

مهاربند کمانش ناپذیری فولادی با هندسه مناسب

محمدجواد گودرزی

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
m.goodarzi@iiees.ac.ir

فریدون اربابی

استاد پژوهشگاه سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
farbabi@mtu.edu

کلیدواژه‌ها: مهاربند کمانش ناپذیر فولادی، هسته دوتکه، استاپرغلاف، خستگی سیکل پایین، هسته فولادی

چکیده

با توجه به ورود پیدا کردن سیستم مهاربند کمانش ناپذیر به‌عنوان سیستم باربر جانبی در آیین‌نامه لرزه‌ای ۲۸۰۰ ایران، احساس نیاز به بومی‌سازی این نوع مهاربند بیشتر می‌شود. در این مقاله هدف آن است که با به‌کارگیری روند طراحی مشخصی بتوان به مهاربند کمانش ناپذیری دست یافت که، علاوه بر ارضا نمودن معیارهای آیین‌نامه، بتواند از یک ظرفیت رزرو برای جذب انرژی زلزله برخوردار باشد. بدین منظور ابتدا می‌بایست چالش‌های پیش روی، در طراحی این نوع مهاربند را شناخت و برای هر یک تدابیر مناسبی اندیشید. با بررسی مطالعات پیشین محققین مشاهده گردید که نقاط ضعف این مهاربند اکثراً در نواحی انتهایی و همچنین در رابطه با عملکرد نامناسب سیستم متوقف‌کننده لغزش غلاف نسبت به هسته بوده. جهت پاسخ‌گویی به این نیاز طراحی، دو ایده بکار گرفته شد و بر اساس آن‌ها سه نمونه مهاربند کمانش ناپذیر فولادی با مقیاس ۱/۲ واقعی طراحی و ساخته شد. در هر سه نمونه تمامی مشخصات هندسی و مصالح به‌جز اندازه طول هسته جاری شونده یکسان می‌باشد. جهت ارزیابی کفایت نمونه‌ها آن‌ها را تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای مطابق با الگوی بار ارائه‌شده توسط آیین‌نامه AISC2010 قرار داده‌ایم. نتایج حاکی از رفتار چرخه‌ای بسیار مناسب باقابلیت جذب انرژی بالا بوده به‌گونه‌ای که علاوه بر ارضا نمودن حداقل موردنیاز آیین‌نامه، نمونه‌ها از یک ظرفیت رزرو برای جذب انرژی زلزله برخوردار هستند. با استناد بر نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ها می‌توان گفت، ایده بکار گرفته‌شده در هسته و غلاف مهاربند آن را به مهاربند کمانش ناپذیر فولادی با هندسه مناسب تبدیل نموده است.

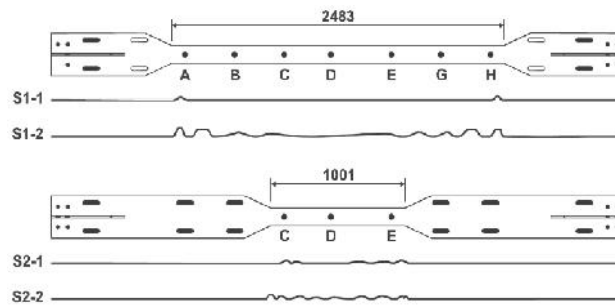
مقدمه

شکل‌پذیری به‌عنوان توانایی سازه در جذب انرژی لرزه‌ای بدون کاهش قابل‌ملاحظه در مقاومت آن، مسئله کلیدی در تأمین ایمنی یک سازه در زلزله‌های بزرگ است. عموماً در یک سازه، شکل‌پذیری از منابع مختلفی نظیر مصالح و المان‌ها تأمین می‌شود. برای دستیابی به مقاومت جانبی لرزه‌ای کافی در یک سازه مشارکت تمامی این منابع همانند حلقه‌های یک زنجیر الزامی است. در این حالت عمده انرژی حرکت نیرومند زمین از طریق عملکرد غیر الاستیک در المان‌های شکل‌پذیر مشخصی که به‌عنوان فیوز سازه‌ای عمل می‌کنند اتلاف می‌گردد و از خرابی اعضای دیگر جلوگیری می‌شود. با توجه به تجارب حاصل از زلزله‌های گذشته و همچنین اطلاعات به‌دست‌آمده از طریق آزمایش، بروز کمانش در اعضای مهاربندی پدیده‌ای غیر شکل‌پذیر و همراه با زوال سختی و مقاومت شدید در رفتار این مهاربندها می‌باشد. جهت مقابله با ظرفیت شکل‌پذیری پایین مهاربند معمولی فولادی سیستم جدیدی از مهاربند با عنوان مهاربند کمانش ناپذیر در حدود سی سال قبل ارائه گردید. در این سیستم‌ها از کمانش فشاری هسته مهاربند از طریق تعبیه یک سیستم محصورکننده جلوگیری می‌شود. البته غلاف مذکور تنها نقش تأمین مقاومت خمشی کافی برای اطمینان از عدم وقوع کمانش کلی در مهاربند را ایفا می‌نماید. در این سیستم برخلاف سیستم مهاربند معمولی که تنها در چند نقطه از طول مهاربند امکان ایجاد مفاصل پلاستیک جهت استهلاک انرژی فراهم می‌شود، در تمام طول هسته مهاربند کمانش ناپذیر امکان رفتار غیر الاستیک تحت بارگذاری چرخه‌ای محوری وجود دارد.

