

# مطالعه‌ی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای کمانش ناپذیر سه هسته‌ای

علی چیگویی<sup>۱</sup>، محمد علی رهگذر<sup>۲\*</sup>، محسن ایزدی‌نیا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری عمران، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل دانشگاه اصفهان

۳- استادیار دانشکده عمران، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

\*rahgozar@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۲

## چکیده

مهاربندها به عنوان نوعی سیستم کنترل غیرفعال، نقش موثری در ایجاد مقاومت سازه در برابر نیروهای جانبی مانند زلزله و باد دارند. یکی از روش‌های بهره‌گیری بیشتر و اقتصادی‌تر از قابلیت مهاربندها استفاده از ظرفیت غیر ارتجاعی آن‌ها است. مهاربندهای معمولی تحت کشش دارای عملکرد خوبی هستند، ولی تحت فشار دچار کمانش شده و رفتار نامطلوب از خود نشان می‌دهند. این مشکل می‌تواند باعث کاهش ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری شود، که نقش مهمی در بارگذاری چرخه‌ای مانند زلزله به دلیل ماهیت بارهای لرزه‌ای دینامیکی دارد. به همین دلیل مهاربندهای کمانش ناپذیر در کشورهای مختلف به شکل قابل توجهی محبوب شده‌اند. مهاربندهای کمانش ناپذیر شامل هسته و غلاف فولادی هستند. اگر چه هسته فولادی دارای ظرفیت فشاری ناچیز است، ولی ظرفیت آن را می‌توان با استفاده از یک غلاف فولادی یا غلاف محدود کننده کمانش افزایش داد. به همین منظور در این مقاله برای بهبود رفتار لرزه‌ای مهاربندهای کمانش ناپذیر تک هسته‌ای، مهاربندهای کمانش ناپذیر سه هسته‌ای پیشنهاد شد که در آن از سه هسته با تنش تسلیم متفاوت به صورت موازی استفاده شده است. مهاربندهای کمانش ناپذیر به دو صورت تک هسته‌ای و سه هسته‌ای با ظرفیت کششی و فشاری یکسان ساخته شد و تحت پروتکل بارگذاری ATC-24 به صورت یک عضو محوری در آزمایشگاه تحت نیروی کشش و فشار قرار گرفتند. نمودار چرخه هیستریزس هر کدام از مهاربندها به دست آمد و بررسی و مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد حلقه هیستریزس مهاربند سه هسته‌ای نسبت به مهاربند تک هسته‌ای ۱۶۳٪ چاق‌تر و مساحت بیشتری دارد. این مطلب نمایانگر این است که مهاربند سه هسته‌ای از ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بالاتر و عملکرد لرزه‌ای بهتری برخوردار است. همچنین میرایی در مهاربند سه هسته‌ای از دریافت ۰/۲۵٪ تا ۱٪ با اختلاف ۱۵/۶٪، از دریافت ۱٪ تا ۱/۵٪ با اختلاف ۱۰/۱٪ و در دریافت ۲/۵٪ با اختلاف ۸/۸٪ نسبت به مهاربند تک هسته‌ای بیشتر است.

**واژگان کلیدی:** کمانش، مهاربند تک هسته‌ای، مهاربند سه هسته‌ای، چرخه هیستریزس

## ۱- مقدمه

ناحیه: (۱) ناحیه الاستیک خارج از غلاف (محصور نشده)، (۲)

ناحیه الاستیک محصور شده و (۳) ناحیه پلاستیکی محصور

شده هستند. ناحیه الاستیک محصور نشده، برای ایجاد ارتباط

مهاربندهای کمانش ناپذیر (BRBs<sup>۱</sup>) به طور کلی دارای سه

1 buckling-restrained-brace

بین BRB و ورق اتصال مهاربند به قاب (گاست پلیت) طراحی شده است. زمانی که منطقه پلاستیکی تحت فشار و کشش تسلیم می‌شود، این ناحیه قادر به مقاومت در برابر نیروهای محوری بدون کمانش است. ناحیه الاستیک محصور شده، یک قسمت انتقالی از هسته فولادی محسوب می‌شود که بین رفتار الاستیک و پلاستیک قرار دارد. اگر چه این ناحیه تحت رفتار کشش و فشار دارای رفتار الاستیک است ولی غلاف فولادی از کمانش آن جلوگیری می‌کند. ناحیه پلاستیکی محصور شده نیروهای کششی و فشاری را به صورت الاستیک و پلاستیک تحمل می‌کند. هسته فولادی قرار گرفته شده داخل غلاف فولادی باید آزادانه حرکت کند. به همین منظور می‌توان با قرار دادن فاصله یا با استفاده از مواد جداساز مانند لاستیک، گریس، فوم و غیره بین هسته و غلاف این امر را انجام داد. شکاف هوا یا مواد جداساز از اصطکاک بین هسته و غلاف جلوگیری می‌کند و بنابراین ظرفیت باربری محوری اضافی در هنگامی که مهاربند تحت فشار قرار دارد رخ نمی‌دهد. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیار زیادی روی مهاربندهای کمانش ناپذیر تک هسته‌ای انجام شده است [1-27]. برای نمونه کلارک و همکاران [1] و بلک و همکاران [2] مهاربندهای کمانش ناپذیر تک هسته‌ای با مقاطع فولادی مستطیلی و صلیبی شکل را آزمایش کردند. چن و همکاران [3] BRBs با فولاد تنش تسلیم پایین و هسته فولادی شکل‌پذیر را مورد آزمایش قرار دادند. هیگینز و نیوال [4] به جای استفاده از یک لوله فولادی پر شده با ملات، یک لوله فولادی پر شده از یک ماده غیر چسبنده به منظور محدود کردن تسلیم مهاربندها استفاده کردند. تایوشی و همکاران [5] یک استراتژی برای جلوگیری از کمانش موضعی در صفحه BRB تک هسته‌ای پیشنهاد کردند. واتانبا و همکاران [6] به منظور بررسی کمانش کلی مهاربندهای کمانش ناپذیر تک هسته‌ای به آزمایش مهاربندهای با لوله‌های مربع و مستطیل پر شده با ملات پرداختند. و معادله (۱) را برای جلوگیری از کمانش کلی مهاربندهای کمانش ناپذیر (BRBs) پیشنهاد دادند.

