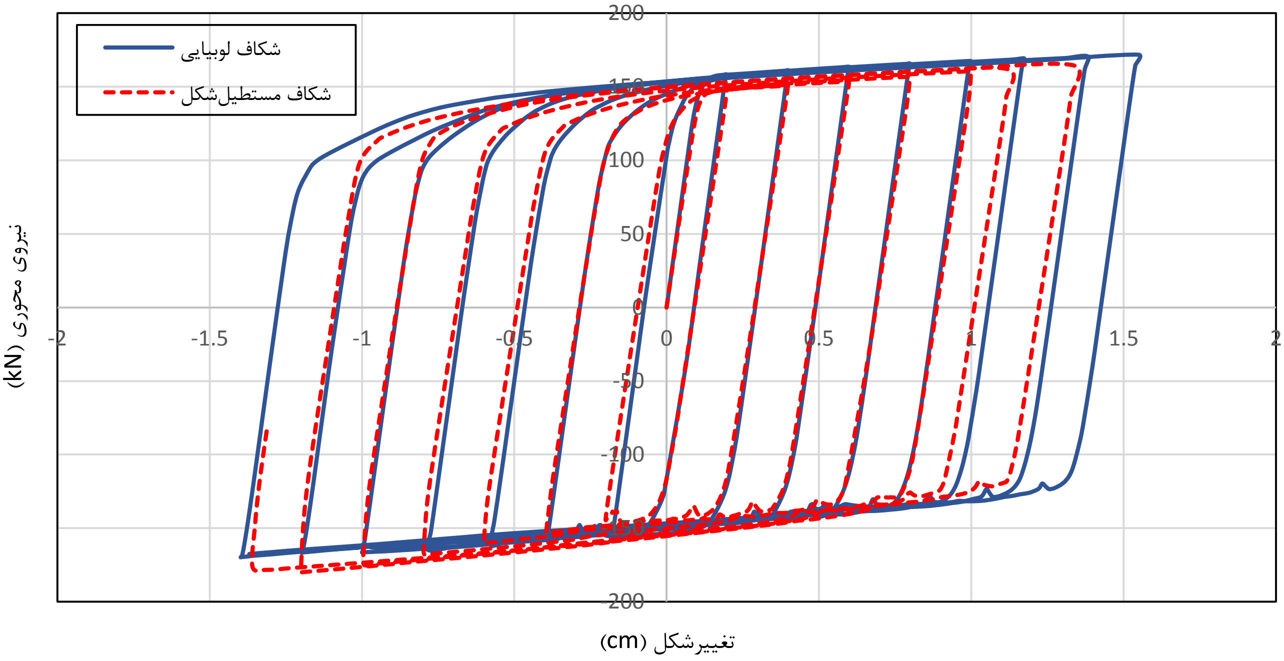
شکل ۱۷ : نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار سه‌تایی

همان‌طور که در شکل ۱۷ 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 کمانش موضعی زودهنگام در هسته‌ی مستطیل‌شکل، اگرچه در قسمت کششی مشابه یکدیگر رفتار می‌کنند، چرخه‌های پاسخ این مهاربند در مقایسه با مهاربند با هسته‌ی لوبیایی دچار کاهش شدیدتری شده‌اند و دو مهاربند در بخش فشاری رفتار مشابهی ندارند. علاوه بر این، شکل بالا نشان می‌دهد که تغییرشکل نهایی مهاربند شکاف‌دار مستطیل‌شکل سه‌تایی زودتر از مهاربند متناظر به حد نهایی خود رسیده است و تعداد چرخه‌های پاسخ در مهاربند شکاف‌دار سه‌تایی لوبیایی‌شکل بیشتر است. از این رو، میزان جذب انرژی، مقاومت در برابر بارهای فشاری و هم‌چنین شکل‌پذیری در مهاربند شکاف‌دار سه‌تایی لوبیایی‌شکل نسبت به مهاربند شکاف‌دار سه‌تایی مستطیل‌شکل بیشتر می‌باشد. نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار چهارتایی در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۸ : نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار چهارتایی

شکل ۱۸ 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 لوبیایی‌شکل در مقایسه با هسته با حفره‌های مستطیل‌شکل دارای تعداد چرخه‌های پاسخ بیشتر، مقدار مقاومت بالاتر در برابر بارهای فشاری، میزان شکل‌پذیری و جذب انرژی فراوان‌تری می‌باشد. نتیجه‌ی پاسخ چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار پنج‌تایی نیز در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.