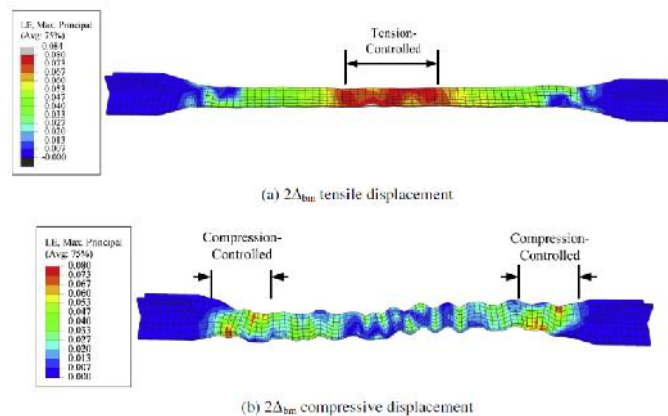
کلیه مهاربندهای کمانش ناپذیری که تا به امروز طراحی شده‌اند، اصول مشابهی دارند. اما با توجه به گذشت زمان و تحقیقات انجام‌گرفته بر روی این مهاربند ایده‌های متفاوتی جهت ارضا نمودن مکانیزم محدود کردن کمانش هسته در این مهاربند به کار گرفته‌شده است، که این امر موجب



ارائه نسل‌های جدیدی از مهاربندهای کمانش ناپذیر گردیده است. به‌طور کلی شاید بتوان از زمان ابداع این سیستم از سال ۱۹۷۰ تا به حال پیشرفت سه نسل مهاربند کمانش ناپذیر را شاهد بود. به‌طور کلی در تمام این سه نوع مهاربند کمانش ناپذیر ایده بهره‌گیری از جاری شدن هسته در رفتار چرخه‌ای در کشش و فشار ملاک عمل بوده است. نسل اولیه‌ی مهاربند کمانش ناپذیر توسط (Wakabayashi et al., 1973) مورد بررسی قرار گرفت. نسل دوم این مهاربندها که به‌صورت هسته با سطح مقطع مستطیلی یا صلیبی قرار گرفته در بتن محصور شده در غلاف فولادی در نظر گرفته می‌شود را می‌توان در کارهای (Tremblay et al., 1999 2002 2006) مشاهده نمود. اما نسل سوم این مهاربندها که توانسته است دارای مزیت‌هایی از جمله وزن کمتر، سهولت در روند طراحی و ساخت، کاهش زمان ساخت را به آن نسبت داد، مهاربند کمانش ناپذیر تمام فولادی بوده که در دو الگوی طراحی با اتصالات پیچی و جوشی ارائه می‌گردد. مطالعات صورت گرفته در این زمینه را می‌توان در کارهای (Ma et al., 2009) مشاهده نمود به‌گونه‌ای که آن‌ها توانسته بودند نمونه‌هایی با هسته صلیبی را تا کرنش‌های 3.4% بارگذاری کنند. با بررسی نتایج مطالعات آزمایشگاهی و همچنین مطالعات عددی صورت گرفته جهت ارزیابی عملکرد مهاربندهای کمانش ناپذیر فولادی، می‌توان چالش‌های پیش روی این نوع مهاربند کمانش ناپذیر را شناخت و جهت بهبود عملکرد آن راهبردی را انتخاب نمود. با توجه به نتایج مطالعات انجام شده بر روی مهاربندهای کمانش ناپذیر با هسته جاری شونده یک‌تکه توسط ترمبلی مطابق شکل (۱) و همچنین مطالعه عددی انجام گرفته توسط میر قادری و رضوی مطابق شکل (۲) ملاحظه می‌شود که طی بارگذاری چرخه‌ای، در هسته جاری شونده این نوع مهاربندها دو ناحیه مختلف تشکیل می‌شود یکی ناحیه کنترل شونده فشاری که این ناحیه به دلیل کاهش سختی غلاف‌ها در هر دو انتهای هسته ایجاد شده و با اعمال تغییر مکان فشاری به هسته، تنش‌ها و کرنش‌های موضعی فشاری در این نواحی ماکزیمم می‌شوند. ناحیه دیگر که در وسط هسته ایجاد می‌شود کنترل شونده توسط کشش بوده چراکه با اعمال تغییر مکان کششی به هسته در این مکان تنش‌ها و کرنش‌های کششی ماکزیمم می‌باشند. افزایش این تنش‌ها و کرنش‌های موضعی در هسته می‌تواند عمر خستگی مهاربند را کاهش دهد علتی را که می‌توان برای این پدیده برشمرد این است که اغلب مهاربندهای کمانش ناپذیر با ایجاد نوعی بازشدگی در هر دو انتهای غلاف جهت سهولت در حرکت کردن سخت‌کننده‌های انتهایی هسته، منجر به کاهش سختی غلاف در این نواحی می‌گردد، و همچنین در بعضی طرح‌ها تغییرات سطح مقطع هسته در این نواحی اتفاق می‌افتد، لذا با اعمال تغییر مکان فشاری در هسته هر دو انتهای هسته نسبت به سایر نواحی مستعد کمانش کردن می‌باشند و همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد کرنش‌ها و تنش‌های موضعی در این نواحی به دلیل کمانش‌های موضعی ماکزیمم بوده از طرفی با عوض شدن جهت بارگذاری تغییر مکانی و اعمال تغییر مکان کششی بر هسته، به دلیل وجود تنش‌ها و کرنش‌های پسماند فشاری در هر دو انتهای هسته ناشی از سیکل فشاری قبلی، این تنش‌های کششی در هر دو انتهای هسته صرف بازگرداندن تنش‌ها و کرنش‌های پسماند می‌شود و بالعکس در وسط هسته به دلیل عدم وجود چنین تنش‌های فشاری پسماندی، تنش‌ها و کرنش‌های موضعی کششی متمرکز شده و منجر به گسیختگی به دلیل باریک شدن میانه هسته تحت بار کششی می‌شود.

