

## رفتار کمانشی کلی مهاربندهای کمانش تاب تمام فولادی

سجاد کفاش زاده<sup>۱</sup>، حسن رمضانزاده کندی<sup>۲</sup>، محمد امین عظیمی راد<sup>۲</sup> و مجتبی اطهری زاده<sup>۲</sup>

۱-استاد دانشگاه، گروه عمران، دشته مهندسی راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیرجند

۲-دانشجوی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیرجند

### چکیده

یکی از ملزومات اصلی رفتار مکانیکی مطلوب مهاربندهای کمانش تاب (BRBs) تحت بارکنش شدید زمین لرزه، جلوگیری از کمانش سرتاسری است تا زمانی که قطعه مهاربند به تغییرشکل پلاستیک و شکل پذیری کافی برسد. این مقاله نتایج آنالیز المان محدود مهاربندهای تمام فولادی کمانش تاب را که پیشنهاد شده اند، ارائه می دهد. BRB های پیشنهادی دارای مقطع های مرکزی همانند ولی مکانیزم های کمانش ناپذیر (BRMs) متفاوت هستند. هدف از این آنالیز، انجام یک تحقیق پارامتری درباره BRB ها با مقدار شکاف متفاوت (بین هسته ۱ و BRM) و نواقص اولیه است تا رفتار کمانشی کلی مهاربند بررسی شود. نتایج این آنالیز نشان داد که سختی خمشی BRM می تواند تاثیر زیادی را بر رفتار کمانشی مهاربند بدون توجه به اندازه شکاف داشته باشد. بعلاوه، کمترین نسبت بار کمانشی اویلر قطعه گیردار به مقاومت تسلیم هسته ( $P_e/P_y$ ) به منظور طراحی پیشنهاد شد. این نسبت، پارامتر اصلی کنترل کننده ی کمانش کلی BRB ها است.

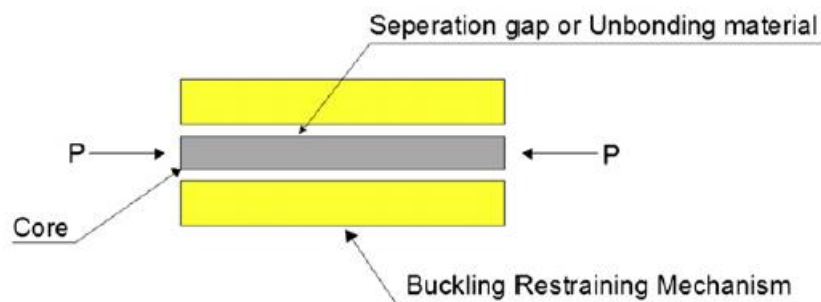
واژگان کلیدی: کمانشی، مهاربندی، خمشی BRM

## ۱- مقدمه

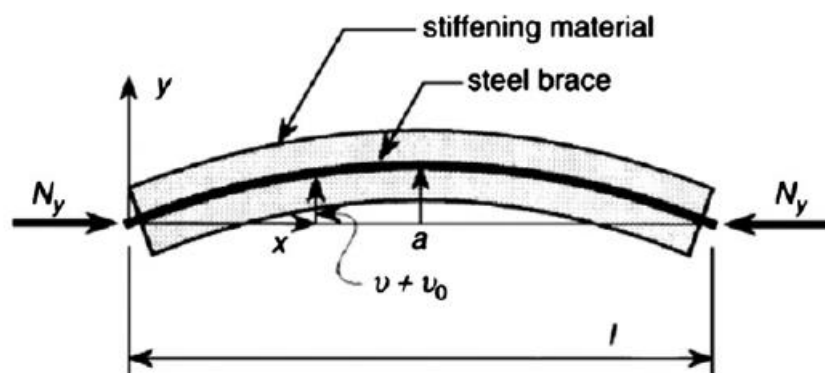
قاب های مهارشده کمانش تاب (BRBs) برای مقاومت بار لرزه ای کاربرد گسترده ای را در سالهای اخیر یافته اند. یک BRBF با یک قاب مهارشده متداول فرق دارد زیرا تحت تنش و تراکم بدون کمانش قابل توجهی، تسلیم می شود. بیشتر قطعات مهاربند کمانش تاب (BRB) موجود به وسیله قرار دادن یک صفحه فولادی درون یک لوله فولادی پرشده با ملات یا بتن ساخته می شوند. صفحه فولادی از کناره ها به ملات یا لوله فولادی محدود می شود و می تواند در فشار و تراکم و نیز تنش تسلیم گردد که این به مقاومت تسلیم و شکل پذیری قابل مقایسه و نیز رفتار هیستریکی پایدار در BRB ها می انجامد. اطلاعات زیادی درباره عملکرد BRB های سنتی وجود دارد. بلک و همکارانش تست مولفه ای BRB ها را انجام دادند و یک منحنی هیستریکی را مدلسازی کردند تا نتایج تست را مقایسه نمایند (۱). آنها دریافتند که منحنی هیستریکی یک BRB پایدار، متقارن و وسیع است. اینگونه و همکارانش مهاربندهای کمانش تاب را به عنوان میراگرهای هیستریکی معرفی کردند تا پاسخ لرزه ای سازه های ساختمانی را بهبود دهند (۲). همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، یک قطعه BRB معمولی شامل یک هسته فولادی، یک مکانیزم کمانش ناپذیر (BRM) و یک شکاف جداکننده یا عامل ضداصل است که امکان تغییرشکل محوری مستقل هسته درونی را نسبت به BRM می دهد. محققان فراوانی آزمایشات و آنالیزهای عددی را روی BRB ها برای وارد کردن آنها در سیستم های مقاوم در برابر نیروی لرزه ای انجام داده اند. کیانگ درباره استفاده از BRB ها در کاربردهای عملی برای ساختمان ها در آسیا تحقیق نمود (۳). کلرک و همکارانش یک فرآیند طراحی را برای ساختمان های دربردارنده BRB ها پیشنهاد کردند (۴). سابلی و همکارانش ملزومات BRB ها در زمین لرزه را از طریق آنالیز پاسخ ارتعاشی قاب های BRB گزارش کردند (۵). فانستاک و همکارانش آنالیز عددی و آزمایشات شبه دینامیکی قابل های BRB بزرگ مقیاس را در ایالات متحده ارائه کردند (۶).

رفتار کمانشی موضعی BRB ها توسط تاکنوچی و همکارانش مطالعه شده است (۷). بار کمانش موثر BRB ها با در نظر گرفتن سختی اتصال سر آنها اخیرا توسط تمباتا و همکارانش (۸) و کینوشیتا و همکارانش (۹) مطالعه شده است. تحقیقات قبلی پتانسیل تولید سیستم های BRB تماما ساخته شده از فولاد را ثابت کرده اند (۱۰). در یک BRB تمام فولادی متداول، هسته داخلی فولادی بین مکانیزم های کمانش ناپذیر کاملا ساخته شده از قطعات فولادی ساندویچ شده است، از این رو از هزینه ملات لازم در BRB های سنتی اجتناب شده است. این امر مراحل ساخت مربوط به ریختن و سخت شدن ملات یا بتن را حذف کرده و زمان و هزینه های ساخت را بسیار کاهش می دهد. بعلاوه چنین BRB را می توان به آسانی جدا کرد تا بعد از یک زمین لرزه آن را بازرسی نمود. مطالعات تحلیلی و تجربی درباره عملکرد تغییرشکل و پاسخ دینامیکی BRB ها توسط کاتو و همکارانش (۱۱)، واتانبل و همکارانش (۱۲) و اوسامی و همکارانش (۱۳) انجام شده اند. قطعه گیردار پیشنهاد شده قبلی یک مقطع فولادی پرشده از ملات بود که یک قطعه کاملا صلب را می ساخت. در چنین نوع BRB هایی، قطعه مهاربند و BRM به کار برده شده بودند و کمانش سرتاسری رخ نداده بود. با این همه در BRB های تمام فولادی که نسل جدیدی از BRB ها به شمار می روند، سیستم مهاربند کاملا از فولاد ساخته شده و سیستم BRM در مقایسه با BRB های سنتی سبک تر است و این پتانسیل بالایی را برای کمانش سرتاسری مهاربند ناشی از صلبیت و سختی اندک BRM نتیجه می دهد. رفتار هیستریکی BRB های تمام فولادی توسط ترمبلی و همکارانش (۱۰) به صورت تجربی بررسی شدند. یک مطالعه تجربی درباره رفتار هیستریکی BRB های تمام فولادی نیز توسط اریاسا و همکارانش (۱۴) ارائه شد.