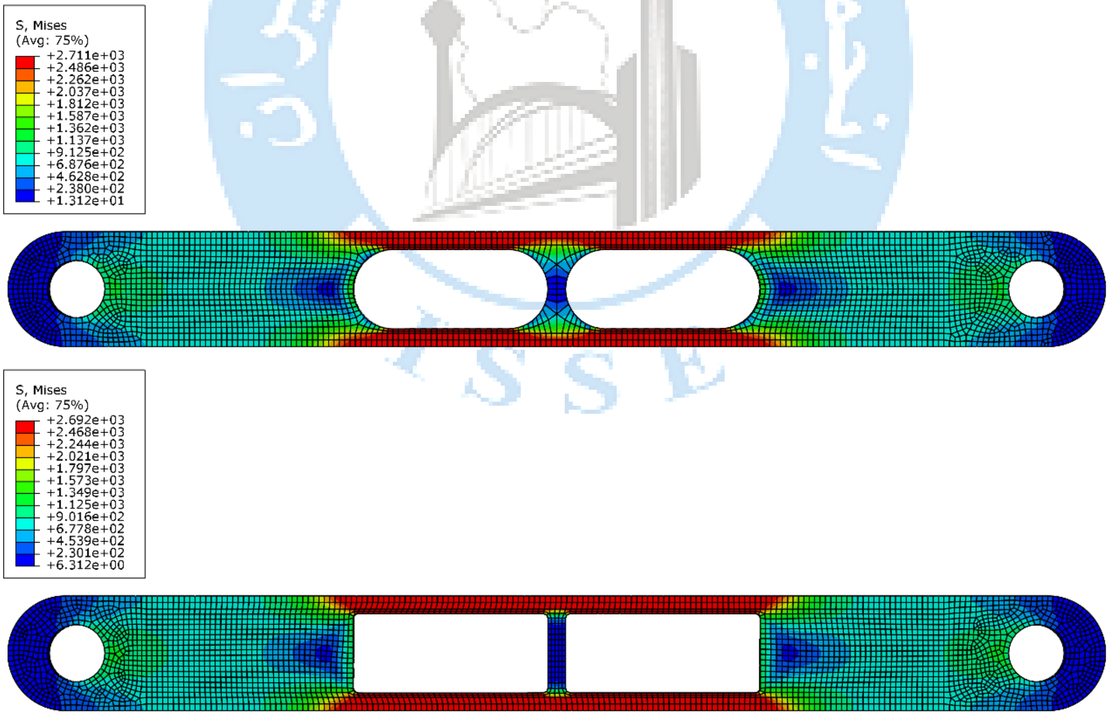
شکل ۱۹ : نمودار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار چهارتایی

بررسی رفتار چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با هسته‌ی سوراخ‌دار پنج‌تایی، مطابق شکل ۱۹ نشان می‌دهد که شکاف‌های لوبیایی و مستطیل‌شکل تفاوت چندانی باهم ندارند. تعداد چرخه‌های و میزان نیروی جذب‌شده در مهاربندهای مستطیل‌شکل 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 لوبیایی‌شکل نشان می‌دهد که نیروی جاری‌شدن 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 لوبیایی‌شکل در هسته نسبت به مهاربندهای شکاف‌دار متناظر خود با حفره‌های مستطیل‌شکل، این گونه از مهاربندها می‌توانند برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بارهای جانبی پیشنهاد شوند. از بین مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی‌شکل، با توجه به رفتار آن‌ها در برابر بارهای رفت و برگشت، مهاربندها با هسته‌ی چهار حفره‌ای به علت ایجاد کمانش دیرهنگام عملکرد مناسب‌تری دارند و نسبت به دیگر مهاربندها با هسته‌ی شکاف‌دار لوبیایی برای تحمل بارهای جانبی وارد بر سازه پیشنهاد می‌شوند.

