

بررسی رفتار لرزه‌ی مهاربندهای کمانش تاب با غلاف فولادی بدون مواد پُرکننده

مصطفی رضوانی شریف (استادیار)

دانشکده‌ی هندیسی عمان، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

سارا غفاری* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هندیسی عمان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمین

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۱۷-۱۲۴، (پادداشت نشی)

یکی از سیستم‌های پایدارکننده‌ی سازه‌ها در برابر بارهای جانبی، مهاربندهای کمانش تاب است؛ که در آن‌ها با تسلیم عضو مورب تحت اثر کشش یا فشار، ظرفیت اتلاف انرژی قابل ملاحظه‌ی فراهم می‌شود. در پژوهش حاضر، ۱۱ مهاربند کمانش تاب و یک مهاربند معمولی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. رفتار مدل‌های مهاربند کمانش تاب تحت تأثیر وجود غلاف فولادی، عدم استفاده از ملات پُرکننده، شکل مقطع هسته‌ی اعضاء مورب و ضخامت غلاف فولادی تحت اثر بارگذاری دوره‌ی یکسان بررسی شد و نتایج تحلیل نشان داد که ظرفیت اتلاف انرژی در مهاربند کمانش تاب حدود ۵ برابر ظرفیت اتلاف انرژی مهاربند معمولی است. قابلیت اتلاف انرژی و ظرفیت نهایی مقطع عضو مورب در حالت بدون مواد پُرکننده در مقایسه با ظرفیت مقطع در صورت استفاده از مواد پُرکننده کاهش می‌یابد و هسته‌ی اعضاء مورب مهاربند با سطح مقطع دایره نسبت به دو سطح مقطع ضربه‌ی و ناودانی مقاومت بیشتری دارد.

واژگان کلیدی: مهاربند کمانش تاب، غلاف فولادی، اتلاف انرژی، نرم‌افزار آباکوس، بارگذاری دوره‌ی.

۱. مقدمه

طراحی مناسب سازه در مناطق زلزله‌خیز باید دو معیار قابل قبول مقاومت و شکل‌پذیری داشته باشد. با توجه به اینکه طراحی سازه در محدوده‌ی کشسان مقرون به صرفه نیست و توجیه اقتصادی ندارد، برای طرح لرزه‌ی سازه لازم است که از رفتار جذب‌کنندگی انرژی با تغییرشکل‌های غیرارتجاعی اعضاء سیستم‌های مقاوم در هنگام زلزله‌های شدید استفاده شود. روش‌های مختلفی در این مورد وجود دارد و کاربرد مهاربندهای فولادی یکی از روش‌های مذکور است. از پرکاربردترین نوع مهاربندهای جانبی، مهاربندهای همگراست.^۱

مهاربندهای همگرای معمولی، سختی اولیه‌ی مناسبی دارند؛ اما تحت اثر بارگذاری دوره‌ی به سرعت، سختی اولیه خود را از دست می‌دهند و نقش آن‌ها در پایداری سازه دچار مشکل می‌شود. در مهاربندهای همگرای معمولی، عضو مورب تحت اثر نیروی فشاری کمانه می‌کند، در نتیجه منحنی هیستریزیس متقارن و پایداری ندارد و از تمام ظرفیت سیستم مهاربند برای جذب انرژی استفاده نخواهد شد.

نوع دیگری از مهاربندها به نام مهاربند کمانش تاب^۲ وجود دارند که برخی از نقاط ضعف مهاربندهای معمولی در آن‌ها بر طرف شده است و تحت اثر بارگذاری

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۶/۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۰/۸، پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۱۸.

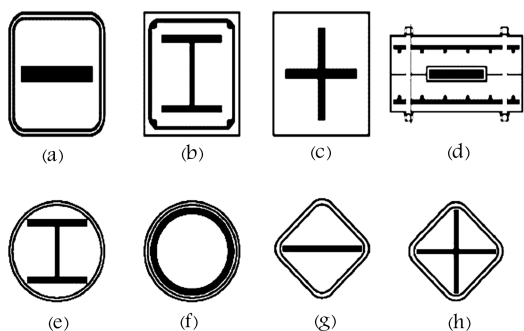
DOI: 10.24200/J30.2018.1420

دوره‌ی، منحنی هیستریزیس متقارن و پایدار دارند و در فشار و کشش، رفتار مناسبی از خود نشان می‌دهند. در مهاربندهای مذکور از کمانش اعضاء مورب تحت اثر نیروی فشاری جاوگیری می‌شود، در نتیجه از تمام ظرفیت مقطع برای اتلاف انرژی استفاده خواهد شد. در شکل ۱، منحنی رفتار هیستریزیس دو سیستم ذکر شده در مقایسه با یکدیگر مشاهده می‌شود.

از پیشگامان معرفی و توسعه‌ی مهاربندهای کمانش تاب، واکابا یاشی و همکاران (۱۹۷۳) بوده‌اند. در سیستم پیشنهادی آن‌ها، مهاربندها به صورت ورق‌های فولادی محصورشده درون پانل‌های پیش‌ساخته‌ی بتنی هستند.^[۱] برخی پژوهشگران نیز (۱۹۸۸)،^[۲] در مطالعه‌ی بر روی کمانش کلی مهاربندهای کمانش تاب با مقاطع مربع یا مستطیل، در مجموع ۵ نمونه آزمایش انجام دادند. در جدول ۱، نسبت $\frac{P_e}{P_y}$ تسلیم هسته‌ی فولادی و P_e بار کمانش کشسان غلاف است. مربوط به نمونه‌ها نشان داده شده است. در رابطه‌ی ۱، P_y بار تسلیم هسته‌ی فولادی و P_e بار کمانش کشسان غلاف است.

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 \quad (1)$$

نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که دو نمونه‌ی انتهایی در فشار دچار کمانش شده‌اند، در حالی که هر سه مدل ۱ الی ۳، رفتار هیستریزیس متقارن در فشار و کشش داشته‌اند. آن‌ها با مطالعات عددی نشان دادند که در صورت وجود



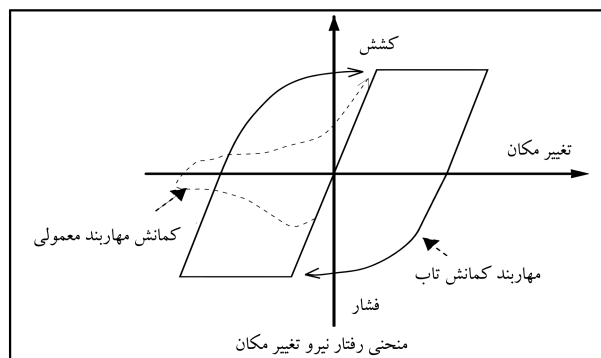
شکل ۲. مقاطع مهاربند کمانش تاب در حالت محصورشده در بتن (یا ملات) و غلاف فولادی، محصورشده در بتن مسلح و یا محصورشده با فقط غلاف فولادی.

