

به کارگیری مهارندهای کمانش گریز در بهسازی قاب‌های خمشی فولادی

مرتضی رئیسی دهکردی^{۱*}، مرتضی علیزاده اسفیوخی^۲

۱- استادیار و عضو هیئت‌علمی دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه علم و صنعت ایران

morteza.alizadeh2010@gmail.com

چکیده

در کشور ما تعداد ساختمان‌هایی که براساس ضوابط ویرایش اول استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده‌اند، زیاد است. این سازه‌ها براساس ضوابط ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه‌های معتبر بهسازی لرزه‌ای از شکل‌پذیری کافی برخوردار نیستند و ضعیف عمل می‌کنند؛ بنابراین به کارگیری روش‌های مناسب برای بهسازی این سازه‌ها و تأمین ایمنی جانی ساکنین ضرورت دارد. افزودن مهارندهای فولادی یکی از راهکارهایی است که ضمن افزایش سختی سازه، بهبود رفتار لرزه‌ای و عدم اختلال در کاربری سازه را به همراه دارد. در این میان استفاده از مهارندهای کمانش‌ناپذیر، به دلیل رفتار لرزه‌ای مناسب آن مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق این نوع مهارند به عنوان راه‌حلی برای بهسازی قاب‌های خمشی فولادی طراحی شده براساس ویرایش اول استاندارد ۲۸۰۰ در تعداد طبقات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و در نهایت رفتار لرزه‌ای و سطوح عملکرد نمونه‌های بهسازی شده با این نوع مهارند، با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سازه‌های بهسازی شده با مهارندهای کمانش‌گریز دارای سختی و شکل‌پذیری و سطح عملکرد مناسبی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: قاب خمشی فولادی، مهارند کمانش‌گریز، بهسازی، تحلیل استاتیکی غیرخطی

۱- مقدمه

بخش عظیمی از ساختمان‌هایی که در حال بهره‌برداری است از نوع قاب خمشی فولادی است. بنا به تعریف قاب خمشی سیستم سازه‌ای است که در آن قاب، به طور همزمان در برابر بارهای ثقلی و جانبی مقاومت می‌کند. تعداد زیادی از این سازه‌ها براساس ضوابط طراحی ویرایش اول استاندارد ۲۸۰۰ [۱] مصوب سال ۱۳۶۶ طراحی و اجرا شده‌اند. احتمال می‌رود که این ساختمان‌ها براساس ضوابط جدید آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش سوم) [۲] و آیین‌نامه‌های معتبر بهسازی لرزه‌ای مانند FEMA356 [۳] و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای [۴] توانایی برآورده نمودن نیازهای لرزه‌ای سازه را نداشته باشند از اینرو نیاز به بهسازی دارند؛ بنابراین به کارگیری روش‌های مناسب برای بهسازی این سازه‌ها و تأمین ایمنی جانی ساکنین ضرورت دارد. مطالعات صورت گرفته بر روی قاب‌های خمشی طراحی شده براساس ویرایش اول استاندارد ۲۸۰۰ [۵] نشان می‌دهد که این قاب‌ها براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای و استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم در «سطح خطر ۱» و «سطح خطر ۲» ضعیف‌اند و از شکل‌پذیری کافی برخوردار نمی‌باشند؛ و نیازمند بهسازی می‌باشند. به منظور بهسازی این سازه‌ها دو راهکار مورد بررسی و مقایسه

قرار می‌گیرد. راهکار اول استفاده از مهارندهای همگرای متداول به شکل ضربدری (CBF¹) و روش دوم استفاده از مهارندهای کمانش‌گریز (BRBF²) می‌باشد.

۲- معرفی مهارند کمانش‌گریز

ایده ممانعت از کمانش مهارند، برای فراهم آوردن تسلیم فشاری آن به حدود ۳۰ سال قبل برمی‌گردد، که ابتدا توسط یک مهندس هندی به نام Benne Sirdhar برای جلوگیری از کمانش ستون‌ها و افزایش باربری آن‌ها در هندوستان مورد مطالعه قرار گرفت [۶]. برای اولین بار مطالعات جدی بر روی مهارندهای کمانش‌ناپذیر در سال ۱۹۸۰ در ژاپن صورت گرفت؛ اما اولین بار در سال ۲۰۰۰ در آمریکا مورد استفاده قرار گرفت و به سرعت استفاده از آن‌ها گسترش یافت [۷]. در سال ۱۹۹۹ clerk (و همکارانش) روشی برای طراحی ساختمان‌هایی که سیستم مهاربندی کمانش‌گریز کارشده‌اند ارائه داده‌اند [۸]. در سال ۲۰۰۱ Inoue، مهارندهای کمانش‌ناپذیر را به عنوان میراگرهای هیستریسی معرفی کرد تا بتواند با بهره‌گیری از آن رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها را بهبود بخشد [۹]. در سال ۲۰۰۲ Black آزمایش‌هایی را روی سیستم مهاربندی کمانش‌گریز انجام داد و منحنی چرخه‌ای را با نتایج آزمایشگاهی تطبیق داد و دریافت که منحنی چرخه‌ای مهارندهای کمانش‌گریز، متقارن، پایدار و گسترده است [۱۰]. Sabelli در سال ۲۰۰۳، تقاضای لرزه‌ای سیستم مهاربندی کمانش‌گریز را به وسیله آنالیز رفتار لرزه‌ای یک قاب مهاربندی کمانش‌گریز گزارش داد. بار کمانشی موثر مهارندهای کمانش‌گریز با در نظر گرفتن سختی و اثر اتصالات انتهایی در سال ۲۰۰۴ توسط Tembaba مطالعه شد [۱۱]. در سال ۲۰۰۵ Qiang به بررسی نمونه‌های عملی استفاده از این سیستم سازه‌ای در آسیا پرداخت [۱۲]. همچنین Takeushi (و همکارانش) بر روی کمانش موضعی مهارندهای کمانش‌گریز مطالعاتی انجام دادند [۱۳]. در سال ۲۰۰۶ اولین بار ایده‌ی استفاده از مهارندهای کمانش‌گریز که تماماً از فولاد ساخته شده باشد مطرح شد و رفتار چرخه‌ای مهارندهای کمانش‌گریز تماماً فولادی^۳ به صورت آزمایشگاهی توسط Trembley بررسی و مطالعه شد [۱۴]. سپس در سال ۲۰۱۰ مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار لرزه‌ای مهارندهای کمانش‌گریز تماماً فولادی توسط Eryasar و همکارانش صورت گرفت [۱۵]. محققان زیادی بر روی رفتار لرزه‌ای و نحوه بهبود رفتار این سیستم مقاوم جانبی کار کرده‌اند تا امروزه به عنوان یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها به صورت گسترده در بسیاری از کشورهای لرزه‌خیز از جمله آمریکا، ژاپن، چین، تایوان و ... مورد استفاده قرار گیرد.