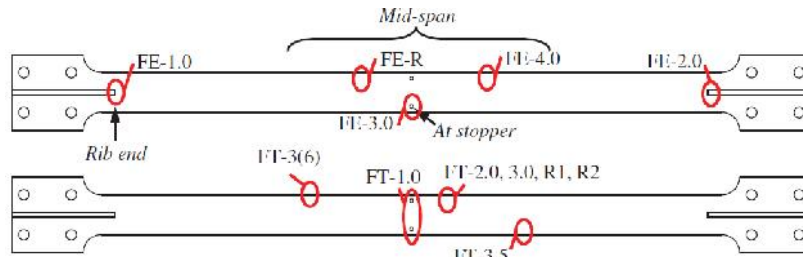


شکل ۱: تغییر شکل‌های باقی‌مانده در هسته نمونه‌های شاخه شده توسط (Tremblay, 2006)



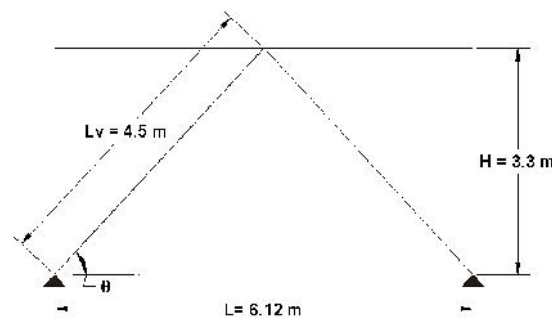
شکل ۲: کرنش‌های اصلی هسته یک‌تکه تحت تغییر مکان ماکزیمم فشاری و کششی (Mirghaderi and Razavi, 2014)