ساختمان‌های ۴ و ۱۰ طبقه انجام و تغییر مکان جانبی آن‌ها با هم مقایسه شد.^[۱۲] مکانیزم کمانش تاب (مهار کمانش)، معمولاً توسط ملات و غلاف فولادی انجام می‌شود. در صورتی که از سیستم کمانش تاب با ملات استفاده شود، باید دقت لازم در خصوص طرح اختلاط به عمل آید و در صورت استفاده از سیستم بدون ملات، اجرا ساده‌تر خواهد شد. به همین علت، مهاربندهایی با غلاف فولادی به تنهایی و بدون مواد پرکننده نیز پیشنهاد شده و در مطالعاتی که تاکنون در مورد مهاربندهای کمانش تاب مذکور انجام شده است، عملکرد بادبندهای ذکرشده در قاب بتنی و فلزی بررسی شده است.

در پژوهش حاضر، ۱۱ مدل مهاربند کمانش تاب با مقاطع صفحات تخت، ضربدری، دوپل ناودانی، و دایره‌ای بدون مواد پرکننده با غلاف فولادی یک مهاربند معمولی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و رفتار مهاربندهای کمانش تاب تحت تأثیر وجود غلاف فولادی، عدم اجرای ملات پرکننده، شکل هسته، ضخامت غلاف تحت اثر بارگذاری دوره‌ی یکسان بررسی شده است.

بسیاری از مشکلاتی که در مهاربندهای هم‌مرکز ایجاد می‌شود، ناشی از تفاوت در ظرفیت کشش و فشار مهاربند است. مطالعات زیادی انجام شده است تا مهاربند رفتار کمانش خمیری ایده‌آلی از خود بروز دهد و دامنه‌ی وسیعی از سختی و مقاومت برای مهاربند حاصل شود. در مجموع این نتیجه به دست آمد که افزودن مهاربند مقاوم در کمانش به قاب، باعث بهبود شکل‌پذیری، سختی و مقاومت سازه می‌شود. مهاربندهای کمانش تاب به ۳ دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: هسته‌ی فولادی محصورشده در ملات پرکننده و غلاف فولادی، هسته‌ی فولادی محصور در بتن مسلح و هسته‌ی فولادی محصورشده فقط در تیوپ فولادی. مهاربندهای مذکور از یک هسته‌ی فولادی شکل‌پذیر تشکیل شده‌اند، که هسته‌ی آن‌ها باید به گونه‌ی طراحی شود، که هم در فشار و هم در کشش دچار تسلیم شود. برای جلوگیری از کمانش در نوع اول، هسته‌ی داخل یک تیوپ فولادی قرار می‌گیرد و فضای بین تیوپ و هسته‌ی فولادی با ملات یا بتن پر می‌شود. قبل از ریختن ملات، یک ماده‌ی غیرچسبیده در فضای خالی بین هسته و ملات قرار می‌گیرد تا انتقال نیروی محوری از هسته به ملات و مقطع توخالی به میزان کمینه برسد و در صورت امکان حذف شود. پدیده‌ی پواسون، هسته‌ی فولادی را تحت فشار منبسط می‌کند، که این هم دلیل دیگری برای ایجاد فاصله بین هسته و ملات است.^[۱۳، ۱۴] موارد ذکرشده در شکل ۲ مشاهده می‌شود. در شکل ۳، اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی یک مهاربند کمانش تاب نشان داده شده است. سیستم مذکور از ۴ بخش قابل تفکیک از لحاظ رفتار و عملکرد تشکیل شده است:

الف) بخش محصور جاری‌شونده: بخش محصور جاری‌شونده، سطح مقطع با



شکل ۱. منحنی رفتار سیستم مهاربندی کمانش تاب و مهاربند معمولی.^[۱]

جدول ۱. نسبت بار کمانش غلاف به مقاومت تسلیم هسته‌ی فولادی.^[۳]

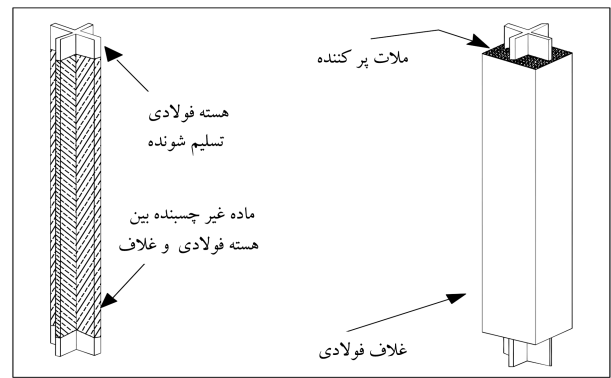
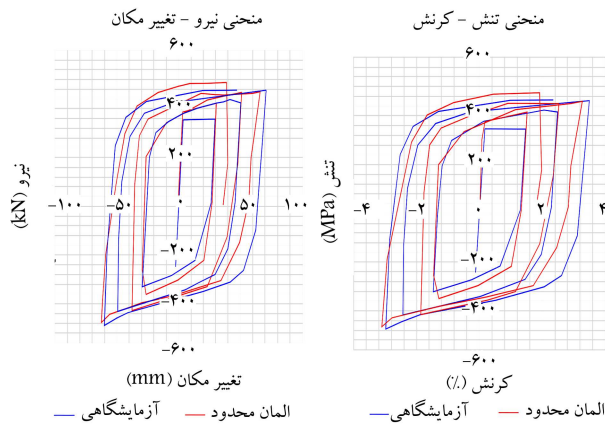
شماره‌ی نمونه	P_e / P_y
۱	۳/۵۳
۲	۱/۳۹
۳	۱/۰۳
۴	۰/۷۲
۵	۰/۵۵

خطای ساخت، نمونه‌ی ۳ نیز دچار کمانش می‌شود، بنابراین در جهت اطمینان، کمیته‌ی ۱/۵ را برای نسبت مذکور پیشنهاد کرده‌اند.

همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹، از مهاربند کمانش تاب تمام فولاد جهت بهسازی لرزه‌ی ساختمان بتن مسلح موجود استفاده و به بررسی آن پرداخته شده است.^[۴] نتایج آزمایش‌هایی در سال ۲۰۱۴، در مورد رفتار دوره‌ی مهاربندهای مذکور نشان داد که به هنگام ایجاد بیشینه‌ی تغییر مکان‌های جانبی نسبی، سیستم‌های مهاربند کمانش تاب بدون آنکه دچار کاهش سختی و مقاومت شوند، ظرفیت استهلاک انرژی بسیار بالایی داشته‌اند.^[۵] در مطالعات دیگری در همان سال،^[۶] قاب‌های ۲ و ۳ بُعدی بادبندهای کمانش تاب در مقیاس واقعی بررسی شدند و نتایج آزمایش‌ها نشان داد که قاب‌های مذکور، رفتار هیستریزس مناسبی در تغییر مکان‌های متوسط دارند.^[۶]

همچنین در مطالعات دیگری (۲۰۱۵)، در مورد عملکرد مهاربند کمانش تاب بدون مواد پرکننده نشان داده شد که استحکام و سختی غلاف و طول هسته در عملکرد مهاربند مذکور مؤثر است.^[۷] برخی پژوهشگران (۲۰۱۶)، نیز بر روی رفتار دوره‌ی مهاربندهای کمانش تاب بدون مواد پرکننده نشان دادند که فاصله‌ی بین هسته و غلاف، پارامتری مؤثر در کمانش جزئی و کلی مهاربندهای مذکور است.^[۸] در مطالعه‌ی دیگری نیز (در همان سال) بر روی رفتار لرزه‌ی مهاربند کمانش تاب تمام فولاد با مقطع هسته‌ی متفاوت، این نتیجه به دست آمد که در صورت انتخاب مقطع مناسب، ناپایداری سیستم مذکور به میزان کمینه می‌رسد و ظرفیت انلاف انرژی آن بیشینه خواهد شد.^[۹] همچنین تأثیر مواد غیرچسبیده در رفتار دوره‌ی مهاربند کمانش تاب فولادی با روش به‌کارگیری یک لایه‌ی لاستیک بوتیل با ضخامت ۱ میلی‌متر بررسی شد و برای کارایی بهتر مهاربندهای مذکور، استفاده از مواد غیرچسبیده توصیه شد.^[۱۰] برخی دیگر از پژوهشگران (۲۰۱۶) نیز به بررسی آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب فولادی با هسته‌ی H شکل پرداختند.^[۱۱]

همچنین در بررسی رفتار لرزه‌ی مهاربندهای کمانش تاب فولادی با هسته و طول کوتاه (۲۰۱۵)، آنالیز تاریخی زمانی غیرخطی بر روی بادبندهای ذکرشده در



شکل ۳. اجزاء تشکیل دهنده یک مهاربند کماتنش تاب. [۱۵]

شکل ۴. منحنی تنش - کرنش و منحنی رفتار مدل رایانه‌یی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پژوهشی در سال ۱۶۰۲۰ [۱۶]

کرنشی در رفتار دوره‌یی، مقاومت فشاری به اندازه‌ی ۳۰٪ افزایش می‌یابد و ضریب مقاومت ۸۵٪ در صورت کسر ضرب خواهد شد (رابطه‌ی ۴):

$$\frac{\varphi P_e}{1.3 P_y} \geq 1 \text{ or } \frac{P_e}{P_y} \geq 1.5 \quad (4)$$

۲. صحت‌سنجی

در آزمایش‌هایی که برخی پژوهشگران در سال ۱۱۰۲۰ انجام داده‌اند، [۱۶] عملکرد لرزه‌یی و خستگی مقاطع غلاف‌دار بدون ملات پُرکننده و آثار پارامترهای مختلفی، همچون شکل اتصال و یا خستگی اعضا در بارگذاری‌های دوره‌یی بررسی شده است که خارج از بحث پژوهش حاضر است. اما در بخش نتایج پژوهش مذکور، منحنی‌های رفتار دوره‌یی مربوط به مدل‌ها ارائه شده است که از آن‌ها برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی اجزاء محدود در پژوهش حاضر استفاده شده است. مدل استفاده شده در نوشتار حاضر منطبق با مدل $S - I$ مطالعات اخیر، است. [۱۶] در مدل مذکور از المان صفحه‌یی SAR برای مدل‌سازی صفحه‌ی فولادی هسته و المان سه‌بعدی C3D8 برای غلاف فولادی استفاده شده است. برای هر دو جزء قطعه، مشخصات غیرخطی نیز لحاظ شده است. در نهایت، منحنی رفتار و منحنی تنش و کرنش دو نمونه‌ی آزمایشگاهی و رایانه‌یی با هم مقایسه شده است. مقدار بیشینه‌ی ظرفیت (بار - جابه‌جایی) آزمایشگاهی، برابر ۴۳۷/۳۳ و ۷۰/۷۳ بر حسب میلی‌متر و کیلو نیوتن است که در مقایسه با مقدار بیشینه‌ی نتایج مدل‌سازی و تحلیل رایانه‌یی در پژوهش حاضر ۴۳۲/۱۸ و ۶۵/۸۰، در مورد جابه‌جایی ۶/۷۹٪ و در مورد نیرو ۱/۱۷٪ اختلاف را نشان داده است. در نتیجه، مدل‌سازی و تحلیل به روش اجزاء محدود در پژوهش حاضر، دقت مناسبی دارد. در شکل ۴، منحنی تنش - کرنش و منحنی رفتار دو مدل آزمایشگاهی و رایانه‌یی نشان داده شده است.

۳. مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها

برای بررسی رفتار دوره‌یی و کماتنش در اثر بار، با استفاده از روش المان محدود، مطالعات عددی بر روی ۱۱ مدل مهاربند کماتنش تاب و ۱ مدل مهاربند معمولی انجام شده است. مدل‌ها در ۴ حالت، بررسی و مقایسه شده‌اند. در هر حالت یک پارامتر، متغیر و سایر پارامترها، ثابت در نظر گرفته شده‌اند و تحت اثر بارگذاری

شکل‌های مختلف دارد و به گونه‌یی طراحی می‌شود که تحت اثر بارگذاری دوره‌یی در هر دو حالت فشاری و کششی، جاری شود. برای این منظور استفاده از فولاد نرمه که شکل‌پذیری بالایی دارد، مناسب است.