مشخصات زیر برای عملکرد ایمن BRB ها ضروری به نظر می رسند: (۱) جلوگیری از کمانش سرتاسری، (۲) جلوگیری از کمانش موضعی هسته، (۳) جلوگیری از فرسودگی کم دوره ی قطعه مهاربند، (۴) مقاومت بالای قطعات مفصل و اتصالات. در این مقاله، مشخصه نخست (یعنی رفتار کمانش سرتاسری) بررسی می گردد.



شکل ۱. مولفه های یک BRB (۱۰).



شکل ۲. نیرو و تغییرشکل یک BRB (۲۰).

یک قطعه BRB با انحنای اولیه تحت تراکم را در نظر بگیرید. وقتی هسته داخلی با نقص ذاتی اولیه تحت تراکم انحنای می یابد، با BRM تماس پیدا می کند. نیروهای تماسی سبب افزایش تغییرشکل خارج از صفحه ای کل BRB شده و تخریب مقاومت رخ می دهد پیش از آنکه قطعه مهاربند به جابجایی موردنظر برسد (اگر صلبیت و مقاومت BRM کافی نباشند). بر اساس دستورالعمل های AISC 2010 برای تعیین کیفیت تست های دوره ای BRB ها (۱۵)، یک BRB باید تغییرشکل محوری تا  $\Delta_{bm}$  را حفظ نماید که در آن  $\Delta_{bm}$  تغییرشکل محوری مهاربند متناظر با رانش طبقه طراحی شده است. مکانیزم کمانش ناپذیری باید مقاومت و صلبیت کافی را برای جلوگیری از کمانش سرتاسری مهاربند در طی تغییرشکل محوری داشته باشد. از این رو برای به دست آوردن مشخصه هیستریکی در سمت تراکم مشابه سمت تنش و نیز برای کاهش تنگی و تراکم، لازم است تا از کمانش سراسری جلوگیری شود (یعنی از کمانش خمشی). نتایج نخستین مطالعات روی رفتار کمانش سراسری BRB ها که توسط واتانابه و همکارانش صورت گرفت آشکار نمود که نسبت بار کمانش اوپلر قطعه گیردار به مقاومت تسلیم هسته  $(P_e/P_y)$  عاملی است که دقیق تر از همه ظرفیت کمانش کلی مهاربند را کنترل می کند (۱۶). این مولفن نتیجه رگفتند که اگر نسبت بار کمانش اوپلر BRM به بار تسلیم هسته داخلی  $(P_e/P_y)$  کمتر از یک باشد، قطعه مهاربند، کمانش سراسری را در طی بارکنش دوره ای قابل مهار شده تجربه خواهد کرد. با این همه، مقدار 1.5 برای نسبت  $P_e/P_y$  به منظور طراحی در مطالعات نام برده پیشنهاد گردید. معیار  $P_e/P_y \geq 1$  یک پایه تئوری (۱) دارد و از سوی ایواتا و همکارانش از طریق تست تجربی تایید شده است

(۱۷). مطالعات تجربی مشابه توسط اوسامی و همکارانش (۱۳) روی BRB های تمام فولادی انجام شدند و یک ضریب ایمنی برابر  $\lambda_f = P_{max}/P_y$  پیشنهاد شد که در آن  $P_{max}$  و  $P_y$  نشان دهنده بیشترین نیروی تراکمی در قطعه مهاربند و ظرفیت تسلیم هسته هستند. ضریب ایمنی به صورت زیر نشان داده شده است:

$$\gamma_f = \frac{1}{\left(P_y/P_e\right) + \left(P_y/M_y\right) \cdot (a + d + e)} \quad (1)$$

که در آن،  $a$ ،  $d$  و  $e$  به ترتیب انحنای اولیه، دامنه شکاف و دوری از مرکز بارکنش هستند. نتایج تست نشان دادند که اگر مقدار ضریب ایمنی  $\gamma_f$  بزرگتر از سه باشد، کمانش سراسری BRB رخ نخواهد داد.

روش آنالیز المان محدود اخیرا با موفقیت برای پیش بینی پاسخ کمانش صفحات هسته در قطعات BRB با تیوب های پر شده با ملات به کار برده شده است (۱۸). مطالعات بعدی آنالیز المان محدود توسط ترمبلی و همکارانش صورت گرفت تا درباره رفتار کمانش هسته در BRB های تمام فولادی تحقیق نماید (۱۹). کارهای اشاره شده در بالا همچنین توصیفی از اندرکنش پیچیده را به دست دادند که بین هسته مهاربند و BRM وجود می آید. نیروهای به سمت خارج که توسط نیروهای تماسی القا می شوند، در خمیدگی حاصل از قطعات BRM و نیز در پیچ هایی که قطعات BRM واقع در هر طرف هسته را کنار هم نگه می دارند، مقاومت می کنند. به علاوه نیروهای تماسی به نیروهای اصطکاکی طولی انجامیدند که بارهای تراکم محوری را در BRM القا می کردند. نسبت  $P_e/P_y$  نمونه که در این مطالعات به کار برده شده برابر 3.5 بود و نتایج تست نشان داد که مقاومت پوششی برای جلوگیری از کمانش کلی مهاربند کافی بود.

این مقاله درباره آنالیز المان محدود رفتار کمانش کلی BRB های تمام فولادی با در نظر گرفتن اثر دامنه شکاف بین هسته و BRM و نقص اولیه کل قطعه BRB های پیشنهادی تحقیق می کند. در نهایت شرط پیشگیری از کمانش سراسری BRB های پیشنهادی برای اهداف طراحی پیشنهاد می شود.

#### ۱. معیار کمانش سراسری BRB ها

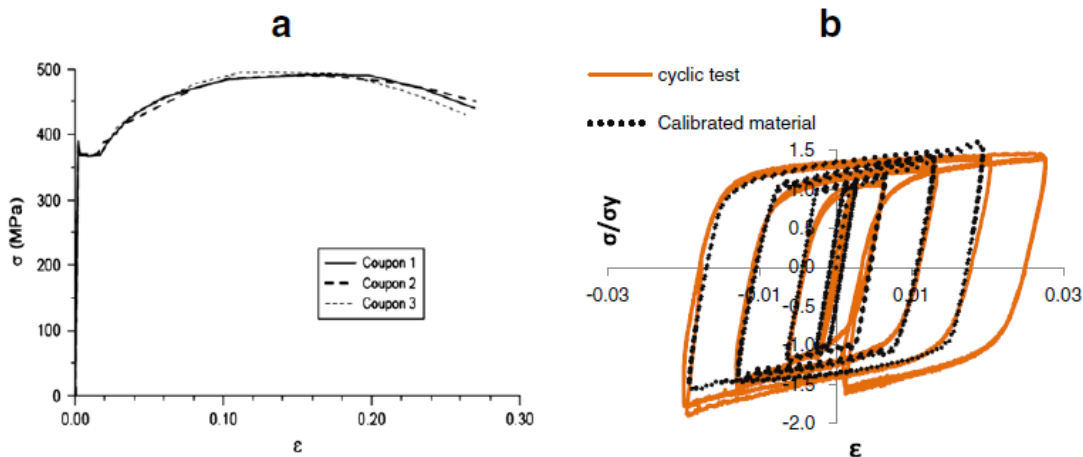
آنالیز کمانش کشسان یک مهاربند کامپوزیت متشکل از یک هسته فولادی پوشیده شده توسط یک گیره نشان داد که بار بحرانی کل قطعه مهاربند تحت تراکم را می توان با حل معادله تعادلی زیر به دست آورد (۲۰):

$$E_B I_B \cdot \frac{d^2 v}{dx^2} + (v + v_0) N_{max} = 0 \quad (2)$$

که در آن  $E_B I_B$  سختی خمشی BRM،  $N_y$  بار تسلیم مهاربند،  $v$  و  $v_0$  به ترتیب انحراف و انحنای عرضی و اولیه هستند (شکل ۲).