چالش دیگر در مهاربندهای کمانش ناپذیر مسئله نوع متوقف کننده بکار گرفته جهت عدم لغزش غلاف نسبت به هسته و همچنین مسئله کفایت و موقعیت مناسب تقویت کننده‌های انتهایی هسته می‌باشد. wang و همکاران در سال ۲۰۱۲ در نمونه‌های خود از ایده جوش نمودن میله‌ای باریک بر روی میانه هسته جاری شونده و متصل نمودن به غلاف مهاربند استفاده نمودند. با توجه به شکل (۳) ملاحظه می‌گردد که در بعضی از نمونه‌ها حالت گسیختگی به دلیل جوش کاری نمودن بر روی هسته جاری شونده منجر به تضعیف مقطع و به دنبال آن شروع گسیختگی از این ناحیه می‌باشد. همچنین از شکل (۳) می‌توان مشاهده نمود که در نمونه‌هایی که تقویت کننده‌های انتهایی توسط جوشکاری در ناحیه هسته جاری شونده امتداد یافته‌اند به دلیل تمرکز تنش و تغییر سطح مقطع ناگهانی گسیختگی از این نواحی اتفاق افتاده است و در تعدادی از نمونه‌ها توانسته‌اند با بکارگیری روش (Toe – Finished Method) از تمرکز تنش در این نواحی جلوگیری کرده و گسیختگی را به نواحی دیگر انتقال دهند.

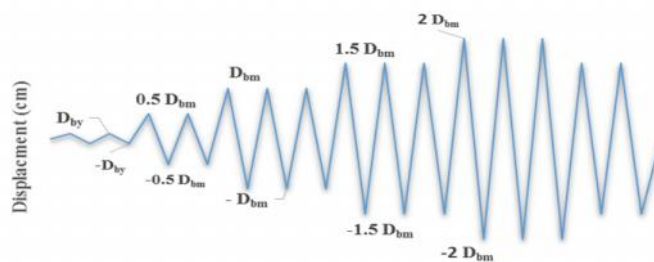


شکل ۳: مد گسیختگی نمونه‌ها پس از آزمایش (wang et al., 2012)

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و شناخت چالش‌های پیش روی در روند طراحی این نوع مهاربند تصمیم بر آن شد که با به کار بستن یک‌روند طراحی مناسب بتوان مهاربند کمانش ناپذیری را که بتواند علاوه بر ارضا نمودن معیارهای آیین ای، از یک ظرفیت رزرو برخوردار باشد طرح نمود. جهت صحت سنجی روند پیشنهادی تصمیم به ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی شد که برای این منظور مدلی از یک ساختمان واقعی را در نظر گرفتیم و دهانه‌ای از آن را مطابق شکل (۴) انتخاب نموده‌ایم. با توجه به محدودیت‌های مقادیر حداقل و حداکثر نسبت دریافت طراحی طبقه مطابق آیین‌نامه AISC که به ترتیب یک و دو درصد می‌باشد، نسبت دریافت طراحی مدل را برابر 1.34% اختیار نموده‌ایم. الگوی بارگذاری وارد بر نمونه‌ها مطابق شکل (۵) از لحاظ دامنه بارگذاری و ترتیب اعمال بارگذاری مشابه آیین‌نامه AISC بوده با این تفاوت که تعداد سیکل‌های بارگذاری متناظر با هر دامنه بیشتر از مقادیر آیین‌نامه می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاه تصمیم بر آن شد که مدل ۱:۲ مقیاس شکل (۵) را به عنوان مدل آزمایشگاهی در نظر بگیریم. بدین ترتیب با کسر نمودن ابعاد تقریبی تیرها، ستون‌ها و صفحات اتصالی به قاب در دو انتهای مهاربند، طول 1.5m را به عنوان طول نمونه‌های آزمایشگاهی اختیار نمودیم.



شکل ۴: دهانه مهاربندی شده توسط مهاربند کمانش ناپذیر در مدل واقعی



شکل ۵: الگوی بارگذاری وارد بر نمونه‌های آزمایشگاهی



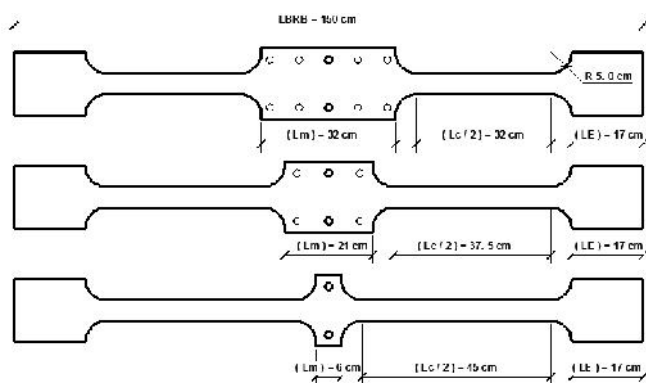
با مشخص بودن تقاضای نیرویی اعمالی برابر با 11ton و همچنین تغییر مکان محوری مهاربند نظیر دریافت طراحی طبقه برابر $\Delta_{bm} = 1.5cm$ سی سطح مقطع موردنیاز را با توجه به روابط آیین‌نامه‌ای طراحی نمود. همچنین طول جاری شونده هسته با توجه به روابط محدودکننده (۱) و (۲) و سختی موردنیاز قابل تخمین می‌باشد.