بخش غیرمحصور که جاری نمی‌شود: بخش انتهایی دو سر مهاربند که قطعه‌ی اتصال به قاب است، هسته‌ی فولادی پیش‌آمده نامیده می‌شود و قابل طراحی و اجرا برای اتصال توسط جوش یا پیچ و مهره برای نصب در محل عضو به قاب است.

ج) ماده‌ی جداکننده: ماده‌ی جداکننده برای کمیته‌سازی و یا حذف انتقال نیروی محوری از هسته به غلاف و نیز ایجاد امکان برای افزایش سطح مقطع هسته به علت پدیده‌ی پواسون تحت اثر بار فشاری استفاده می‌شود.

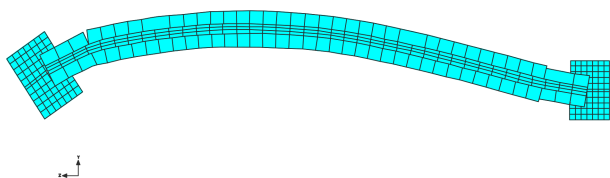
د) غلاف فولادی برای جلوگیری از کماتنش هسته: انتظار می‌رود تا بخش محصور جاری‌شونده، کماتنش‌های کم دامنه‌یی را تحت مودهای بالاتر داشته باشد. مقدار درز موجود باید به اندازه‌ی کافی باشد تا امکان افزایش سطح مقطع هسته در فشار را امکان‌پذیر سازد، در غیر این صورت اصطکاک بین هسته و غلاف افزایش می‌یابد و مصالح پُرکننده موجب انتقال بخشی از بار محوری به غلاف فولادی خواهند شد. در صورتی که درز ذکر شده بیش از حد لازم انتخاب شود، موجب می‌شود تا دامنه‌ی کماتنش هسته و در نتیجه مقدار انحنای هسته‌ی کماتنش‌یافته افزایش یابد که باعث کاهش عمر هسته‌ی جاری‌شونده به علت خستگی در خمش خواهد شد. برای جلوگیری از کماتنش مهاربند، در پژوهشی در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد شده است که غلاف فولادی برای تأمین سختی کافی باید براساس رابطه‌ی ۱ طرح شوند. [۲]

همان‌طور که در بخش ۱ توضیح داده شد، در رابطه‌ی ۱، P_y مقاومت تسلیم هسته‌ی فولادی و P_e مقاومت کماتنش کشسان غلاف است که از روابط ۲ و ۳ به دست می‌آیند:

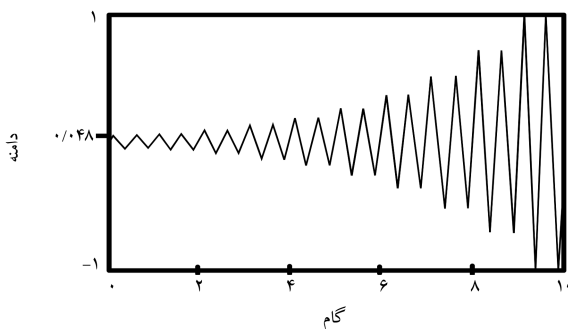
$$P_e = \frac{\mu^v E I_{sc}}{L_{sc}^v} \quad (2)$$

$$P_y = f_y \cdot A_c \quad (3)$$

که در آن‌ها: μ ضریب شکل‌پذیری؛ $(E I_{sc})^*$ سختی خمشی کشسان مقطع غلاف فولادی؛ E مدول کشسانی فولاد؛ I ممان اینرسی مقطع عضو؛ L_{sc}^v طول آزاد غلاف فولادی؛ f_y تنش تسلیم فولاد مورد استفاده برای هسته؛ A_c مساحت هسته. در رابطه‌ی ۲، به دلایل محافظه‌کارانه، از آثار مقاومت خمشی ملات و همچنین از آثار سخت‌شدگی کرنشی نیز چشم‌پوشی شده است و با در نظر گرفتن سخت‌شدگی



شکل ۵. شکل شماتیک شرایط مرزی.



شکل ۶. الگوی اعمال بارگذاری دوره‌ی برای رسیدن ظرفیت نهایی عضو، FEMA۴۶۱.

شرح شامل: مدول کشسان (E)، ضریب پواسون (ν)، تنش جاری شدن (f_y)، تنش گسیختگی (f_u) و کرنش نهایی (ϵ_u) دارند:

$$E = 210 \text{ Gpa}, \nu = 0.29, f_y = 260 \text{ Mpa}, f_u = 430 \text{ Mpa}, \epsilon_u = 22\%$$

ملات (بتن) پُرکننده نیز مشخصات مکانیکی به این شرح شامل: مدول کشسان (E)، ضریب پواسون (ν)، تنش جاری شدن (f_y) دارد:

$$E = 71 \text{ Gpa}, \nu = 0.14, f_{cu} = 250 \text{ Mpa}$$

۲.۳. نحوه‌ی بارگذاری

در پژوهش حاضر، از الگوی بارگذاری دوره‌ی غیرخطی، طبق آیین‌نامه‌ی FEMA۴۶۱-۲۰۰۷^۵، استفاده و بارگذاری براساس کنترل جابه‌جایی انجام شده است (شکل ۶).