۴-۲- توزیع تنش

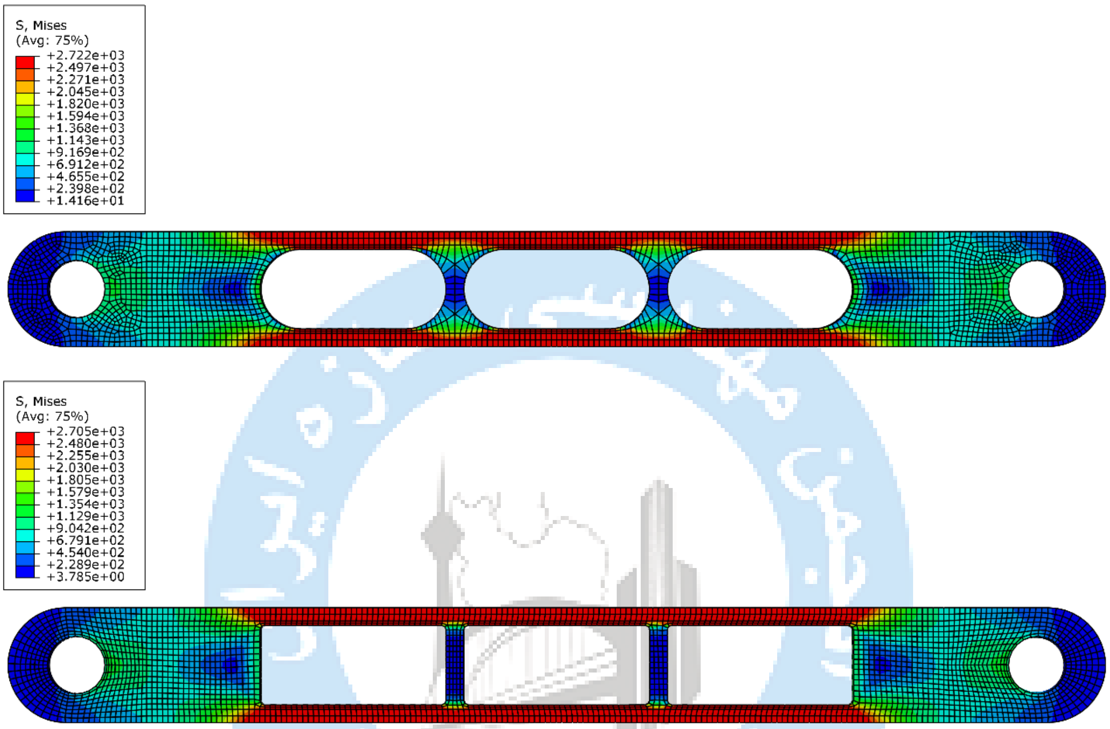
پس از بررسی رفتار و پاسخ چرخه‌ای مهاربندهای شکاف‌دار در بخش پیشین، در این بخش، چگونگی توزیع تنش در هسته‌ی این گونه از مهاربندها در دو حالت حفره‌های لوبیایی و مستطیل‌شکل و در سه دسته‌ی دوتایی، سه‌تایی و چهارتایی مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهند گرفت. شکل‌های ۲۰ تا ۲۳، چگونگی توزیع تنش‌های ون- مایسز[1] در هسته‌ی مهاربندها در چرخه‌ی نهایی بارگذاری را نشان می‌دهند.



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

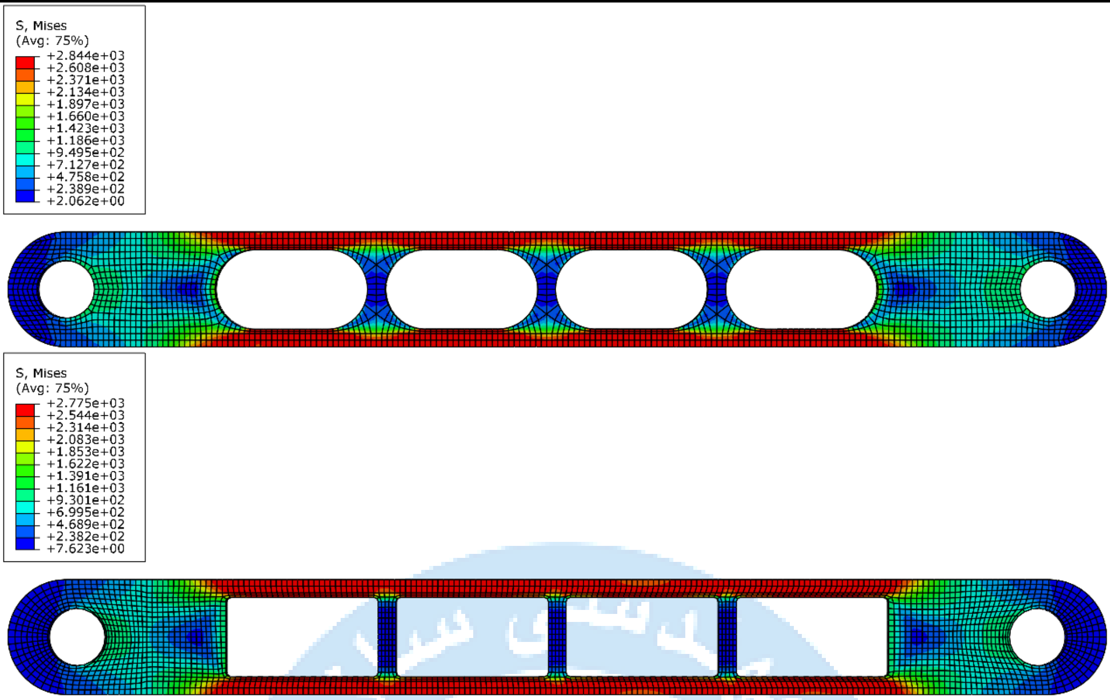
[1] Von Misses

مطابق شکل ۲۰، مقدار تنش بیشینه‌ی ون- مایسز در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی و مستطیل‌شکل به ترتیب برابر $۲۷۱۱kg/cm^2$ و $۲۶۹۲kg/cm^2$ 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 لوبیایی‌شکل نسبت به مهاربند متناظر خود نشان‌دهنده‌ی مقاومت بیشتر آن در برابر بارهای محوری وارد شده بر آن می‌باشد. شکل ۲۱، توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی را نشان می‌دهد.



