

بررسی رفتار مهاربند کمانش‌ناپذیر پیشنهادی متشکل از لوله‌های تودرتو تحت اثر بارگذاری چرخه‌یی

حمید حیدری ترکمانی* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

شاهرخ مالک (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره ۲ - شماره ۴/۲، ص. ۱۰۵-۱۱۱)، پژوهشی

در نوشتار حاضر، مطالعات پیشین در زمینه سیستم مهاربندی کمانش‌تاب تمام فولادی معرفی شده توسط نویسندگان از طریق روش‌های نظری و آزمایشگاهی گسترش یافته است. سیستم پیشنهادی شامل دو عضو لوله‌یی به صورت تودرتو بوده است، که در آن لوله‌ی داخلی به عنوان عضو تسلیم‌شونده تحت بار محوری و لوله‌ی خارجی با جزئیات و ملحقیات لازم به عنوان مکانیسم مقیدکننده در برابر کمانش عمل می‌کند. در پژوهش حاضر، ضمن معرفی جزئیات سیستم مهاری پیشنهادی، رفتار آن تحت اثر بارگذاری چرخه‌یی به صورت تفصیلی مطالعه شده است. علاوه بر گزارش مطالعات آزمایشگاهی انجام شده به منظور اثبات مفاهیم مطروحه، مدل‌سازی‌های عددی مشتمل بر مدل‌سازی تفصیلی و تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن آثار رفتار غیرخطی هندسی و مصالح و همچنین تماس انجام پذیرفته است. نتایج حاصل از مطالعات حاضر نشان از عملکرد مناسب عضو پیشنهادی به عنوان مهاربند کمانش‌تاب با رفتار متقارن و پایدار تحت بارگذاری چرخه‌یی دارد. از جمله مزایای سیستم پیشنهادی، می‌توان به سهولت ساخت و نصب، کاهش وزن و میزان مصالح مصرفی، تسریع عملیات اجرایی و آثار زیست‌محیطی مطابقت اشاره کرد.

واژگان کلیدی: مهاربند کمانش‌تاب، عضو لوله در لوله، بارگذاری چرخه‌یی، تحلیل اجزاء محدود.

hamid_heidary@sut.ac.ir
maalek@ut.ac.ir

۱. مقدمه

آمریکایی قرار گرفت و مطالعات گسترده‌یی بر روی انواع مهاربندهای کمانش‌تاب شروع شد، که منجر به استفاده از آن در طراحی و بهسازی ساختمان‌های مختلفی شد. مطالعات مذکور در دیگر کشورها، از جمله: هند، تایوان و ایران نیز در حال پیگیری است.

نوع رایج مهاربندهای کمانش‌تاب، که در سازه‌های ساختمانی استفاده می‌شود، از یک ورق فلزی محصور در غلاف فولادی پُر شده با بتن تشکیل شده است. شکل ۲ نمونه‌های مختلفی از مهاربند کمانش‌تاب تجاری‌سازی شده است. در نوع دیگری از مهاربندهای کمانش‌تاب از بتن یا ملات استفاده نشده و هسته‌ی فلزی آن توسط یک غلاف فولادی محافظت می‌شود، که اصطلاحاً آنها را «مهاربندهای کمانش‌تاب تمام فولادی»^۲ می‌نامند. در مهاربند پیشنهادی در پژوهش حاضر نیز از بتن یا ملات استفاده نشده است. عمده‌ی مطالعات انجام شده تاکنون در زمینه‌ی مهاربندهای کمانش‌تاب بر نوع بتن‌دار آن بوده و اساساً با عضو مهاری پیشنهادی در پژوهش حاضر متفاوت است. به همین دلیل از ذکر جزئیات مطالعات پیشین در مورد مهاربندهای بتن‌دار پرهیز و فقط به مطالعات شاخص اشاره شده است.