۳.۳. بررسی اثر وجود غلاف فولادی

در بخش کنونی، بهبود عملکرد غلاف فولادی بدون ماده‌ی پُرکننده بر روی نیم‌رخ دابل ناودانی در مقایسه با حالت بدون غلاف با مساحت یکسان 1600 میلی‌متر مربع بررسی شده است. در شکل‌های ۷ و ۸، ظرفیت نهایی و قابلیت استهلاک انرژی دو مدل با هم مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مدل دابل ناودانی بدون غلاف فولادی، در چرخه‌ی سوم به مرز ناپایداری رسیده است. این ناپایداری در ناحیه‌ی فشاری، ناشی از کمانش عضو بادبندی در اثر نیروی فشاری است. در حالی که با توجه به شکل ۸، برای بادبند دابل ناودانی با غلاف فولادی ناپایداری در ناحیه‌ی کششی در اواخر بارگذاری در اثر تسلیم عضو بادبندی اتفاق افتاده است. ظرفیت مقطع از $2751 E^5$ به $4724 E^5$ نیوتن رسیده است که افزایش 70% درصدی را نشان می‌دهد. ظرفیت استهلاک انرژی برابر با مساحت منحنی زیر

دوره‌ی، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس^۳ تحلیل شده‌اند. در مدل سازی غیرخطی در نرم‌افزار آباکوس لازم است که مود کمانشی غالب در فرایند بارگذاری معرفی شود. پس در هر بخش، مود کمانشی اول مربوط به هر نمونه و مقدار بار نظیر حالت کمانش به دست آمده است.

در پژوهش حاضر، متغیرهای مورد بررسی در رفتار لرزه‌ی مهاربندهای کمانش تاب عبارت‌اند از:

۱. تأثیر وجود غلاف فولادی،
۲. عدم اجرای ملات پُرکننده،
۳. شکل هسته‌ی درون غلاف،

۴. نسبت بارکمانش غلاف به مقاومت تسلیم هسته (تأثیر ضخامت غلاف).

در جدول ۲، جزئیات و مشخصات هر یک از مدل‌ها نشان داده شده است. هر مدل با یک شناسه‌ی اختصاری مانند $2 - SQ - Cr$ معرفی شده است که حرف اول از سمت چپ معرف شکل هسته‌ی فولادی، حرف میانی معرف شکل غلاف و عدد آخر بیانگر میزان رواداری بین غلاف و هسته است. همچنین حروف Cr ، SQ و PL به ترتیب متناظر با مقاطع ضربدری، مربعی و ورق‌شکل است. در مدل سازی اجزاء محدود برای به‌دست‌آوردن جواب‌های دقیق‌تر، از مقادیر تنش - کرنش واقعی فولاد $ST37$ جهت مدل‌سازی استفاده شده است. معیار خرابی کرنش خمیری معادل، از لحاظ تئوری ساده‌ترین و پرکاربردترین معیار خرابی است. براساس معیار مذکور که در نرم‌افزار آباکوس موجود است، شروع خرابی موقعی است که کرنش خمیری به یک مقدار بحرانی برسد. کرنش خمیری در زمان خرابی یگانه پارامتری است که لازم است توسط آزمایش تعیین شود. معمول‌ترین روش تنظیم کرنش خمیری، معادل آزمایش کشش تک‌محوره است. برای فولاد مورد استفاده در پژوهش حاضر، مقدار کرنش خمیری معادل برابر 1.8% محاسبه شده است. لازم به یادآوری است که معیار کرنش خمیری معادل به دلیل اینکه تعیین‌کننده‌ی نقطه‌ی شروع گسیختگی است، اهمیت دارد و به‌عنوان یکی از معیارهای کنترل‌کننده‌ی فرایند مدل‌سازی مطرح است.

در پژوهش حاضر از معیار تسلیم ون مایسز^۴ استفاده شده است. معیار ون - مایسز به دلیل اسکار بودن و مستقل از دستگاه مختصات بودن، معیار مناسبی برای استفاده‌ی کاربردی است. جهت مدل‌سازی اعضاء مهاربندی، در میان روش‌های موجود برای مش‌بندی، روش ساختار یافته برای نواحی ساده‌ی سه‌بعدی انتخاب شده است. برای کل مجموعه‌ی مدل‌ها، اندازه‌ی مش‌بندی در حدود 40 میلی‌متر لحاظ شده است. همچنین از المان SAR (المان صفحه‌ی Shell با 8 نقطه‌ی انتگرال‌گیری به روش کاهش یافته) برای مقاطع هسته‌ی داخلی و غلاف‌های فولادی استفاده شده است.

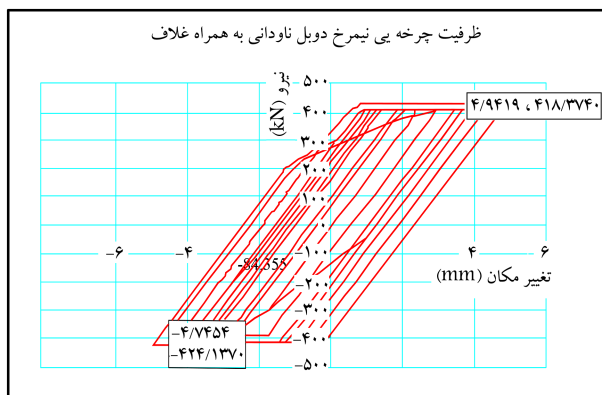
شرایط مرزی به بخش‌هایی از مدل اعمال می‌شود که در آن‌ها جابه‌جایی‌ها و یا دوران‌ها معلوم هستند. در مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته، مهاربندها به گونه‌ی مدل شده‌اند که یک سر کاملاً گیردار است و سر دیگر فقط در راستای محور طولی مهاربند، آزادی حرکت دارد. در شکل ۵، شکل شماتیک شرایط مرزی مدل‌ها نشان داده شده است.

۱.۳. مشخصات مکانیکی مصالح

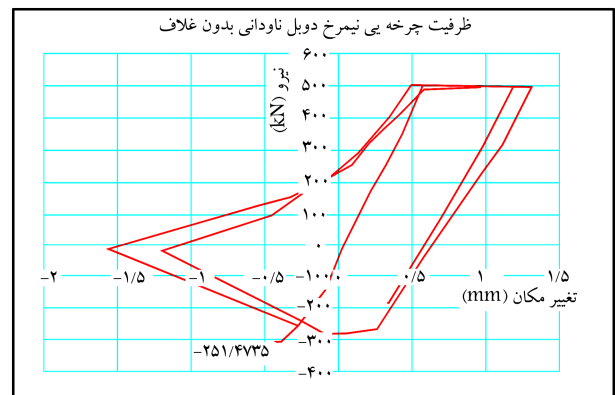
در پژوهش حاضر از فولاد نرمه در مقطع هسته‌ی مهاربندهای کمانش تاب و غلاف فولادی آن استفاده شده است که مشخصات مکانیکی کشسان و خمیری به این

جدول ۲. مشخصات هندسی مدل‌های مطالعه شده.