$$P_e/P_y > 1 \quad (1)$$

$P_y$  مقاومت تسلیم در هسته فولادی و  $P_e$  مقاومت کمانش

الاستیک غلاف فولادی است. این چن و همکاران [7] به منظور بررسی پدیده کمانش در مودهای بالاتر، روی ۶ مهاربند کمانش ناپذیر تک هسته‌ای تمام فولادی آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل اجزای محدود در الگوهای مختلف بارگذاری انجام دادند. در پژوهش‌های مشابه لازلو دونای و همکاران [8] دو نمونه مهاربند کمانش ناپذیر را آزمایش کردند. مینگ مینگ و همکاران [9] روی نمونه‌هایی با مقیاس یک‌سوم اندازه واقعی به صورت قاب ۲ طبقه یک دهانه، مجهز به مهاربندهای کمانش ناپذیر با استفاده از آزمایش‌های شبه استاتیکی پژوهشی انجام دادند. همچنین با توجه به آزمایش مهاربندهای کمانش ناپذیر واقع شده در قاب، ترمبلی و همکاران [10] شش BRB را روی یک قاب فولادی تک دهانه آزمایش کردند. طول‌های مختلف هسته تسلیم و انواع غلاف مورد آزمایش قرار گرفتند. فانستوک و همکاران [11] با استفاده از یک روش تست شبه دینامیکی دوگانه، یک قاب مجهز به مهاربند کمانش ناپذیر با مقیاس بزرگ را آزمایش کردند. اخیراً دلاکورت و همکاران [12] آزمایش‌های کامل شبه استاتیکی چرخه‌ای را انجام دادند، ساختمان با قاب خمشی بتن مسلح مجهز به BRB فولادی با قابلیت تعویض، که در آن مهاربندهای کمانش ناپذیر ساخته شده از هسته فولادی و غلاف فولادی که اجازه بازرسی پس از وقوع زلزله را می‌دهد استفاده شد. مطالعات توصیف شده در بالا نشان می‌دهد که مهاربندهای کمانش ناپذیر تک هسته‌ای یک راه حل موثر در اتلاف مقدار زیادی از انرژی لرزه‌ای هستند. بنابراین، در این مقاله ابتدا به بررسی پاسخ آزمایشگاهی مهاربندهای کمانش ناپذیر با یک هسته پرداخته شد. سپس نمودار چرخه هیستریزس مهاربند تک‌هسته‌ای مطابق با پروتکل استاندارد، میزان اتلاف انرژی و میرایی در گام‌های مختلف از منحنی فوق استخراج شد. در گام دوم با توجه به نتایج تئوریک به دست آمده از مهاربندهای سه هسته‌ای، که عملکرد بهتر این مهاربندها را نسبت به مهاربندهای تک هسته‌ای نشان می‌دهد، اقدام به ساخت مهاربند سه هسته‌ای با سه هسته با تنش تسلیم متفاوت شد. در ادامه نمودار چرخه هیستریزس، میزان ظرفیت اتلاف انرژی و میرایی هر دو مهاربند در شرایط یکسان مقایسه شد.

مطابق شکل (۱)،  $E_D$  (انرژی اتلافی میرایی) برابر است با مساحت محصور شده توسط حلقه هیستریزس و  $E_s$  ماکزیمم انرژی کرنشی که برابر مساحت مثلث هاشورخورده است. با توجه به شکل (۱)، می‌توان رابطه میرایی چرخه‌ای را به شکل ساده‌تری بازنویسی کرد رابطه ۴:

$$\xi_o = \frac{2}{\pi} \frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi} d_{pi}} \quad (4)$$

شکل ۲. رابطه دوخطی نیرو-جابجایی

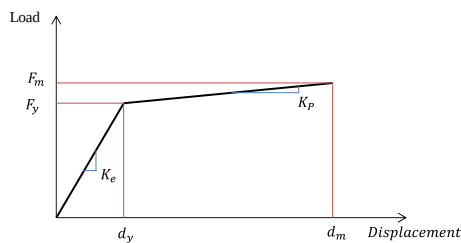


Fig. 2. Load-displacement curve

با توجه به شکل (۲) اگر  $d_m$  جابه‌جایی نهایی،  $F_m$  مقاومت نهایی متناظر آن،  $d_y$  جابه‌جایی تسلیم و  $F_y$  مقاومت تسلیم عضو BRB باشد، برای عضو BRB با رابطه دوخطی مطابق شکل (۲)، رابطه میرایی را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\xi_o = \frac{(F_y d_m - F_m d_y)}{\pi F_m d_m} \quad (5)$$

که در آن

$$F_m = k_p(d_m - d_y) + F_y \quad (6)$$

$$F_y = k_e \times d_y \quad (7)$$

رابطه میرایی بر حسب سختی الاستیک و پلاستیک و تغییر مکان‌ها به صورت زیر است:

$$\xi_o = \frac{(-1+\mu)(k_e - k_p)}{\pi\mu(k_e + \beta(-1+\mu)k_p)} \quad (8)$$

و اگر  $\mu = \frac{d_m}{d_y}$  و  $\beta = \frac{k_p}{k_e}$  باشد، رابطه ۸ به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\xi_o = \frac{2(1+\beta)\mu-1}{\pi(1+\beta(\mu-1))\mu} \quad (9)$$

رابطه ۹ میرایی چرخه‌ای را بر حسب ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) و نسبت سختی ( $\beta$ ) بیان می‌کند.

### ۲-۳- سختی معادل و میرایی چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر چند هسته‌ای در حالت موازی

شکل (۳) BRB پیشنهادی با سه هسته تسلیمی که به صورت موازی بسته شده‌اند را نمایش می‌دهد. شکل (۴)

## ۲- مطالعه پارامتریک مهاربندهای کمانش‌ناپذیر و پارامترهای عملکرد لرزه‌ای

### ۱-۳- تاثیر میرایی و سختی در BRBهای تک هسته‌ای

در ادامه تاثیر پارامترهای مختلف بر سختی و میرایی معادل BRBهای ترکیبی را بررسی کرده و روابطی بسته برای سختی و میرایی معادل این BRBهای ترکیبی ارائه می‌شود.

#### ۱-۱-۳- تعریف میرایی

در شکل (۱) چگونگی محاسبه میرایی ویسکوز معادل یک عضو BRB تک هسته‌ای مطابق ATC 40 در یک قاب نشان داده شده است. مطابق رابطه ۲ میرایی سازه شامل میرایی ذاتی (مثلاً ۲٪ برای سازه‌های فولادی) و میرایی چرخه‌ای است که مجموع این دو میرایی را ویسکوز معادل ( $\xi_{eq}$ ) می‌نامند. میرایی ویسکوز معادل بستگی به نقطه ماکزیمم جابه‌جایی ( $d_{pi}$ ) دارد [28].

$$\xi_{eq} = \xi_o + 0.02 \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $\xi_o$  میرایی چرخه‌ای است و از رابطه ۳ قابل محاسبه است [28]:

$$\xi_o = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_s} \quad (3)$$

شکل ۱. چگونگی محاسبه میرایی ویسکوز معادل [۲۹]

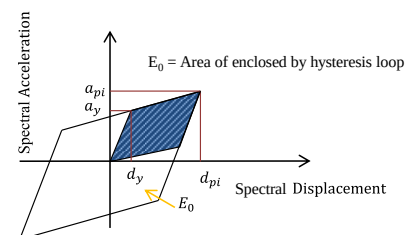
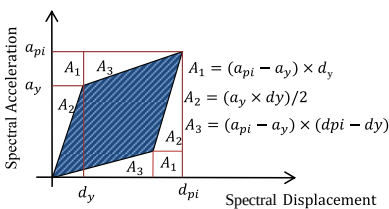
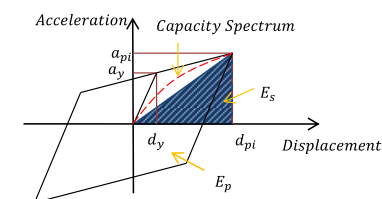


Fig. 1. Calculating equivalent viscous damping [29]

**Fig. 4.** load-displacement relationship of BRBs in parallel لازم به ذکر است که  $k_{ei}$  سختی الاستیک و  $k_{pi}$  سختی پس از حد تسلیم  $i^{th}$  هسته تسلیمی است. هر یک از هسته‌های فلزی که با هم به طور موازی بسته شده‌اند خود مشتمل بر سه قسمت غیرتسلیمی، انتقالی و هسته تسلیمی هستند که به طور موازی نسبت به هم قرار گرفته‌اند.