مطالعه روی مهاربندهای کمانش‌تاب نوع پُر شده با بتن، برای اولین بار توسط یوشینو و همکارانش^۳ (۱۹۷۱)، آغاز شده است.^[۱] ایشان دو نمونه را با عنوان دیوار

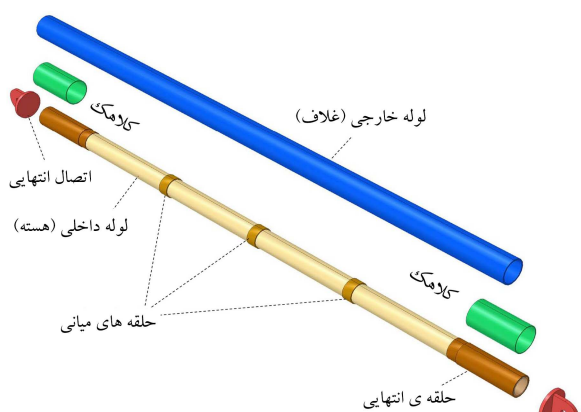
مهاربند کمانش‌تاب یا BRB^۱، یکی از سیستم‌های باربر جانبی است، که در دو دهه‌ی اخیر استفاده از آن در انواع سازه‌ها به خصوص سازه‌های ساختمانی رو به گسترش بوده است. سیستم مهاربند جانبی BRB به دلیل عملکرد مناسبی که از خود نشان داده است، جایگزین مهاربندهای معمولی شده است. در مقایسه با مهاربندهای معمولی، مهاربند کمانش‌تاب عملکرد چرخه‌یی متقارن و پایدار داشته است؛ که در نتیجه، ظرفیت اتلاف انرژی قابل توجهی را فراهم می‌کند. اساس عملکرد سیستم مهاربندی BRB، جلوگیری از وقوع کمانش هسته‌ی فولادی به منظور امکان وقوع پدیده‌ی تسلیم فشاری در آن و دست‌یابی به رفتار متقارن در کشش و فشار است. رفتار متقارن و پایدار در شرایط بارگذاری چرخه‌یی، امکان جذب انرژی قابل توجهی در این عضو از سازه را فراهم می‌کند. در شکل ۱، مقایسه‌ی رفتار مهاربند BRB با مهاربندهای همگرای رایج مشاهده می‌شود.

از نظر تاریخی استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی در ژاپن شروع شد. در دهه‌ی ۱۹۹۰، مهاربند کمانش‌تاب مورد توجه پژوهشگران

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۳/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۰/۵/۲۳، پذیرش ۱۴۰۰/۵/۳۱.

DOI:10.24200/J30.2021.58197.2964



شکل ۳. نمایش مقطع طولی و عرضی مهاربند لوله‌یی کمانش تاب پیشنهادی.

پیشنهادی، حیدری و مالک (۲۰۱۷) نیز مطالعات گسترده‌ی عددی و آزمایشگاهی با هدف بررسی رفتار مهاربند پیشنهادی تحت بارگذاری چرخه‌یی انجام داده‌اند.^[۸] در مطالعه‌ی اخیر، رفتار عضو پیشنهادی تحت اثر بارگذاری یک طرفه و چرخه‌یی با استفاده از مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن تمام جزئیات اجرایی و شرایط مرزی پرداخته شده است. همچنین مطالعه‌ی پارامتریک گسترده به منظور بررسی تأثیر تمام پارامترهای هندسی و مقاومتی در رفتار مهاربند پیشنهادی انجام شده است.^[۸] هدف اصلی از مطالعات پارامتریک انجام شده، شناسایی تمام عوامل مؤثر در رفتار چرخه‌یی عضو مهاری پیشنهادی بوده است.

در نوشتار حاضر، بر اساس نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک عددی ارائه شده‌ی حیدری و مالک (۲۰۱۷)،^[۸] نمونه‌ی آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. نمونه‌ی ساخته شده تحت بارگذاری چرخه‌یی، آزمایش و منحنی رفتار هیستریزس آن استخراج شده است. سپس نمونه‌ی آزمایش شده به صورت عددی مدل‌سازی و نتایج حاصل از مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در ادامه‌ی نوشتار حاضر، به شرح و تفسیر مطالعات آزمایشگاهی و عددی پرداخته شده است.