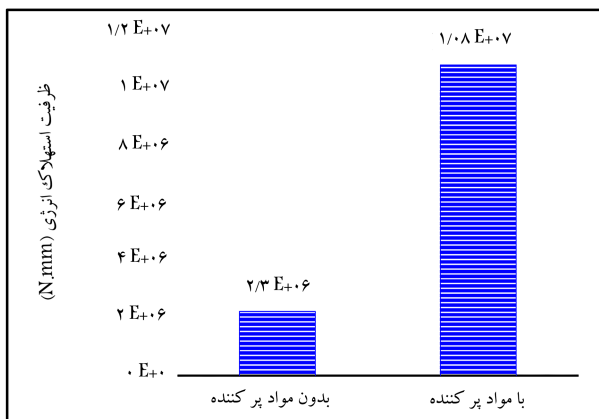
شماره	نمونه	ضخامت هسته (mm)	عرض هسته (mm)	طول هسته (mm)	مساحت هسته (mm) ^۲	$F_y \cdot A$ (N)	ضخامت غلاف (mm)	عرض غلاف (mm)	طول غلاف (mm)	$\frac{P_e}{P_y}$	توضیحات
۱	۲UNP	۸	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	-	-	-	-	مقطع دابل ناودانی
۲	Cr-SQ-۲	۱۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۴	۸۴	۱۷۰	۱/۱	مقطع ضربدری با رواداری mm ^۲ با ملات پرکننده
۳	۲UNP-SQ-۲	۸	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۴	۸۴	۱۷۰	۱/۴	مقطع دابل ناودانی با رواداری mm ^۲
۴	Circ-SQ-۲	۶/۳	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۴	۸۴	۱۷۰	۱/۴	مقطع دایره‌یی با رواداری mm ^۲
۵	Cr-SQ-۲	۱۰	۱۶۰	۲۰۰۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۴	۸۴	۱۷۰	۱/۱	مقطع ضربدری با رواداری mm ^۲
۶	PL-SQ-۲	۱۰	۸۰	۸۰۰	۸۰۰	۲۰۸۰۰۰	۳/۶	۶۵	۱۷۰	۱/۱	ورق با رواداری mm ^۲ با ملات پرکننده
۷	PL-SQ-۲	۱۰	۸۰	۸۰۰	۸۰۰	۲۰۸۰۰۰	۳/۶	۶۵	۱۷۰	۱/۱	ورق با رواداری mm ^۲
۸	Cr-SQ-۶	۱۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۴	۹۲	۱۷۰	۱/۹	
۹	Cr-SQ-۴	۱۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۴	۸۸	۱۷۰	۱/۴	
۱۰	Cr-SQ-۴	۱۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۳	۸۸	۱۷۰	۱/۱	
۱۱	Cr-SQ-۴	۱۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۷	۹۶	۱۷۰	۱/۹	
۱۲	Cr-SQ-۵	۱۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰۰	۴۱۶۰۰۰	۴	۹۰	۱۷۰	۱/۴	



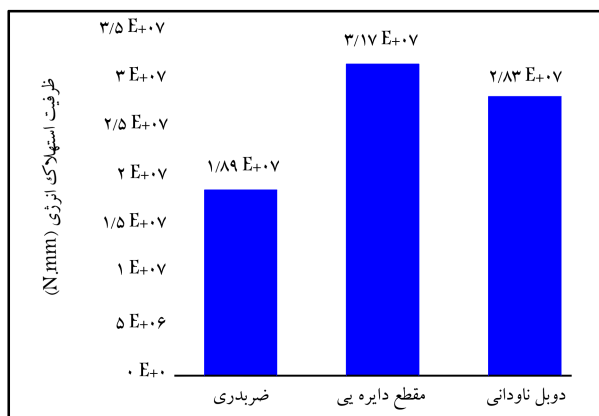
شکل ۸. منحنی رفتار نیمرخ دابل ناودانی با غلاف مربعی ۴ میلی‌متر.



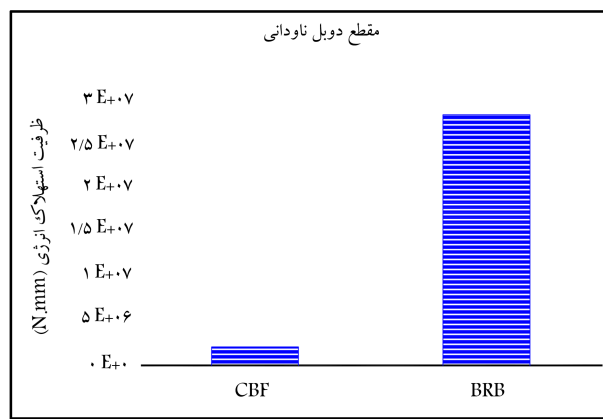
شکل ۷. منحنی رفتار نیمرخ دابل ناودانی بدون غلاف مربعی.



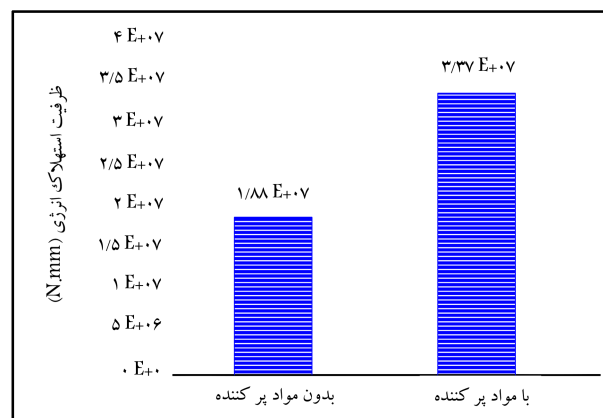
شکل ۱۱. انرژی تلف شده در عضو با مقطع ورق.



شکل ۱۲. انرژی تلف شده در سه مقطع.



شکل ۹. مقایسه‌ی ظرفیت اتلاف انرژی دو نوع مهاربند CBF و BRB بر حسب (N.mm).



شکل ۱۰. انرژی تلف شده در عضو با مقطع ضربداری.