رفتار نامطلوب عمده‌ای که در مهارندها مشاهده می‌شود کمانش مهارند فشاری است، که این امر باعث کاهش شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی در سازه به دلیل اثر ثانوی تغییر شکل‌های غیرخطی هندسی می‌گردد. این موضوع در بارگذاری‌های تناوبی مانند زلزله با توجه به ماهیت کاهش بیشتر سختی تحت بارهای دینامیکی لرزه‌ای، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از مهاربندی که در فشار و کشش رفتار یکسانی داشته باشد و کمانش نکند، همیشه مطلوب طراحان سازه بوده است. در حقیقت این بهسازی، رفتارهای نامناسب زیر را اصلاح می‌کند:

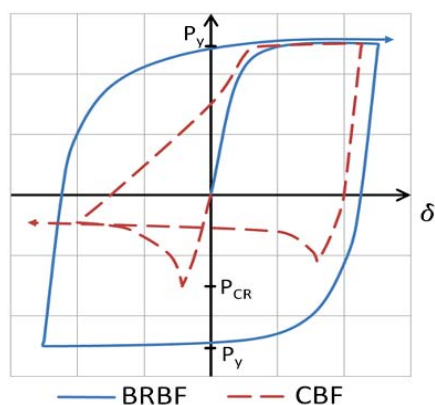
۱. کاهش مقاومت
۲. کاهش سختی
۳. کاهش شکل‌پذیری

شکل ۱ نحوه رفتار سیستم مهاربندی کمانش‌گریز (BRBF) و مهاربندی متداول هم محور (CBF) را نمایش می‌دهد، همان طور که ملاحظه می‌گردد این سیستم دارای رفتار لرزه‌ای مناسب و منحنی چرخه‌ای پایدار و متقارنی در کشش و فشار نسبت به مهارندهای هم محور می‌باشد.

1 Concentrically Braced Frames

2 Buckling- Restrained Braced Frame

3 All- steel BRBS

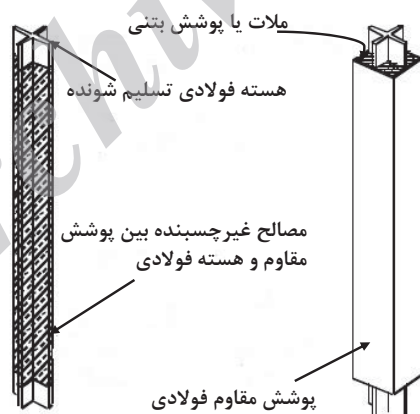


شکل ۱- مقایسه رفتار چرخه‌ای سیستم‌های کمانش‌گریز و هم‌محور [۱۶]

در حال حاضر انواع مختلفی از مهاربندهای کمانش‌گریز وجود دارند. براساس تحقیقاتی که صورت گرفته است، این مهاربندها براساس نوع پوشش مقاوم خارجی به سه دسته تقسیم شده‌اند:

۱. هسته ضد کمانش با پوشش مقاوم فولادی و ملات یا بتن
۲. هسته ضد کمانش محصورشده داخل پانل بتن مسلح
۳. هسته ضد کمانش با پوشش مقاوم تمام فولادی

رایج‌ترین نوع این مهاربندها، هسته ضد کمانش با تیوپ فولادی و ملات یا بتن است که هسته فولادی از ملات توسط ماده‌ای غیر چسبنده جدا شده است. از اینرو از این‌گونه مهاربندها به عنوان مهاربندهای کمانش‌گریز غیر چسبنده نام می‌برند؛ که در زیر اجزای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر چند در سال‌های اخیر استفاده از مهاربندهای تمام فولادی (نوع ۳) به دلیل مزیت‌های آن گسترش یافته است. اجزا و عملکرد این نوع از مهاربندهای کمانش‌گریز نیز مشابه مهاربندهای کمانش‌گریز غیر چسبنده است، فقط تفاوت در پوشش مقاوم است. شکل ۲ اجزای سازنده مهاربند کمانش‌ناپذیر با پوشش مقاوم فولادی و ملات را نشان می‌دهد.

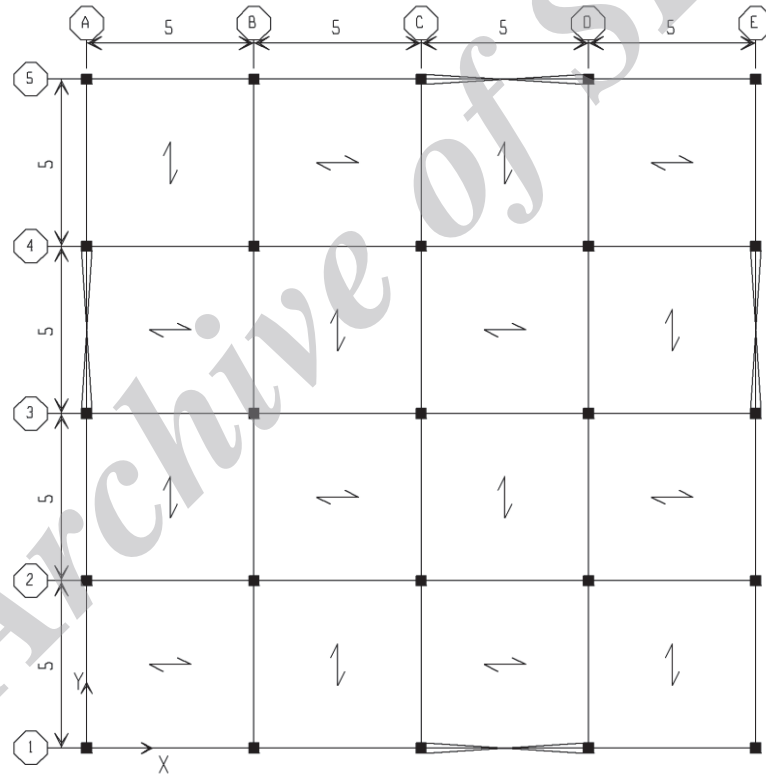


شکل ۲- یک نوع مهاربند کمانش‌گریز [۱۶]

