

ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی لرزه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای

علی چیگویی

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

محمدعلی رهگذر *

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

محسن ایزدی‌نیا

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

rahgozar@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۱۲/۰۹

چکیده:

در این مقاله جهت بهبود رفتار لرزه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای، مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای پیشنهاد گردید که در آن از سه هسته با تنش تسلیم متفاوت به صورت موازی استفاده شده است. مهاربندهای کمانش‌ناپذیر 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. سپس مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای در یک قاب خمشی فولادی به صورت قطری قرار گرفته و با استفاده از تحلیل پوش‌آور تطبیقی غیرخطی عملکرد لرزه‌ای و ضریب رفتار آن‌ها بدست آمده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، سطح زیر منحنی حلقه‌ی هیستریزس مهاربند کمانش‌ناپذیر سه هسته‌ای نسبت به مهاربند کمانش‌ناپذیر تک هسته‌ای به میزان ۱۶/۳٪ از مساحت بیشتری برخوردار است، همچنین ضریب میرای در تغییر طول نسبی ۲/۵٪ برای مهاربند کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای با اختلاف ۸/۸٪ نسبت به مهاربند کمانش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای بیشتر می‌باشد. میانگین ضریب رفتار حاصل از آنالیز پوش‌آور تطبیقی برای قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند کمانش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای ۸/۱۱ و برای قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای ۹/۱۴ بدست آمده است. در نتیجه مهاربند کمانش‌ناپذیر سه هسته‌ای از ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بالاتر و عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به مهاربند کمانش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای برخوردار است و همچنین شکل پذیری قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای از قاب فولادی مجهز به مهاربند کمانش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای بالاتر است که نشان از رفتار بهتر مهاربند کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای در برابر زلزله و امر بهسازی سازه‌ها دارد.

کلید واژگان: کمانش، مهاربند کمانش‌ناپذیر تک هسته‌ای، مهاربند کمانش‌ناپذیر سه هسته‌ای، چرخه هیستریزس، آنالیز غیرخطی پوش‌آور تطبیقی

۱- مقدمه

ضخامت و عرض آن و الگوهای بارگذاری بستگی دارد. هیگینز و نیوال [۶] به جای استفاده از یک لوله‌ی فولادی پر شده با ملات، یک لوله‌ی فولادی پر شده از یک ماده غیر چسبنده به منظور محدود کردن تسلیم مهاربندها استفاده کردند. تایوشی و همکاران [۷] یک استراتژی برای جلوگیری از کماتش موضعی در صفحه BRB تک هسته‌ای پیشنهاد کردند. واتانبا و همکاران [۸] به منظور بررسی کماتش کلی مهاربندهای کماتش‌ناپذیر تک هسته‌ای به آزمایش مهاربندهای با لوله‌های مربع و مستطیل پر شده با ملات پرداختند و معادله‌ی (۱) را برای جلوگیری از کماتش کلی مهاربندهای کماتش‌ناپذیر (BRBs) پیشنهاد دادند.

$$P_e/P_y > (1)$$

P_y مقاومت تسلیم در هسته فولادی و P_e مقاومت کماتش الاستیک غلاف فولادی است. این‌چنین و همکاران [۹] به منظور بررسی پدیده‌ی کماتش در مودهای بالاتر، بر روی ۶ مهاربند کماتش‌ناپذیر تک هسته‌ای تمام فولادی آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل اجزای محدود در الگوهای مختلف بارگذاری انجام دادند. طی تحقیقاتی مشابه لازلودونای و همکاران [۱۰] دو نمونه BRB به نام‌های EWC_{۸۰۰}A و EWC_{۸۰۰}B مورد آزمایش قرار دادند. مساحت ناحیه تسلیمی نمونه‌ها ۸۰۰ میلی‌مترمربع، نیروی تسلیم آنها برابر ۲۲۵ کیلونیوتن و فاصله بین هسته تسلیمی و بتن پوشش از هوا بود. هدف از انجام آزمایش، بررسی عملکرد BRB طراحی شده بر اساس آیین‌نامه اروپا و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل رایانه‌ای بیان شده است، نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و رفتار پایدار و متقارنی بدون افت مقاومت مشاهده شد. مینگ مینگ همکاران [۱۱] بر روی نمونه‌های با مقیاس یک‌سوم اندازه واقعی به صورت ساختمان ۲ طبقه یک دهانه، مجهز به مهاربندهای کماتش‌ناپذیر آزمایشات شبه استاتیکی تحقیقاتی انجام دادند. ستون‌ها از قوطی‌های پر شده با بتن و تیرها و مهاربندهای کماتش‌ناپذیر فولادی به کار گرفته شد. همچنین سیستم BRB با سیستم‌های همگرای معمولی از نظر سختی، ظرفیت تحمل بار و ظرفیت اتلاف انرژی مورد مقایسه قرار گرفت. طراحی قاب برای BRB به گونه‌ای انجام گردید که در هنگام قرارگیری در برابر بار زلزله به صورت الاستیک باقی بماند. نتایج نشان داد که مهاربندهای کماتش‌ناپذیر به شدت ظرفیت اتلاف انرژی را افزایش می‌دهند و قاب‌های مجهز به BRB شکل‌پذیری‌های بسیار خوبی از خود نشان داده‌اند. همچنین با توجه به آزمایش مهاربندهای کماتش‌ناپذیر واقع شده در قاب، ترمبلای و همکاران [۱۲] شش BRB را بر روی یک قاب فولادی تک دهانه آزمایش کردند و طول‌های مختلف هسته تسلیم و انواع غلاف مورد آزمایش قرار گرفتند. فانستوک و همکاران [۱۳] با استفاده از یک روش تست شبه دینامیکی دوگانه، یک قاب مجهز به مهاربند کماتش‌ناپذیر با مقیاس بزرگ را آزمایش کردند.

مهاربندهای کماتش‌ناپذیر (BRBs) در کشورهای مختلف لرزه‌ای به طور فزاینده‌ای محبوب شده‌اند. این بر تعداد روزافزون نشریات مرتبط با BRBs مشاهده شده است. این دستگاه‌ها از هسته و غلاف فلزی تشکیل شده که غلاف از کماتش هسته تحت بارهای فشاری جلوگیری می‌کند [۱-۲]. مهاربندهای کماتش‌ناپذیر BRBs به طور کلی دارای سه 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، جهت ایجاد ارتباط 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 کماتش می‌باشد. 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 کماتش 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 بایستی 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 بر روی مهاربندهای کماتش‌ناپذیر تک هسته‌ای انجام شده است [۱-۳۴]. برای نمونه کلارک و همکاران [۳] در آزمایشگاه بر روی ۳ مهاربند آزمایش انجام دادند. آزمایش‌ها بر روی تسلیم کششی و فشاری مهاربندها انجام شد. هدف اصلی از این آزمایش‌ها بررسی رفتار مهاربندها تحت بارگذاری چرخه‌ای و همچنین انواع دیگر بارگذاری در نظر گرفته شد. بلک و همکاران [۴] مهاربندهای کماتش‌ناپذیر تک هسته‌ای با مقاطع فولادی مستطیلی و صلیبی شکل را مورد آزمایش قرار دادند. چن و همکاران [۵] BRBs با فولاد تنش تسلیم پایین و هسته فولادی شکل‌پذیر را مورد آزمایش قرار دادند. آزمایش بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل اجزای محدود بر روی ۶ مهاربند کماتش‌ناپذیر تمام فولاد با استفاده از الگوهای مختلف بارگذاری، برای بررسی پدیده کماتش در مودهای بالاتر انجام دادند. BRB پیشنهادی ترکیبی از یک هسته و یک جفت اعضای نگهدارنده و تعدادی پیچ است که اتصال آن‌ها را به یکدیگر تامین می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد، کماتش هسته در مودهای بالاتر به ابعاد هسته از جمله

^۱ buckling-restrained-brace

۲- مطالعه پارامتریک مهاربندهای کماتش ناپذیر و

پارامترهای عملکرد لرزه‌ای

۲-۱- تاثیر میرای و سختی در BRBهای تک هسته‌ای

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

۲-۱-۱- تعریف میرایی

در شکل (۱) نحوه محاسبه میرایی ویسکوز معادل یک عضو BRB تک هسته‌ای مطابق ۴۰ ATC در یک قاب نشان داده شده است. مطابق رابطه (۲) میرای سازه شامل میرای ذاتی (مثلاً ۲٪ برای سازه‌های فولادی) و میرایی چرخه‌ای می‌باشد که مجموع این دو میرای را ویسکوز معادل (ξ_{eq}) می‌نامند. میرایی ویسکوز معادل بستگی به نقطه ماکزیمم جابجایی (d_{pi}) دارد.