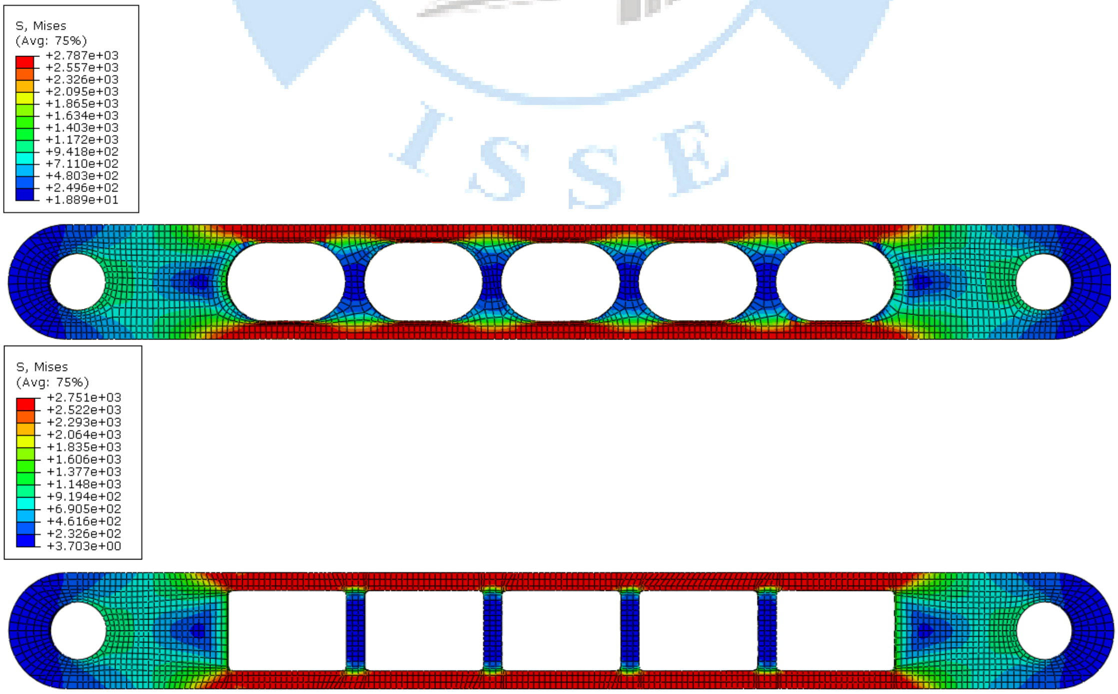
شکل ۲۱ : توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی سه‌تایی

مشابه توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی، مطابق شکل ۲۱، 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 $۲۷۲۲kg/cm^2$ و $۲۷۰۵kg/cm^2$ می‌باشد که از حد جاری شدن مصالح عبور کرده و وارد مرحله‌ی پلاستیک شده‌اند. مطابق انتظار، مقدار تنش بحرانی در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی‌شکل بیشتر از مهاربند متناظر مستطیل‌شکل خود است. این امر، توانایی بیشتر مهاربند با هسته‌ی شکاف‌دار لوبیایی‌شکل در تحمل بارهای محوری واردشده بر آن در طی چرخه‌های بارگذاری را نشان می‌دهد. مشابه مهاربندهای کمانش‌ناپذیر 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 در مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی مقدار بیشتری دارند که علت آن را می‌توان کوتاه‌تر شدن طول کمانشی در نوارهای کناری هسته‌ی مهاربندها و در نتیجه بیشتر بودن آستانه‌ی کمانشی هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار سه‌تایی نسبت به هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی دانست. شکل ۲۲، توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار چهارتایی را نشان داده است.