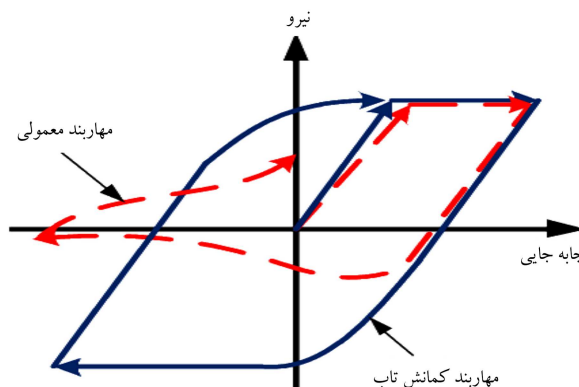
۲. مهاربند کمانش تاب پیشنهادی در پژوهش حاضر

ساختار مهاربند لوله‌یی کمانش تاب پیشنهادی در پژوهش حاضر در شکل ۳ مشاهده می‌شود. مهاربند پیشنهادی متشکل از دو عضو لوله‌یی تودرتو با حلقه‌های میانی است. لوله‌ی داخلی به عنوان هسته‌ی تسلیم‌شونده و لوله‌ی خارجی به عنوان غلاف محافظ در برابر کمانش عمل می‌کنند. بر اساس طرح پیشنهادی، لوله‌ی محافظ، سهمی در باربری محوری نخواهد داشت.

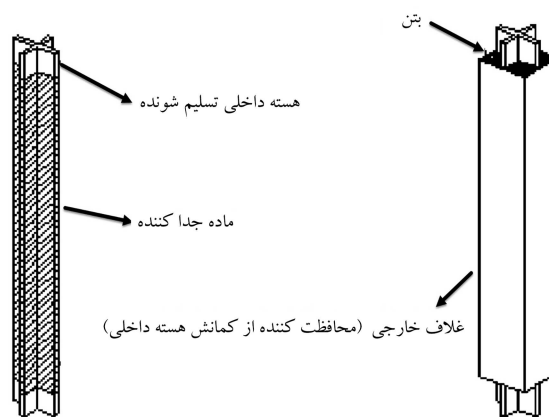
۳. آزمون آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی عملکرد عضو مهاری پیشنهادی به عنوان یک نوع مهاربند کمانش تاب، یک نمونه از عضو مذکور ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌یی آزمایش شده است. تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش به طور خلاصه شامل این موارد بوده است (شکل ۴):

- جک بارگذاری دو طرفه‌ی کششی - فشاری با ظرفیت ۳۰۰ تن؛
- سیستم کنترل اتوماتیک دامنه و سرعت جک بارگذاری با قابلیت اعمال و تعقیب پروتکل بارگذاری دلخواه؛



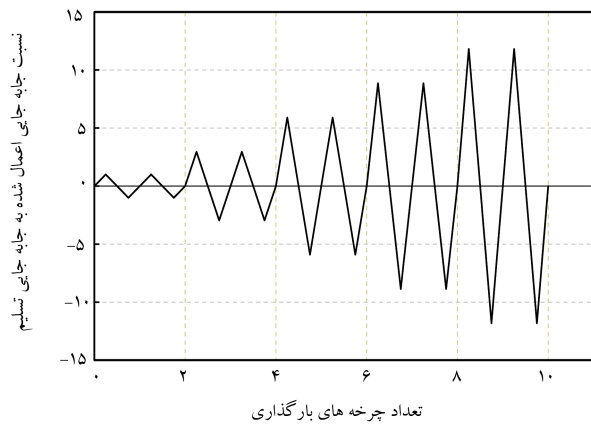
شکل ۱. مقایسه‌ی رفتار مهاربندهای متعارف با مهاربند کمانش تاب BRB در رفتار فراکشسان.^[۱]



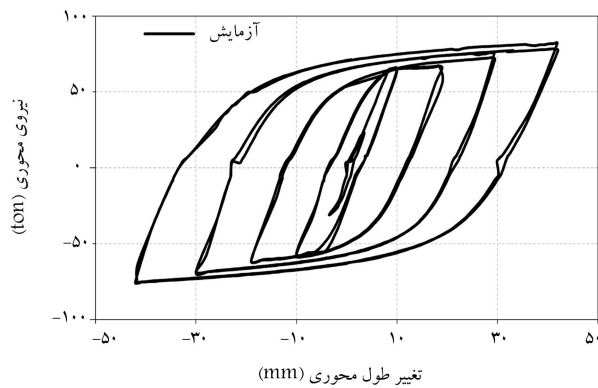
شکل ۲. گونه‌ی رایج مهاربندهای کمانش تاب BRB.^[۲]