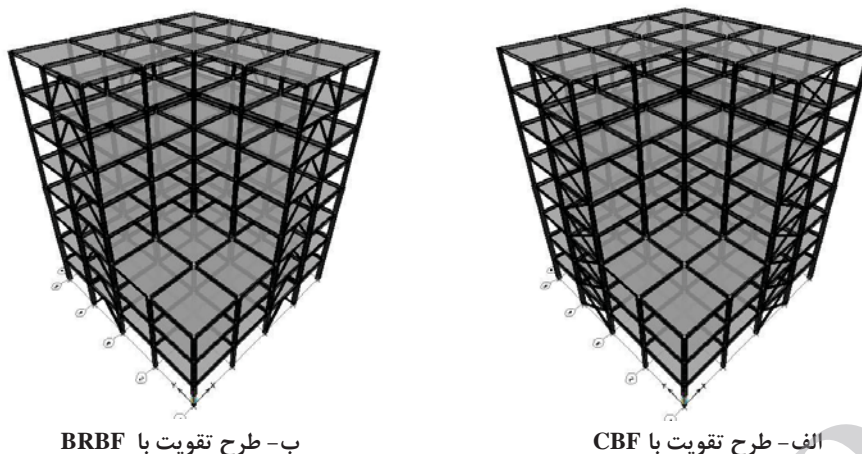
۳- معرفی نمونه‌ها

نمونه‌های قاب خمشی فولادی متوسط به صورت ساختمان‌های سه بعدی ۴ طبقه، ۸ طبقه و ۱۲ طبقه به دو صورت منظم و نامنظم در پلان و در ارتفاع سازه براساس ویرایش اول استاندارد ۲۸۰۰ به صورت الاستیک تحلیل و طراحی شده‌اند. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی این نمونه‌ها آسیب‌پذیری این سازه‌ها براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای تأیید شده است. به منظور تحلیل و طراحی این سازه‌ها فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- کاربری ساختمان‌ها اداری و بااهمیت متوسط ($I=0$) فرض شده است.
- محل احداث ساختمان از نظر پهنه بندی زلزله جز مناطق با لرزه بالا ($A=0.35g$) محسوب می‌شود.
- سیستم باربر جانبی ساختمان در هر دو جهت قاب خمشی متوسط ($R=6$) است.
- سیستم باربر ثقلی، سقف تیرچه بلوک است.
- نوع خاک زمین از نوع III است.
- ارتفاع تمامی طبقات به طور یکسان و برابر $3/20$ متر می‌باشد.
- فولاد مصرفی از نوع فولاد نرمه ساختمانی (ST37) و بتن مصرفی در سقف‌ها بتن با مقاومت مشخصه 210 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع ($f_c=210 \text{ kg/m}^2$) می‌باشد.
- بارگذاری ثقلی براساس نشریه 519 و بارگذاری جانبی براساس آیین‌نامه 2800 ویرایش اول مصوب سال 1366 صورت گرفته است.
- پس از بررسی آسیب‌پذیری این سازه‌ها، به دلیل آسیب‌پذیری بیشتر قاب‌های خمشی نامنظم به تقویت این نمونه‌ها با استفاده از مهاربندهای همگرا و کمانش‌گریز پرداخته می‌شود. محل استقرار مهاربندها در پلان ساختمان‌های نمونه در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۳- محل استقرار مهاربندها در پلان ساختمان‌های نمونه



شکل ۴- مدل سه بعدی نمونه ۸ طبقه

برای سهولت در کار نام گذاری نمونه‌ها به شکل زیر انجام می‌شود.



۴- تحلیل استاتیکی غیرخطی

در تحلیل استاتیکی غیرخطی (تحلیل پوش آور)، بار جانبی به تدریج افزایش داده می‌شود تا آنجا که تغییر مکان در نقطه معینی (نقطه کنترل) از مقدار مشخصی (تغییر مکان هدف) فراتر رود. در هنگام افزایش بار جانبی تغییر شکل‌ها و نیروهای داخلی به طور مداوم تحت نظر قرار می‌گیرد. این روش مشابه روش تحلیل استاتیکی خطی است با این تفاوت که رفتار غیرخطی تک تک اعضا و اجزای سازه در تحلیل وارد می‌گردد و اثر زلزله به جای اعمال بار مشخص، بر حسب تغییر شکل برآورد می‌گردد.

۴-۱- نقطه کنترل

مطابق با دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای و تفسیر آن [۴] و [۱۷] نقطه‌ی عملکرد بیانگر شرایطی است که در آن، ظرفیت سازه‌ای با نیاز لرزه‌ای تحمیل شده به سازه در اثر یک زمین لرزه مشخص، برابر باشد. مرکز جرم بام به عنوان نقطه کنترل تغییر مکان سازه انتخاب می‌گردد. بدین معنی که در هنگام تحلیل سازه تغییر شکل‌ها این نقطه از سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد و منحنی ظرفیت براساس جابجایی این نقطه ترسیم می‌گردد.

۴-۲- تغییر مکان هدف

جابجایی متناظر با نقطه کنترل را براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای [۴] و نشریه FEMA356 [۳] تغییر مکان هدف^۱ و در آیین‌نامه ATC-40 جابجایی تقاضا^۲ می‌گویند. در تعریف تغییر مکان هدف پارامترهای زیادی موثرند مانند، سطح عملکرد مورد انتظار از سازه و سطح خطر زلزله. در واقع تغییر مکان هدف بیانگر هدف بهسازی (بهسازی مینا) است. روشی که برای به دست

^۱ Target Displacement

^۲ Demand Displacement

آوردن تغییر مکان هدف در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای [۵] و نشریه FEMA356 [۳] مورد استفاده قرار می‌گیرد به روش ضرایب جابجایی^۱ معروف است. در آیین‌نامه ATC-40 جابجایی تقاضا به روش طیف ظرفیت^۲ تعیین می‌گردد.

۴-۳- الگوی بار جانبی

با انجام تحلیل غیرخطی استاتیکی (پوش آور) عملکرد لرزه‌ای طرح‌های تقویت مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در تمامی نمونه‌ها زمان تناوب مد اول کمتر از یک ثانیه است و مد اول کمتر از ۷۵٪ جرم سازه را مرتعش می‌کند الگوی توزیع بار جانبی نوع اول، توزیع متناسب تحلیل دینامیکی طیفی و توزیع نوع دوم، توزیع یکنواخت بر سازه اعمال می‌گردد. با انجام تحلیل پوش آور، مشخص شد که الگوی بار مثلثی وضعیت بحرانی تری در سازه ایجاد می‌کند. در تمامی نمونه‌ها هدف بهسازی مبنا است و می‌بایست ایمنی جانی ساکنین حفظ شود. ترکیبات بار ثقلی براساس ترکیبات بار ارائه شده در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای منظور شده است.