شکل ۲۲ : توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی چهارتایی

مطابق شکل ۲۲، توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار چهارتایی نیز رفتار مشابهی با مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی و سه‌تایی دارد. تنش‌های بحرانی در نوارهای کناری هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار چهارتایی لوبیایی و مستطیل‌شکل به ترتیب برابر ۲۸۴۴kg/cm^2 و ۲۷۷۵kg/cm^2 است. این تنش‌ها وارد محدوده‌ی پلاستیک شده‌اند و مقدار آن‌ها نسبت به تنش‌های بحرانی در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی و سه‌تایی بیشتر می‌باشد و از این رو، دارای مقاومت و آستانه‌ی کمانش بالاتری نسبت به آن‌ها هستند. توزیع تنش در مهاربندهای شکاف‌دار پنج‌تایی نیز در شکل ۲۳ نمایش داده شده است.

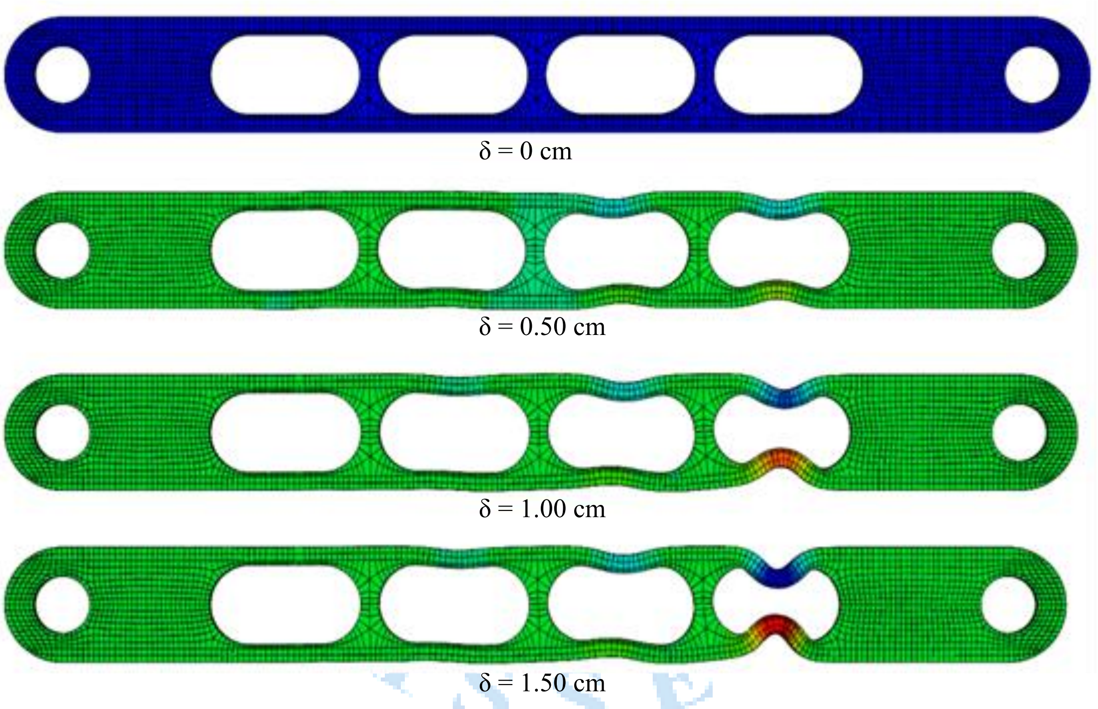


شکل ۲۳ : توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی پنج‌تایی

مطابق با شکل ۲۳، ارزیابی توزیع تنش در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار پنج‌تایی نشان می‌دهد که تنش‌های بحرانی در نوارهای کناری هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار چهارتایی لوبیایی و مستطیل‌شکل به ترتیب برابر ۲۷۸۷kg/cm^2 و ۲۷۵۱kg/cm^2 است. مقدار این تنش‌ها در مقایسه با تنش‌های بحرانی در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار دوتایی و سه‌تایی بیشتر و در مقایسه با هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار چهارتایی کم‌تر می‌باشد.