جدول ۱. خصوصیات نمونه BRB

No.	Model name	BRM dimensions (mm)	Core dimensions (mm)	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	gap (mm)	$I_r$ (mm <sup>4</sup> )	$P_e$ (KN)	$P_{yc}$ (KN)
1	S1g0.5	UNP 50+2 face plates (45×5)	Plate 100×10	1000	0.5	850,000	419	370
2	S2g0.5	UNP 65+2 face plate (37.5×5)	Plate 100×10	1000	0.5	1,160,000	571	370
3	S3g0.5	BOX (50×50×3)+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	0.5	1,530,000	752	370
4	S4g0.5	BOX (50×50×4)+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	0.5	1,950,000	963	370
5	S1g2	UNP 50+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	2.0	960,000	475	370
6	S2g2	UNP 65+2 face plate (37.5×5)	Plate 100×10	1000	2.0	1,300,000	639	370
7	S3g2	BOX (50×50×3)+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	2.0	1,660,000	816	370
8	S4g2	BOX (50×50×4)+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	2.0	2,110,000	1042	370
9	S5g2	PL (35×10)+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	2.0	820,000	406	370
10	S1g0	UNP 50+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	-	810,000	401	370
11	S2g0	UNP 65+2 face plate (37.5×5)	Plate 100×10	1000	-	1,120,000	551	370
12	S3g0	BOX (50×50×3)+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	-	1,480,000	732	370
13	S4g0	BOX (50×50×4)+2 face plate (45×5)	Plate 100×10	1000	-	1,900,000	937	370



شکل ۳. (a) منحنی تنش-کشش منتج از تست (۱۰). (b) پاسخ هیستریکی کالیبره شده ی ماده فولادی (۱۹). فرض می شود انحنای اولیه مهاربند با منحنی سینوسی زیر بیان شود:

$$v_0 = a \sin \frac{\pi x}{L} \quad (3)$$

که در آن  $a$  انحنای اولیه مهاربند در مرکز و  $N$  بار محوری مهاربند است که با  $P$  در معادلات زیر جایگزین شده است. حل معادله تعادلی ۲ به عبارت زیر می انجامد:

$$v + v_0 = \frac{a}{1 - \frac{P_{max}}{P_e}} \sin \frac{\pi x}{L} \quad (4)$$

گشتاور خمشی در مرکز BRM را می توان به صورت زیر نوشت (۲۰):

$$M_c = \frac{P_{max} \cdot a}{1 - \frac{P_{max}}{P_e}} \quad (5)$$

که در آن،  $P_{max}$  نیروی محوری بیشینه ی مهاربند است. با فرض اینکه  $P_{max}$  برابر  $P_y$  (یعنی بار تسلیم هسته) است و اینکه کماتش BRB وقتی رخ می دهد که بیشترین تنش فیبر بیرونی BRM به مقدار تنش تسلیم برسد، شرط لازم برای سختی و مقاومت تیوب فولادی (BRM) را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 + \frac{\pi^2 E_B \cdot a \cdot D}{2\sigma_y \cdot L_B^2} \quad (6)$$

که در آن،  $\sigma_y \cdot L_B$  و  $D$  به ترتیب نشان دهنده طول، تنش تسلیم تیوب فولادی و عمق مقطع قطعه گیردار هستند. این نخستین فرمولی است که ملزومات مقاومت و سختی را با موفقیت به صورت جفت جفت در طراحی BRB ها بیان می کند. در این فرمول، تاثیر دامنه شکاف (g) در محاسبه گشتاور در مرکز BRM در نظر گرفته نشده است. از این رو در این مقاله، این پارامتر در معادله ۶ وارد می شود. پس معادله ۶ را می توان به صورت زیر اصلاح نمود:

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 + \frac{\pi^2 E_B \cdot (a + g) \cdot D}{2\sigma_y \cdot L_B^2} = \beta \quad (7)$$

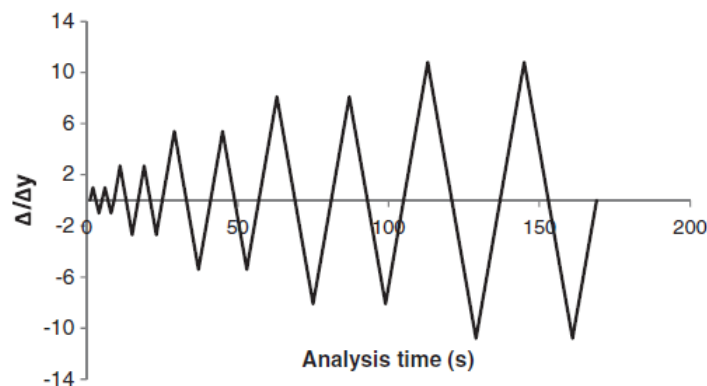
که در آن،  $L_B$  طول هسته و BRM (برابر با هم) و  $D$  عمق مقطع BRM است. معادله ۷ نشان می دهد که کماتش کلی مهاربند رخ نخواهد داد اگر نسبت  $P_e/P_y$  بزرگتر از پارامتر  $\beta$  باشد که بر اساس مشخصات هندسی و مشخصات مواد قطعه مهاربند محاسبه می شود.

## ۲. آنالیز المان محدود

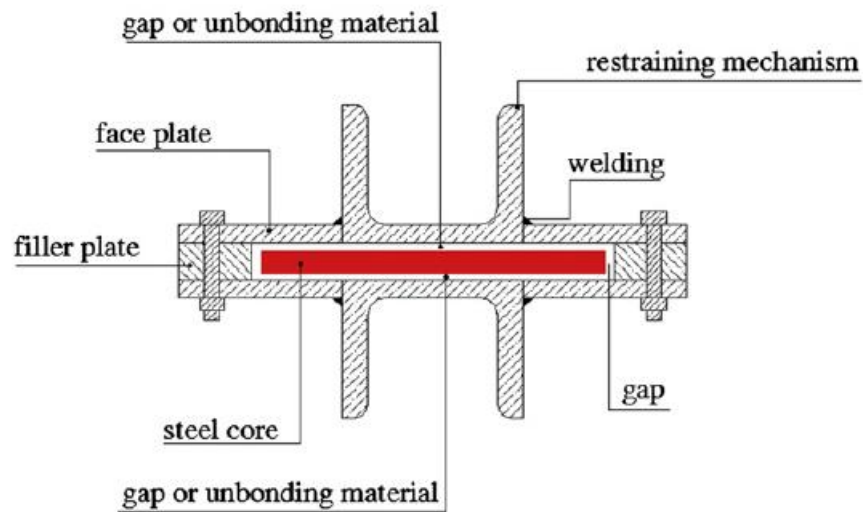
برای ارائه یک درک عددی از رفتار دوره ای و بار کماتش BRB های تمام فولادی، یک آنالیز با استفاده از روش المان محدود روی ۱۳ نمونه BRB صورت گرفت. یک نمایش سه بعدی از نمونه های مهاربند تولید شد تا رفتار مشاهده شده را به خوبی ثبت نماید. مدلها شامل صفحات مرکزی (هسته) می شدند و قطعات BRM متشکل بودند از تیوب ها، صفحات راهنما، صفحات پرکننده و محکم کننده های سر.