$$s = (1 + 2v)^2 \leq 1.3 \quad (1)$$

$$L_y \geq L_{\min} = \frac{2\}^{c|} \Delta_{bm}, \} = \sum_{i=1}^{i=k} n_i (x_i) \frac{1}{c} \quad (2)$$

رابطه‌ی (۱) رابطه‌ای است که توسط Tsai (2012) جهت تخمین ضریب اضافه مقاومت فشاری ارائه شده است. همان‌طور که از رابطه مشخص است این ضریب با کرنش متوسط موجود در هسته جاری شونده رابطه داشته و از طرفی حداکثر کرنش متوسط موجود در هسته به‌واسطه‌ی طول اولیه و همچنین ماکزیمم تقاضای تغییر مکانی اعمالی وارد بر مهاربند قابل محاسبه می‌باشد. مسئله بسیار مهمی که در تعیین طول جاری شونده مهاربندهای کمانش ناپذیر حائز اهمیت می‌باشد پدیده‌ی خستگی در سیکل پایین بوده و این پدیده زمانی که با کاهش طول هسته‌ی جاری شونده سختی موردنیاز مهاربند را تأمین می‌کنیم بحرانی‌تر می‌گردد. در رابطه (۲) که توسط آن حداقل طول موردنیاز برای مقابله با پدیده خستگی ارائه می‌گردد، V_0 و c پارامترهایی هستند که توسط آزمایش خستگی با سیکل‌های ثابت مشخص می‌شوند و نیز ضریب ثابتی است که بر اساس تعداد سیکل‌های بارگذاری (n_i) با دامنه ($\Delta_{bm} X_i$) قابل محاسبه می‌باشد. در این گزارش پارامترهای V_0 و c را از رابطه خستگی (Nakamura et al., 2000) استخراج نموده‌ایم. در این مقاله سه نمونه مهاربند کمانش ناپذیر با مشخصات یکسان تنها با طول‌های جاری شونده متفاوت موردبررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است به‌گونه‌ای که طول هسته جاری شونده در یکی از نمونه‌ها برابر حداقل مقدار محاسبه شده از رابطه (۲) یعنی برابر با 64cm و دو نمونه دیگر را مقداری بیشتر از این حداقل طول اختیار نموده‌ایم.

ایده بکار گرفته در این مهاربند آن است که طول هسته جاری شونده را به‌صورت دوتکه در نظر گرفته‌ایم به‌گونه‌ای که مطابق شکل (۶) با لحاظ نمودن یک قطعه با سطح مقطع افزایش یافته به طول L_m توانسته‌ایم با استفاده از قابلیت کاهش و افزایش قسمت جاری شونده و به‌تبع آن افزایش و کاهش طول اضافه سطح مقطع میانی علاوه بر تأمین سختی موردنیاز در مهاربند، بتوانیم سراسر دهانه را توسط تنها یک عضو مهاربند کمانش ناپذیر پوشش دهیم.



شکل ۶: هسته‌های طراحی شده در نمونه‌های آزمایشگاهی

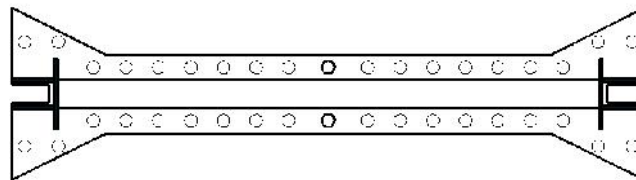
از جمله پارامترهای دیگری که آیین‌نامه AISC جهت کنترل عملکرد شکل‌پذیر مهاربند کمانش ناپذیر معرفی نموده نسبت تغییر شکل پلاستیک تجمعی هسته جاری شونده بوده و می‌توان آن را توسط رابطه‌ی (۳) محاسبه نمود.

$$y = \frac{2 \sum_{i=1}^n \Delta V_p}{V_{by}} \quad (3)$$

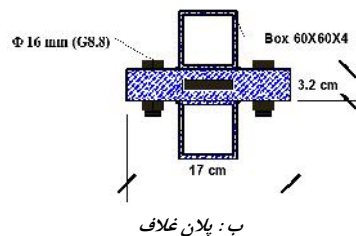
که در رابطه فوق V_p به ترتیب کرنش پلاستیک در هر سیکل بارگذاری و کرنش تسلیم نظیر تغییر مکان تسلیم نمونه می‌باشند.