- ظرفیت نهایی سطح مقطع ضربداری با مساحت 1600 میلی‌مترمربع در دو حالت بدون ملات پُرکننده و به همراه ملات پُرکننده برابر با $3.86 E^6$ و $6.57 E^5$ نیوتن بوده است.
- ظرفیت استهلاک انرژی در عضو با مقطع ضربداری در دو حالت بدون ملات پُرکننده و با ملات پُرکننده به ترتیب برابر با $1.88 E^7$ و $3.37 E^7$ نیوتن - میلی‌متر بوده است.
- ظرفیت استهلاک انرژی در عضو با مقطع ورق در دو حالت بدون ملات پُرکننده و با ملات پُرکننده به ترتیب برابر با $2.3 E^6$ و $1.08 E^7$ نیوتن - میلی‌متر بوده است.^[۱۷]

۵.۳. اثر شکل مقطع هسته در حالت وجود غلاف فولادی بدون ماده‌ی پُرکننده

- در بخش حاضر، ظرفیت اتلاف انرژی ۳ هسته‌ی دوبل ناودانی، ضربداری و دایره‌یی شکل با غلاف ثابت $4 \times 84 \times 84$ میلی‌متر و با در نظر گرفتن ۲ میلی‌متر رواداری و با مساحت یکسان مقاطع بررسی شده است. مقطع دایره‌یی تحت اثر بارگذاری دوره‌یی قرار گرفته و توزیع تنش یکنواخت در سرتاسر عضو، نشان‌دهنده‌ی عملکرد قابل قبول مقطع مذکور است (شکل ۱۲).
- در خصوص نتایج تحلیل به مواردی به این شرح می‌توان اشاره کرد:
- ظرفیت نهایی در نمونه‌ی مذکور به مقدار 468 کیلونیوتن رسیده است که نسبت به دو مقطع ناودانی و ضربداری ۱۱٪ و ۲۱٪ افزایش پیدا کرده است.

نمودار است که مطابق شکل ۹ حدود ۵ برابر شده است. در نتیجه، نشان‌دهنده‌ی قابلیت بالای استهلاک انرژی مهاربند کماتش تاب در بارگذاری دوره‌یی است. در شکل ۹، مقدار انرژی تلف شده تحت اثر بارگذاری دوره‌یی برای مهاربند کماتش تاب با مقطع دوبل ناودانی در مقایسه با مهاربندهای معمولی مشاهده می‌شود.

۴.۳. اثر ماده‌ی (ملات) پُرکننده

دو نمونه‌ی PI-SQ-۲ و CI-SQ-۲ با مساحت سطح مقطع به ترتیب 800 و 1600 میلی‌مترمربع در دو حالت با ملات و بدون ملات پُرکننده تحت اثر بارگذاری دوره‌یی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. قبل از بارگذاری دو نمونه‌ی مذکور، مود کماتشی تأثیرگذار آن‌ها تعیین و در گام بعدی تحلیل، مقدار مود اول در بارگذاری استاتیکی غیرخطی اعمال شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، انرژی تلف‌شده در دو مدل مذکور مشاهده می‌شود.

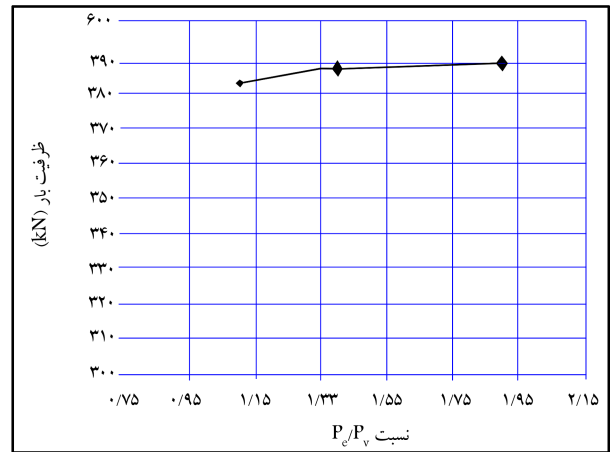
نتایج تحلیل دو مدل مذکور به این شرح است:

- در نمونه با مقطع ورق، مشکل تمرکز تنش در بخش‌هایی از نمونه مشاهده شد، در صورتی که سطح مقطع ضربداری عملکرد بهتری به لحاظ توزیع تنش یکنواخت داشته است.
- ظرفیت نهایی سطح مقطع ورق شکل با مساحت 800 میلی‌مترمربع در دو حالت بدون ملات پُرکننده و به همراه ملات پُرکننده برابر با $1.76 E^5$ و $3.02 E^5$ نیوتن بوده است.

۴. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، ۱۱ نمونه مهاربند کمانش تاب و یک مهاربند معمولی در نرم افزار آباکوس مدل سازی و بارگذاری دوره‌یی شده است. نتایج به این شرح است:

۱. استفاده از غلاف فولادی، ظرفیت باربری مهاربند دابل ناودانی را حدود ۷٪ افزایش می دهد.
۲. ظرفیت اتلاف انرژی در مهاربند کمانش تاب حدود ۵ برابر مهاربند هم‌گرایی معمولی شده است.
۳. در نمونه با مقطع هسته‌ی ضربدری و ورق در حالت بدون ملات پُرکننده نسبت به حالت با ملات، به علت ایجاد موج کمانشی در هسته در اثر وجود فاصله‌ی آزاد بین هسته و غلاف، ظرفیت نهایی حدود ۵۰ الی ۵۸ درصد کاهش یافته است.
۴. با محاسبه‌ی مساحت نمودار بار - جابه‌جایی برای مقاطع ضربدری و ورق، در دو حالت با ماده‌ی پُرکننده و بدون آن مشاهده شد که به‌کارگیری ماده‌ی پُرکننده در نمونه‌های مذکور به علت به تأخیر انداختن پدیده‌ی کمانش موضعی هسته، قابلیت اتلاف انرژی را تا ۴ برابر افزایش داده است.
۵. در مقایسه‌ی سه نمونه با مقاطع ناودانی، ضربدری و دایره‌یی مشخص شد که ظرفیت اتلاف انرژی در مقطع با هسته‌ی دایره‌یی نسبت به دو مقطع ناودانی و ضربدری به ترتیب ۱۲٪ و ۶۷٪ برابر شده است.
۶. در مقایسه‌ی سه نمونه با مقطع هسته‌های ناودانی، ضربدری و دایره‌یی مشخص شد که ظرفیت نهایی نمونه در مقطع با هسته‌ی دایره‌یی نسبت به دو مقطع ناودانی و ضربدری به ترتیب ۱۰٪ و ۲۱٪ افزایش یافته است.
۷. در مهاربندهای کمانش تاب بدون مواد پُرکننده، ضریب $\frac{P_c}{P_y}$ در صورتی که بزرگ‌تر از ۱ باشد، افزایش آن تأثیر چندانی در ظرفیت نهایی مقطع ندارد.
۸. با انتخاب شکل و مشخصات مناسب هسته و غلاف برای مهاربندهای کمانش تاب می‌توان کاهش مقاومت ناشی از عدم اجرای ماده‌ی پُرکننده را تا حدودی جبران کرد و ظرفیت مهاربند را افزایش داد.