### ۱-۳ توصیف مدلها

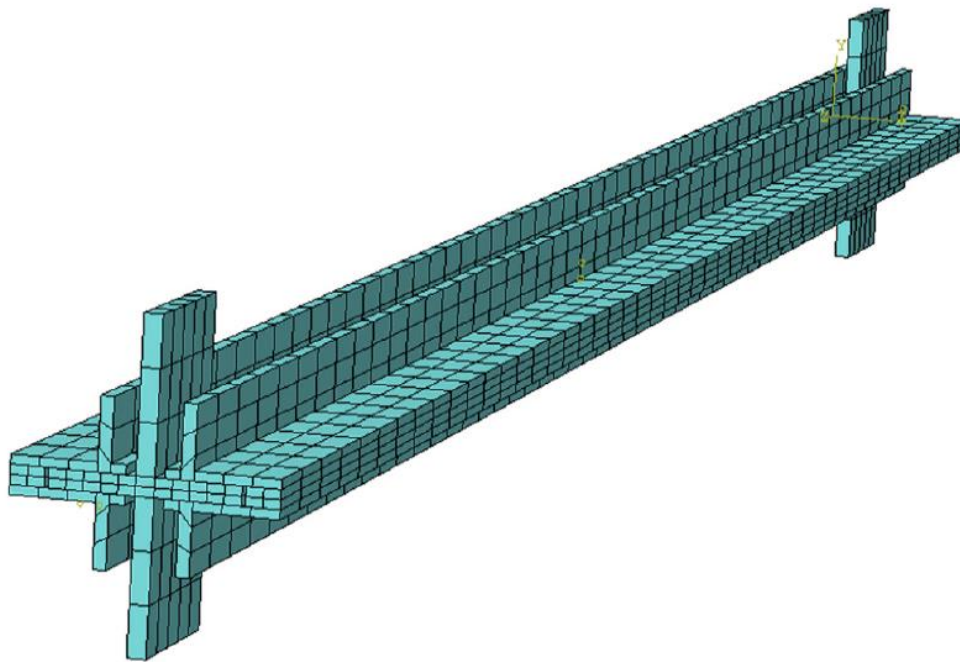
مطالعات عددی روی ۱۳ BRB تمام فولادی پیشنهادی انجام شده اند. جدول ۱ جزئیات و مشخصات این مدلها را نشان می دهد که در آنها، اولین ستون کد نمونه به فرم  $S_i g_i$  را نشان می دهد و در آن اندیس های  $i$  و  $g$  به ترتیب نشان دهنده شماره مدل و دامنه شکاف در سطح مشترک هستند. همه مدلها شامل یک صفحه مرکزی ثابت به اندازه  $100 \times 10 \text{ mm}^2$  بودند با سطح مقطع های مختلف برای قطعات BRM (جدول ۱).



شکل ۴. پروتکل بارکنش در مدلهای BRB.



شکل ۵. سطح مقطع متداول BRB های پیشنهادی.



شکل ۶. مدل المان محدود یک BRB پیشنهادی.

از این رو وقتی که سختی و مقاومت BRM ها تغییر داده می شود، مقاومت تسلیم هسته ثابت نگه داشته می شود. بعلاوه، اثر تولید یک شکاف بین هسته و BRM در این آنالیز در نظر گرفته شد. طول کلی BRB ها ( $L$ ) برابر 2000 mm در نظر گرفته شد.



تسلیم صفحه مرکزی ( $P_y$ ) با ضرب تنش تسلیم در مساحت سطح مقطع محاسبه شد و بار کمانش BRM ( $P_e$ ) از فرمول بار کمانش اوپلر محاسبه گردید.

صفحه مرکزی و BRM با استفاده از المان های آجری خطی C3D8R هشت گره ای با انتگرالگیری کاهش یافته مدلسازی شدند. آنالیز دوره ای استاتیک جابجایی بزرگ با استفاده از برنامه المان محدود عمومی ABAQUS 6.9.3 انجام شد (۲۱). روش نیوتن-رافسون کامل برای حل معادلات غیرخطی در این آنالیز در نظر گرفته شد. عامل تثبیت خودکار با استفاده از یک ضریب میرایی برابر  $2.0E-4$  مشخص شد تا همگرایی را ساده نماید. یک مسئله استاتیک غیرخطی می تواند ناپایدار باشد. چنین ناپایداری هایی می توانند دارای ماهیت هندسی باشند از جمله کمانش یا ماهیت مادی داشته باشند مانند نرم شدگی ماده. ABAQUS یک مکانیزم خودکار را برای پایدارسازی مسائل شبه استاتیک ناپایدار از طریق افزودن خودکار میرایی متناسب حجمی به مدل فراهم می کند. طرح تثبیت (پایدارسازی) خودکار تطبیقی که در آن ضریب میرایی می تواند با زمان و مکان متغیر باشد، یک رویکرد جایگزین موثر را به دست می دهد. در این حالت، ضریب میرایی توسط سابقه همگرایی و نسبت انرژی تلف شده توسط میرایی ویسکوز به انرژی کرنشی کل کنترل می شود. اگر رفتار همگرایی به دلیل ناپایداری ها یا مدهای جسم صلب مشکل ساز شود، ABAQUS بطور خودکار ضریب میرایی را افزایش می دهد. در این تحقیق، تیرانس دقت پیش فرض برابر 0.05 برای تثبیت تطبیقی در نظر گرفته شد. همچنین بیشترین و کمترین اندازه نمو 0.25 و  $1E-6$  به ترتیب در این آنالیز مشخص گردید. صفحات پرکننده و وجه با استفاده از یک نوع اندرکنش به هم متصل شدند تا یک اتصال جوش خورده پیوسته را شبیه سازی کنند. انتظار می رفت که صفحه مرکزی دستخوش تغییرشکل های پلاستیک بزرگ و کمانش مد بالاتر با انحنای قابل توجه شود. از این رو یک المان جامد با یک مش<sup>۱</sup> اصلاح شده با پنج المان در سرتاسر صفحه و دوتا روی ضخامت برای صفحه مرکزی استفاده شدند. یک مش درشت تر برای BRM استفاده شد زیرا انتظار می رفت بیشتر این قطعه کشسان باقی بماند. خصوصیات تماسی با رفتارهای اصطکاک مماسی کولنی بین هسته و قطعات BRM در نظر گرفته شدند. برای این منظور، ویژگی تماس سطح با سطح با یک ضریب تثبیت خودکار تقریبی برابر  $1E-4$  به همگرایی بهتری می انجامید. با این همه، بزرگی ضریب پایدارسازی به خصوصیات مدل بستگی داشت و هر وقت که آنالیز با دشواری های همگرایی روبه رو می شد، تغییر می کرد. تثبیت تماسی بر اساس میرایی ویسکوز است که با حرکت نسبی بین سطوح مجاور مخالفت می کند بدون اینکه دقت نتایج را کاهش دهد. رفتار تماس مماسی با یک ضریب اصطکاک 0.1 برای شبیه سازی یک سطح مشترک هموار گریسی بین ماده فولاد صفحه مرکزی و BRM استفاده گردید. همین ضریب اصطکاک در آنالیز مشابه صورت گرفته توسط چو و همکارانش (۲۲) در نظر گرفته شد (۲۲). بعلاوه، یک ضریب اصطکاک 0.075 بین عامل جداکننده و پوشش در این آنالیز صورت گرفته روی BRB ها توسط اوسامی و همکارانش اعمال شد (۲۳).

مولفان این مقاله قویا معتقدند که بزرگی ضریب اصطکاک تماسی بین هسته و پوشش تاثیر زیادی را بر پاسخ کمانشی موضعی و کلی BRB ها دارد. این مولفان آنالیزهای گسترده ای را برای تحقیق روی اثر پاسخ اصطکاک در BRB ها انجام داده اند. نتایج تحلیل های آنها نشان داد که نیروی محوری منتقل شده به BRM با افزایش مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح تماسی افزایش می یابد. نیروهای محوری تشدید شده ناشی از نیروهای برشی اصطکاک در سطح مشترک به گشتاورهای خمشی وسیعی در BRM منجر می شود که به دلیل اثرات  $P-\Delta$  است. بنابراین بار کمانش سراسری کل BRB ممکن است با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک تغییر یابد. نتایج مشابهی توسط کورزکاو و همکارانش (۱۹) گزارش شدند. در این مقاله، مولفان بر این پدیده تاکید نکردند. بنابراین یک سطح تماسی گریسی هموار بین هسته و پوشش در نظر گرفته شد. با این همه ضریب اصطکاک 0.3 را می