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

در رابطه (۲)، ξ_{eq} میرایی ویسکوز معادل، ξ_o میرای چرخه‌ای و ۲٪ میرایی ویسکوز ذاتی که مقدار آن ثابت فرض می‌شود. ξ_o میرایی چرخه‌ای از رابطه‌ی (۳) قابل محاسبه است [۳۵]:

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

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 می‌باشد. با توجه به شکل (۱)، می‌توان رابطه‌ی میرایی چرخه‌ای را به شکل ساده‌تری بازنویسی کرد (رابطه‌ی ۴):

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

با توجه به شکل (۲) اگر d_m جابجایی نهایی، F_m مقاومت نهایی متناظر آن، d_y جابجایی 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

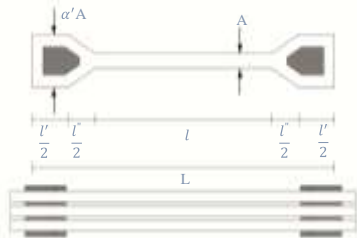
$$F_m = k_p (d_m - d_y) + F_y \quad (6)$$

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

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

دلکورت و همکاران [۱۴] آزمایش‌های کامل شبه استاتیکی چرخه-ای را انجام دادند، ساختمان با قاب خمشی مجهز به BRB فولادی با قابلیت تعویض، که در آن مهاربندهای کماتش ناپذیر ساخته شده از هسته فولادی و غلاف فولادی که اجازه بازرسی پس از وقوع زلزله را می‌دهد استفاده شد. کومار و همکاران [۱۵]، با انجام تحلیل غیرخطی با استفاده از نرم افزار SAP۲۰۰۰، مطالعه‌ای پارامتریک به منظور بررسی رفتار ساختمان‌های پنج طبقه، مجهز به مهاربندهای کماتش ناپذیر انجام دادند. دالکار و همکاران [۱۶]، با استفاده از نرم افزار SAP۲۰۰۰ یک ساختمان ۵ طبقه را تحلیل غیرخطی نمودند. طی نتایج آزمایشگاهی یانگ و همکاران [۱۷]، بر قاب خمشی بتن مسلح، نشان داد که نمونه مقاوم سازی شده با BRB عملکرد لرزه‌ای بسیار بهتری نسبت به نمونه شاهد بدون BRB نشان می‌دهد و BRBها می‌توانند به طور موثری عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی بتن مسلح را بهبود ببخشند. الوانسازیدی و همکاران [۱۸]، سه نمونه BRBF و سه نمونه SCBF را با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۱۰ بر اساس آیین‌نامه AISC۳۶۰-۵ طراحی و با استفاده از نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی کردند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سیستم‌های BRBF در مقایسه با سیستم‌های SCBF ظرفیت بالاتری را برای سطح عملکرد هدف فراهم می‌کنند. طی نتایج آزمایشگاهی چاتوردی و همکاران [۱۹]، مشخص شد که استفاده از هسته‌های فولادی BRB باعث افزایش وزن مهاربند در سازه شده است و از این رو می‌توان از مهاربندهای سبک وزن (LWBRB) به عنوان یک گزینه موثر جایگزین هسته تسلیمی فولادی استفاده کرد. از مواد شکل پذیر مانند هسته آلومینیوم به عنوان جایگزینی برای هسته فولادی BRB استفاده کردند. مطالعات توصیف شده در بالا نشان می‌دهد که مهاربندهای کماتش 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 کماتش ناپذیر با یک هسته پرداخته شد. سپس نمودار چرخه‌ی هیستریزس مهاربند تک هسته‌ای مطابق با پروتکل استاندارد، میزان اتلاف انرژی و میرای 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. سپس هر دو مهاربند تک و سه هسته‌ای در یک قاب خمشی فولادی پنج طبقه قرار داده شده و با استفاده از آنالیز استاتیکی پوش‌آور تطبیقی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در ادامه نمودار چرخه هیستریزس، میزان ظرفیت اتلاف انرژی و میرای هر دو مهاربند حاصل از نتایج آزمایشگاهی و ضریب رفتار و ضریب شکل‌پذیری هر دو مهاربند حاصل از نتایج تحلیلی در شرایط یکسان مقایسه شد.

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 می‌باشد. بنابراین ضریب سختی معادل در هر یک از قسمت‌های چهارگانه شکل (۴) به صورت روابط ۱۰-۱۳ قابل محاسبه می‌باشد.



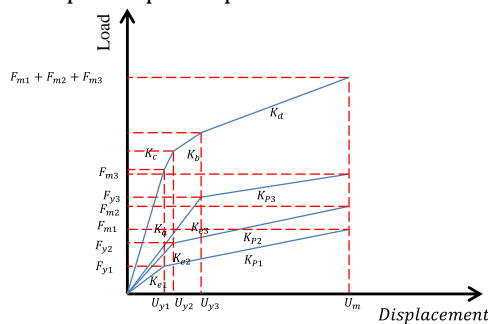
شکل (۳) اجزای مهاربند کماتش‌ناپذیر با هسته‌های تسلیمی موازی

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

$$k_b = k_{p1} + k_{e2} + k_{e3} \quad (11)$$

$$k_c = k_{p1} + k_{p2} + k_{e3} \quad (12)$$

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



شکل (۴) نمودار فرض شده نیرو-جابجایی مهاربند کماتش‌ناپذیر با هسته‌های تسلیمی موازی

که k_{ei} سختی الاستیک و k_{pi} سختی پس از حد تسلیم i^{th} هسته تسلیمی می‌باشد. هر یک از هسته‌های فلزی که با هم به طور موازی بسته شده‌اند خود مشتمل بر سه قسمت غیرتسلیمی، انتقالی و هسته تسلیمی می‌باشد که به طور موازی نسبت به هم قرار گرفته‌اند.

۳- مطالعه پارامتریک آنالیز پوشش‌آور تطبیقی

۳-۱- آنالیز پوشش‌آور تطبیقی (APA)

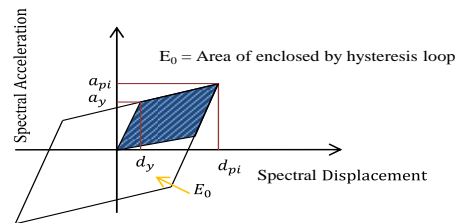
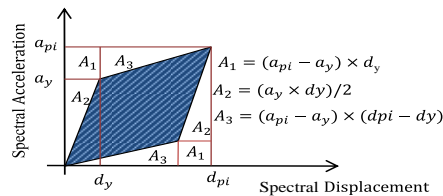
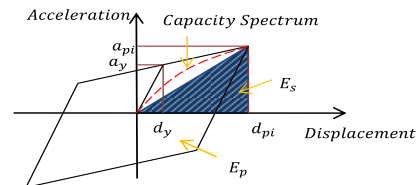
کونات (۲۰۰۰) از نیروهای طبقات جهت بهنگام نمودن الگوی بارگذاری در آنالیز پوشش‌آور استفاده کردند. در این شیوه بار اعمالی در هر گام بر اساس مشخصات دینامیکی سازه حاصل می‌گردد. بعلاوه

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

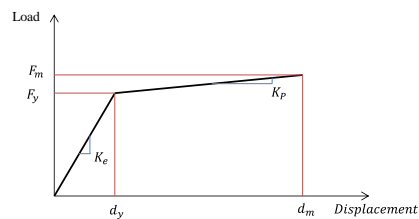
و اگر $\beta = \frac{k_p}{k_e}$ و $\mu = \frac{d_m}{d_y}$ باشد، رابطه‌ی (۸) به شکل زیر نوشته می‌شود:

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

رابطه‌ی (۹) میرای چرخه‌ای را بر حسب ضریب شکل‌پذیری (μ) و نسبت سختی (β) بیان می‌کند.



شکل ۱- نحوه محاسبه میرایی ویسکوز معادل [۳۶]



شکل ۲- رابطه دوخطی نیرو-جابجایی

۲-۲- سختی معادل و میرایی چرخه‌ای مهاربندهای

کوماتش‌ناپذیر چند هسته‌ای در حالت موازی

شکل (۳) BRB پیشنهادی با سه هسته تسلیمی که به صورت موازی بسته شده‌اند را نمایش می‌دهد. شکل (۴) نمودار نیرو-جابجایی این BRB را نشان داده است. هر یک از n هسته تسلیمی می‌تواند دارای خصوصیات مصالح و هندسی مختلفی باشد ولی در اندرکنش با دیگران عمل کند. نمودار بار تغییرمکان هر یک از هسته‌های تسلیمی دوخطی فرض شده ولی نمودار بار تغییرمکان سیستم معادل به صورت چندخطی می‌باشد. در نمونه‌های آزمایشگاهی BRBها، در طی بارگذاری هیچ‌گونه افت مقاومت و سختی مشاهده نشده است [۲۹]. بنابراین در ترکیب موازی، هر یک از

۲-۳- تحلیل پوش‌آور تطبیقی مبتنی بر تغییر مکان^۲

در تحلیل پوش‌آور غیرتطبیقی آنتونیو و پینهو (۲۰۰۴) یک شیوه ابتکاری بر اساس تغییر مکان ارائه کردند که در این شیوه با توجه به اینکه از مشخصات مودی جاری سازه جهت الگوی بار استفاده می‌شود، تغییر سختی و مقاومت در آن منظور می‌گردد [۳۷]. الگوریتم روش پیشنهادی در چهار مرحله اصلی به شرح زیر است،

الف) تعریف بردار بار اسمی U و جرم اینرسی

ب) محاسبه ضریب بار λ

ج) محاسبه بردار مقیاس همپایه شده

د) بهنگام نمودن بردار تغییر مکان.