برشی، شامل مهاربند تحت بارگذاری چرخه‌یی آزمایش کردند که شامل یک صفحه‌ی پهن فلزی محصور شده توسط پانل‌هایی از بتن مسلح با وجود یک ماده‌ی جداساز بین آنها بود. در نمونه‌ی اول، یک فاصله‌ی ۱۵ میلی‌متری بین قسمت محصور شده با پانل‌های اطراف وجود داشت. در حالی که در نمونه‌ی دوم، چنین فاصله‌یی وجود نداشت. نمونه‌ی اول، تغییرشکل بیشتر و همچنین ظرفیت استهلاک انرژی بیشتری از خود نشان داد. در دهه‌های اخیر، مطالعات عددی و آزمایشگاهی متعددی بر نمونه‌های بتن‌دار مهاربندهای کمانش تاب توسط پژوهشگران کشورهای مختلف انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به برخی مطالعات،^[۳-۴] اشاره کرد. قاسمی و مالک (۱۳۸۶)،^[۱۵] در بررسی رفتار مهاربند کمانش تاب پیشنهادی با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود، رفتار عضو مهاری کمانش تاب متشکل از دو لوله‌ی تودرتو در حالت با حلقه‌ی میانی و بدون آن را تحت بارگذاری یک طرفه مطالعه کردند.

در ادامه‌ی مطالعات انجام شده‌ی اخیر، امید (۲۰۱۴)،^[۱۶] نیز به طور عددی و با در نظر گرفتن تمام شرایط مرزی، مطالعه‌ی رفتار مهاربند کمانش تاب قاسمی و مالک را ادامه داده و رفتار لوله‌های منفرد، لوله‌های دوبل بدون حلقه‌ی واسط و همچنین لوله‌های دوبل با حلقه‌ی واسط را به صورت عددی مطالعه کرده است. در ادامه‌ی مطالعات بر روی مهاربند پیشنهادی لوله در لوله، فتوح‌آبادی^[۴] (۲۰۱۵)،^[۱۷] در تکمیل مطالعات عددی پیشین، ضمن بررسی رفتار مهاربند مذکور در سطح عضو به بررسی رفتار ساختمان‌های مجهز به مهاربند پیشنهادی و مقایسه‌ی آن با دیگر انواع رایج مهاربندها پرداخته است. در تکمیل مطالعات بر روی مهاربند



شکل ۶. پروتکل بارگذاری بر اساس آیین نامه ای AISC.



شکل ۷. منحنی هیستریزس نمونه ای حاصل از آزمایش.

۲.۳. پروتکل بارگذاری

پروتکل استفاده شده در مطالعات آزمایشگاهی و عددی، پروتکل پیشنهادی دستورالعمل AISC 341-10^[۱۸] بوده است، که مطابق شکل ۶، به صورت گام های بارگذاری و توقف به سیستم هدایت کننده ای جک بارگذاری معرفی و به صورت جابه جایی محوری به نمونه اعمال شده است.

در طول انجام آزمایش، تغییر شکل محوری نمونه توسط خطکش دیجیتال ثبت و نمودار نیرو - تغییر شکل ترسیم شده است. نمودار مذکور، که در ادبیات فنی به منحنی هیستریزس معروف است، در شکل ۷ مشاهده می شود.

همان طور که مشهود است، در منحنی حاصل هیچ گونه اثری از افت مقاومت یا سختی نیست و نمونه ای مورد مطالعه رفتار هیستریزس پایدار و متقارن داشته است. نمودار اخیر به روشنی نشان می دهد که نمونه ای بررسی شده، کفایت و عملکرد مناسب به عنوان یک مهاربند کمانش تاب را دارد.