<sup>1</sup> - mesh

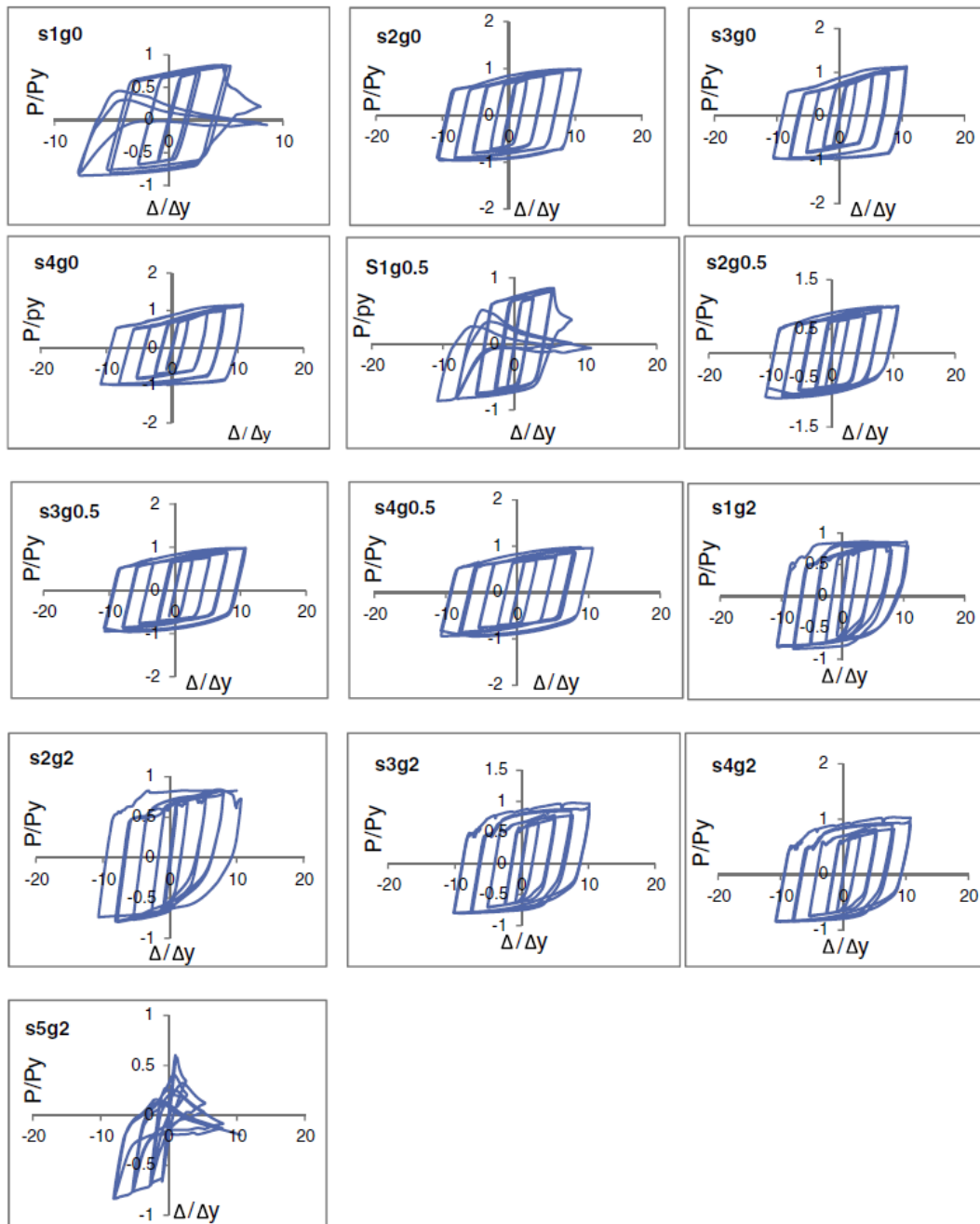


توان برای سطوح خشک و ناهموار بین هسته و BRM به کار برد که در تحقیق کورزکاوا و همکارانش (۱۰) در نظر گرفته شده است.

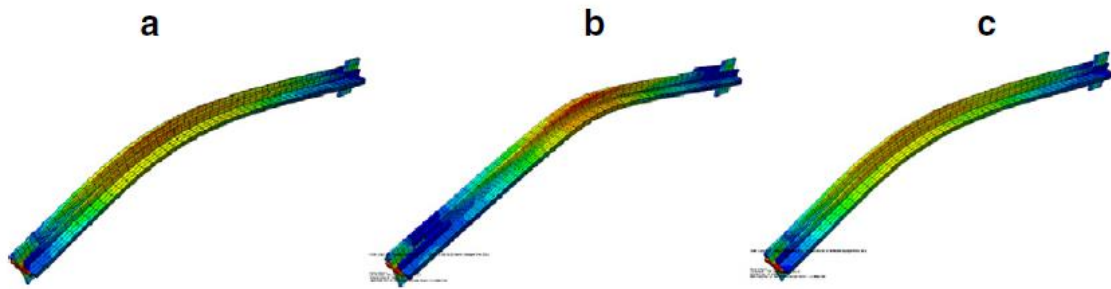
یک قانون تماسی سخت برای جهت عمودی در نظر گرفته شد که نفوذ سطوح BRM و هسته را کمینه می ساخت. مدل تماسی امکان جداسازی صفحه مرکزی از المان های BRM را فراهم می ساخت که کمانش مد بالایی صفحه مرکزی را ممکن می ساخت. صفحه مرکزی و قطعات BRM از فولاد با تنش تسلیم  $F_y = 370 \text{ MPa}$  ساخته شدند. یک مدول یانگ برابر با 200 GPa و نسبت پواسون برابر با 0.3 برای صفحه مرکزی و قطعات BRM فرض شدند. یک قانون سخت شدگی سینماتیک همسانگرد ترکیبی غیرخطی به کار بسته شد تا ویژگی ماده غیرکشسان و از این رو یک رفتار دوره ای دقیق را بازتولید نماید. انتخاب و کالیبراسیون خصوصیات مادی فولاد و پارامترهای سخت شدگی بر اساس کوپن و نتایج تست دوره ای انجام شده توسط ترمبلی و همکارانش (۱۰) و مطالعات تحلیلی بعدی کورزکاوا و همکارانش (۱۹) بودند. بر مبنای این تحقیقات، مدول C سخت شدگی سینماتیکی اولیه و ضریب آهنگ  $\gamma$  به ترتیب برابر 8 و 75 GPa قرار داده شدند (۱۹). برای سخت شدگی همسانگرد، بیشترین تغییر در تنش تسلیم برابر  $Q_\infty = 110 \text{ MPa}$  و ضریب آهنگ برابر  $b = 4$  قرار داده شد. شکل  $3a-b$  منحنی تنش- کرنش ماده فولاد را که به ترتیب از تست ها و پاسخ دوره ای کالیبره شده بر اساس مدل سخت شدگی ترکیبی منتج شده اند، نمایش می دهد (۱۹و۱۰).

در همه مدلها، ناکاملی (نقص) هندسی اولیه برابر 2 mm (یعنی L/1000) در هر دو صفحه مرکزی و BRM در نظر گرفته شد. چندین روش وجود دارند که برای وارد کردن ناکاملی هندسی درون مدل استفاده شدند از جمله اختلال هندسی بر اساس روند کمانش اولین مد یا تعریف یک نقص بر اساس هندسه تغییرشکل یافته از یک آنالیز استاتیک قبلی. در این مقاله، روش آخری برای اعمال این ناکاملی به کار برده شد. یک آنالیز استاتیک خطی پیش تعریف شده انجام شد تا ناکاملی قطعه مهاربند را قبل از آنالیز دوره ای غیرخطی مشخص نماید. بری این منظور، یک بار سطحی به هسته و BRM اعمال شد تا به جابجایی لازم (یعنی 2 mm) در مرکز مهاربند برسد. در نتیجه آنالیز دوره ای غیرخطی در پایان اولین مرحله ادامه یافت که از بارکنش تراکمی در سر هسته شروع می شد.