شکل ۱۳. آثار نسبت $\frac{P_c}{P_y}$ غلاف فولادی در ظرفیت مهاربند کمانش تاب بدون مواد پُرکننده.

- ظرفیت استهلاک انرژی برای مقاطع دابل ناودانی، دایره‌یی و ضربدری به ترتیب برابر: $2.783E^7$ ، $3.717E^7$ و $1.789E^7$ نیوتن - میلی‌متر بوده است. [۱۷]

۶.۳. اثر ضخامت غلاف فولادی

درخصوص عملکرد غلاف فولادی بدون ملات پُرکننده، پارامتر میزان ضخامت مناسب غلاف که می‌توان آن را با نسبت $\frac{P_c}{P_y}$ سنجید، قابل بررسی است. با تغییر جزئی در مقدار ضخامت غلاف فلزی، مقادیر متفاوتی برای نسبت $\frac{P_c}{P_y}$ به دست می‌آید؛ همان‌طور که در جدول ۲ بیان شده است، با انتخاب ضخامت‌های ۳، ۴ و ۷ میلی‌متر، مقدار ضریب مذکور به ترتیب برابر با ۱/۱، ۱/۴ و ۱/۹ می‌شود (شکل ۱۳). همان‌طور که در شکل ۱۳ ظرفیت نهایی سه نمونه‌ی ذکر شده مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد نسبت $\frac{P_c}{P_y}$ پس از مقدار ۱/۱۵، تأثیر قابل ملاحظه‌یی در ظرفیت مهاربندهای کمانش تاب بدون مواد پُرکننده ندارد. نسبت مذکور برای جلوگیری از کمانش غلاف نباید از ۱/۰ کمتر گرفته شود و توصیه شده است در جهت اطمینان بیشتر از ۱/۱۵ در نظر گرفته شود.

پانویس‌ها

1. concentrically braced frame
2. buckling restrained braced
3. ABAQUS
4. The von mises yield criterion
5. federal emergency management agency

منابع (References)

1. Ballio , G. and Castiglioni , C. "seismic behavior of steel sections" , *Int. J. of Construct and Steel Research*, **29**, pp.21-54 (1994).

2. Wakabayashi, M., Nakamura, T., Kashibara , A. and et al. "Experimental study of elasto-plastic properties of precast concrete wall panels with built-in insulating braces", *Int. Annual Meeting. on Architectural Institute.*, Japan, pp. 1041-1044 (1973).
3. Watanabe, A., Hitomi, Y., Yaeki, E. and et al. "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube", *9th Int. proc. World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, IV, pp.719-724 (1988).
4. Corte, G., Aniello, M. and Mazzolani, F. "All-steel buckling-restrained braces for seismic upgrading of existing reinforced concrete buildings", *Int. Proc. of ANIDI2009 BOLOGNA*, pp. 1-10 (2009).

5. Mingming, J., Dagang, L., Lanhui, G. and et al “Experimental research and cyclic behavior of buckling-restrained braced composite frame”, *Int. J. of Constructional Steel Research*, **95**, pp. 90-105 (Apr., 2014).
6. Palmer, K., Christopoulos, A., Dawn, E. and et al. “Experimental evaluation of cyclically loaded , large-scale, planar and 3-d buckling-restrained braced frames”, *Int. J. of Constructional Steel Research*, **101**, pp. 415-425 (Oct., 2014).
7. Jiang, Z., Yanlin, G., Zhang , B. and et al. “Influence of design parameters of buckling-restrained brace on its performance”, *Int. J. of Constructional Steel Research*, **105**, pp. 139-150 (2015).
8. Shen, J., Seker, O., Sutchiewcharn, N. and et al. “Cyclic behavior of buckling-controlled braces ”, *Int. J. of Constructional Steel Research*, **121**, pp. 110-125 (2016).
9. Hosseinzadeh, Sh. And Mohebi, B. “Seismic evaluation of all-steel buckling restrained braces using finite element analysis”, *Int. J. of Constructional Steel Research*, **119**, pp. 76-84 (2016).
10. Chen, Q., Wang , Ch., Meng, Sh. and et al. “Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces”, *Int. J. of Engineering Structures*, **111**, pp. 478-493 (2016).
11. Li, W., Wu, B., Ding, Y. and et al. “Experimental performance of buckling-restrained braces with steel cores of H-section and half-wavelength evaluation of higher-order local buckling” , *Int. J. of Advances in Structural Engineering*, **20**(4), pp.1-17 (2016).
12. Bagerzadeh Karimi, R., Lotfollahi Yaghin, A., Mehdinezhad, R. and et al. “Seismic behavior of steel structure with buckling-restrained braces”, *Int. J. of Civil, Environmental ,Structural , Construction and Architectural Engineering*, **9**(4), pp. 480-488 (2015).
13. Tasnimi, A. and Dehghan, A. “behavior coefficient reinforced concrete strenghte with baracing buckling”, *3th Int. Conf. on Seismic Retrofitting*, Tabriz, Iran (1389).
14. Salmanpour, A. and Arabi, F. “Seismic reliability in Buckling restrained braced structures(BRB)”, *4th. Int. Cong. on Civil Engineering*, Tehran, Iran ,Tehran University (1387).
15. Clark, P., Aiken, I., Kasai, K. and et al. “Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices”, Proc. 69th Annual Convention of SEAOC, Sacramento, CA (1999).
16. Usami, T., Wang, Ch. and Funayama, J. “Low-cycle fatigue tests of a type of buckling restrained braces”, *14th Conf. on Structural Engineering and Construction*, Meijo University, Japan, 956-964 (2011). pp.
17. Ghafari, S. “Seismic behavior of buckling restrained braces with steel tube without Mortar filler”, Master's Thesis Islamic Azad University, Khomein Branch, Iran, pp. 55-63(1395).