۴-۴- پارامترهای مدل‌سازی و معیارهای پذیرش

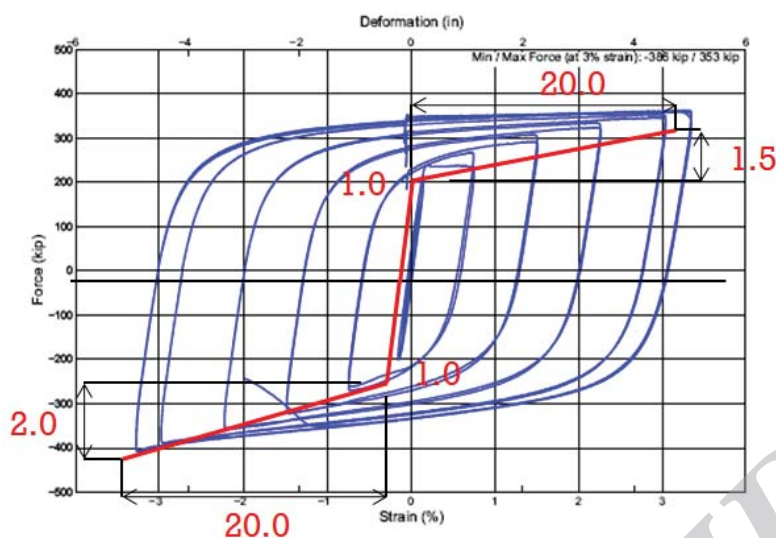
نرم‌افزارهای مانند SAP2000 در تحلیل غیرخطی به جای استفاده از منحنی تنش کرنش مصالح از روابط پیشنهادی FEMA356 برای اختصاص رفتار غیرخطی عضو به سازه استفاده می‌کنند. این پارامترها (منحنی‌ها) رفتاری در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای نیز برای تحلیل‌های خطی و غیرخطی براساس نوع تلاش اعضای سازه ارائه شده‌اند. مفاصل پلاستیک تعریف شده در هر یک از اعضا براساس نوع تلاش حاکم در آن عضو و براساس دستورالعمل بهسازی برای اعضای سازه تعریف شده است.

معیارهای پذیرش مهاربندهای کمانش گریز و پارامترهای مدل‌سازی این مهاربندها در برخی آیین‌نامه‌های بهسازی از جمله آیین‌نامه‌ی ASCE 41-06 ارائه شده است. این آیین‌نامه‌ی برای تحلیل‌های خطی از ضریب تعدیل m برای انطباق رفتار خطی و غیرخطی سازه استفاده می‌کند. این ضریب برای مهاربندهای کمانش گریز همانند مهاربندهای هم محور با شکل‌پذیری متوسط در کشش و فشار یکسان تعریف می‌شود. برای تحلیل‌های غیرخطی می‌توان از نتایج آزمایشگاهی حاصل شده توسط شرکت Nippon Steel ژاپن و یا معیارهای ارائه شده در آیین‌نامه‌ی ASCE 41-06 استفاده نمود.

نتایج آزمایشگاهی حاصل شده توسط شرکت Nippon Steel ژاپن برای ترسیم منحنی پوش نمودار هیستریز بر روی ۵ نمونه مهاربند با سطح مقطع‌های متفاوت می‌باشد. شکل زیر منحنی ترسیم شده حاصل از آزمایش‌های این شرکت را نشان می‌دهد. گرچه نیرو و جابجایی واقعی مهاربندها با صرف نظر از ظرفیت مهاربند بسیار متأثر از سطح مقطع هسته فولادی مهاربند می‌باشد. ظرفیت شکل‌پذیری به دست آمده برای تمامی نمونه‌ها ۲۰ برابر تغییر شکل تسلیم محوری مهاربند می‌باشد. از آنجا که نمونه‌های مهاربند کمانش گریز آن قدر پوش نمی‌شوند تا گسیخته شوند، بنابراین نمی‌توان ظرفیت شکل‌پذیری به دست آمده را ظرفیت شکل‌پذیری حداکثر مهاربند محسوب کرد، گرچه ظرفیت شکل‌پذیری محاسبه شده به صورت محافظه کارانه به عنوان حداکثر ظرفیت شکل‌پذیری مهاربند منظور می‌شود.

۱ Displacement coefficient Method

۲ Capacity Spectrum Method



شکل ۶- منحنی پوش نمودار هیستریزیس مهاربند کمانش گریز حاصل شده از آزمایش‌های شرکت Nippon Steel ژاپن سال ۲۰۰۶

در بخش ۱، ۲، ۳، ۴، ۳ آیین‌نامه ASCE 41-06، استفاده از معیارهای پذیرش اعضای غیر اصلی را با پوش نمودار هیستریزیس کامل مجاز می‌داند. استفاده از معیارهای پذیرش غیرخطی برای مهاربند در کشش براساس این آیین‌نامه به ترتیب به ۱۱، ۰/۲۵ و ۱۳ برابر تغییر شکل تسلیم برای سطح عملکرد قابلیت استفاده بدون وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) محدود می‌شود. براساس نتایج آزمایش‌های Nippon Steel و همچنین نتایج آزمایش‌های Fahnestock و همکاری‌اش در سال ۲۰۰۳، می‌توان حداکثر ظرفیت شکل‌پذیری مهاربندهای کمانش گریز را بیشتر از ۲۰ برابر ظرفیت تغییر شکل تسلیم آن دانست؛ بنابراین در کارهای تحقیقاتی می‌توان از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و توصیه‌های Nippon Steel استفاده نمود. بر این اساس در برخی مراجع معیارهای پذیرش مهاربند کمانش گریز در کشش مانند جدول زیر ارائه شده است [۱۸]:

جدول ۱- معیارهای پذیرش غیرخطی مهاربند کمانش ناپذیر [۱۸]

سطح عملکرد	معیارهای پذیرش براساس ASCE 41-06	معیارهای پذیرش براساس نتایج آزمایشگاهی
قابلیت استفاده بدون وقفه (IO)	$0.25\Delta y$	$5\Delta y$
ایمنی جانی (LS)	$11\Delta y$	$15\Delta y$
آستانه فروریزش (CP)	$13\Delta y$	$20\Delta y$

۴-۵- معرفی شاخص N_{bf}

به منظور بررسی کامل رفتار غیرخطی نمونه‌ها و همچنین جهت ایجاد امکان مقایسه رفتار سازه‌های مختلف با یکدیگر، با در نظرگیری رفتار تمامی مفاصل نمونه مورد بررسی، مرجع [۱۹] شاخص N_{bf} را به صورت زیر پیشنهاد می‌کند:

$$N_{bf} = \left[\frac{(n_{(A-B)} \times 1 + n_{(B-IO)} \times 1 + n_{(IO-LS)} \times 3 + n_{(LS-CP)} \times 6 + n_{(CP-C)} \times 9)}{n_{TOTAL}} \right] \quad (1)$$

که در آن:

- $n_{(A-B)}$: تعداد کل مفاصل موجود در ناحیه A تا B.
- $n_{(B-IO)}$: تعداد کل مفاصل موجود در ناحیه B تا IO.
- $n_{(IO-LS)}$: تعداد کل مفاصل موجود در ناحیه IO تا LS.