سه نوع سطح مشترک بین صفحه مرکزی و BRM در این مدلها در نظر گرفته شدند. در اولین مورد، یک تماس مستقیم بین صفحه مرکزی و BRM پیاده سازی شد و در دومین و سومین مورد، دامنه شکاف ها به ترتیب برابر 0.5 و 2 mm از طریق ضخامت هسته تنظیم شد. بعلاوه، دامنه ثابت 2 mm برای شکاف از طریق پهنای هسته در همه مدلها تنظیم شد. چنین شکافی برای تطبیق انبساط آزاد هسته داخلی تحت بارهای محوری به کار برده شد. تغییرشکل محوری در یک سر مهاربند با یک اتصال پین شده مسدود شد. جابجایی های محوری در سر دیگر تحمیل شدند که از پروتکل شبه استاتیک دوره ای پیشنهاد شده توسط قوانین لرزه ای AISC برای BRB ها به صورت زیر پیروی می کردند (۱۵): ۲ دوره (تناوب) در  $\pm \Delta_y$ ، ۲ دوره در  $\pm 0.5 \Delta_{bm}$ ، ۲ دوره در  $\pm \Delta_{bm}$ ، ۲ دوره در  $\pm 1.5 \Delta_{bm}$  و ۲ دوره در  $\pm 2 \Delta_{bm}$  که در آن  $\Delta_y$  جابجایی متناظر با تسلیم هسته است.  $\Delta_{bm}$  تغییرشکل محوری مهاربند متناظر با رانش طبقه طراحی شده است. بر اساس مطالعات قبلی ترمبلی و همکارانش (۱۰)، دامنه کرنش مامزین در مهاربندهای هسته ای تمام طول معمولا در بازه 0.01 تا 0.02 برای کاربردهای ساختاری رایج قرار می گیرد و تغییرشکل بیشینه در اکثر برنامه های تست گذشته به این بازه محدود شده اند (۱۶). در این مطالعه،  $\Delta_{bm}$  به 20 mm تنظیم شد که با کرنش محوری ۱٪ در هسته متناظر است و جابجایی تسلیم کننده هسته ( $\Delta_y$ ) بر اساس مشخصات ماده برابر 3.7 mm محاسبه شد.



شکل ۷. پاسخ های هیستریکی BRB های پیشنهادی (تراکم مثبت است).



شکل ۸. کمانش کلی BRB ها. (a) مدل  $S_{1g0}$ . (b) مدل  $S_{5g2}$ . (c) مدل  $S_{1g0.5}$ .

از این رو جابجایی محوری نهایی لازم مهاربند در طی بارکنش دوره ای برابر  $2\Delta_{bm} = 40 \text{ mm}$  (i.e.  $\approx 11\Delta_y$ ) به دست آمد که با یک کرنش مرکزی (هسته) برابر ۰.۲٪ متناظر است. از این رو مقدار به کار برده شده برای بیشترین کرنش لازم هسته به نظر معقول می آید. شکل ۴ پروتکل بارکنش (بارگذاری) مورد استفاده در این آنالیزها را نشان می دهد. سطح مقطع متداول قطعات BRB پیشنهاد شده و نمایش المان محدود آن به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نمایش داده شده اند.

### ۳. نتایج و بحث

پاسخ های هیستریکی در همه مدل های BRB توسط مدل المان محدود در هر دو بازه غیرخطی و کشسان بخوبی پیش بینی می شوند. شکل ۷ پاسخ های هیستریکی بهنجارشده ی مهاربندها را نشان می دهد که در آنها بعد افقی و بعد قائم به ترتیب نشان دهنده تغییرشکل محوری بهنجارشده هسته و نیروی محوری هستند.

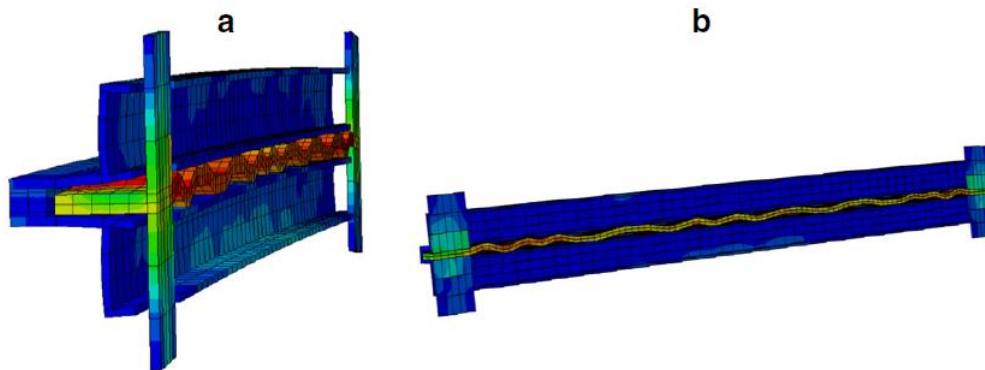
منحنی های جابجایی-نیروی محوری مدل های BRB از یک نقطه در سر مهاربند گرفته شده اند. این نقطه در ناحیه ای واقع است که لزوماً کشسان باقی می ماند زیرا صفحات سخت تر در این ناحیه فراهم می شوند تا از کمانش موضعی در سر مهاربند جلوگیری نمایند. بنابراین، رابطه جابجایی-نیروی به دست آمده ممکن است نمایشی از توزیع واقعی تنش در هسته در طی بارکنش دوره ای نباشد، گرچه این منحنی ها تخریب مقاومت حاصل از کمانش موضعی یا سراسری مهاربند را بخوبی توصیف می کنند. منحنی های تغییرشکل-نیروی محوری در شکل ۷، تخریب ناگهانی مقاومت و کمانش سراسری در مدل های  $S_{1g0.5}$ ،  $S_{5g2}$  و  $S_{1g0}$  را نشان می دهند در حالی که در دیگر مدلها، پاسخ هیستریکی پایدار بدون تغییر زیاد در ظرفیت حامل بار مهاربند مشخص می شود. بعلاوه، نوسانات موضعی کوچک در منحنی هیستریکی مدل های شامل شکاف به دلیل کمانش موضعی صفحه مرکزی تحت تراکم به دست می آیند. شکل ۸ کمانش یافته مدل های  $S_{1g0.5}$ ،  $S_{5g2}$  و  $S_{1g0}$  شامل کانتورهای تنش ون میزس را نشان می دهد.

مقادیر  $P_e/P_y$  به ازای همه ۱۳ نمونه BRB محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده اند. بعلاوه، ضریب  $\beta$  محاسبه شده و در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این آنالیز، مدل های با نسبت  $P_e/P_y$  بزرگتر از 1.2، دستخوش کمانش سراسری در طی بارکنش محوری تا حداکثر کرنش دو درصدی هسته نمی شوند. همچنین همانطور که از جدول ۲ پیداست، این مدلها دارای نسبت  $P_e/P_y$  بزرگتر از  $\beta$  هستند. از این رو نتایج آنالیز، اعتبار معادله ۷ را تایید می کنند. در مدل های  $S_{1g0}$  تا  $S_{4g0}$  با تماس مستقیم بین هسته و BRM، کمانش موضعی صفحه مرکزی تحت بارکنش تراکمی تدریجی رخ نمی دهد. شکل ۷ این پدیده را تایید می کند. علاوه بر این، شکل ۷ نشان می دهد که افت موضعی منحنی هیستریکی به دلیل افزایش دامنه شکاف، افزایش می یابد. در مدل  $S_{1g0}$  با نسبت  $P_e/P_y$  کمتر از 1.2، قطعه مهاربند سبب انحراف جانبی می شود که بر اثر افزایش جابجایی تراکمی و افزایش انحنای جانبی است. نیروهای تماسی وارد بر سمت بالایی BRM افزایش می یابد و کمانش قطعه مهاربند وقتی رخ می