سختی الاستیک معادل  $i$  مین هسته برابر است با:

$$k_{ei} = \frac{E_i A_i \alpha'_i (\alpha'_i - 1)}{L \alpha'_i (\alpha'_i - 1) - n l'_i ((\alpha'_i - 1)^2 + \alpha'_i m'_i (\alpha'_i - 1 - \ln(\alpha'_i)))} \quad (14)$$

سختی معادل پس از تسلیم  $i$  مین هسته برابر است با:

$$k_{pi} = \frac{E_{ti} A_i \alpha'_i (\alpha'_i - 1)}{\alpha'_i (\alpha'_i - 1) L - n l'_i (\alpha'_i (\alpha'_i - 1) (1 + m'_i) - \frac{E_{ti}}{E_i} (\alpha'_i - 1 + \alpha'_i m'_i \ln(\alpha'_i)))} \quad (15)$$

سختی معادل هر یک از هسته‌های یک عضو BRB سه هسته‌ای موازی در حالت الاستیک از سه رابطه ۱۶-۱۸ محاسبه می‌شود.

$$k_{e1} = \frac{E_1 A_1 \alpha'_1 (\alpha'_1 - 1)}{L \alpha'_1 (\alpha'_1 - 1) - n l'_1 ((\alpha'_1 - 1)^2 + \alpha'_1 m'_1 (\alpha'_1 - 1 - \ln(\alpha'_1)))} \quad (16)$$

$$k_{e2} = \frac{E_2 A_2 \alpha'_2 (\alpha'_2 - 1)}{L \alpha'_2 (\alpha'_2 - 1) - n l'_2 ((\alpha'_2 - 1)^2 + \alpha'_2 m'_2 (\alpha'_2 - 1 - \ln(\alpha'_2)))} \quad (17)$$

$$k_{e3} = \frac{E_3 A_3 \alpha'_3 (\alpha'_3 - 1)}{L \alpha'_3 (\alpha'_3 - 1) - n l'_3 ((\alpha'_3 - 1)^2 + \alpha'_3 m'_3 (\alpha'_3 - 1 - \ln(\alpha'_3)))} \quad (18)$$

همچنین سختی معادل پس از تسلیم هر یک از هسته‌های یک عضو BRB سه هسته‌ای از سه رابطه ۱۹-۲۱ محاسبه می‌شود.

$$K_{p1} = \frac{E_{t1} A_1 \alpha'_1 (\alpha'_1 - 1)}{\alpha'_1 (\alpha'_1 - 1) L - n l'_1 ((\alpha'_1 - 1) (1 + m'_1) - \frac{E_{t1}}{E_1} (\alpha'_1 - 1 + \alpha'_1 m'_1 \ln(\alpha'_1)))} \quad (19)$$

$$K_{p2} = \frac{E_{t2} A_2 \alpha'_2 (\alpha'_2 - 1)}{\alpha'_2 (\alpha'_2 - 1) L - n l'_2 ((\alpha'_2 - 1) (1 + m'_2) - \frac{E_{t2}}{E_2} (\alpha'_2 - 1 + \alpha'_2 m'_2 \ln(\alpha'_2)))} \quad (20)$$

$$K_{p3} = \frac{E_{t3} A_3 \alpha'_3 (\alpha'_3 - 1)}{\alpha'_3 (\alpha'_3 - 1) L - n l'_3 ((\alpha'_3 - 1) (1 + m'_3) - \frac{E_{t3}}{E_3} (\alpha'_3 - 1 + \alpha'_3 m'_3 \ln(\alpha'_3)))} \quad (21)$$

با پیروی از روش پیشنهادی ATC-40 برای محاسبه میرایی چرخه‌ای و با استفاده از روابط سختی سیستم‌های موازی که در بالا ذکر شد ( $\dots, k_b, k_a$ ) می‌توان ضریب میرایی چرخه‌ای BRB با هسته‌های موازی را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\xi_0 = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n (k_{ej} - k_{pj}) (\mu_j - 1)}{\mu_j^2} \right\} \times \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (22)$$

رابطه ۲۲ برای BRB یک، دو و سه هسته‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود.

نمودار نیرو-جابجایی این BRB را نشان داده است. هر یک از  $n$  هسته تسلیمی می‌تواند دارای ویژگیهای مصالح و هندسی مختلفی باشد ولی در اندرکنش با دیگران عمل کند. نمودار بار تغییرمکان هر یک از هسته‌های تسلیمی دوطبقی فرض شده ولی نمودار بار تغییرمکان سیستم معادل به صورت چندخطی است. در نمونه‌های آزمایشگاهی BRBها، در خلال بارگذاری هیچ‌گونه افت مقاومت و سختی مشاهده نشده است [24]. بنابراین در ترکیب موازی، هر یک از هسته‌های تسلیمی دارای سختی پس از حد تسلیم بدون افت مقاومت و سختی، مدل شده‌اند و نمودار نیرو-جابجایی کل BRB همواره افزایشی است. این امر انگیزه اصلی فرض انجام شده در بالا است. بنابراین ضریب سختی معادل در هر یک از قسمت‌های چهارگانه شکل (۴) به صورت روابط ۱۰-۱۳ قابل محاسبه است.

شکل ۳. اجزای مهاربند کمانش‌ناپذیر با هسته‌های تسلیمی موازی

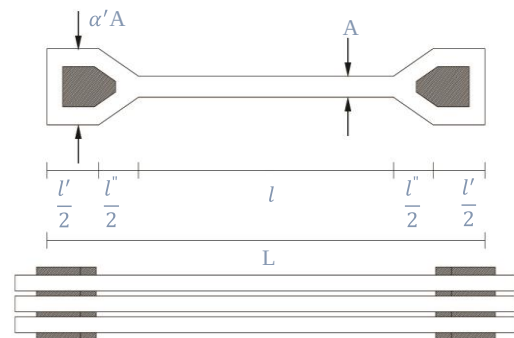


Fig. 3. Three segmented parallel BRB.

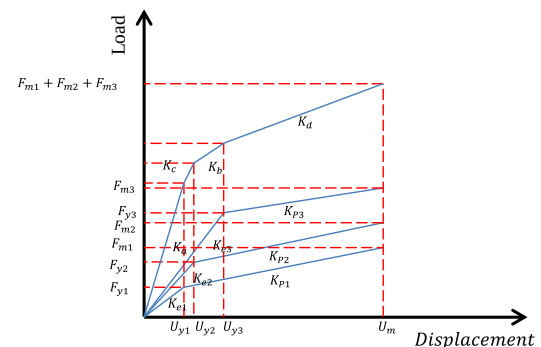
$$k_a = k_{e1} + k_{e2} + k_{e3} \quad (10)$$

$$k_b = k_{p1} + k_{p2} + k_{p3} \quad (11)$$

$$K_c = k_{p1} + k_{p2} + k_{p3} \quad (12)$$

$$k_d = k_{p1} + k_{p2} + k_{p3} \quad (13)$$

شکل ۴. نمودار فرض شده نیرو-جابجایی مهاربند کمانش‌ناپذیر با هسته‌های تسلیمی موازی



نشان داده شده است، طول هسته فولادی برای هر دو نمونه ۶۰۰ میلی‌متر است. هسته فولادی در BRB1 از ورق فولادی با تنش تسلیم متوسط (معمول) و در BRB3 از سه نوع ورق فولادی با تنش تسلیم کم، متوسط و بالا ساخته شده است. سطح مقطع در BRBها به سه ناحیه تقسیم می‌شود: (۱) در ناحیه پلاستیکی به طول ۶۰۰ میلی‌متر سطح مقطع هسته در BRB1 از یک هسته به ابعاد  $۴ \times ۳۶/۵$  میلی‌متر و در BRB3 از سه عدد هسته به ابعاد  $۳ \times ۱۵۰$  میلی‌متر تشکیل شده است. (۲) در محدوده الاستیک محدود به طول ۱۵۰ میلی‌متر (در بخش B-B در شکل (۵) عرض مقطع از ۱۵ به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند). در این محدوده از دو عدد سخت کننده در دو طرف به صورت صلیبی برای بالا بردن سختی خمشی و جلوگیری از کمانش استفاده شده است. (۳) در محدوده الاستیک بدون محدودیت به طول ۲۳۰ میلی‌متر، عرض مقطع از ۱۰۰ به ۱۴۰ میلی‌متر برای اتصال به ورق گاست پلست افزایش یافته است و همچنین از دو عدد سخت کننده به صورت صلیبی استفاده شده است. مواد جداکننده هسته از غلاف برای همه اعضای BRB گریس است. در محل اتصال مهاربند به گاست پلست، ۴ عدد سوراخ به قطر ۱۴ میلی‌متر برای پیچ M14 تعبیه شده است. همچنین پیچ‌ها طبق شرایط لرزه‌ای AISC [30] طراحی و مقاومت بحرانی لغزشی پیچ‌ها مطابق با معادله ۲۶ به دست آمده است.