^۱ Nonlinear behavior factor

$n_{(LS-CP)}$: تعداد کل مفاصل موجود در ناحیه LS تا CP.

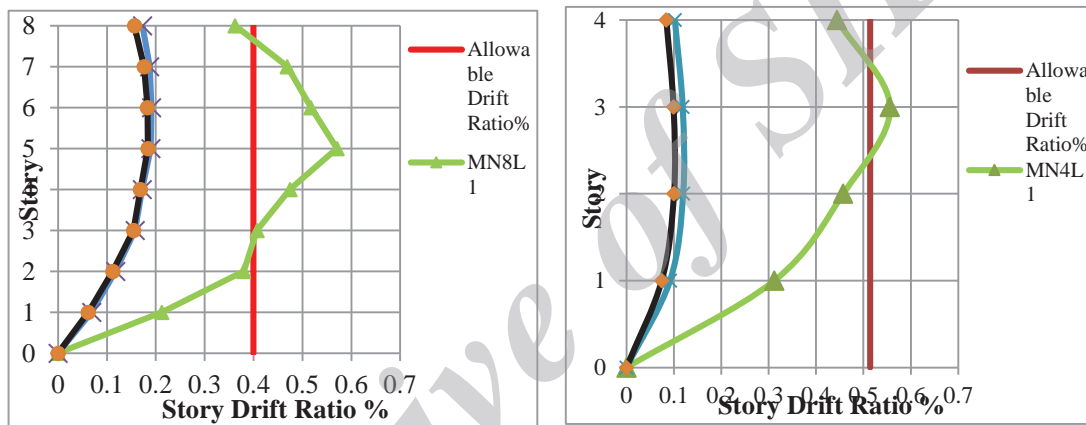
$n_{(CP-C)}$: تعداد کل مفاصل موجود در ناحیه CP تا C.

n_{TOTAL} : تعداد کل مفاصل.

این شاخص روند تغییرات غیرخطی سازه را در طول بارگذاری به صورت کمی با اعدادی بین ۰ تا ۹ ارائه می‌دهد. همان طور که مشخص است افزایش مقدار N_{bf} نشان‌دهنده ورود بیشتر سازه مورد بررسی به ناحیه غیرخطی است. همچنین ضرایب مربوطه با توجه به اهمیت رفتار مفاصل پلاستیک مختلف در رفتار غیرخطی سازه‌ها پیشنهاد شده است.

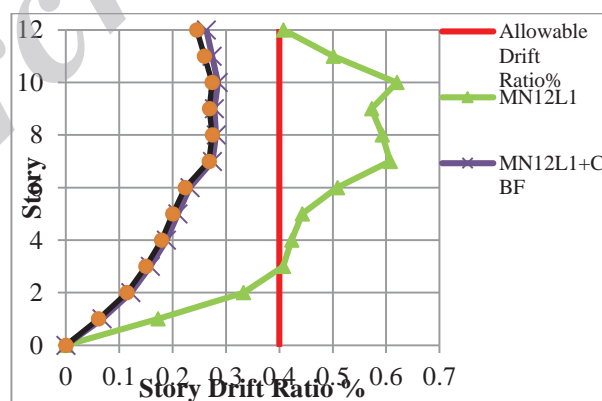
۵- ارزیابی و مقایسه طرح تقویت نمونه‌ها

کنترل معیار سختی در تراز حد مقاومت براساس تغییر مکان نسبی (گریز یا دریفت) مجاز طبقات بررسی می‌شود. سازه‌های نمونه قبل از تقویت از سختی کافی برخوردار نبوده‌اند و تغییر مکان نسبی آن‌ها فراتر از محدوده مجاز بوده است. پس از اضافه نمودن مهاربندهای هم محور ضربدری و مهاربندهای کم‌انحراف گریز به سازه، تغییر مکان سازه در تراز مقاومت با مقدار مجاز و برایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ مطابق شکل ۷ مقایسه شده است.



ب- نمونه ۸ طبقه

الف- نمونه ۴ طبقه

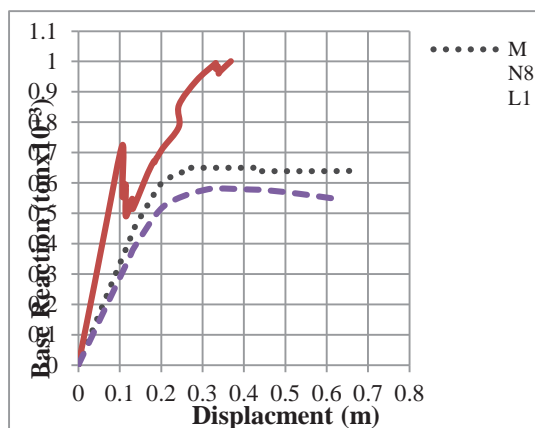


ج- نمونه ۱۲ طبقه

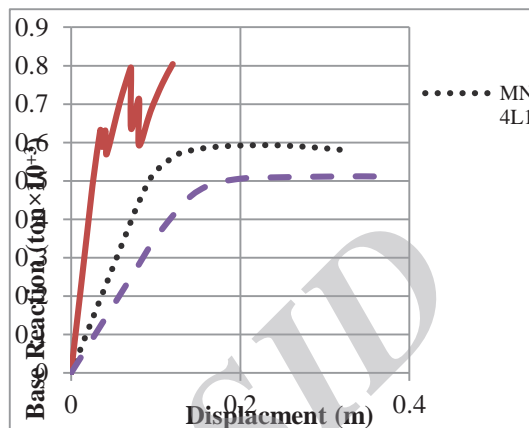
شکل ۷- مقایسه مقدار دریفت طبقات با مقدار مجاز در نمونه‌های تقویت‌شده

با توجه به نمودار شکل ۷ مشاهده می‌گردد که در تمامی طرح‌های تقویت دریفت طبقات بسیار کمتر از مقدار مجاز بوده و معیار سختی را براساس و برایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ برآورده می‌کنند. همان طور که مشاهده می‌شود نمونه تقویت‌شده با مهاربند کم‌انحراف گریز در تمامی نمونه‌ها کمترین مقدار تغییر مکان را در بین طرح‌های تقویت داراست.