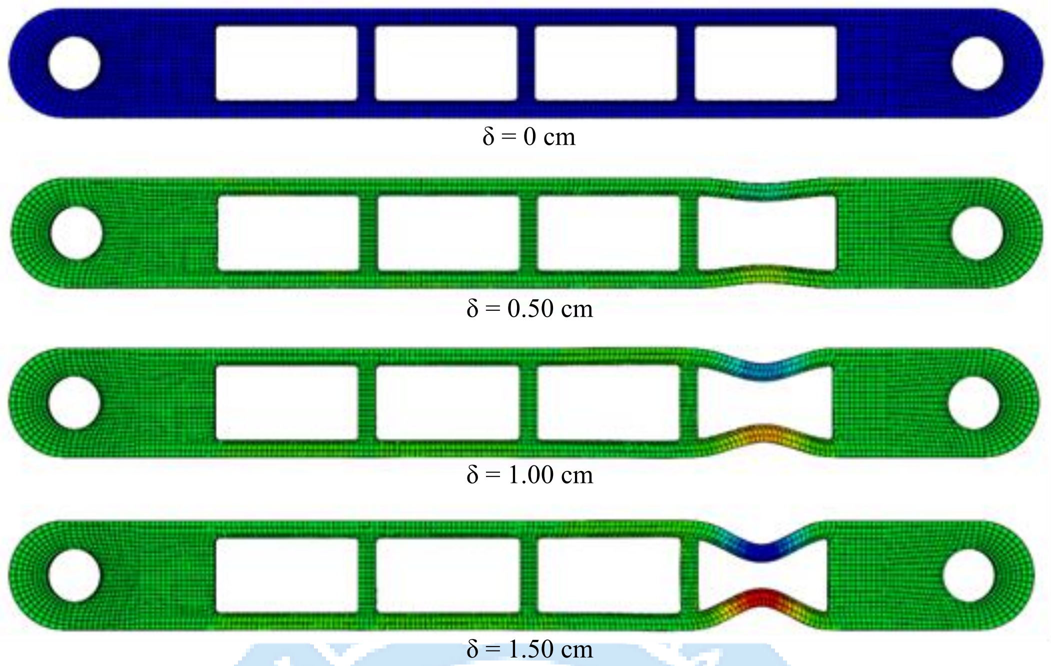
۴-۳- سیر تکاملی تغییرشکل‌ها

به منظور بررسی بیشتر رفتار مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار، در این پژوهش، سیر تکاملی تغییرشکل آن‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ به عنوان نمونه، سیر تکاملی هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار چهارتایی در تغییرشکل‌های محوری مختلف (δ_i) را نشان داده شده است.



شکل ۲۴ : سیر تکاملی تغییرشکل در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی چهارتایی در تغییر شکل‌های محوری مختلف (δ_i)

همان‌طور که در شکل ۲۴ دیده می‌شود، در چرخه‌های نخست، توزیع تغییرشکل به‌طور تقریبی یکنواخت است. پس از اعمال چندین چرخه‌ی بارگذاری، بخش‌های بیرونی تغییرشکل‌های کم‌تری نسبت به بخش‌های درونی دارند. استفاده از الگوی عددی بدون در نظر گرفتن اثر اصطحکاک در نمونه‌ها، چنین تفاوتی در توزیع تغییرشکل‌ها را نشان نمی‌دهد. از این رو، توزیع غیر یکنواخت تغییرشکل‌ها به علت اصطحکاک بین هسته و واحد نگهدارنده به‌وجود می‌آید. این توزیع غیر یکنواخت، با نوع شکست نمونه‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی دارد. در نمونه‌های آزمایشگاهی، کمانش 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 کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار، در نظر گرفتن اصطحکاک در آن‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. به منظور بررسی بیشتر رفتار مهاربندهای شکاف‌دار، چگونگی سیر تکاملی تغییرشکل هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار مستطیل‌شکل چهارتایی در شکل ۲۵ نشان داده شده است.

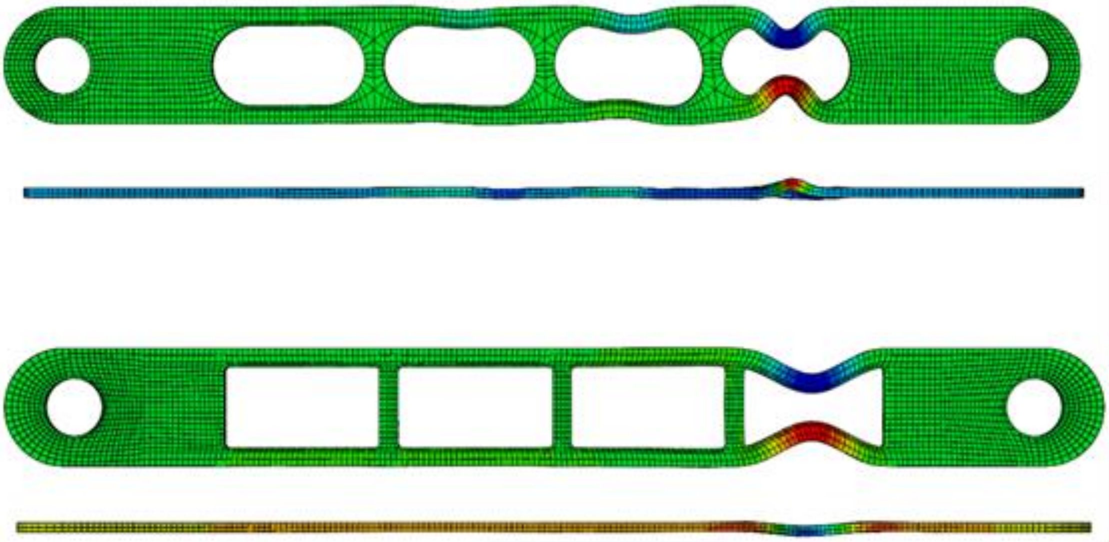


شکل ۲۵ : سیر تکاملی تغییرشکل در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار مستطیلی چهارتایی در تغییر شکل‌های محوری مختلف (δ_i)