$$R_n = \mu D_u h_{sc} T_b N \quad (26)$$

$R_n$  مقاومت بحرانی لغزشی یک پیچ؛  $\mu$  ضریب لغزش؛  $D_u$  نشان دهنده نسبت پیچ میانی به حداقل پیچ مشخص شده و برابر با ۱/۱۳ است؛  $h_{sc}$  ضریب مربوط به سوراخ؛  $T_b$  حداقل پیچ مشخص شده ظاهری و  $N$  تعداد صفحات لغزش است. بتن درون غلاف از مخلوط گروت اپوکسی با بیشینه سنگ دانه با قطر ۵ میلی‌متر به همراه فوق روان‌کننده ساخته شده است. برای هر BRB مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد ۲۸ روزه ۳۰ مگاپاسکال است. در ادامه جزئیات هر نمونه آزمایشگاهی به صورت مجزا آورده شده است.

**BRB1:** غلاف فولادی شامل یک مقطع قوطی توخالی فولادی  $۵ \times ۱۲۰ \times ۱۲۰$  میلی‌متر به طول ۹۰۰ میلی‌متر است.

میرایی چرخه‌ای BRB تک هسته‌ای:

$$\xi_0 = \frac{2}{\pi} \frac{(\mu-1)(k_e-k_p)}{\mu(k_e+(\mu-1)k_p)} = \frac{2}{\pi} \mu \left( \frac{(k_e-k_p)(\mu-1)}{\mu^2(k_e-k_p)+\mu k_p} \right) \quad (23)$$

میرایی چرخه‌ای BRB دو هسته‌ای که به صورت موازی با یکدیگر عمل می‌کنند:

$$\xi_0 = \frac{2}{\pi} \mu_1 \mu_2 \left( \frac{(k_{e1}-k_{p1})(\mu_1-1) + (k_{e2}-k_{p2})(\mu_2-1)}{\mu_1(k_{e2}-k_{p2}) + \mu_2(k_{e1}-k_{p1}) + \mu_1 \mu_2 (k_{p1}+k_{p2})} \right) \quad (24)$$

میرایی چرخه‌ای BRB سه هسته‌ای که به صورت موازی با یکدیگر عمل می‌کنند:

$$\xi_0 = \left( \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{\mu_1 \mu_2 (k_{e3}-k_{p3}) + \mu_1 \mu_3 (k_{e2}-k_{p2}) + \mu_2 \mu_3 (k_{e1}-k_{p1}) + \mu_1 \mu_2 \mu_3 (k_{p1}+k_{p2}+k_{p3})} \right) \quad (25)$$

### ۳- مراحل انجام آزمایش

#### ۳-۱- ساخت نمونه‌ها

در این مقاله، دو نمونه BRB آزمایش شده است. نمونه اول BRB معمولی به صورت تک هسته‌ای که با کد BRB1 نام گذاری شده است و نمونه دوم BRB سه هسته‌ای با کد BRB3 است. مشخصات و جزئیات BRBها در شکل (۵) ارائه شده است.

شکل ۵. شمایک مهاربندهای تک و سه هسته‌ای

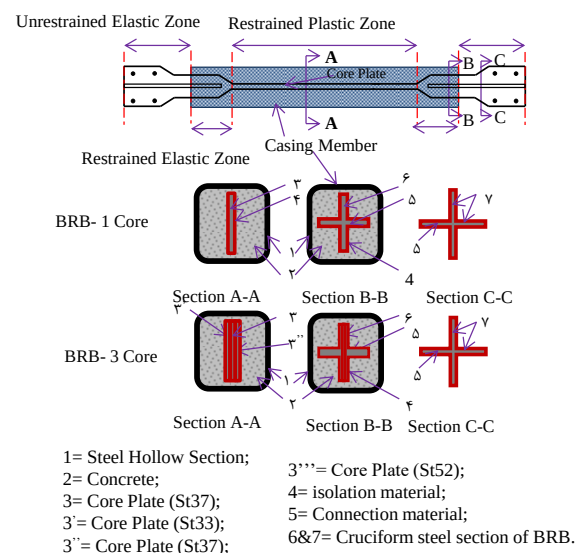


Fig. 5. Details of BRB

به منظور جلوگیری از کمانش کلی BRBها، سختی خمشی غلاف فولادی مطابق با رابطه ۱ در طراحی باید به اندازه کافی در نظر گرفته شود. همان‌گونه که در شکل (۵)

#### ۴-۲- ابزار دقیق و بارگذاری

دستگاه تست کشش و فشار (قاب لرزه‌ای) شامل یک قاب فولادی با کف صلب به موازات زمین می‌باشد. این کف صلب بر روی دو عدد ریل قرار گرفته است که ابتدا و انتهای آن مجهز به نیروسنج و کرنش‌سنج می‌باشد. اعمال نیرو به صورت دستی توسط اپراتور دستگاه به وسیله‌ی یک شیر کنترل میزان فشار و کشش انجام می‌شود. مقادیر تغییر شکل‌های محوری در مانیتور متصل به دستگاه ثبت می‌شود. در نهایت به منظور انجام آزمایش، نمونه در راستای طول توسط دو فک در دستگاه محکم می‌گردد؛ یک سر نمونه به کف صلب و سر دیگر آن به قاب فولادی متصل می‌شود. جهت جلوگیری از جابجایی خارج از صفحه‌ی کف صلب، ستونک‌هایی در دو طرف آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۸) نمونه‌ی قرار گرفته شده در دستگاه و تنظیمات آزمایش را نشان می‌دهد. پروتکل بارگذاری انتخابی از ATC-24 [26] جهت اعمال به نمونه‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. میزان دریافت (تغییر شکل محوری عضو تقسیم بر طول کل عضو) و منحنی هیستریزس، در هر نمونه به عنوان معیاری برای مقایسه‌ی پارامترهای لرزه-ایی مهاربندهای تک هسته‌ای و سه هسته‌ای استفاده می‌شود. دامنه بارگذاری چرخه‌ای برای نسبت دریافت ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد طبق پروتکل بارگذاری ATC-24 برای اعمال به نمونه‌ها انتخاب شد.

شکل ۷. جزئیات مهاربند سه هسته‌ای.