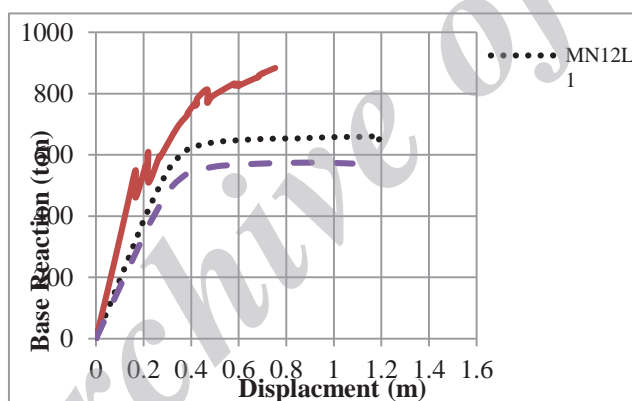
با انجام تحلیل پوش آور، مشخص شد که الگوی بار مثلی وضعیت بحرانی تری در سازه ایجاد می‌کند. به دلیل کماتش مهاربند فشاری در فشار، منحنی ظرفیت نمونه‌های تقویت‌شده با مهاربند همگرا رفتار نامتقارنی در کشش و فشار دارد و پس از کماتش مهاربند، افت شدید سختی در منحنی ظرفیت سازه مشاهده می‌شود. منحنی ظرفیت نمونه‌های تقویت‌شده با مهاربندهای کماتش گریز در مقایسه با منحنی ظرفیت سازه‌های تقویت‌شده با مهاربندهای همگرا پایدار و بدون افت مقاومت و سختی می‌باشد.



ب- نمونه ۸ طبقه



الف- نمونه ۴ طبقه

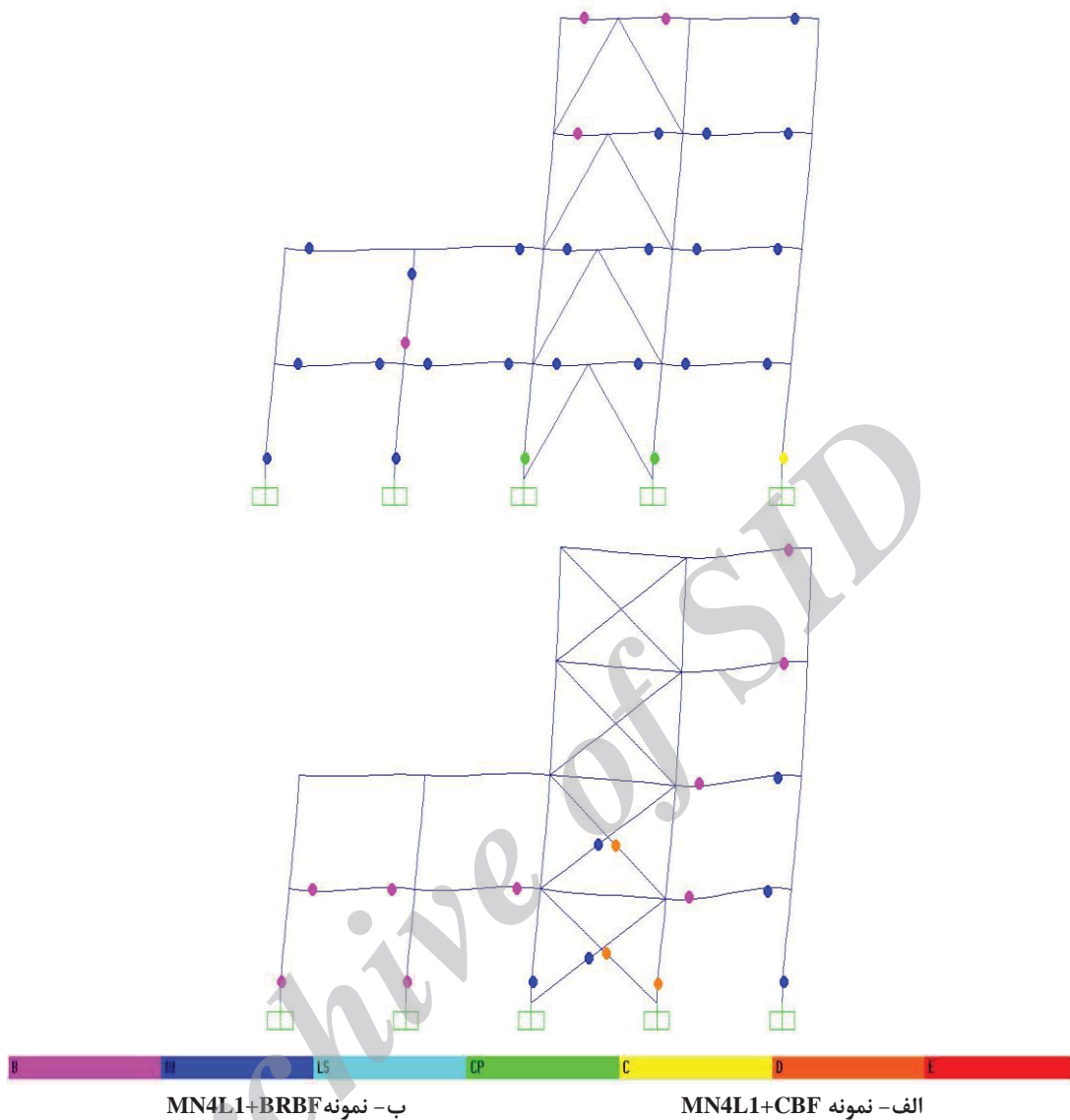


ج- نمونه ۱۲ طبقه

شکل ۸- مقایسه منحنی ظرفیت نمونه‌های تقویت‌شده تحت الگوی بارگذاری مثلی

در نمونه‌های تقویت‌شده با مهاربند همگرا (CBF) تمرکز مفاصل پلاستیک در ستون‌های اطراف مهاربند اتفاق می‌افتد. برخی از ستون‌های طبقه اول و برخی از مهاربندهای طبقات اول سطح عملکرد ایمنی جانی را نقض می‌کنند. تیرهای تمامی طبقات دارای سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) می‌باشند. به دلیل کماتش مهاربند فشاری در فشار، منحنی ظرفیت این نمونه رفتار نامتقارنی در کشش و فشار دارد و پس از کماتش مهاربند، افت شدید سختی در منحنی ظرفیت سازه مشاهده می‌شود.