شکل ۲۵ نشان می‌دهد که اگرچه رفتار کلی سیر تکاملی تغییرشکل هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی و مستطیل‌شکل چهارتایی مشابه هستند، تفاوت‌های ظریفی بین آن‌ها وجود دارد. در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی‌شکل، فقط حفره‌ی نخست دچار کمانش نشده و حفره‌ی مجاور نیز در تغییرشکل‌های ایجاد شده در هسته نقش دارد. این امر باعث می‌شود کمانش دیرتر رخ دهد و آستانه‌ی مقاومت کمانشی مهاربند بیشتر می‌شود. در حالی‌که در مهاربند کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار مستطیل‌شکل، کمانش فقط در یکی از حفره‌های کناری رخ می‌دهد و در نتیجه کمانش زودهنگام در آن رخ می‌دهد.

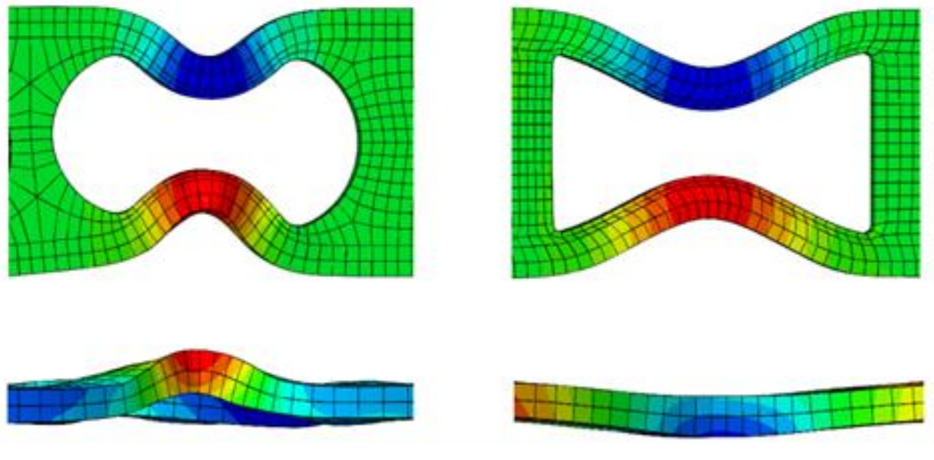
۴-۴- وضعیت هسته پس از کمانش

همان‌طور که در بخش صحت‌سنجی به آن اشاره شد، در هسته‌ی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار به علت فاصله‌ی اندکی که بین هسته و بخش نگهدارنده وجود دارد، علاوه بر تغییرشکل‌های دورن صفحه‌ای، δ_{IP}، شاهد ایجاد تغییرشکل‌های بیرون از صفحه‌ی هسته‌ی مهاربند، δ_C، نیز خواهیم بود. در این بخش مقدار و چگونگی رفتار این گونه از تغییرشکل‌های هسته در الگوی عددی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به عنوان نمونه، شکل ۲۶ مقدار و چگونگی ایجاد تغییرشکل‌های بیرون صفحه در هسته‌ی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار چهارتایی را نشان داده است.



شکل ۲۶ : تغییرشکل بیرون صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی چهارتایی

همان‌طور که در شکل ۲۶ دیده می‌شود، بر طبق انتظار، تغییرشکل‌های بیرون صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندها نیز در حفره‌ی بحرانی بیشینه هستند. بر خلاف تغییرشکل‌های دورن صفحه‌ای، نمی‌توان فرآیند و تفاوت رفتاری ویژه‌ای بین چگونگی ایجاد تغییرشکل‌های بیرون صفحه‌ای بین هسته‌ی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار لوبیایی و مستطیل‌شکل یافت. شکل ۲۷، نمای دقیق‌تری از چگونگی ایجاد تغییرشکل‌های بیرون صفحه‌ای در حفره‌ی بحرانی مهاربندها را نشان می‌دهد.



شکل ۲۷ : تغییرشکل بیرون صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی و مستطیلی چهارتایی در حفره‌ی بحرانی

همان‌طور که در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود، تغییرشکل‌های بیرون صفحه‌ای در هسته‌ی مهاربندهای کمانش ناپذیر به‌صورت اتفاقی می‌تواند به سمت هرکدام از صفحه‌های کناری خود در بخش نگهداره‌ی هسته تمایل پیدا کند و چگونگی تغییر آن قابل پیش‌بینی نیست.