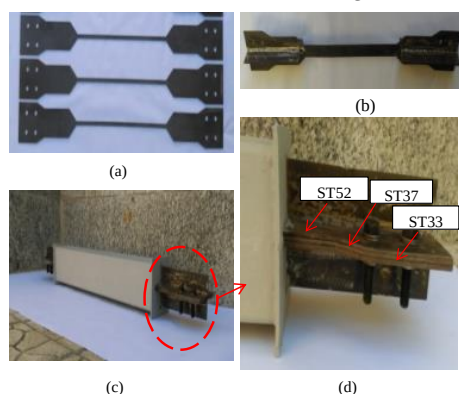


Fig. 7. Details of test specimen BRB3

BRB ها ولی به علت این که میزان نیروی فشاری و کششی به صورت دستی قابل کنترل است، و فقط با چرخاندن شیر

بتن درون غلاف با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال و ماده جداکننده (گریس) در اطراف هسته فولادی به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. هسته فولادی از ورق ST37 به طول ۶۰۰ میلی‌متر و ابعاد  $۴ \times ۳۶/۵$  میلی‌متر و سطح مقطع ۱۴۶ میلی‌متر مربع و ظرفیت کششی الاستیک ۳۵۰۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع ساخته شده است. ناحیه انتقالی به طول ۵۰ میلی‌متر و عرض آن متغیر از  $۳۶/۵$  میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش دارد، ناحیه غیرتسلیمی محدود به طول ۱۶۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۰ میلی‌متر و ناحیه انتقالی از محدوده غیر تسلیمی محدود به ناحیه نامحدود به طول ۵۰ میلی‌متر و عرض ۱۴۰ میلی‌متر، ناحیه غیر تسلیمی برای اتصال به گاست پلیت به عرض ۱۴۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر است که در هر دو طرف هسته در ناحیه غیر تسلیمی از ورق سخت کننده با ابعاد مقطع  $۶ \times ۴۰$  میلی‌متر به طول ۳۵۰ میلی‌متر به صورت صلیبی شکل استفاده شده است. برای ساخت نمونه، ابتدا هسته فولادی آغشته به گریس می‌شود و سپس درون غلاف فولادی قرار داده می‌شود. برای ریختن بتن درون غلاف، BRB به صورت قائم قرار گرفته می‌شود. در نهایت، انتهای باز BRB با استفاده از جوشکاری با ورق فولادی بسته می‌شود. در شکل (۶) نمونه ساخته شده همراه با جزئیات نشان داده شده است. BRB3: این BRB مشابه BRB1 است با این تفاوت که هسته فولادی در این BRB به تعداد ۳ عدد به طول ۶۰۰ میلی‌متر و ابعاد  $۳ \times ۱۵$  میلی‌متر و مجموع سطح مقطع ۱۳۵ میلی‌متر مربع و ظرفیت کششی الاستیک ۳۵۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع که به ترتیب شامل ST33، ST37، ST52 است. در شکل (۷) نمونه ساخته شده همراه با جزئیات نشان داده شده است.

شکل ۶. جزئیات مهاربند تک هسته‌ای

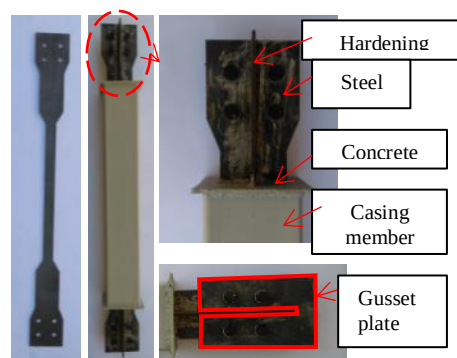


Fig. 6. Details of test specimen BRB1



شکل ۱۱. کمانش هسته مهاربند سه هسته‌ای بعد از بارگذاری



Fig. 11. State of BRB-3

#### ۴- نتایج آزمایش و تفسیر نمودارها

در این پژوهش دو نمونه کامل از مهاربند تک و سه هسته‌ای آزمایش شد و نتایج زیر بر اساس پاسخ‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های آزمایش شده است. برای مقایسه نتایج حاصل از بارگذاری چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تک و سه هسته‌ای ضرورت دارد که هر دو مهاربند در هر سیکل بارگذاری از بیشینه ظرفیت فشاری و کششی اسمی یکسانی در ناحیه الاستیک و پلاستیک برخوردار باشند. از این رو ابعاد هسته تسلیمی طوری انتخاب شد که از ظرفیت باربری یکسانی برخوردار باشند. شکل (۱۲) بیشینه ظرفیت اسمی فشاری و کششی هسته تسلیم مربوط به دو مهاربند را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشخص است هر دو مهاربند ظرفیت باربری تقریباً یکسانی دارند. و این نمودار نشان می‌دهد که برای ایجاد دررفت مشخص در هر کدام از BRB های تک و سه هسته‌ای از نیروی کششی و فشاری تقریباً یکسانی استفاده شده است. در شکل (۱۳) منحنی چرخه‌ای هیستریزیس مهاربندهای تک و سه هسته‌ای نشان داده شده است. این ارقام نشان‌دهنده نیروی بر حسب دررفت هسته تسلیمی هستند. منحنی فوق تا دررفت حداکثر ۲/۵٪ ادامه دارد. مقدار جابه‌جایی از روی کرنش سنج دستگاه اندازه‌گیری شده است. از این رو، جابه‌جایی متوسط طول بخش پلاستیکی (۶۰۰ میلی‌متر) هسته تسلیمی لحاظ شده است. همان‌گونه که مشخص است حلقه هیستریزیس مهاربند سه هسته‌ای نسبت به مهاربند تک هسته‌ای چاق‌تر و از سطح بیشتری برخوردار است؛ که این مطلب نمایانگر این است که مهاربند سه هسته‌ای از ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بالاتر و عملکرد بهتری برخوردار است. همان‌گونه که در شکل (۴) توضیح داده شد، وقتی که هسته‌های تسلیمی با تنش‌های تسلیم مختلف شامل فولاد

فشار هیدرولیکی به صورت دستی توسط اپراتور امکان‌پذیر است، باید دارای خطا و تغییراتی با پروتکل انتخابی باشد. از همین رو پروتکل اعمال شده واقعی برای نسبت دررفت ۰/۲۵، ۰/۵/۷۵، ۱/۰، ۱/۸، ۲/۲ و ۲/۵ درصد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. پس مقایسه پارامترهای لرزه‌ای در هر دو نمونه از طریق این پروتکل واقعی صورت گرفته است.

شکل ۸. تنظیمات آزمایش (واحد ها بر حسب میلی‌متر هستند)

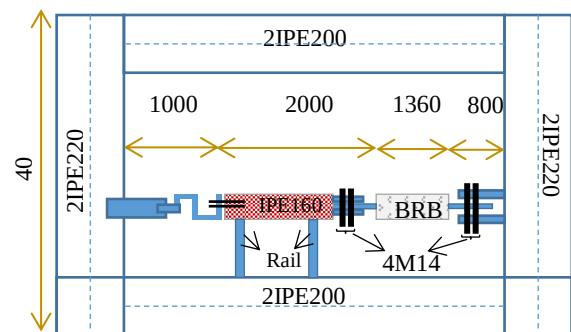


Fig. 8. The experimental setup (dimensions in millimeters)

شکل ۹. پروتکل بارگذاری انتخابی از ATC-24 [31]

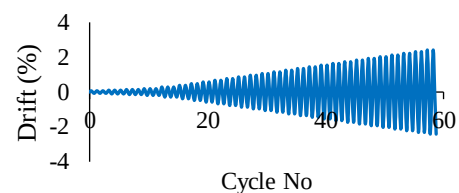


Fig. 9. loading protocol according to ATC-24

شکل ۱۰. پروتکل بارگذاری اعمال شده واقعی

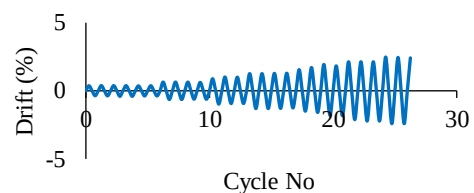


Fig. 10. Experimental loading protocol

شکل (۱۱) چگونگی کمانش مهاربند سه هسته‌ای را بعد از بارگذاری محوری نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هسته با سختی خمشی دارای یک فاصله ۵ میلی‌متری با غلاف است. با افزایش بار محوری کمانشی در هسته فولادی و ایجاد کمانش در هسته، نیروی اصطکاک بین هسته و غلاف اتفاق می‌افتد و موده‌های کمانشی گسترش می‌یابد.