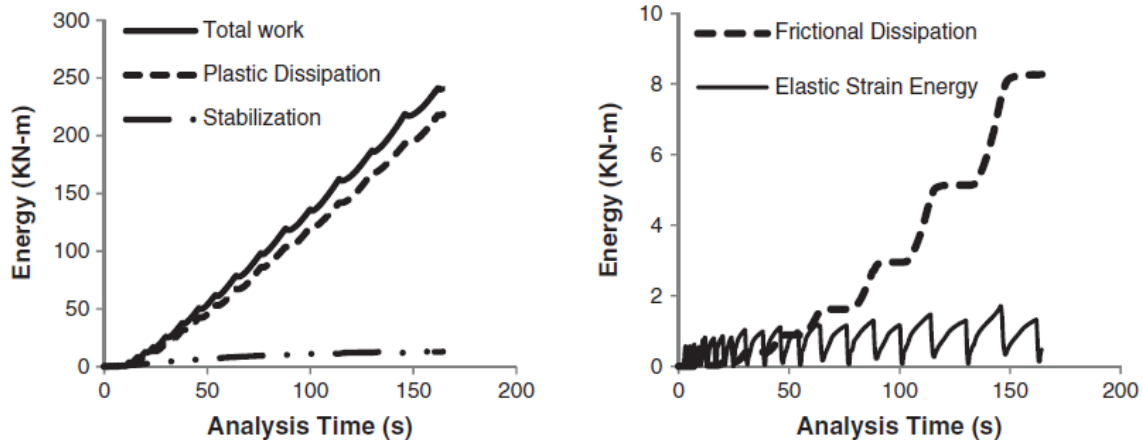
دهد که در نتیجه ی نیروهای تماسی، گشتاور در مرکز BRM به گشتاور تسلیم BRM می رسد. در مدل های  $S_{1g0.5}$  و  $S_{5g2}$  در برگیرنده شکاف و یا نسبت  $P_e/P_y$  کوچکتر از 1.2، انحراف جانبی به تغییر شکل مدهای کمانش مرتبه بالاتر منجر می شود. نیروهای تماسی وارد بر هر دو سمت قطعه گیردار، تحت تراکم افزایش می یابد و سبب کمانش سراسری مهاربند می شوند. این نتایج نشان دادند که مدل های با نسبت  $P_e/P_y$  بزرگتر از 1.2 دچار کمانش سرتاسری نمی شوند (بدون توجه به اندازه شکاف). با این همه در مدل های دارای شکاف، وقتی  $P_e/P_y$  بزرگتر از 1.2 است، حرکت های غیرکشسان شدیدی در صفحه مرکزی تحت تراکم رخ می دهند که سبب بازشدگی جانبی قطعه BRM بدون رخداد کمانش سرتاسری می شوند. مطالعات قبلی صورت گرفته توسط ترمبلی و همکارانش نیز این پدیده را تصدیق می کند (۱۰). از این رو ایجاد یک شکاف کافی بین صفحه مرکزی و BRM برای تسهیل انبساط جانبی صفحه مرکزی، تاثیر زیادی را بر پاسخ هیستریکی BRB ندارد در صورتی که BRM به اندازه کافی سفت باشد، یعنی اگر  $P_e/P_y \geq 1.2$ . بعلاوه، شکاف ایجاد شده امکان تغییر شکل محوری آزاد صفحه مرکزی را می دهد و مقدار نیروهای اصطکاکی در سطح مشترک را کاهش می دهد. نتایج نشان دادند که تعداد نقاط تماس بین BRM و صفحه مرکزی با بیشتر شدن انحنا، به تدریج افزایش می یابد. کمانش ها در جایجایی های تراکمی بزرگ نیز به دو سر هسته نزدیک تر هستند (شکل 9b). بازشدگی BRM که به کمانش مرتبه بالاتر هسته در مدلهایی با مقاومت کافی BRM نسبت داده می شود، در شکل 9a نشان داده شده اند. در این شکل، رنگ ها نشان دهنده کانتورهای تنش ون میزس در قطعه پوشش هستند که نشان می دهد هسته، نیروهای به سمت خارج را بر BRM وارد می کند که توسط جوش های متصل کننده دو قطعه بالایی و پایینی BRM تحمل می شوند. نیروهای تماسی وارد بر دیواره پوشش سبب خمش جزئی در BRM می شوند که متناظر با انحراف اولیه از خط مستقیم است. با این همه BRM کشسان باقی می ماند در حالی که صلبیت آن به اندازه کافی زیاد است. به عبارت دیگر با اینکه صلبیت پوشش کافی است، نیروهای تماسی کل وارد بر دیوارهای پوشش بالایی و پایینی، تقریباً با هم موازنه شده اند و کمانش سرتاسری رخ نمی دهد.

جدول ۲. نتایج آنالیز BRB های پیشنهادی.

ABAQUS results				
Model	$\alpha = P_e/P_y$	$\beta$	Brace global buckling	Core local buckling
<i>gap = 0 (direct contact)</i>				
$S_{1g0}$	1.09	1.11	Yes	No
$S_{2g0}$	1.49	1.13	No	No
$S_{3g0}$	1.98	1.15	No	No
$S_{4g0}$	2.53	1.15	No	No
<i>gap = 2.0 mm</i>				
$S_{1g2}$	1.29	1.24	No	Yes, opening of BRM
$S_{2g2}$	1.73	1.26	No	Yes, opening of BRM
$S_{3g2}$	2.21	1.30	No	Yes, opening of BRM
$S_{4g2}$	2.82	1.30	No	Yes, opening of BRM
$S_{5g2}$	1.10	1.25	Yes	Yes
<i>gap = 0.5 mm</i>				
$S_{1g0.5}$	1.13	1.15	Yes	Yes
$S_{2g0.5}$	1.54	1.16	No	Yes, opening of BRM
$S_{3g0.5}$	2.03	1.19	No	Yes, opening of BRM
$S_{4g0.5}$	2.60	1.19	No	Yes, opening of BRM



شکل ۹. (a) بازشدگی BRM در مدل  $S_{1g2}$ . (b) کمانش موضعی هسته در مدل  $S_{1g0}$ . (نسخه رنگی به صورت آنلاین).



شکل ۱۰. تاریخچه زمان-انرژی در مدل عددی  $S_{1g2}$ .

بر اساس این نتایج، مولفان یک شرط پیشگیری از کمانش سرتاسری را برای BRB ها پیشنهاد می کنند که در آن، عبارت پیشنهادی  $P_e/P_y \geq 1.2$  می باشد. نتایج نشان دادند که در مدل‌هایی که در حالت تراکم، کمانش می یابند، نیروهای محوری در نقطه وسط صفحات مرکزی تقریباً برابر  $1.2P_y$  در شروع کمانش سرتاسری مهربند هستند. اگر مقدار  $P_y$  در نسبت  $P_e/P_y$  با  $1.2P_y$  جایگزین شود، استفاده از معادله اصلاح شده  $P_e/(1.2P_y) \geq 1$  یا  $P_e/P_y \geq 1.2$  به جای معادله اصلی  $P_e/P_y \geq 1$  که توسط واتنبل و همکارانش پیشنهاد شده (۱۶)، توجیه خواهد شد و این نتایج اعتبار آن را تایید می کنند. با این همه یک ضریب مقاومت برابر 0.85 را می توان در صورت برای اهداف طراحی وارد نمود. در نتیجه عبارت بالا را می توان به صورت  $P_e/P_y \geq 1.4$  نوشت که تقریباً با معادله پیشنهادی پاول یعنی  $P_e/P_y \geq 1.5$  مطابقت دارد (۲۴).

تاریخچه انرژی-زمان در طی این آنالیز برای همه مدل‌ها محاسبه شد. شکل ۱۰ تاریخچه های انرژی-زمان را برای مدل  $S_{1g2}$  نشان می دهد. کل کار با تاریخچه های زمان-انرژی داده شده به این سیستم متناظر است و این انرژی تقریباً از طریق تغییر شکل های پلاستیکی هسته به طور کامل تلف می شود. شکل ۱۰ انرژی های سطح پایین تر سیستم، انرژی کرنش کشسان، انرژی تلف

شده توسط اصطکاک بین هسته و BRM و انرژی تلف شده توسط میرایی مصنوعی مورد استفاده برای اهداف پایداری و تثبیت را نمایش می دهد. انرژی کرنش کشسان در این سیستم در هر سکانس بارگذاری ذخیره می شود. پیک های بلندتر متناظر با حرکت های تراکمی هستند زیرا با انتقال بار به BRM، انرژی اضافی کرنش در BRM القا می شود. اتلاف انرژی توسط اصطکاک در طی حرکت جابجایی تراکمی رخ می دهد. مقدار انرژی تلف شده با افزایش جابجایی تحمیلی و نیروهای تماسی، افزایش می یابد. انرژی مربوط به تثبیت همگرایی به طور یکنواخت افزایش می باد و بطور میانگین ۳٪ از ورودی کل انرژی را در پایان آنالیزهای هر ۱۳ مدل نشان می دهد.