طراحی غلاف

از آنجایی که انتظار می‌رود که مهاربند کمانش ناپذیر بتواند کلیه سیکل‌های تقاضای بارگذاری وارده بر هسته‌ی مهاربند را بدون هیچ‌گونه کمانش‌های کلی در مهاربند و همچنین کمانش‌های موضعی شدید تحمل نماید، لذا جهت اطمینان از این قابلیت مهاربند کمانش ناپذیر و پایداری کلی این اعضا می‌بایست با استفاده از روابط ارائه‌شده توسط (Chung and Sheng 2010) کفایت غلاف پیشنهادی را کنترل نمود. لازم به ذکر است که طراحی نوع و فواصل پیچ‌های اتصال غلاف‌های فوقانی و تحتانی به یکدیگر بایستی به گونه‌ای باشد که علاوه بر تحمل نمودن نیروهای جانبی رسیده از هسته مهاربند، کمانش موضعی هسته را کنترل نموده و سختی کافی بین فواصل دوپیچ در غلاف ایجاد گردد. با توجه به نتایج آزمایش در شکل (۳) بر روی نمونه‌هایی که سخت‌کننده‌های انتهایی هسته بر روی قسمت جاری شونده هسته ادامه یافته بودند، ملاحظه گردید اولاً بر اثر تمرکز تنش به دلیل عملیات جوش کاری و تغییر سطح مقطع هسته به صورت ناگهانی ترک‌های ناشی از خستگی در این نواحی گسترش یافته و موجب گسیختگی زودرس می‌گردد. ثانیاً به دلیل تأمین فضای کافی جهت حرکت رفت و برگشتی سخت‌کننده‌های تعبیه‌شده می‌بایست درست در قسمتی از غلاف که در ابتدای ناحیه جاری شونده هسته قرار دارد شکافی ایجاد گردد، با ایجاد این فضای خالی در غلاف سختی موردنیاز هسته در ابتدای ناحیه کنترل شونده فشاری کاهش می‌یابد و به تبع آن پتانسیل کمانش‌های موضعی در این نواحی افزایش خواهد یافت. بنابراین با کوتاه کردن طول سخت‌کننده‌های انتهایی هسته و به دنبال آن افزایش طول غلاف و جا دادن بخشی از قسمت انتهایی هسته جاری نشونده به داخل غلاف امید است بتوان بر مشکلات قبلی فائق آمد. از طرفی چون قسمت انتهایی هسته عریض‌تر می‌باشد می‌بایست عرض ورق غلاف نیز بیشتر گردد. به دلیل کاهش وزن غلاف تنها این عریض شدن غلاف را به نواحی انتهایی اختصاص داده‌ایم. در نهایت پلان شکل (۷) را به عنوان غلاف محصورکننده با مقطع عرضی نشان داده‌شده در نظر گرفته‌ایم.



الف: پلان غلاف



ب: پلان غلاف

شکل ۷: هسته‌های طراحی شده در نمونه‌های آزمایشگاهی

طراحی اتصالات و سخت‌کننده‌های انتهایی هسته

در این مرحله به بررسی کنترل پایداری دو قسمت انتهایی هسته، که داخل غلاف قرار ندارند پرداخته می‌شود. از آنجایی که این دو قسمت انتهایی تحت نیروی محوری قرار می‌گیرند همانند ستون‌ها در برابر تحدید کمانش خمشی قرار دارند و از طرفی این مقطع به صورت مقطع جدار نازک باز بوده احتمال اینکه در برابر خطر کمانش پیچشی و یا ترکیبی از آن دو قرار بگیرد نیز وجود دارد. لذا برای اینکه نمونه بتواند بارگذاری مربوطه را تا تغییر مکان موردنظر تحمل نماید می‌بایست کفایت این مقاطع کنترل گردد و سطح تنش‌ها در محدوده الاستیک قرار داشته باشد. برای این منظور مطابق روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه AISC به کنترل این اعضای فشاری پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که در مدل واقعی الزاماً این اعضا می‌بایست به همراه دو ورق اتصال انتهایی متصل به قاب از پایداری لازم برخوردار باشند.

نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی

پس از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی هریک از آن‌ها را طبق الگوی بارگذاری شکل (۵) تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادیم و در انتهای بارگذاری با دامنه $2 b_m$ جهت ارزیابی خستگی سیکل پایین، بارگذاری نمونه‌ها را تا لحظه گسیختگی با دامنه $1.5 b_m$ ادامه دادیم. قابل ذکر است در الگوی بارگذاری نمونه اول مطابق شکل (۵) به طور اتفاقی تعداد ۴ سیکل با دامنه بارگذاری $2 b_m$ را به جای ۳ سیکل بر نمونه اعمال نمودیم. این موضوع علاوه بر آنکه کلیات مسئله را تغییر نمی‌دهد بلکه بیانگر پتانسیل بالای جذب انرژی این نمونه خواهد بود. مطابق جدول (۱) می‌توان

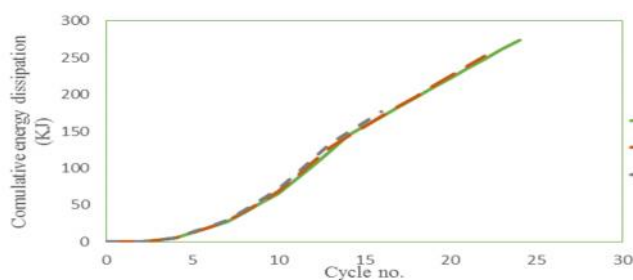


مشخصات حداکثر کرنش متوسط، تغییر مکان تسلیم هر نمونه، مقایسه حداکثر مقادیر تئوری و آزمایشگاهی ضریب اضافه مقاومت فشاری و همچنین نسبت تغییر شکل پلاستیک تجمعی به دست آمده از بارگذاری چرخه‌ای را مشاهده نمود.

جدول ۱: جدول مشخصات تسلیم نمونه‌ها، محاسبه و مقایسه پارامترهای تئوری و آزمایشگاهی

نمونه	طول جاری شونده هسته (cm)	تغییر مکان تسلیم (cm)	حداکثر کرنش متوسط (%)	تئوری	(Test)	
اول	90	0.135	3.35	1.14	1.21 , 1.18	1240
دوم	75	0.11	4.02	1.17	1.19 , 1.16	1414
سوم	64	0.096	4.69	1.2	1.19 , 1.17	1102

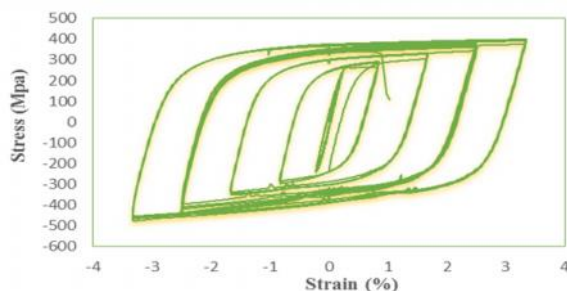
مطابق جدول (۱) با مقایسه مقادیر تئوری و آزمایشگاهی ضریب اضافه مقاومت متناظر با دامنه بارگذاری $2 f_{bm}$ ملاحظه می‌گردد که روابط تئوری (۲) توانسته است در مقادیر کرنش‌های بزرگ‌تر با تقریب بسیار خوبی مقادیر ضریب تعدیل اضافه مقاومت فشاری را پیش‌بینی نماید. مقادیر محاسبه شده توسط ضریب که به نوعی بیانگر قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها می‌باشد علاوه بر ارضای حداقل مقدار آیین‌نامه از یک ظرفیت رزرو برای جذب انرژی زلزله برخوردار است. جهت قضاوت دقیق‌تر از پتانسیل جذب انرژی توسط هر یک از نمونه‌ها می‌توان نمودار انرژی تجمعی در هر سیکل را مطابق نمودار شکل (۸) ترسیم نمود.



شکل ۸: مقایسه انرژی تجمعی جذب شده توسط نمونه اول و دوم و سوم

با توجه به نمودار شکل (۸) می‌توان نتیجه گرفت که با اختیار نمودن طولی بیشتر از حداقل طول مورد نیاز جهت عدم وقوع پدیده‌ی خستگی با استفاده از پیکربندی مورد استفاده در هسته جاری شونده می‌توان قابلیت جذب انرژی را تا حدود ۱.۵ برابر افزایش داد. با مقایسه نمودارهای جذب انرژی در نمونه دوم و سوم این‌طور به نظر می‌رسد که از یک طول مشخصی، دیگر با افزایش طول جاری شونده نتوان افزایش قابل توجهی را در جذب انرژی مهاربند ایجاد نمود. لازم به ذکر است که این مقدار جذب انرژی برای یک مدل با مقیاس ۱:۲ نمونه واقعی بوده و در مقیاس واقعی با توجه به مرتبه دیمانسیون انرژی نسبت به دیمانسیون بعد طول قابلیت جذب انرژی تا چند برابر افزایش خواهد یافت. که این موضوع بسیار حائز اهمیت بوده و از ظرفیت رزرو بالایی برای جذب انرژی زلزله حکایت می‌کند.