در مهاربند سه هسته‌ای بعد از دریافت ۱/۵٪ منحنی هیستریزیس بازتر و شکل محدب به خود می‌گیرد و این نشان از رفتار پایدارتر دارد. به طور کلی در چرخه‌های بالاتر، مهاربند سه هسته‌ای تحت نیروی فشاری و کششی رفتار بهتر و پایدارتری نسبت به مهاربند تک هسته‌ای از خود نشان می‌دهد. با وجود این که از پیچ‌های پر مقاومت برای ایجاد اتصال اصطکاکی و جلوگیری از لغزش استفاده شده است، همان‌گونه که در شکل (۱۳) دیده شد، لغزش در محل اتصال سبب ایجاد پرش‌های ناگهانی جزئی در رفتار چرخه‌ای شده است.

شکل ۱۳. منحنی هیستریزیس مهاربندهای تک و سه هسته‌ای

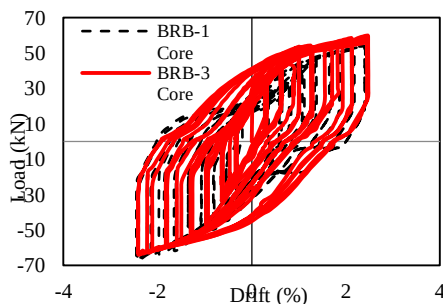


Fig. 13. Cyclic behavior of test specimens BRB1 & BRB3

با این وجود لغزش محل اتصال گاست پلیت و مهاربند ممکن است بر رفتار BRBها تأثیر بگذارد. از این رو مناسب است که این لغزش را در هنگام طراحی قاب‌ها در نظر گرفته شود. در شکل (۱۴) و جدول (۱) مقایسه بیشینه ظرفیت جذب و استهلاک انرژی مهاربندهای کم‌انرژی تک و سه هسته‌ای نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که اختلاف ظرفیت مهاربند تک هسته‌ای و سه هسته‌ای تا دریافت ۱٪ تقریباً ناچیز است ولی ظرفیت سه هسته‌ای ۱۰/۵۳٪ از تک هسته‌ای بالاتر است. از دریافت ۱٪ درصد تا ۱/۵٪ این اختلاف ظرفیت مشهودتر شده که همان‌گونه که در شکل (۱۳) دیده می‌شود در این بازه مهاربند سه هسته‌ای پایداری چرخه‌ای هیستریزیس خود را حفظ کرده ولی تک هسته‌ای دارای افت ظرفیت است و این اختلاف ظرفیت در دریافت ۱/۵٪ درصد رفتار پایدار و بدون افت با اختلاف ظرفیت تقریباً ۱۷٪ نسبت به مهاربند تک هسته‌ای است. از دریافت ۱/۸٪ به بعد کاهش

ST33، ST37 و ST52 به صورت موازی در کنار یکدیگر تحت نیروی کششی قرار گرفته‌اند، در مرحله اول ابتدا فولاد ST33 وارد ناحیه پلاستیک شده و دو فولاد دیگر در ناحیه الاستیک قرار دارند و در مرحله دوم فولاد ST33 و ST37 وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند و فولاد ST52 هنوز در ناحیه الاستیک قرار دارد؛ در مرحله سوم هر سه هسته فولادی وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند و این چرخه برخلاف مهاربند تک هسته‌ای که یک‌باره از ناحیه الاستیک وارد ناحیه پلاستیک می‌شود باعث شده مطابق با شکل (۱۳) مهاربند سه هسته‌ای به صورت ملایم و با شیب یکنواخت و با انحنای محدب از ناحیه الاستیک وارد ناحیه پلاستیک شود و این چرخه تحت نیروی فشاری هم تکرار شده است. همچنین این انتقال ملایم از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک باعث شده که مقاومت نهایی مهاربند سه هسته‌ای بالاتر از مهاربند تک هسته‌ای قرار گیرد.

شکل ۱۲. بیشینه ظرفیت اسمی فشاری و کششی هسته تسلیم

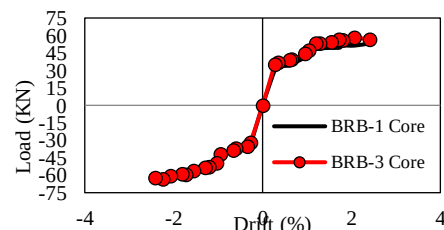


Fig. 12. load-drift of the BRB1 and BRB3 specimens

مقایسه چرخه هیستریزیس مهاربند تک و سه هسته‌ای مطابق با شکل (۱۳) نشان می‌دهد که بعد از ناحیه خطی مهاربند سه هسته‌ای دارای رفتاری با شیب ملایم‌تر و شکل محدب‌تری نسبت به مهاربند تک هسته‌ای هست؛ چرخه هیستریزیس مهاربند تک هسته‌ای تحت نیروی فشاری تا دریافت ۱٪ تقریباً پایدار و افت ناگهانی ظرفیت در آن دیده نمی‌شود ولی از دریافت ۱/۵٪ به بالا این افت ظرفیت کاملاً مشهود است در صورتی که این ضعف در چرخه هیستریزیس مهاربند سه هسته‌ای نه تنها وجود ندارد بلکه در دریافت ۱/۵٪ به بالا دارای عملکرد بهتر و منحنی بازتری است. چرخه هیستریزیس مهاربند تک هسته‌ای تحت نیروی کششی تقریباً با افت کم و یک شیب ملایم در تمامی گام‌های بارگذاری دیده می‌شود در صورتی که



ظرفیت در هر دو مهاربند مشهود بوده و تا دررفت ۲/۵٪ ادامه داشته که با اختلاف ۱۶/۳٪ به پایان می‌رسد. به طور میانگین در تمامی دررفت‌ها مهاربند سه هسته‌ای از ظرفیت جذب و استهلاك انرژی بالاتری نسبت به مهاربند تک هسته‌ای برخوردار است. همان‌گونه که در شکل ۱۴ دیده می‌شود در دررفت‌های بالاتر مهاربند سه هسته‌ای نسبت به تک هسته‌ای فاصله گرفته و از ظرفیت جذب و استهلاك انرژی بالاتری برخوردار می‌شود، که علت آن را می‌توان استفاده از فولاد با تنش تسلیم بالاتر (ST52) دانست. به عبارت دیگر می‌توان گفت انحنای محدب ناشی از عبور از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک در چرخه‌ها دیده می‌شود ولی در دررفت‌های بالاتر مشهودتر هست.

جدول ۲. مقایسه میرایی مهاربندهای کماتش ناپذیر تک و سه هسته‌ای

| Drift (%) | BRB-1  |       |             | BRB-3   |        |             |
|-----------|--------|-------|-------------|---------|--------|-------------|
|           | Ed     | Es    | $\xi_o$ (%) | Ed      | Es     | $\xi_o$ (%) |
| 0.25      | 64.9   | 28.8  | 17.9        | 103.6   | 39.85  | 20.7        |
| 0.75      | 331.0  | 98.8  | 26.6        | 388.82  | 107.49 | 28.8        |
| 1         | 613.1  | 163.4 | 29.8        | 677.65  | 165.50 | 32.6        |
| 1.5       | 1140.0 | 282.9 | 32.1        | 1290.43 | 288.60 | 35.6        |
| 1.8       | 1433.7 | 334.5 | 34.1        | 1678.85 | 365.21 | 36.6        |
| 2.2       | 1656.8 | 377.0 | 34.9        | 1922.75 | 403.92 | 37.9        |
| 2.5       | 1728.4 | 391.6 | 35.1        | 2010.19 | 418.80 | 38.2        |