بین بردار بار اسمی، ضریب بار و بردار بار رابطه زیر برقرار است:

$$U = \lambda U \quad (۱۷)$$

بردار مقیاس همپایه شده \bar{D} ، جهت تعیین شکل بردار بار افزایشی به کار می‌رود و در ابتدای هر گام محاسبه می‌شود. جهت مشخص نمودن این بردار، در ابتدای هر گام یک آنالیز مودال به منظور انعکاس سختی جاری سازه که حاصل آن ضریب مشارکت مودی و مود شکل‌ها می‌باشد، انجام می‌شود. بارهای مودی را می‌توان به یکی از روش‌های SRSS یا CQC ترکیب نمود [۴۰]. بهنگام نمودن بردار بار در DAP به دو شیوه زیر انجام می‌گیرد:

۱- مقیاس بر اساس تغییر مکان جانبی طبقات

۲- مقیاس بر اساس تغییر مکان نسبی داخلی طبقات

مراحل انجام آزمایش

۱-۴- ساخت نمونه‌ها

در این مقاله، دو نمونه BRB مورد آزمایش قرار گرفته است. نمونه‌ی اول BRB معمولی به صورت تک‌هسته‌ای که با کد BRB-۱ نام‌گذاری شده است و نمونه‌ی دوم BRB سه هسته‌ای با کد BRB-۳ می‌باشد. نمونه‌ها در مقیاس یک دوم ساخته شده‌اند. مشخصات و جزئیات BRBها در شکل (۵) ارائه شده است. به منظور جلوگیری از کمانش کلی BRBها، سختی خمشی غلاف فولادی مطابق با رابطه‌ی (۱) در طراحی باید به اندازه کافی در نظر گرفته شود. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، طول هسته‌ی فولادی برای هر دو نمونه ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. هسته فولادی در BRB-۱ از ورق فولادی با تنش تسلیم متوسط (معمول) و در BRB-۳ 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 BRB-۱ ناحیه پلاستیکی از یک هسته به طول ۶۰۰ میلی‌متر و ابعاد $۴ \times ۳۶/۵$

اثر ساختگاه نیز با استفاده از طیف پاسخ مربوطه می‌تواند در تعریف الگوی بار اعمال گردد. در روش مذکور قبل از هر افزایش بار بر اساس وضعیت سختی جاری سازه یک آنالیز مودال انجام می‌گیرد و نیروی طبقات در هر مود طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۳۷]:

$$F_{ij} = \Gamma_j \Phi_{ij} W_i S_a(j) \quad (۱۴)$$

که در رابطه (۱۴): i : شماره طبقه، j : شماره مود، N : تعداد مودهای منظور شده در تحلیل، Φ_{ij} : مقدار مود شکل طبقه i ام در مود j ام که به جرم همپایه شده است، W_i : وزن طبقه i ام، $S_a(j)$: ضریب طیف پاسخ مود j ام و Γ_j : ضریب مشارکت مودی مود j ام می‌باشد. سپس نیروهای حاصل شده از هر مود به طور یکنواخت به نسبت به برش پایه افزایشی از پیش تعریف شده ΔV و برش پایه V که از SRSS برش‌های پایه مودی به دست آمده است طبق رابطه (۱۵) مقیاس می‌گردند:

$$V_j = \frac{\Delta V}{V} V_j, \quad F'_{ij} = S_n \cdot F_{ij} \\ = \frac{\Delta V}{V} F_{ij} \quad (۱۵)$$

با استفاده از هر الگوی مودی یک تحلیل استاتیکی به طور مستقل انجام می‌گیرد. اثرات به دست آمده از هر آنالیز با یکدیگر به روش SRSS ترکیب و به مقدار نظیر خود در گام قبلی افزوده می‌شوند. در انتهای گام جاری سختی سازه جهت انجام آنالیز مودال برای گام بعدی محاسبه می‌گردد.

آنتونیو و پینهو (۲۰۰۵) از الگوهای بهنگام شده‌ای استفاده نمودند که اثر تمام مودها به طور همزمان در یک بردار منظور شده بود. در شیوه ارائه شده توسط لی فورت الگوی بار در هر گام بر اساس مشخصات مودی جاری سازه بعلاوه بردار نیرو در گام قبلی بر اساس رابطه (۱۶) حاصل می‌شود [۳۸].

$$F_i = \frac{W_i \sqrt{\sum_{j=1}^m (\Phi_{ij} \cdot \Gamma_j)^2}}{\sum_{L=1}^N W_L \sqrt{\sum_{j=1}^m (\Phi_{Lj} \cdot \Gamma_j)^2} + F_i^{old}} \cdot \Delta V_b \quad (۱۶)$$

که در رابطه (۱۶): i : شماره طبقه، j : شماره مود، Γ_j : ضریب مشارکت مودی مود j ام، Φ_{ij} : مقدار شکل مودی طبقه i ام و مود j ام که به جرم همپایه شده است، m : تعداد مود منظور شده در آنالیز، N : تعداد طبقات ساختمان و ΔV_b : برش پایه افزایشی در هر گام می‌باشند. روش دیگری توسط پاپانیکولاو و الناشای (۲۰۰۰) ارائه گردید. در این شیوه نیز الگوی بار در خلال آنالیز ثابت نمی‌ماند و در هر گام طبق مشخصات دینامیکی سازه و طیف ساختگاه، اصلاح می‌گردد [۳۹].

میلی‌متر و عرض ۱۰۰ میلی‌متر و ناحیه انتقالی از محدوده غیرتسلیمی محدود به ناحیه نامحدود به طول ۵۰ میلی‌متر و عرض ۱۴۰ میلی‌متر، ناحیه غیرتسلیمی جهت اتصال به گاست‌پلیت به عرض ۱۴۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. در هر دو طرف هسته در ناحیه غیر تسلیمی از ورق سخت‌کننده با ابعاد مقطع ۶×۴۰ میلی‌متر به طول ۳۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. جهت ساخت نمونه، ابتدا هسته‌ی فولادی به گریس آغشته شده و سپس درون غلاف فولادی قرار داده می‌شود. جهت ریختن بتن درون غلاف، BRB به صورت قائم قرار گرفته می‌شود. در نهایت، انتهای باز BRB با استفاده از جوشکاری ورق فولادی بسته می‌شود. در شکل (۶) نمونه ساخته شده همراه با جزئیات نشان داده شده است.

BRB-۳: این BRB مشابه BRB-۱ می‌باشد با این تفاوت که هسته فولادی در این BRB به تعداد ۳ عدد به طول ۶۰۰ میلی‌متر و ابعاد ۱۵×۳ میلی‌متر و مجموع سطح مقطع ۱۳۵ میلی‌متر مربع و ظرفیت کششی الاستیک ۳۵۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع که به ترتیب شامل $ST_{۳۷}$ ، $ST_{۳۳}$ ، $ST_{۵۲}$ می‌باشد. در شکل (۷) نمونه ساخته شده همراه با جزئیات نشان داده شده است.