در کنار قابلیت جذب انرژی مناسب این نمونه‌ها با ملاحظه رفتار چرخه‌ای هر یک تحت بارگذاری اعمالی می‌توان قضاوت معقولی را از رفتار چرخه‌ای هر یک داشته باشیم. برای مثال در شکل (۹) رفتار چرخه‌ای مهاربند نمونه اول را آورده‌ایم. منحنی هسته‌تزیس تنش و کرنش متوسط هسته جاری شونده بیانگر رفتار کاملاً پایدار و تقریباً متقارن در کشش و فشار دربار گذاری چرخه‌ای محوری بوده و هر سیکل بارگذاری نسبت به سیکل قبلی دارای افزایش سختی و مقاومت می‌باشد. لازم به ذکر است که این رفتار معیار پذیرش آیین‌نامه را کاملاً ارضا می‌کند.



شکل ۹: منحنی هسته‌تزیس تنش و کرنش آزمایشگاهی نمونه اول

نتیجه گیری

با توجه به نتایج مناسب آزمایشگاهی می توان نتیجه گرفت که با به کارگیری یک روند منطقی طراحی مهاربند کمانش ناپذیر فولادی با هندسه مناسب به دست آمده است، که علاوه بر ارضا نمودن حداقل محدودیت های آیین نامه ای از یک ظرفیت رزرو جهت استهلاک انرژی زلزله برخوردار می باشد. به طور خلاصه می توان دست آورد های این تحقیق را به صورت زیر خلاصه نمود:

(۱) صحت سنجی رابطه تئوری تخمین حداقل طول مورد نیاز جهت عدم پدیده خستگی و همچنین رابطه تخمین ضریب تعدیل اضافه مقاومت فشاری مورد استفاده در مهاربند کمانش ناپذیر فولادی با هسته جاری شونده دو تکه.

(۲) استفاده از یک ایده بسیار ساده بدون نیاز به تدابیر خاص و امکانات اضافی جهت عدم لغزش غلاف نسبت به هسته، که تنها با محکم نمودن پیچ های غلاف این عملکرد فعال می شود

(۳) قابلیت بسیار مناسب کاهش و افزایش طول جاری شونده و به تبع آن افزایش و کاهش طول اضافه سطح مقطع میانی جهت رسیدن به سختی مورد نیاز به گونه ای که بتوان کل دهانه را توسط تنها یک عضو مهاربند کمانش ناپذیر پوشش داد.

مراجع

- Chung C and Sheng Y (2010) Subassembly tests and finite element analyses of sandwiched buckling restrained braces, *Journal of engineering structures*, article in press
- Khatib I and Mahin S (1987) Dynamic inelastic behavior of chevron braced steel frames, *Fifth Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam, pp. 211-220
- Nakamura H et al. (2000) Fatigue properties of practical scale unbounded brace. Nippon steel technical report, No 82, July
- Ning M, Bin W, Junxial Z, Hui L, Jinping u and Weibiao Y (2008) Full scale tests of all-steel buckling restrained braces *Proceeding of 14th World Conference in Earthquake Engineering Beijing, China*
- Razavi-S A, Mirghaderi-S R, Hosseini A (2013) Experimental And Numerical Developing Of Reduced Length Buckling – Restrained Braced, *Journal of engineering structures* 77(2014)143-160
- Tasi KC , Huang YC, Chiang (2012) Huge Scale Tests of All-Steel Multi-curve Buckling Restrained Braces *The 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012*
- Tremblay R, Degrange G and Blouin J (1999) Seismic rehabilitation of a four- storey building with a stiffened bracing system, In *Proceedings of the 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., 13-16 June 1999. Canadian Association of Earthquake Engineering, Vancouver, B.C. pp. 549-554
- Usami T (2006) Guidelines for seismic and damage control design of steel bridges. Edited by Japan Society of Steel Construction, Gihodo-Shuppan, Tokyo [in Japanese]
- Wakabayashi M, Nakamura T, et al., (1973) Experimental study on the elasto-plastic behavior of braces enclosed by precast concrete panels under horizontal cyclic loading Parts 1 and 2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section, pp. 1041-1044 (in Japanese)
- Wang C, Usami T and Funayama J (2012) Improving Low-Cycle Fatigue Performance of High-Performance Buckling-Restrained Braces by Toe-Finished Method, *Journal of Earthquake Engineering*, 16:8, 1248-1268