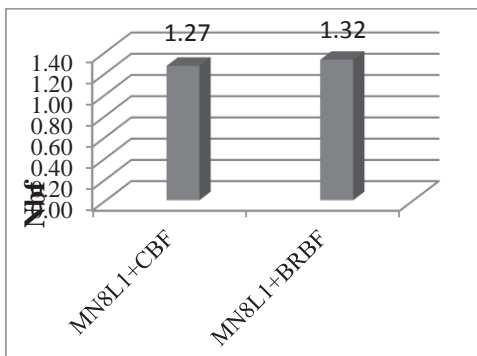
در نمونه‌های تقویت‌شده با مهاربند کماتش گریز (BRBF) هیچ‌گونه مفصلی در مهاربندها ایجاد نمی‌شود و تیرهای تمامی طبقات دارای سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) می‌باشند. تعداد اندکی از ستون‌های طبقه اول در تمامی نمونه‌ها و تعداد اندکی از ستون‌ها و تیرهای طبقات میانی در سازه ۱۲ طبقه نیاز به بهسازی موضعی دارند. این نمونه دارای منحنی ظرفیت منظم و متقارن در کشش و فشار در مقایسه با نمونه‌های تقویت‌شده با مهاربند همگرا (CBF) می‌باشد و از شکل‌پذیری قابل قبولی برخوردار است. همچنین تعداد مفاصل پلاستیک که در سطح عملکرد قرار دارند افزایش یافته است و در تمامی طبقات پخش شده است (شکل ۹). به عنوان نمونه در شکل زیر وضعیت تشکیل مفاصل پلاستیک در حالت رانشی با الگوی بار جانبی مثلی در راستای x و در گام تغییر مکان هدف، برای قاب محور ۱ در نمونه ۴ طبقه نشان داده شده است.



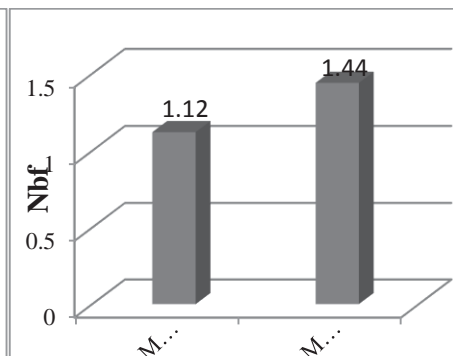
شکل ۹- محل و وضعیت تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب محور ۱

همان طور که در نمودار شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، نمونه‌های تقویت‌شده با مهاربند کمانش‌گریز در مقایسه با هم محور دارای شاخص N_{bf} بزرگ‌تری است؛ بنابراین ورود این سازه‌های نمونه به ناحیه غیرخطی بیشتر از سازه نمونه با مهاربند همگرا است یا به عبارتی تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل‌شده در، نمونه‌های تقویت‌شده با مهاربند کمانش‌گریز در مقایسه با هم محور افزایش یافته است. در نمونه ۱۲ طبقه به دلیل افزایش تعداد مفاصل خارج از سطح عملکرد در مهاربند و ستون‌های اطراف مهاربند در نمونه تقویت‌شده با مهاربند همگرا شاخص N_{bf} بزرگ‌تری نسبت به نمونه تقویت‌شده با مهاربند کمانش‌گریز دارد.

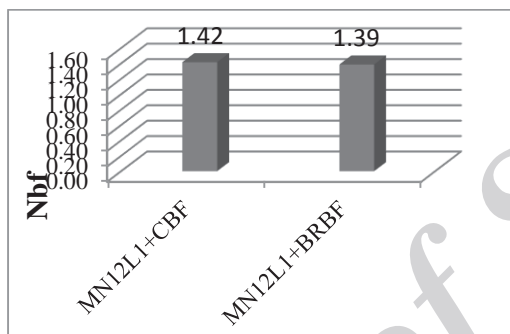
با توجه به شکل ۱۱ درصد قابل توجهی از مفاصل تشکیل‌شده در تمامی طرح‌های تقویت‌شده در سطح عملکرد مورد انتظار قرار دارند. همچنین مقایسه‌ای بین مفاصل قابل قبول در سطح عملکرد مورد انتظار (LS) صورت گرفته است. با توجه به این نمودار تعداد مفاصل قابل قبول در طرح تقویت با مهاربند همگرا بیش‌ترین مقدار را نسبت به کل مفاصل تشکیل‌شده در سازه با طرح تقویت با مهاربند همگرا دارد. درصد مفاصل قابل قبول در طرح تقویت با مهاربند کمانش‌گریز نیز درصد قابل قبول و قابل توجهی می‌باشد ولی با توجه به رفتار کمانشی مهاربندهای همگرای معمولی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مهاربندهای همگرای کمانش‌گریز گزینه مناسبی برای بهسازی سازه‌های فولادی است که علاوه بر رفتار مناسب و متقارن در فشار و کشش، سطح عملکردی مورد انتظار از سازه را برآورده می‌کند [۲۰]



ب- نمونه ۸ طبقه

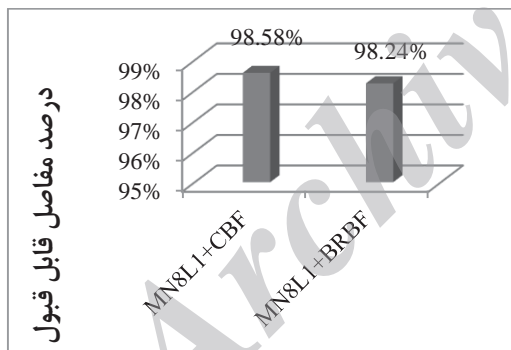


الف- نمونه ۴ طبقه

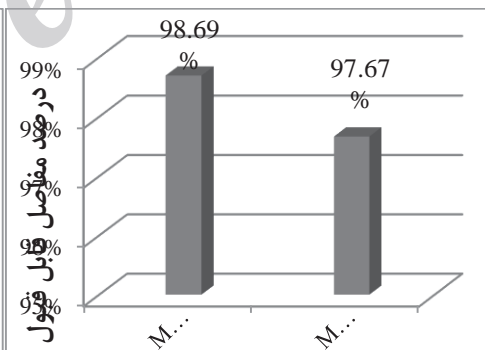


ج- نمونه ۱۲ طبقه

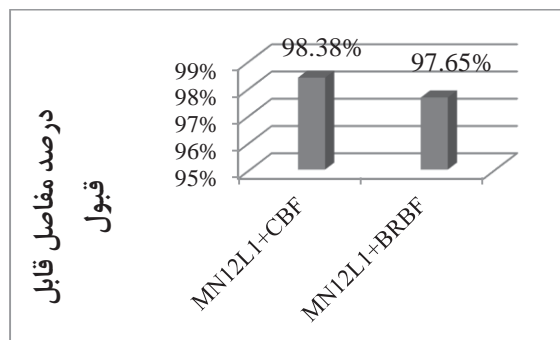
شکل ۱۰- مقایسه شاخص Nbr در نمونه‌های تقویت‌شده