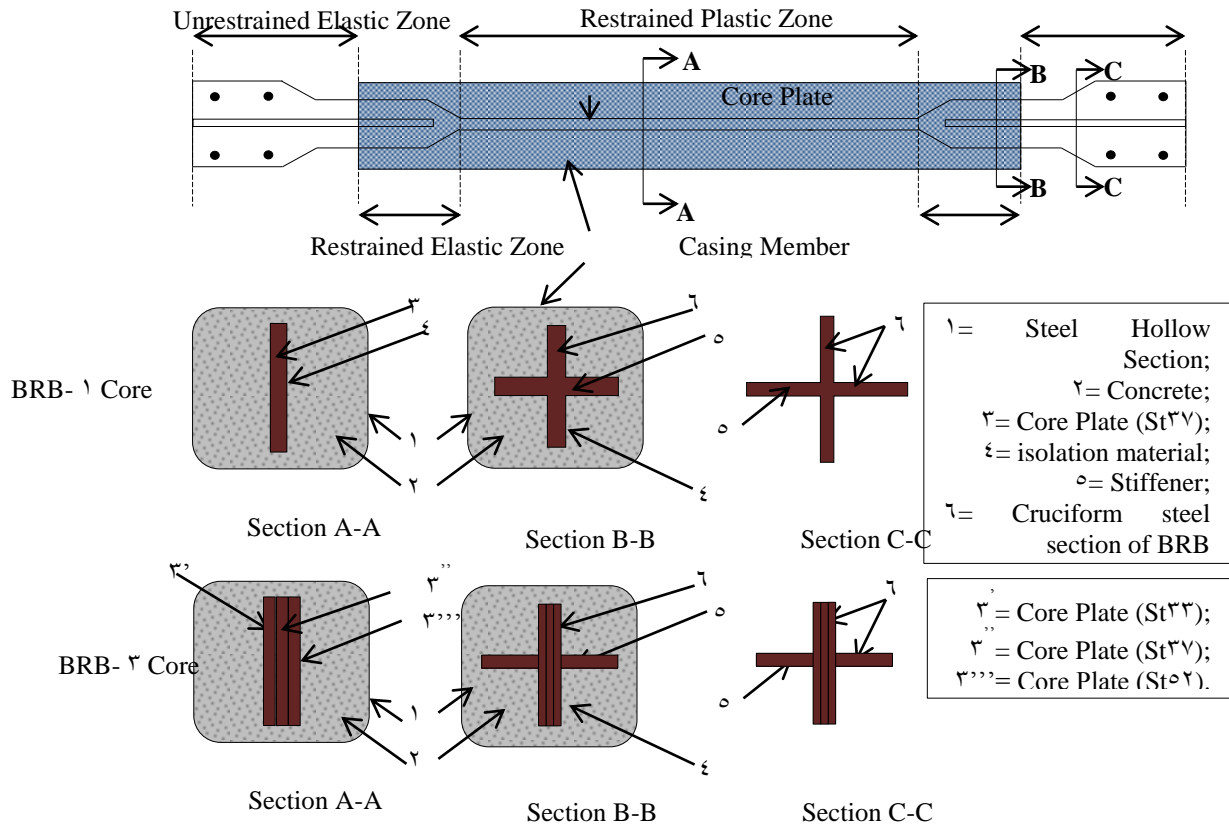
میلی‌متر و در BRB-۳ از سه عدد هسته به ابعاد ۱۵۰×۳ میلی‌متر تشکیل شده است. (۲) در محدوده الاستیک محدود به طول ۱۵۰ میلی‌متر (در بخش B-B در شکل (۵) عرض مقطع از ۱۵ به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند). در این محدوده از دو عدد سخت‌کننده در دو طرف به صورت صلیبی جهت بالا بردن سختی خمشی و جلوگیری از کمانش استفاده شده است. (۳) در محدوده الاستیک بدون محدودیت به طول ۲۳۰ میلی‌متر، عرض مقطع از ۱۰۰ به ۱۴۰ میلی‌متر جهت اتصال به ورق گاست پلیت افزایش یافته است و همچنین از دو عدد سخت‌کننده به صورت صلیبی استفاده شده است.

مواد جداکننده هسته از غلاف برای همه اعضای BRB گریس می‌باشد. در محل اتصال مهاربند به گاست پلیت، ۴ عدد سوراخ به قطر ۱۴ میلی‌متر جهت پیچ $M14$ تعبیه شده است. همچنین پیچ‌ها طبق شرایط لرزه‌ای AISC [۴۱] طراحی و مقاومت بحرانی لغزشی پیچ‌ها مطابق با معادله (۱۸) به دست آمده است.

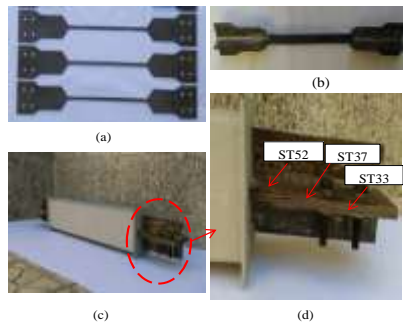
$$R_n = \mu D_u h_{sc} T_b N \quad (18)$$

R_n مقاومت بحرانی لغزشی یک پیچ؛ μ ضریب لغزش؛ D_u نشان دهنده نسبت پیچ میانی به حداقل پیچ مشخص شده و برابر با $1/13$ 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 حداکثر سنگ دانه با قطر ۵ میلی‌متر به همراه فوق‌روان‌کننده ساخته شده است. برای هر BRB مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد ۲۸ روزه ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. در ادامه جزئیات هر نمونه آزمایشگاهی به صورت مجزا آورده شده است.

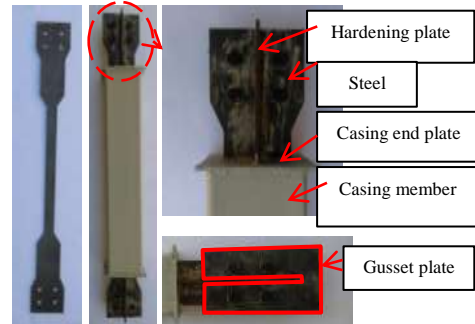
BRB-۱: غلاف فولادی شامل یک مقطع قوطی توخالی فولادی $۵ \times ۱۲۰ \times ۱۲۰$ میلی‌متر به طول ۹۰۰ میلی‌متر می‌باشد. بتن درون غلاف با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال و ماده جداکننده (گریس) در اطراف هسته‌ی فولادی به ضخامت $۰/۵$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. هسته فولادی از ورق $ST_{۳۷}$ به طول ۶۰۰ میلی‌متر و ابعاد $۴ \times ۳۶/۵$ 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



شکل ۵- شماتیک مهارندهای تک و سه هسته‌ای



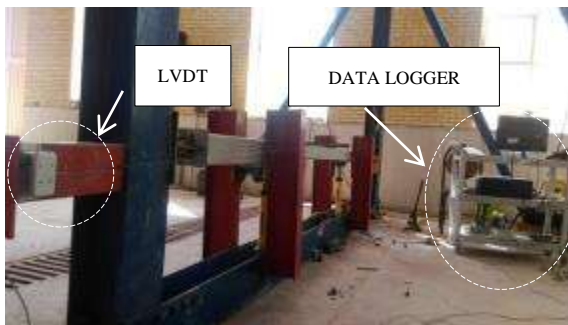
شکل ۷- جزئیات مهارنده سه هسته‌ای.



شکل ۶- جزئیات مهارنده تک هسته‌ای

۴-۲- ابزار دقیق و بارگذاری

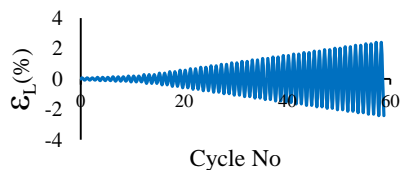
دستگاه تست کشش و فشار (قاب صلب) شامل یک قاب فولادی با کف صلب به موازات زمین می‌باشد. این کف صلب (IPE) بر روی دو عدد ریل قرار گرفته است که ابتدا و انتهای آن مجهز به نیروسنج و کرنش‌سنج می‌باشد. اعمال نیرو به صورت دستی توسط اپراتور دستگاه به وسیله‌ی یک شیر کنترل میزان فشار و کشش انجام می‌شود. جک مورد استفاده دارای قابلیت اعمال نیروی فشاری با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن و ظرفیت کششی ۱۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد. مقادیر تغییر شکل‌های محوری در مانیتور (DATA LOGGER) متصل به دستگاه ثبت و ذخیره 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-۲۴ [۴۲] جهت اعمال به نمونه‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. تغییر طول نسبی (تغییر شکل محوری عضو تقسیم بر طول کل عضو) و منحنی هیستریزس، در هر نمونه به عنوان معیاری برای مقایسه‌ی پارامترهای لرزه‌ای مهاربندهای تک‌هسته‌ای و سه‌هسته‌ای استفاده می‌شود.



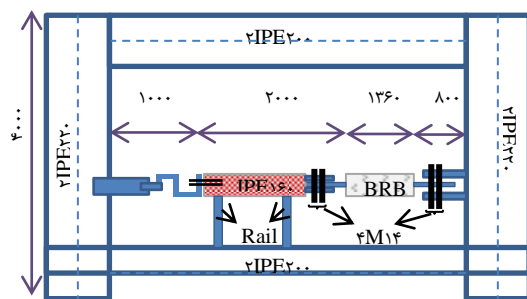
(C)

شکل ۸- شکل‌های (A)، (B) و (C) تنظیمات دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. (واحدها بر حسب میلی‌متر هستند)

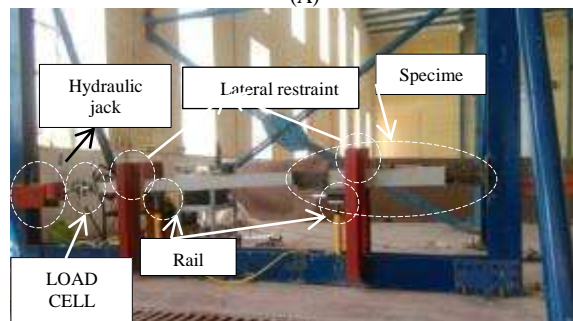
دامنه‌ی بارگذاری چرخه‌ای برای تغییر طول نسبی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد طبق پروتکل بارگذاری ATC-۲۴ برای اعمال به نمونه‌ها انتخاب گردید. در این آزمایش به علت این که میزان نیروی فشاری و کششی به BRBها به صورت دستی قابل کنترل می‌باشد و فقط با چرخاندن شیر فشار هیدرولیکی به صورت دستی توسط اپراتور امکان‌پذیر است قاعدتاً دارای خطا و تغییراتی با پروتکل انتخابی می‌باشد. از همین رو پروتکل اعمال شده‌ی واقعی برای نسبت تغییر طول نسبی ۰/۲۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۱/۸، ۲/۲ و ۲/۵ درصد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. لذا مقایسه‌ی پارامترهای لرزه‌ای در هر دو نمونه از طریق این پروتکل واقعی صورت گرفته است. شکل (۱۱) نحوه‌ی کماتش مهاربند سه هسته‌ای را بعد از اعمال بارگذاری محوری نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هسته با سختی خمشی دارای یک فاصله ۵ میلیمتری با غلاف می‌باشد، با افزایش بار محوری کماتش در هسته‌ی فولادی و ایجاد کماتش در هسته، نیروی اصطکاک بین هسته و غلاف اتفاق می‌افتد و مودهای کماتش گسترش می‌یابد.