۴-۵- انتخاب مهاربند بهینه

در بخش‌های پیشین، رفتار مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار در قالب چندین الگوی عددی در دو حالت لوبیایی و مستطیل‌شکل و با دو، سه و چهار حفره 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 تغییرشکل‌های دورن صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندها از لحظه‌ی شروع چرخه‌های بارگذاری تا لحظه‌ی کمانش و هم‌چنین تغییرشکل‌های بیرون صفحه‌ای هسته‌ی مهاربندها در حالت پس از کمانش، انجام شد. در حالت کلی، نتیجه‌ی مقایسه و ارزیابی این عامل‌ها نشان دادند که در همه‌ی حالت‌ها، رفتار هسته‌های لوبیایی‌شکل نسبت و هسته‌های مستطیل‌شکل برتری دارند و مناسب‌تر می‌باشند. از طرف دیگر، بین حالت‌های مختلف مهاربندهای کمانش-ناپذیر شکاف‌دار لوبیایی‌شکل، 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 کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار لوبیایی‌شکل چهارتایی برای مقاوم‌سازی و تحمل بارهای جانبی در سازه‌ها پیشنهاد می‌شوند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، گونه‌ای نوین از مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با هسته‌ی سوراخ‌دار به عنوان جایگزینی مناسب برای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سنتی پیشنهاد شد و رفتار آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از صحت‌سنجی الگوی عددی ساخته‌شده از این مهاربند با نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های پیشین، به‌منظور دست‌یابی به طرحی بهینه برای تعداد (دو، سه، چهار و پنج) و نوع سوراخ‌های هسته (لوبیایی‌شکل و مستطیل‌شکل) در این مهاربند، الگوهای عددی ساخته‌شده تحت بارگذاری رفت و برگشت قرار گرفت. نتیجه‌های این تحلیل بر اساس عامل‌هایی شامل نمودارهای چرخه‌ای رفتار مهاربندها، توزیع تنش و چگونگی تغییر در آن‌ها و هم‌چنین وضعیت هسته پس از وقوع کمانش بررسی شد. ارزیابی و مقایسه‌ی نمودارهای چرخه‌ای پاسخ مهاربندهای شکاف‌دار نشان دادند که هسته‌ی مهاربند با حفره‌های لوبیایی‌شکل در مقایسه با هسته با حفره‌های مستطیل‌شکل دارای تعداد چرخه‌های پاسخ بیشتر، مقدار مقاومت بالاتر در برابر بارهای فشاری، میزان شکل‌پذیری و جذب انرژی فراوان‌تری می‌باشد. از بین مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی‌شکل، با توجه به رفتار آن‌ها در برابر بارهای رفت و برگشت، مهاربندها با هسته‌ی چهار حفره‌ای به علت ایجاد کمانش دیرهنگام عملکرد مناسب‌تری دارند و نسبت به دیگر مهاربندها با هسته‌ی شکاف‌دار لوبیایی برای تحمل بارهای جانبی وارد بر سازه پیشنهاد می‌شوند. بررسی توزیع تنش در مهاربندها نشان داد که تنش‌های بحرانی فقط در نوارهای کناری هسته‌ی مهاربند رخ داده‌اند و مقدار تنش در دیگر بخش‌های هسته در حالت کشسان قرار دارند. از طرف دیگر تنش و در نتیجه مقاومت تحمل بار در هسته‌ی مهاربند شکاف‌دار لوبیایی‌شکل نسبت به مهاربند با شکاف‌های مستطیل‌شکل بیشتر است. ارزیابی سیر تکاملی تغییرشکل‌ها نشان داد که بر خلاف هسته‌ی مهاربندها با شکاف‌های مستطیل‌شکل، در هسته‌ی مهاربندهای شکاف‌دار لوبیایی‌شکل، علاوه بر حفره‌ی نخست، حفره‌ی مجاور نیز در تغییرشکل‌ها نقش دارد و بازتوزیع مناسب‌تری از تغییرشکل‌ها در آن‌ها رخ داده است. تفاوت رفتاری ویژه‌ای بین چگونگی ایجاد تغییرشکل‌های بیرون صفحه‌ای بین هسته‌ی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر شکاف‌دار لوبیایی و مستطیل‌شکل یافت نشد. در حالت کلی، نتیجه‌های به‌دست آمده در این مقاله نشان دادند که از بین مهاربندهای مختلف ارزیابی‌شده، مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سوراخ‌دار چهارتایی با حفره‌های لوبیایی‌شکل 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 StructDynam;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, Christopulos 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.