#### ۴. نتیجه گیری ها

۱- یکی از ملزومات ضمنی مهارندهای کمانش ناپذیر، عملکرد پیشگیری از کمانش سرتاسری است تا زمانی که قطعه مهاربند به جابجایی مورد نظر و شکل پذیری کافی برسد. این عملکرد لازم با سبک شدن BRB و کاهش مقاومت قطعه و صلبیت قطعه گیردار، اهمیت می یابد. نسل جدیدی از BRB ها به نام BRB های تمام فولادی، گروهی از BRB ها با مقاطع کمانش ناپذیر سبک تر از BRB های سنتی هستند. در این گروه از BRB ها، یک قطعه فولاد سبک بعنوان یک قطعه گیردار به جای تیوب های پر شده از ملات در BRB های سنتی به کار برده شد که به دلیل صلبیت و مقاومت ناکافی مقاطع گیردار می تواند منجر به کمانش سرتاسری مهاربند شود. در این مقاله، شرط پیشگیری از کمانش سرتاسری در BRB های تمام فولادی به وسیله روش آنالیز المان محدود به صورت عددی بررسی شده است. در بین ۱۳ مدل BRB، سه مدل که نسبت  $P_e/P_v$  کمتر از 1.2 داشتند، دچار کمانش سرتاسری در طی بارکنش دوره ای مهاربند تا رسیدن به کرنش ۲٪ در هسته شدند. در این BRB های کمانش یافته، نسبت های  $P_e/P_v$  کمتر از ضریب  $\beta$  در معادله ۷ بودند که اعتبار این معادله را تایید می کند. در حالی که در مدل های دیگر، با نسبت  $P_e/P_v$  بزرگتر از 1.2، هیچ کمانشی در تراکم بوجود نیامد. از این رو مولفان یک شرط پیشگیری از کمانش سرتاسری ( $P_e/P_v \geq 1.2$ ) را به جای معادله اصلی پیشنهاد شده توسط واتانابل و همکارانش (۱۶) پیشنهاد می کنند. با این همه تصور می شود این نسبت  $P_e/P_v$  مینیمم باید با اعمال یک ضریب ایمنی 0.85 به کار برده شود. در نتیجه می توان از نسبت  $P_e/P_v \geq 1.4$  در طراحی استفاده نمود.

۲- نتایج نشان دادند که ایجاد یک شکاف بین هسته و BRM علی رغم برخی ناپایداری های نسبی که به کمانش مد بالایی هسته نسبت داده می شود، تاثیر زیادی بر رفتار هیستریکی مهاربند نخواهد داشت، البته در صورتی که مقاومت و صلبیت BRM کافی باشد (یعنی  $P_e/P_v \geq 1.2$ ). تحقیقات تجربی و تحلیلی بیشتری لازم هستند تا شرط پیشگیری از کمانش سرتاسری BRB ها را با در نظر گرفتن اندازه های مختلف شکاف، انواع مختلف BRM و اثرات پاسخ اصطکاک در مهارندهای کمانش ناپذیر تمام فولادی بررسی نمایند.

مراجع

- [1] Black CJ, Makris N, Aiken ID. Component Testing, stability analysis, and characterization of buckling restrained braced braces. Report No. PEER 2002/08, Univ. of California, Berkeley, CA.
- [2] Inoue K, Sawaizumi S, Higashibata Y. Stiffening requirements for unbonded braces encased in concrete panels. ASCE J Struct Eng 2001;127(6):712-9.
- [3] Qiang X. State of the art of buckling-restrained braces in Asia. J Constr Steel Res 2005;61:727-48.
- [4] Clark P, Aiken I, Kasai K, Ko E, Kimura I. Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices. Proc., 69th annual convention. SEAOC; 1999. p. 355-71.



- [5] Sabelli R, Mahin S, Chang C. Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces. *Eng Struct* 2003;5:655-66.
- [6] Fahnestock LA, Sause R, Ricles JM. Seismic response and performance of buckling-restrained braced frames. *J Struct Eng* 2007;133(9):1195-204.
- [7] Takeuchi T, Suzuki K, Marukawa T, Kimura Y, Ogawa T, Sugiyama T, et al. Performance of compressive tube members with buckling restrained composed of mortar in-filled steel tube. *J Struct Constr Eng* 2005;590:71-8.
- [8] Tembata H, Koetaka Y, Inoue K. Out-of-plane buckling load of buckling restrained braces including brace joints. *J Struct Constr Eng* 2004;581:127-34.
- [9] Kinoshita T, Koetaka Y, Inoue K, Iitani K. Criteria of buckling-restrained braces to prevent out-of-plane buckling. *J Struct Constr Eng* 2007;621:141-8.
- [10] Tremblay R, Bolduc P, Neville R, DeVall R. Seismic testing and performance of buckling restrained bracing systems. *Can J Civ Eng* 2006;33(1):183-98.
- [11] Kato M, Usami T, Kasai A. A numerical study on cyclic elasto-plastic behavior of buckling-restraining brace members. *JSCE J Struct Eng* 2002;48A:641-8.
- [12] Watanabe N, Kato M, Usami T, Kasai A. Experimental study on cyclic elasto-plastic behavior of buckling-restraining braces. *JSCE J Earthquake Eng* 2003;27 [Paper No. 133].
- [13] Usami T. Guidelines for seismic and damage control design of steel bridges. Edited by Japan Society of Steel Construction 2006; Gihodo-Shuppan, Tokyo [in Japanese].
- [14] Eryasar M, Topkaya C. An experimental study on steel-encased buckling restrained brace hysteretic damper. *J Earthquake Eng Struct Dyn* 2010;39:561-81.
- [15] AISC (American Institute of Steel Construction). Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago, IL; 2010.
- [16] Watanabe A, Hitomi Y, Yaeki E, Wada A, Fujimoto M. Properties of braces encased in buckling-restraining concrete and steel tube. *Proceedings of 9th world conference on earthquake engineering*; 1988. p. 719\_24.
- [17] Iwata M, Murai M. Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluations a hysteretic damper. *Earthq Eng Struct Dyn* 2006;35:1807-26.
- [18] Matsui R, Takeuchi T, Hajjar JF, Nishimoto K, Aiken I. Local buckling restraint condition for core plates in buckling-restrained braces. *Proc. 14th World Conf. on Earthquake Eng*; 2008. Beijing, China, Paper No.05-05-0055.
- [19] Korzekwa A, Tremblay R. Numerical simulation of the cyclic inelastic behavior of buckling restrained braces. London: Taylor & Francis Group 978-0-415-56326-0; 2009.
- [20] Fujimoto M, Wada A, Saeki E, Watanabe A, Hitomi Y. A study on the unbonded brace encased in buckling restraining concrete and steel tube. *J Struct Constr Eng* 1988;34B:249-58 [in Japanese].
- [21] ABAQUS. Standard user's manual version 6.3. Pawtucket, RI: Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.; 2003.
- [22] Chou C, Chen S. Sub-assembly tests and finite element analyses of sandwiched buckling restrained braces. *Eng Struct* 2010;32:2108-21.
- [23] Usami T, Ge H, Luo X. Experimental and analytical study on high-performance buckling restrained brace dampers for bridge engineering. *Proceeding of 3rd International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, October 15-16; 2009. San Francisco.
- [24] Powell S. Personal communication, Star Seismic LLC 2002. Park City, UT.



## The overall buckling behavior of the buckling bracelets is all steel

Sajjad Kafashzadeh <sup>1</sup>, Hassan Ramezanzadeh Kandi <sup>2</sup>, Mohammad Amin Azimi Rad <sup>2</sup> and  
Mojtaba Ataherizadeh <sup>2</sup>

1 Professor, Department of Civil Engineering, Engineering and Transportation Engineering,  
Islamic Azad University, Birjand Branch

2 Civil Engineering Student, Islamic Azad University, Birjand Branch

### Abstract

One of the main requirements of the mechanical behavior of the BRBs under severe earthquake loads is to prevent buckling around until a curved piece of plastic is sufficiently shaped and ductile. This paper presents the results of the finite element analysis of all steel barbed wire bolts that have been proposed. Proposed BRBs have a central section similar to that of the Unbreakable Mechanisms (BRMs). The purpose of this analysis is to perform a parametric investigation of BRBs with different gaps (between core 1 and BRM) and initial defects in order to investigate the overall buckling behavior of braiding. The results of this analysis showed that the bending strength of the BRM can have a significant effect on the buckling behavior of the bracket regardless of the size of the gap. In addition, the lowest Euler buckling ratio of the clamping device to the core tolerance resistance ( $P_e/P_y$ ) was proposed for design. This ratio is the main controller of the overall buckling of the BRBs

**Keywords:** Bars, Bracing, Bending BRM