ب- نمونه ۸ طبقه



الف- نمونه ۴ طبقه



ج- نمونه ۱۲ طبقه

شکل ۱۱- مقایسه درصد مفاصل قابل قبول در سطح عملکرد مورد انتظار

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله استفاده از مهاربندهای هم محور و مهاربندهای کمانش‌گریز به عنوان راه‌حلی برای بهسازی قاب‌های خمشی فولادی طراحی شده براساس ویرایش اول استاندارد ۲۸۰۰ در تعداد طبقات مختلف مورد استفاده قرار گرفت و رفتار لرزه‌ای و سطوح عملکرد نمونه‌های بهسازی شده با این نوع مهاربندها، با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت و به طور خلاصه نتایج زیر حاصل شد:

با افزودن مهاربندهای هم محور، سختی سازه افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند و در محدوده الاستیک نیز تغییر مکان سازه به شدت کاهش می‌یابد و این امر باعث افزایش سطح عملکرد سازه می‌گردد. درصد زیادی از مفاصل پلاستیک تشکیل شده در تیر و ستون‌ها در سطح عملکرد مورد نظر قرار می‌گیرند و سازه تحت سطح خطر ۱ عملکرد لرزه‌ای قابل قبولی خواهد داشت به طوری که در بیشتر نمونه‌ها بیش‌ترین درصد مفاصلی که در سطح عملکرد مورد انتظار قرار دارند در این طرح تقویت مشاهده می‌شود. از طرفی در این حالت در مهاربندهای فشاری مفاصل پلاستیک خارج از سطح عملکرد ایجاد می‌شود که بیانگر کمانش این مهاربندها در فشار می‌باشد، به همین دلیل در منحنی ظرفیت طرح‌های تقویت با این نوع مهاربند پرش‌هایی مشاهده می‌شود که بیانگر افت مقاومت ناگهانی پس از کمانش مهاربند فشاری است. همچنین در طرح‌های تقویت‌شده با این مهاربند تمرکز مفاصل پلاستیک در ستون‌های اطراف مهاربند به خصوص در طبقات پایینی اتفاق می‌افتد و این ستون‌ها نیازمند بهسازی می‌باشند.

در حالت تقویت سازه با مهاربندهای کمانش‌گریز، سازه سختی قابل قبولی دارد و در مقایسه با مهاربندهای هم محور دچار کمانش نمی‌شوند. سازه‌های تقویت‌شده با این مهاربندها دارای منحنی ظرفیت متقارن و پایداری می‌باشند و سطح عملکرد قابل قبولی دارند. در حقیقت می‌توان گفت طرح تقویت با مهاربندهای کمانش‌گریز، معایب مهاربندهای هم محور را برطرف می‌کند، ضمن اینکه از سختی و شکل‌پذیری قابل قبولی برخوردار است.

با مقایسه طرح‌های تقویت چهار، هشت و دوازده طبقه در طرح تقویت با مهاربندهای کمانش‌گریز مشاهده می‌شود، این طرح‌ها در ساختمان‌های بلندمرتبه کارایی بهتری دارند.

منابع

- ۱- آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش اول، چاپ چهارم، (۱۳۶۶)
- ۲- آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش سوم، چاپ دهم، (۱۳۸۶)
- 3- FEMA, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA-356), FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, (2000).
- ۴- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، «دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، نشریه شماره ۳۶۰» دفتر نظام فنی و اجرایی، (۱۳۹۰)
- ۵- م. رئیسی دهکردی، م. علیزاده اسفیوخی، «ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های فولادی براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای» همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین، (۱۳۹۲)
- 6- A. Watanabe and Y. Hitomoi, "Brace encased in concrete and steel tube," presented at the 9th World conference on Earthquake Engineering, Japan, 1988.
- 7- L. A. Fahnestock, et al., "Analytical and Experimental Studies on Buckling Restrained Braced Composite Frames," presented at the Proceedings of International Workshop on Steel and Concrete Composite Construction, 2003.
- 8- P. Celerk, et al., "Design procedure for building incorporating hysteretic devices," presented at the 69th annual convention. SEAOC, 1999.
- 9- k. Inoue, et al., "Stiffening requirements for unbounded braces encased in concert panels," Structure Eng, pp. 712-9, 2001.
- 10- C. Black, et al "Component Testing, stability analysis, and characterization of buckling restrained braced braces," univ. of california, Berkley, CA. Report NO. PREE 2002/8.

- 11- H. Tembaba, et al., "Out-of-plane buckling load of buckling restrained braces including brace joints," *Struct Constr Eng*, pp. 127-34, 2004.
 - 12- Q. Xie, "State of the art of buckling-restrained braces in Asia," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, pp. 727-748, 2005.
 - 13- T. Takeuchi, et al., "Performance of compressive tube members with buckling restrained composed of mortar in-filled steel tube," *Struct Constr Eng*, pp. 71-8, 2005.
 - 14- Y. Koetaka and T. Kinoshita, "Design criteria of buckling-restrained brace to prevent out-of-plane buckling," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 74, pp. 1371-1378, 2009.
 - 15- M. E. Eryasar and C. Topkaya, "An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 39, pp. 561-581, 2010.
 - 16- Y. Bozorgnia, Vitelmo V. Bertero, "Earthquake Engineering From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering Boca Raton London New York Washington, D.C., 2000
- ۱۷- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، «تفسیر دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، نشریه شماره ۳۶۱» دفتر نظام فنی و اجرایی، (۱۳۹۰)
- ۱۸- Building With Buckling M. Burkholder, "Performance Based Analysis of a Steel Braced Frame -18 University, January 2012 California Polytechnic State," "Restrained Braces
- ۱۹- ا.م. صنایعی، «بررسی اثر تقارن بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های نامنظم در پلان» نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اردیبهشت‌ماه (۱۳۹۱)
- ۲۰- م. علیزاده اسفیوخی، «ارزیابی و مقایسه رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی بهسازی شده با سیستم‌های مهاربندی هم محور، برون محور و کمانش‌گریز»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۹۲)