شکل ۹- پروتکل بارگذاری انتخابی از ATC-۲۴ [۴۲]

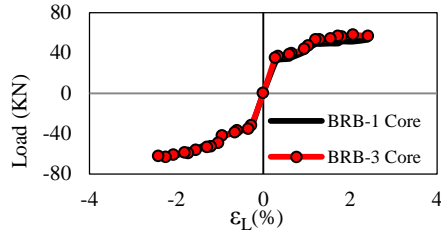


(A)

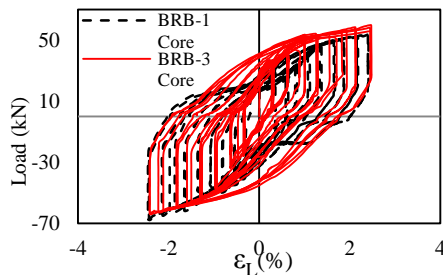


(B)

صورت ملایم و با شیب یکنواخت و با انحنای محدب از ناحیه الاستیک وارد ناحیه پلاستیک می‌شود (شکل ۱۳).



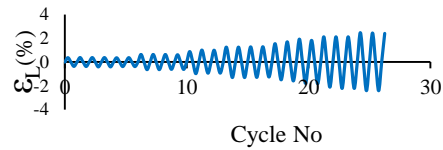
شکل ۱۲- حداکثر ظرفیت اسمی فشاری و کششی هسته‌ی تسلیم



شکل ۱۳- منحنی هیستریزس مهاربندهای تک و سه هسته‌ای

در شکل (۱۴) و جدول (۱) مقایسه حداکثر ظرفیت

جذب و استهلاک انرژی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تک و سه هسته‌ای نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که اختلاف ظرفیت جذب انرژی مهاربند تک هسته‌ای و سه هسته‌ای تا تغییر طول نسبی ۱٪ تقریباً ناچیز می‌باشد و ظرفیت جذب انرژی سه هسته‌ای ۱۰/۵۳٪ از تک هسته‌ای بالاتر می‌باشد. از تغییر طول نسبی ۱٪ درصد تا ۱/۵٪ این اختلاف ظرفیت جذب انرژی مشهودتر شده که همان طور که در شکل (۱۳) دیده می‌شود در این بازه مهاربند سه هسته‌ای پایداری چرخه‌ای هیستریزس خود را حفظ کرده ولی تک هسته‌ای دارای افت ظرفیت می‌باشد و این اختلاف در تغییر طول نسبی ۱/۵٪ درصد ۱۳/۱۹٪ می‌باشد. در تغییر طول نسبی ۱/۸٪ مهاربند سه هسته‌ای دارای رفتار پایدار و بدون افت با اختلاف ظرفیت جذب انرژی تقریباً ۱۷٪ نسبت به مهاربند تک هسته‌ای می‌باشد. از تغییر طول نسبی ۱/۸٪ به بالا افت نمودار ظرفیت جذب انرژی در هر دو مهاربند مشهود بوده و تا تغییر طول نسبی ۲/۵٪ با اختلاف ۱۶/۳٪ (جدول ۱) به پایان می‌رسد. به طور میانگین در تمامی تغییر طول‌ها مهاربند سه هسته‌ای از ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بالاتری نسبت به مهاربند تک هسته‌ای برخوردار است؛ که علت آن را می‌توان استفاده از فولاد با تنش تسلیم پایین (ST۳۳) و فولاد با تنش تسلیم بالا (ST۵۲) دانست.



شکل ۱۰- پروتکل بارگذاری اعمال شده‌ی واقعی



شکل ۱۱- کمانش هسته مهاربند سه هسته‌ای بعد از بارگذاری

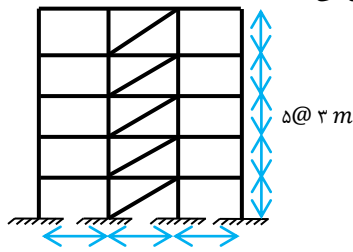
۵- تفسیر نمودارهای آزمایشگاهی

در این تحقیق دو نمونه‌ی کامل از مهاربند تک و سه هسته‌ای مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج زیر بر اساس پاسخ‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های آزمایش شده می‌باشد. جهت مقایسه نتایج حاصل از بارگذاری چرخه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تک و سه هسته‌ای ضرورت دارد که هر دو مهاربند در هر سیکل بارگذاری از حداکثر ظرفیت فشاری و کششی اسمی تقریباً یکسانی در ناحیه‌ی الاستیک و پلاستیک برخوردار باشند. از این رو ابعاد هسته تسلیمی طوری انتخاب گردید که از ظرفیت باربری یکسانی برخوردار باشند. شکل (۱۲) حداکثر ظرفیت اسمی فشاری و کششی هسته‌ی تسلیم مربوط به دو مهاربند را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است هر دو مهاربند ظرفیت باربری تقریباً یکسانی دارند. و این نمودار نشان می‌دهد که جهت ایجاد تغییر طول نسبی مشخص در هر کدام از BRBهای تک و سه هسته‌ای از نیروی کششی و فشاری تقریباً یکسانی استفاده شده است. در شکل (۱۳) منحنی چرخه‌ای هیستریزس مهاربندهای تک و سه هسته‌ای نشان داده شده است. این ارقام نشان‌دهنده‌ی نیرو بر حسب تغییر طول نسبی هسته‌ی تسلیمی می‌باشند. مقدار جابجایی از روی کرنش سنج دستگاه اندازه‌گیری شده است. از این رو، جابجایی متوسط طول بخش پلاستیکی (۶۰۰ میلی- متر) هسته‌ی تسلیمی لحاظ شده است. همان طور که مشخص است حلقه‌ی هیستریزس مهاربند سه هسته‌ای نسبت به مهاربند تک هسته‌ای ای‌چاق‌تر 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 لرزه‌ای بهتری برخوردار می‌باشد. همانطور که در شکل (۴) توضیح داده شد، وقتی که هسته‌های تسلیمی با تنش‌های تسلیم مختلف شامل فولاد ST۳۳، ST۳۷ و ST۵۲ به صورت موازی در کنار یکدیگر تحت نیروی کششی قرار می‌گیرند، در مرحله‌ی اول ابتدا فولاد ST۳۳ وارد ناحیه پلاستیک می‌شود و دو فولاد دیگر در ناحیه الاستیک قرار دارند، در مرحله‌ی دوم فولاد ST۳۳ و ST۳۷ وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند و فولاد ST۵۲ هنوز در ناحیه الاستیک قرار دارد؛ در مرحله سوم هر سه هسته‌ی فولادی وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند و این چرخه مهاربند سه هسته‌ای به

۶- مراحل انجام تحلیل غیر خطی

۶-۱- مدل سازی قاب

قاب‌های ارائه شده در این رساله در ۵ طبقه و هر قاب در دو حالت شامل قاب خمشی فولادی همراه با مهاربند کمانش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای و قاب خمشی فولادی همراه با مهاربند کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای استفاده شده است. ارتفاع تمام طبقات ۳ متر و دارای ۳ دهانه مساوی با طول ۵ متر می‌باشند. در این تحقیق ابتدا مدل‌های دو بعدی قاب‌ها طبق اصول آیین نامه ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم و توسط نرم‌افزار Etabs تحلیل گردیده و سپس طراحی شده است. در مدل‌سازی خاک نوع لحاظ گردیده است. آنالیز لرزه‌ای پوش‌آورتطبیقی توسط نرم‌افزار SeismoStruct انجام گرفته است [۴۳]. در شکل (۱۶) نمونه‌ای از قاب خمشی فولادی به همراه مهاربند کمانش‌ناپذیر در حالت قطری و جدول (۳) مقاطع تیر و ستون را نشان می‌دهد.