Table 2. Results of the experimental tests

شکل ۱۵. مقایسه میرایی مهاربندهای کماتش ناپذیر تک و سه هسته‌ای

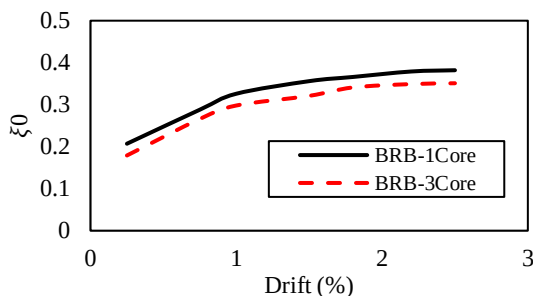


Fig. 15.  $\xi_0$ -drift of the BRB1 and BRB3 specimens

## ۵- مقایسه اقتصادی و سهولت اجرا در مهاربندهای تک و سه هسته‌ای

ساختار کلی مهاربندهای فوق به سه بخش: ۱- هسته فولادی که از تسمه با فولاد رایج در بازار است، ۲- غلاف فولادی که از پروفیل‌های قوطی و لوله موجود در بازار می‌باشد و ۳- بتن درون غلاف که به سهولت در دسترس می‌باشد، تقسیم می‌شود. همچنین مهاربندهای کماتش ناپذیر بر خلاف مهاربندهای معمولی در یک جهت (به صورت تک) و قطری اجرا می‌شوند. که در نتیجه به ازای هر مهاربند ضربدری معمولی یک مهاربند قطری کماتش ناپذیر اجرا می‌شود که از لحاظ اقتصادی به

ظرفیت در هر دو مهاربند مشهود بوده و تا دررفت ۲/۵٪ ادامه داشته که با اختلاف ۱۶/۳٪ به پایان می‌رسد. به طور میانگین در تمامی دررفت‌ها مهاربند سه هسته‌ای از ظرفیت جذب و استهلاك انرژی بالاتری نسبت به مهاربند تک هسته‌ای برخوردار است. همان‌گونه که در شکل ۱۴ دیده می‌شود در دررفت‌های بالاتر مهاربند سه هسته‌ای نسبت به تک هسته‌ای فاصله گرفته و از ظرفیت جذب و استهلاك انرژی بالاتری برخوردار می‌شود، که علت آن را می‌توان استفاده از فولاد با تنش تسلیم بالاتر (ST52) دانست. به عبارت دیگر می‌توان گفت انحنای محدب ناشی از عبور از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک در چرخه‌ها دیده می‌شود ولی در دررفت‌های بالاتر مشهودتر هست.

شکل ۱۴. مقایسه لبشینه ظرفیت جذب و استهلاك انرژی مهاربندهای

کوماتش ناپذیر تک و سه هسته‌ای

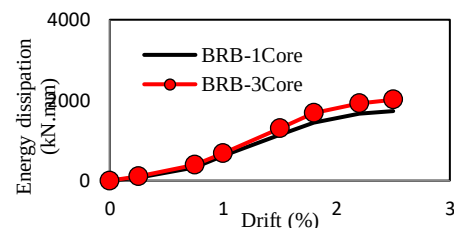


Fig. 14. Energy dissipation-drift of the BRB1 and BRB3

جدول ۱- مقایسه حداکثر ظرفیت جذب و استهلاك انرژی مهاربندهای

کوماتش ناپذیر تک و سه هسته‌ای

| Dissipation energy (kN.mm) |            | Changes (%) |
|----------------------------|------------|-------------|
| BRB-1 Core                 | BRB-3 Core |             |
| 1728.41                    | 2010.19    | 16.30       |

Table 1. Maximum dissipated energy

در شکل (۱۵) و جدول (۲) مقایسه میرایی مهاربند تک و سه هسته‌ای نشان داده شده است. نکته حائز اهمیت اختلاف نمودار میرایی و نمودار حداکثر جذب و استهلاك انرژی می‌باشد. در شکل (۱۵) حداکثر جذب و استهلاك انرژی مهاربند سه هسته‌ای با شیب ملایم صعودی از مهاربند تک هسته‌ای فاصله می‌گیرد، ولی در مهاربند سه هسته‌ای میرایی تقریباً با یک شیب یکنواخت از دررفت ۰/۲۵٪ تا ۲/۵٪ به صورت تقریباً یکنواخت دارای اخلاف می‌باشد. میرایی حدوداً از دررفت ۰/۲۵٪ تا ۱٪ با اختلاف تقریبی ۲/۲ واحد معادل

ملاحظه‌ای در ساخت مهاربند سه هسته‌ای نسبت به تک هسته‌ای وجود ندارد.

## ۶- مراجع

- [1] Clark p., Aiken I., Kasai K., Kimura I., 1999 Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices. **Proc. 69th Annu. Conv. SEAOC.**
- [2] Black C.J., Makris N., Aiken I.D., 2002 Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained braces. **Report No. PEER.**
- [3] Chen C.C., Chen S.Y., Liaw; J.J., 2001 Application of low yield strength steel on controlled plastification ductile concentrically braced frames. **Can. J. Civ. Eng.** 28, 823-836.
- [4] Higgins C., Newell J., 2004 Confined steel brace for earthquake resistance design. **AISC Eng. J** (4th Quart), 41 (4), 187-202.
- [5] Takeuchi T., Hajjar J.F., Matsui R., Nishimoto K., Aiken I.D., 2012 Effect of local buckling core plate restraint in buckling restrained braces, **Eng. Struct.** 44, 304-311.
- [6] Watanabe A., Hitomi Y., Yaeki E., Wada A., Fujimoto M., 1988 Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube. **Proc. 9th World Conf. Earthquake Engineering**, 19-724.
- [7] Lin Wu A. C., Tsai K. C., 2004 High-mode buckling responses of buckling-restrained brace core plates. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics.** 43(3), 375-393.
- [8] zornoczay A., Dunai I., 2011 Type Testing of Buckling Restrained Braces according to EN 15129-EWC800. **Department of structural Engineering**, Budapest University of Technology and Economics.
- [9] jia M., Lu D., Guo L., 2014 Experimental research and cyclic behavior of buckling-restrained braced composite frame. **Journal of constructional Steel research**, 95, 90-105.
- [10] Tremblay R., Degrang G., Blouin J., 1999 Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system. **Proc. 8th Can. Conf. Earthquake Engineering**, 549-554.
- [11] Fahnestock L., Ricles J., Sause R., 2007 Experimental evaluation of a large-scale buckling restrained braced frame. **J Struct Eng**, 133(9), 1205-14.
- [12] Della Corte G, D'Aniello M., Landolfo R., 2015 Field Testing of All-Steel Buckling Restrained Braces Applied to a Damaged Reinforced Concrete Building. **J Struct Eng**, 141(1), 401-404.
- [13] Tremblay R., Bolduc p., Neville r., Devall R., 2006 Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems, **Canadian Journal of Civil Engineering**, 33(2), 183-198.
- [14] Black C., Makris N., Aiken I., 2002 Component testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained unbonded braces. **Pacific Earthquake Engineering Research Center.**

صرفه‌تر است. لازم به ذکر است تعداد مهاربندهای سه هسته‌ای استفاده شده در یک ساختمان (با توجه به این‌که از ظرفیت جذب و اتلاف انرژی بالاتری برخوردار هستند)، از تعداد مهاربندهای تک هسته‌ای کمتر است و صرفه اقتصادی بیشتری دارند. از دیگر مزایای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سهولت اجرا، نصب و قابل تعویض بودن آن‌ها بعد از زلزله هست.