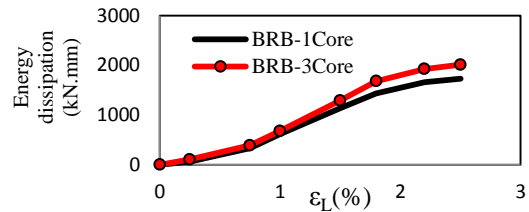
شکل ۱۶- قاب خمشی ۵ طبقه با مهاربند کمانش‌ناپذیر قطری

جدول ۳- مقاطع تیر و ستون به کار رفته در قاب خمشی فولادی ۵ طبقه

STORY	COLUMN		BEAM
	EXTERIOR	INTERIOR	
۱	W14X207	W14X283	W14X99
۲	W14X207	W14X283	W14X99
۳	W14X207	W14X283	W14X99
۴	W14X207	W14X283	W14X99
۵	W14X207	W14X283	W14X99

۶-۲- مشخصات زلزله‌های به کار رفته

در این مطالعه از ۲۲ شتاب‌نگاشت حوزه دور مطابق آیین‌نامه FEMA-۶۹۵ برای آنالیز پوش‌آورتطبیقی استفاده شده است [۴۴].



شکل ۱۴- مقایسه حداکثر ظرفیت جذب و استهلاک انرژی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای

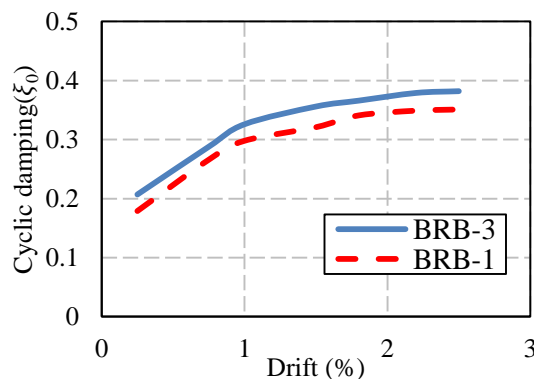
جدول ۱- مقایسه عددی حداکثر ظرفیت جذب و استهلاک انرژی

Dissipation energy (kN.mm)		Changes (%)
BRB-۱ Core	BRB-۳ Core	
۱۷۳۸.۴۱	۲۰۱۰.۱۹	۱۶.۳۰

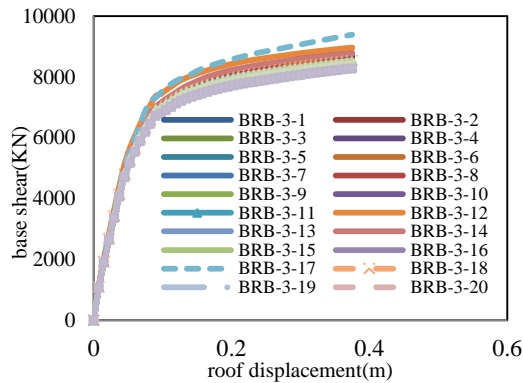
در منحنی میرایی مهاربند سه‌هسته‌ای تقریباً با یک شیب یکنواخت در تمامی تغییر طول‌ها (تغییر طول نسبی ۰/۲۵٪ تا ۲/۵٪) به صورت تقریباً یکنواخت از میرایی بالاتری نسبت به مهاربند تک‌هسته‌ای برخوردار می‌باشد (شکل ۱۵). همانطور که در جدول (۲) و شکل (۱۵) مشخص است، میرایی از تغییر طول نسبی ۰/۲۵٪ تا ۱٪ دارای اختلاف معادل ۱۵/۶٪ است. در تغییر طول نسبی ۱٪ تا ۱/۵٪ این اختلاف حداکثر شده و معادل ۱۰/۱٪ می‌باشد. در نهایت در تغییر طول نسبی ۲/۵٪ اختلاف میرایی مهاربند سه‌هسته‌ای نسبت به تک‌هسته‌ای ۸/۸٪ بالاتر می‌باشد. در نتیجه می‌توان از این اختلاف میرایی در جهت جذب انرژی بالاتر در چرخه‌های رفت و برگشتی بهره برد و به طور کلی می‌توان از ظرفیت بالاتر مهاربندهای سه‌هسته‌ای با اطمینان بیشتری در جایگزین مهاربندهای تک‌هسته‌ای استفاده کرد.

جدول ۲- مقایسه میرایی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای

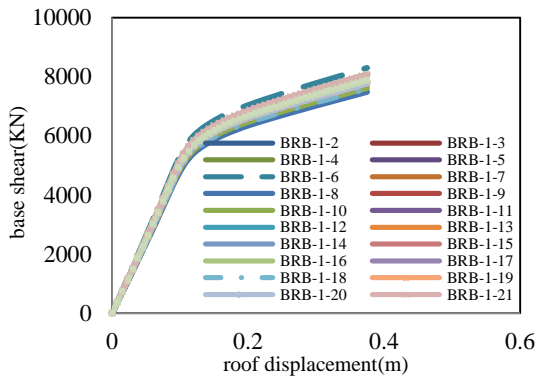
Drift (%)	BRB-۱			BRB-۳		
	Ed	Es	ξ_o (%)	Ed	Es	ξ_o (%)
۰.۲۵	۶۴.۹	۲۸.۸	۱۷.۹	۱۰۳.۶	۳۹.۸۵	۲۰.۷
۰.۷۵	۳۳۱.۰	۹۸.۸	۲۶.۶	۳۸۸.۸۲	۱۰۷.۴۹	۲۸.۸
۱	۶۱۳.۱	۱۶۳.۴	۲۹.۸	۶۷۷.۶۵	۱۶۵.۵۰	۳۲.۶
۱.۵	۱۱۴۰.۰	۲۸۲.۹	۳۲.۱	۱۲۹۰.۴۳	۲۸۸.۶۰	۳۵.۶
۱.۸	۱۴۳۳.۷	۳۳۴.۵	۳۴.۱	۱۶۷۸.۸۵	۳۶۵.۲۱	۳۶.۶
۲.۲	۱۶۵۶.۸	۳۷۷.۰	۳۴.۹	۱۹۲۲.۷۵	۴۰۳.۹۲	۳۷.۹
۲.۵	۱۷۳۸.۴	۳۹۱.۶	۳۵.۱	۲۰۱۰.۱۹	۴۱۸.۸۰	۳۸.۲



شکل ۱۵- مقایسه میرایی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای



شکل ۱۷- نمودارهای ظرفیت قاب خمشی فولادی ۵ طبقه با مهاربند کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای با استفاده از طیف ۱ تا ۲۲.



شکل ۱۸- نمودارهای ظرفیت قاب خمشی فولادی ۵ طبقه با مهاربند کمانش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای با استفاده از طیف ۱ تا ۲۲.

جدول (۵) میانگین ضریب رفتار قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربندهای تک و سه‌هسته‌ای حاصل از تحلیل پوش‌آورتطبیقی تحت طیف ۲۲ شتاب‌نگاشت را نشان می‌دهد. ضریب رفتار قاب مجهز به مهاربند سه‌هسته‌ای ۹/۱۴ و قاب مجهز به مهاربند تک‌هسته‌ای ۸/۱۱ می‌باشد. ظرفیت لرزه‌ای قاب مجهز به مهاربند سه‌هسته‌ای ۱۲/۷٪ بالاتر از قاب مجهز به مهاربند تک‌هسته‌ای می‌باشد، در نتیجه با اطمینان بیشتری در مناطق لرزه‌خیزی زیاد و خیلی زیاد می‌توان از مهاربندهای سه‌هسته‌ای استفاده نمود.

نوع و تعداد طبقات قاب	R
قاب خمشی فولادی با مهاربند کمانش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای	۹/۱۴
قاب خمشی فولادی با مهاربند کمانش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای	۸/۱۱

جدول ۵- میانگین ضریب رفتار قاب خمشی فولادی ۵ طبقه + مهاربند کمانش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای

جدول ۴- ۲۲ شتاب‌نگاشت آیین‌نامه ۶۹۵ FEMA برای حوزه دور [۴۴]

شماره	نام زلزله	شماره ب	شماره زلزله	نام زلزله	شتاب زلزله
۱	Northridge-Beverly Hills-Mulhol	۰.۵۲	۱۲	Landers Coolwater	۰.۴۲
۲	Northridge-Canyon-WLC	۰.۴۸	۱۳	Loma Prieta Capitola	۰.۵۳
۳	Duzce, Turkey-Bolu	۰.۸۲	۱۴	Loma Prieta Gilroy Array	۰.۵۶
۴	Hector Mine Hector	۰.۲۴	۱۵	Manjil, Iran	۰.۵۱
۵	Imperial Valley Delta	۰.۳۵	۱۶	Superstition Hills El Centro.	۰.۳۶
۶	Imperial Valley El Centro	۰.۲۸	۱۷	Superstition Hills Poe Road	۰.۴۵
۷	Kobe, Japan Nishi-Akashi	۰.۵۱	۱۸	Cape Mendocino Rio	۰.۵۵
۸	Kobe, Japan Shin-Osaka	۰.۲۴	۱۹	Chi-Chi, Taiwan CHY۱۰۱	۰.۴۴
۹	Kocaeli, Turkey Duzce	۰.۳۶	۲۰	Chi-Chi, Taiwan TCU۰۴۵	۰.۵۱
۱۰	Kocaeli, Turkey Arcelik	۰.۲۲	۲۱	San Fernando LA - Hollywood	۰.۲۱
۱۱	Landers Yermo Fire Station	۰.۲۴	۲۲	Friuli, Italy Tolmezzo	۰.۳۵

۷- تفسیر گرافها و نتایج تحلیلی

شکل (۱۷) و (۱۸) منحنی ظرفیت انرژی قاب پنج طبقه با مهاربند کمانش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای حاصل از آنالیز پوش‌آورتطبیقی غیرخطی تحت طیف ۲۲ شتاب‌نگاشت جدول (۳) را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نیروی برشی الاستیک ماکزیمم هر دو قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند تک و سه‌هسته‌ای حدوداً به مقدار ۹۰۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد؛ در منحنی قاب خمشی فولادی به همراه مهاربند تک و سه‌هسته‌ای تغییر مکان ماکزیمم الاستیک حدوداً در نقطه ۰/۴ متر اتفاق افتاده است. کاملاً مشهود می‌باشد که سطح زیر منحنی مهاربند سه‌هسته‌ای (شکل ۱۷) بیشتر می‌باشد، که نشان از ظرفیت بیشتر جذب انرژی قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند سه‌هسته‌ای نسبت به تک‌هسته‌ای دارد. (در کلیه نمودارها، اعداد اول و دوم بعد از BRB به ترتیب عدد اول به معنای مهاربند تک یا سه‌هسته‌ای و عدد دوم به معنای شماره شتاب‌نگاشت برگرفته از جدول شماره (۴) می‌باشد).

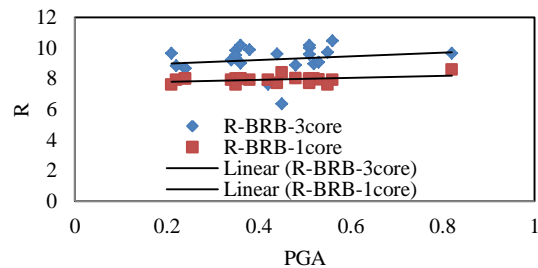
۸- نتیجه گیری

مهارندهای کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای طبق نتایج و نمودارهای حاصل از بارگذاری چرخه‌ای رفتار بهتری نسبت به مهارندهای تک‌هسته‌ای از خود نشان می‌دهند. منحنی هیستریزیس مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای در تمامی سیکل‌های بارگذاری با یک شیب ثابت و به شکل محدب از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک وارد شده است، در نتیجه با توجه به اینکه ظرفیت شکل‌پذیری مهارند تحت بارهای لرزه‌ای در ناحیه پلاستیک بسیار با اهمیت می‌باشد، مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای را می‌توان با اطمینان بیشتری در سازه‌ها به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی استفاده نمود. خلاصه نتایج حاصل از نمودارهای آزمایشگاهی و تحلیلی به شرح زیر می‌باشد:

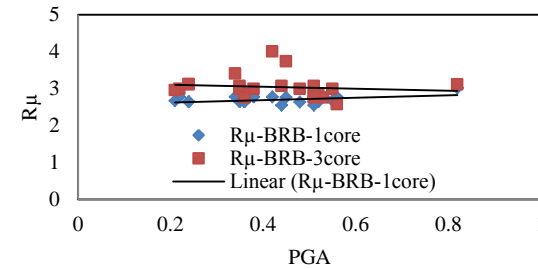
- ۱- چرخه هیستریزیس مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای بعد از ناحیه‌ی خطی دارای شکل محدب یا به اصطلاح لوپ چاق‌تر نسبت به مهارند تک‌هسته‌ای می‌باشد؛
- ۲- چرخه هیستریزیس مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای در تغییر طول نسبی ۱٪ به بالا رفتار پایدارتری (شکل محدب نمودار هیستریزیس در سیکل‌های بارگذاری) نسبت به مهارند کماتش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای از خود نشان می‌دهد؛
- ۳- در تغییر طول نسبی ۲/۵٪ درصد ظرفیت جذب و استهلاک انرژی مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای ۱۶/۳٪ از مهارند کماتش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای بالاتر می‌باشد؛
- ۴- نمودار میرایی مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای تقریباً با یک شیب یکنواخت در تمامی تغییر طول‌ها از ظرفیت بالاتری برخوردار می‌باشد؛
- ۵- در تغییر طول نسبی ۲/۵٪ اختلاف میرایی مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای نسبت به مهارند کماتش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای ۸/۸٪ بالاتر می‌باشد.
- ۶- تفاوت ظاهری مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای نسبت به مهارند کماتش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای، جایگزینی سه‌هسته تسلیمی به جای تک‌هسته تسلیمی می‌باشد، لذا با توجه به ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بالاتر مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای، اضافه هزینه قابل ملاحظه‌ای در ساخت مهارند کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای نسبت به مهارند کماتش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای وجود ندارد.

ضریب رفتار بدست آمده با استفاده از آنالیز استاتیکی پوش‌آور تطبیقی برای قاب خمشی فولادی مجهز به مهارند کماتش‌ناپذیر

نمودارهای خطی (۱۹) میانگین شتاب زلزله در مقابل ضریب رفتار قاب خمشی فولادی مجهز به مهارند تک و سه‌هسته‌ای را نشان می‌دهد و نمودارهای خطی شکل (۲۰) میانگین شتاب زلزله در مقابل ضریب کاهش نیرو بر اثر شکل‌پذیری قاب خمشی فولادی مجهز به مهارند تک و سه‌هسته‌ای را نشان می‌دهد که حاصل آنالیز پوش‌آور تطبیقی ۲۲ شتاب‌نگاشت جدول (۴) می‌باشند؛ با قرار دادن PGA از طریق نمودارهای فوق می‌توان ضریب رفتار و ضریب کاهش نیرو بر اثر شکل‌پذیری را برای قاب خمشی فولادی با مهارند کماتش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای را به دست آورد. جدول (۶) معادله خطی حاصل از نمودارهای (۱۹) و (۲۰) می‌باشد، با جایگذاری PGA منطقه می‌توان ضریب کاهش نیرو بر اثر شکل‌پذیری و ضریب رفتار را برای قاب خمشی فولادی مجهز به مهارندهای کماتش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای به دست آورد. با توجه به اینکه مهارندهای کماتش‌ناپذیر سه‌هسته‌ای از عملکرد لرزه‌ای مطلوبی برخوردار بودند، پس با داشتن شتاب زلزله مناطق با خطر لرزه‌خیزی زیاد و خیلی زیاد و در سازه‌های با اهمیت بالا می‌توان ضریب رفتار سازه را به دست آورد.



شکل (۱۹): نمودار ضریب رفتار در مقابل شتاب قاب خمشی فولادی ۵ طبقه + مهارند کماتش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای از طیف ۱ تا ۲۲.



شکل (۲۰): نمودار ضریب کاهش نیرو بر اثر شکل‌پذیری در مقابل شتاب قاب خمشی فولادی ۵ طبقه + مهارند کماتش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای از طیف ۱ تا ۲۲.

جدول ۶- معادله خط برگرفته از R, R_{μ} در مقابل PGA قاب خمشی فولادی ۵ طبقه + مهارند کماتش‌ناپذیر تک و سه‌هسته‌ای از طیف ۱ تا ۲۲.

قاب خمشی فولادی با مهارند کماتش‌ناپذیر	معادله خط	
	R	R_{μ}
تک‌هسته‌ای	$R=1.22PGA+8.8$	$R_{\mu}=-0.26PGA+3.20$
سه‌هسته‌ای	$R=-0.66PGA+7.66$	$R_{\mu}=-0.32PGA+2.56$

with a stiffened bracing system. Proc. 8th Can. Conf. Earthquake Engineering. ۱۹۹۹; ۵۴۹-۵۵۴.