## ۶- نتیجه‌گیری

در نتیجه‌گیری نهایی به دلایل زیر می‌توان با اطمینان بیشتری از مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سه هسته‌ای به جای مهاربندهای تک هسته‌ای در سازه‌ها به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی، به ویژه بارهای زلزله که دارای چرخه رفت و برگشتی می‌باشد استفاده کرد:

- چرخه هیستریزیس مهاربند سه هسته‌ای مانند شکل (۱۲) بعد از ناحیه خطی دارای شکل محدب یا به اصطلاح لوپ بازتر و چاق‌تر نسبت به مهاربند تک هسته‌ای هست؛ چرخه هیستریزیس مهاربندهای سه هسته‌ای هر اندازه که به سمت دریافت بالاتر سوق پیدا می‌کند به ویژه مانند شکل (۱۲) در دریافت ۲/۵٪ به رفتار بهتر و لوپ چاق‌تری دست پیدا می‌کند؛ چرخه هیستریزیس مهاربند سه هسته‌ای در دریافت ۱٪ به بالا رفتار پایدارتری نسبت به مهاربند تک هسته‌ای از خود نشان می‌دهد؛ مهاربند سه هسته‌ای در تمامی دریافت‌ها از ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بالاتری نسبت به مهاربند تک هسته‌ای برخوردار است و در دریافت ۲/۵٪ درصد ظرفیت مهاربند سه هسته‌ای ۱۶/۳٪ از مهاربند تک هسته‌ای بالاتر است؛ نمودار میرایی مهاربند سه هسته‌ای تقریباً با یک شیب یکنواخت در تمامی دریافت‌ها از ظرفیت بالاتری برخوردار است؛ در دریافت ۲/۵٪ اختلاف میرایی مهاربند سه هسته‌ای نسبت به تک هسته‌ای ۸/۸٪ بالاتر است. نکته حائز اهمیت در مهاربندهای سه هسته‌ای وجود هسته‌های تسلیمی با تنش تسلیم‌های متفاوت است و ساختار مهاربندهای سه هسته‌ای و تک هسته‌ای کاملاً مشابه یکدیگر هستند. هسته تسلیمی در مهاربند تک هسته‌ای به سه هسته تسلیمی در مهاربند سه هسته‌ای با همان ظرفیت باربری تغییر پیدا می‌کند، پس اضافه هزینه قابل

- [23] Gholhaki M., Pachideh G., 2015 Investigating of damage indexes results due to presence of shear wall in building with various stories and spans. *Int J Rev Life Sci*, 5(1), 992-997.
- [24] Pachideh G., Gholhaki M., Lashkari R., Rezayfar O., 2020 Behavior of BRB Equipped with a Casing Comprised of Steel and Polyamide. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, <https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00206>.
- [25] Pachideh G., Gholhaki M., Saedi Daryan A., 2019 Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis, *journal of structures*, 20, 437-451.
- [26] Ozcelik R., Dikiciasik Y., Erdil E., 2017 The development of the buckling restrained braces with new end restrains, *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 208-220.
- [27] Junda E., Leelataviwat S., Doung P., 2018 Cyclic testing and performance evaluation of buckling-restrained knee-braced frames, *Journal of Constructional Steel Research* 148, 154-164
- [28] ATC A, 1996 Seismic evaluation and retrofit of concrete building, *Applied Technology Council*, report ATC-40, Redwood City.
- [29] FEMA, 2009 Quantification of Building Seismic Performance Factors, 695.
- [30] AISC, 2005 Seismic Provisions for Structural Steel Building. AISC, Chicago, IL.
- [31] ATC 24, 1992 Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. Applied Technology Council (ATC).
- [15] Merrit S., Uang C., Benzoni G., 2003 Sub assemblage testing of core brace buckling-restrained braces. San Diego. La Jolla, California: **University of California**.
- [16] Newell J., Uang C., Benzoni G., 2003 Sub assemblage testing of core brace buckling-restrained braces (G Series). San Diego: California: **University of California**.
- [17] Hoveidae N., Rafezy B., 2012 Overall buckling behavior of allsteel buckling restrained braces. *J. Constr. Steel Res*; 2012, 79(Dec), 151-158.
- [18] Hosseinzadeh Sh., Mohebi B., 2016 Seismic evaluation of all-steel buckling restrained bracing finite element analysis. *J. Constr. Steel Res*, 119(Dec), 76-84.
- [19] Zhu B.L., Guo Y.L., Zhou. P., Bradford M. A., Pi Y.L., 2017 Numerical and experimental studies of corrugated-web-connected buckling-restrained braces, *Eng. Struct*, 134, 107-124.
- [20] Palmer K. D., Roeder C. W., Lehman D. E., Okazaki T., Shield C., 2013 Experimental Performance of Steel Braced Frames Subjected to Bidirectional Loading. *J. Struct. Eng*, 139, 1274-1284.
- [21] Aguaguiña Mario., Zhou Y., Zhou Y., 2019 Loading protocols for qualification testing of BRBs considering global Engineering Structures, *Eng Structures*, 189, 440-457.
- [22] Zsarnoczay A., Dunai L., 2011 Type Testing of Buckling Restrained Braces according to EN 15129-EWC800. *Department of Structural Engineering*, Budapest University of Technology and Economics.

# Experimental Investigation of Seismic Performance of Three-core buckling restrained braces

Chigoi, Ali<sup>1</sup>; Rahgozar, Mohammad Ali <sup>\*2</sup>; Izadinia, Mohsen<sup>3</sup>

1- PhD student of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2- Assistant Professor, University of Isfahan.

3- Assistant Professor, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

<sup>\*</sup>rahgozar@eng.ui.ac.ir

## Abstract:

As a passive control system, braces have an effective role in creating structural resistance to lateral forces such as earthquakes and winds. One of the ways to make the braces more economical is to use their inelastic capacity. Ordinary braces perform well in tension; however they buckle under pressure and exhibit undesirable behavior. This problem can reduce dissipated energy due to lack of plasticity, which plays an important role in cyclic loading such as earthquakes. For this reason, buckling-restrained brace (BRB) have become increasingly popular in different countries. BRBs include yielding steel core and an outer steel hollow section. Although the yielding steel core has a low compressive capacity, its capacity in pressure can be increased by limiting its buckling due to the outer steel hollow section. In general, buckling-restrained-braces have three zones. An unrestrained elastic zone, a restrained elastic zone, and a restrained plastic zone. The unrestrained elastic zone is designed to provide a connection between the BRB and the Gusset Plate. When the plastic zone yields under pressure and tension demands, the unrestrained elastic zone resists axial forces without buckling. The restrained plastic zone is a transition part of the core plate between elastic and plastic behaviors. Even though under pressure and compression load this zone has elastic behavior, the steel casing prevents it from buckling. The restrained plastic zone resists tension and compression forces elastically and plastically. The steel core inside the steel casing must be separated and must be able to move freely. Hence, separating or isolating the steel core must be done either using isolation material such as rubber, silicone grease, and foam or by placing an air gap to prevent friction between the steel core and the steel casing and to consequently prevent the additional axial load capacity during compression demands. So far BRBs introduced as mentioned have a single yielding core, however in this paper, in order to improve the seismic behavior of BRBs, buckling-restrained brace with three parallel cores with different yield stress have been suggested and introduced. The buckling braces were made in one and three steel core with the same tensile and compressive capacity. These braces were subjected to cyclic tensile and compressive loads in the laboratory under the ATC-24 loading protocol. Hysteresis cyclic performances of each brace were obtained and examined. The experimental results show that: 1) the hysteresis loop of the 3-core brace is thicker and higher than the 1-core brace, 2) indicating that the three core brace has 16.3% and 8.8% higher energy absorption and damping capacity, respectively compared to that of the single core brace. Furthermore, it has better seismic performance. Three-core BRBs are better alternatives for single-core BRBs as lateral loading resistance systems, especially for seismic loading with hysteresis loops, because of several reasons. The hysteresis loop of the three-core BRB has a convex shape and a fat loop as compared to the single-core BRB. The hysteresis loops in three-core BRBs have better performance and a fat loop as they move toward a higher drift ratio, especially at 2.5% drift. The hysteresis loop of the three-core BRB has a more stable behavior than the single-core BRB after 1% drift.

**Keywords:** Buckling, single core brace, three core brace, hysteresis cycle.