- [۱۳] Fahnestock L, Ricles J, Sause R. Experimental evaluation of a large-scale buckling restrained braced frame. *J Struct Eng.* ۲۰۰۷; ۱۳۳(۹): ۱۲۰۵-۱۴.
- [۱۴] Della Corte G, D'Aniello M, Landolfo R. Field Testing of All-Steel Buckling Restrained Braces Applied to a Damaged Reinforced Concrete Building. *J Struct Eng.* ۲۰۱۵; ۱۴۱(۱): ۴۰۱-۴۰۴.
- [۱۵] Kumar R, Kumar S, yanaraman V. Behaviour of frames with non-buckling bracings under earthquake loading. *Journal of constructional steel Research.* ۲۰۰۷; ۶۳(۲): ۲۵۴-۲۶۲.
- [۱۶] Deulkar W, Modhera D, Patil H. Buckling restrained braces for vibration control of building structure. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences.* ۲۰۱۰; ۴(۴).
- [۱۷] Yang, Y. Liu, R. Xue, Y. Li, H. ۲۰۱۷. "Experimental study on seismic performance of reinforced concrete frames retrofitted with eccentric buckling-restrained braces (brbs)". *Earthquakes and Structures, An Int'l Journal.* ۱۲ (۱).
- [۱۸] Alvansazyazdi M, Khorami M, Shariati M, Zandi Y, Jalali A, Tahir M. Seismic performance evaluation of buckling restrained braced frames (brbF) using incremental nonlinear dynamic analysis method (IDA). *Earthquakes and Structures An Int'l Journal.* ۲۰۱۷; ۱۳(۶).
- [۱۹] Chaturvedi R, Sharma A, Islam A. Design analysis of BRB energy dissipated devices in commercial building structures. *Materials Today. Proceedings available.* ۲۰۲۱; corrected proof.
- [۲۰] Newell J, Uang C, Benzoni G. Sub assemblage testing of core brace buckling-restrained braces (G Series). ۲۰۰۳; San Diego: California, University of California.
- [۲۱] Hoveidae N, Rafezy B. Overall buckling behavior of allsteel buckling restrained braces. *J. Constr. Steel Res.* ۲۰۱۳; ۷۹: ۱۵۱-۱۵۸.
- [۲۲] Hosseinzadeh Sh, Mohebi B. Seismic evaluation of all-steel buckling restrained bracing finite element analysis. *J. Constr. Steel Res.* ۲۰۱۶; ۱۱۹: ۷۶-۸۴.
- سه‌هسته‌ای برابر با ۹/۱۴ و برای قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند کماتش‌ناپذیر تک‌هسته‌ای برابر با ۸/۱۱ به‌دست آمده است.
- ### ۹- مراجع
- [۱] Uang C-M, Nakashima M. Steel Buckling-Restrained Braced Frames. *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering.* ۲۰۰۴; ۴ (۲):۱۳۴-۲۰.
- [۲] Di Sarno L, Elnashai AS. Innovative strategies for seismic retrofitting of steel and composite structures. *Progress, Struct Eng Mater.* ۲۰۰۵; ۷(۳):۱۱۵-۳۵.
- [۳] Clark p, Aiken I, Kasai K, Kimura I. Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices. *Proc ۶۹th Annu Conv;* ۱۹۹۹; SEAOC.
- [۴] Black C.J, Makris N, Aiken I.D. Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained braces. *Report No. PEER;* ۲۰۰۲.
- [۵] Chen C, Chen S, Liaw J. Application of low yield strength steel on controlled plastification ductile concentrically braced frames. *Can. J. Civ. Eng.* ۲۰۰۱; ۲۸: ۸۲۳-۸۳۶.
- [۶] Higgins C, Newell J. Confined steel brace for earthquake resistance design. *AISC Eng. J (۴th Quart).* ۲۰۰۴; ۴۱(۴): ۱۸۷-۲۰۲.
- [۷] Takeuchi T, Hajjar J.F, Matsui R, Nishimoto K, Aiken I.D. Effect of local buckling core plate restraint in buckling restrained braces. *Eng. Struct.* ۲۰۱۲; ۴۴: ۳۰۴-۳۱۱.
- [۸] Watanabe A, Hitomi Y, Yaeki E, Wada A, Fujimoto M. Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube. *Proc. 9th World Conf. Earthquake Engineering.* ۱۹۸۸; ۱۹-۷۲۴.
- [۹] Lin Wu A, Tsai K. High-mode buckling responses of buckling-restrained brace core plates, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics.* ۲۰۰۴; ۳۲(۳):۳۷۵-۳۹۳.
- [۱۰] Zsornoczay A, Dunai I. Type Testing of Buckling Restrained Braces according to EN ۱۵۱۲۹-EWC۸۰۰. ۲۰۱۱; Budapest University of Technology and Economics.
- [۱۱] Jia M, Lu D, Guo L. Experimental research and cyclic behavior of buckling-restrained braced composite frame. *Journal of constructional Steel research.* ۲۰۱۴; ۹۵: ۹۰-۱۰۵.
- [۱۲] Tremblay R, Degrange G, Blouin J. Seismic rehabilitation of a four-story building

- unbonded braces. Pacific Earthquake Engineering Research Center. ۲۰۰۲.
- [۳۴] Merrit S, Uang C, Benzoni G. Sub assemblage testing of core braces buckling-restrained braces. ۲۰۰۳; San Diego, La Jolla, California: University of California.
- [۳۵] ATC A, Seismic evaluation and retrofit of concrete building, Applied Technology Council. Report ATC ۴۰. ۱۹۹۶.
- [۳۶] FEMA, Quantification of Building Seismic Performance Factors. ۲۰۰۹.
- [۳۷] Kunnath S.K. Identification of modal combination for nonlinear static analysis of building structures. Computer-aided Civil Engineering. ۲۰۰۰; ۱۹: ۲۴۶-۲۵۹.
- [۳۸] Pinho R, Antoniou S. A displacement-based adaptive pushover algorithm for assessment of vertically irregular frames. Proceedings of the ۴th European Workshop. ۲۰۰۵; Thessaloniki, Greece, ۲۶-۲۷ August.
- [۳۹] Papanikolaou K, Elnashai A, Pareja J. Limits of Applicability of Conventional and Advanced Pushover Analysis for Seismic Response Assessment. ۲۰۰۵; Mid-America Earthquake Center Research Report.
- [۴۰] Antoniou S. Pushover analysis for seismic design and assessment of RC structures. ۲۰۰۳; PhD thesis, Engineering Seismology and Earthquake Engineering Section, Imperial College, London, UK.
- [۴۱] AISC, Seismic Provisions for Structural Steel Building. ۲۰۰۵; Chicago.
- [۴۲] ATC ۲۴, Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures, ۱۹۹۲.
- [۴۳] Seismo Soft, SeismoStruct. A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures. ۲۰۰۴.
- [۴۴] FEMA ۶۹۶. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Washington (DC).
- [۲۳] Zhu L, Guo L, Zhou P, Bradford A, Pi Y. Numerical and experimental studies of corrugated web connected buckling restrained braces. Eng. Struct. ۲۰۱۷; ۱۳۴: ۱۰۷-۱۲۴.
- [۲۴] Palmer D, Roeder W, Lehman E, Okazaki T, Shield C. Experimental Performance of Steel Braced Frames Subjected to Bidirectional Loading. J. Struct. Eng. ۲۰۱۳; ۱۳۹: ۱۲۷۴- ۱۲۸۴.
- [۲۵] Aguaguiniña M, Zhou Y, Zhou Y. Loading protocols for qualification testing of BRBs considering global Engineering Structures. Eng Structures. ۲۰۱۹; ۱۸۹: ۴۴۰-۴۵۷.
- [۲۶] Zsarnoczay A, Dunai L. Type Testing of Buckling Restrained Braces according to EN ۱۵۱۲۹-EWC۸۰۰. ۲۰۱۱; Budapest University of Technology and Economics.
- [۲۷] Gholhaki M, Pachideh G. Investigating of damage indexes results due to presence of shear wall in building with various stories and spans. Int J Rev Life Sci. ۲۰۱۵; ۵(۱): ۹۹۲-۹۹۷.
- [۲۸] Pachideh G, Gholhaki M, Lashkari R, Rezaifar O. Behavior of BRB Equipped with a Casing Comprised of Steel and Polyamide. Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. ۲۰۲۰.
- [۲۹] Pachideh G, Gholhaki M, Saedi A. Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis. journal of structures. ۲۰۱۹; ۲۰: ۴۳۷-۴۵۱.
- [۳۰] Ozelik R, Dikiciasik Y, Erdil E. The development of the buckling restrained braces with new end restrains. Journal of Constructional Steel Research. ۲۰۱۷; ۱۳۸: ۲۰۸-۲۲۰.
- [۳۱] Junda E, Leelataviwat S, Doung P. Cyclic testing and performance evaluation of buckling-restrained knee-braced frames. Journal of Constructional Steel Research. ۲۰۱۸; ۱۴۸: ۱۵۴-۱۶۴.
- [۳۲] Tremblay R, Bolduc p, Neville r, Devall R. Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems. Canadian Journal of Civil Engineering. ۲۰۰۶; ۳۳(۲): ۱۸۳-۱۹۸.
- [۳۳] Black C, Makris N, Aiken I. Component testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained

Experimental and Seismic Analysis Performance of Three-core Buckling Restrained Braces

Ali Chigoi

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Mohammad Ali Rahgozar

Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Mohsen Izadnia

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract

In this paper, in order to improve the seismic behavior of BRBs, buckling-restrained braces with three parallel cores with different yield stress have been suggested and introduced. The buckling restrained 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. Then, the one and three core buckling braces were placed diagonally in a steel moment frame and their seismic performance and response modification factors were obtained using adaptive pushover analysis. The results indicated that the three core brace has 16.3% and 8.8% higher energy absorption and damping capacity. In addition, the damping in the three-core brace in drift 2.5% is 8.8% higher than the one core brace. Mean value of response modification factors for steel moment frame with one-core brace is 8.11 and steel moment frame with three-core brace is 9.14. In conclusion, the three-core brace has higher energy absorption and damping capacity and the ductility of the steel moment frame with the three core brace is higher than that of the frame with the one core brace, which presented the three-core brace has more acceptable seismic performance and is highly recommended for rehabilitation.

Keywords: Buckling, single core brace, three core brace, hysteresis cycle, adaptive pushover analysis.