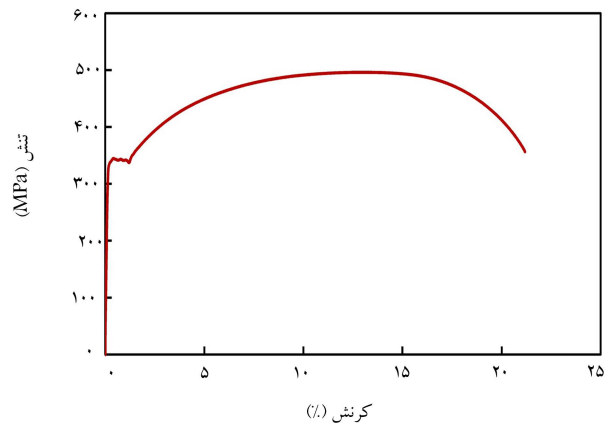
در ادامه ای نوشتار حاضر، نمونه ای آزمایشگاهی به صورت عددی با تمام جزئیات مدل سازی شده و تحت همان پروتکل استفاده شده در آزمایش، تحلیل صورت گرفته است. مشخصات مصالح در مدل عددی بر اساس نتایج حاصل آزمون کشش شکل ۵ به نرم افزار معرفی شده است.

۴. مدل سازی عددی

رفتار چرخه ای عضو مهاری پیشنهادی، رفتاری پیچیده بوده و از نظر مدل سازی



شکل ۴. تجهیزات استفاده شده در آزمایش به همراه نمونه ای نصب شده قبل از آزمایش.

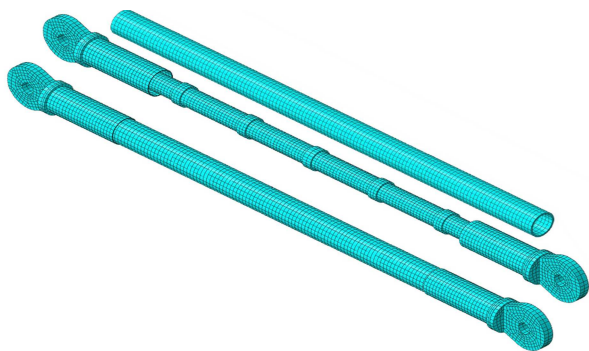


شکل ۵. نمودار تنش - کرنش حاصل از آزمون کشش بر نمونه ای فولاد استفاده شده در ساخت نمونه.

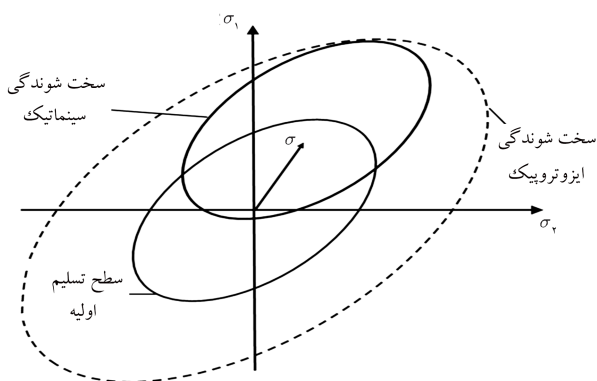
- لودسل^۵ دو طرفه کششی - فشاری با ظرفیت ۲۵۰ تن؛
- خطکش دیجیتال با طول ۴۰ سانتی متر جهت اندازه گیری جابه جایی با دقت ۰/۰۰۱ میلی متر؛
- دستگاه ثبت داده ای^۶ تمام اتوماتیک با قابلیت ثبت داده با بسامد دلخواه.

۱.۳. مشخصات هندسی و مقاومتی نمونه ای مطالعه شده

طراحی نمونه ای آزمایش و تعیین مشخصات هندسی آن بر اساس مطالعه ای پارامتریک انجام شده توسط حیدری و مالک (۲۰۱۷)^[۸] انجام پذیرفته است. لازم به ذکر است که در انتخاب مشخصات نمونه ای آزمایشی، علاوه بر محدودیت های سیستم بارگذاری، امکان تهیه ای لوله ها و مصالح در بازار داخلی نیز مد نظر بوده است. بر این اساس، لوله ای گرم نورد بدون درز^۷ با قطر خارجی ۱۴۰ میلی متر، ضخامت ۶ میلی متر و طول ۲/۵ متر برای غلاف خارجی در نظر گرفته شده است. هسته ای داخلی استفاده شده در نمونه ای مطالعه شده نیز لوله ای با قطر ۱۱۴ میلی متر، ضخامت ۶ میلی متر و طول ۲/۳ متر بوده است. جهت تعیین مشخصات مکانیکی فولاد خریداری شده، آزمون کشش استاندارد بر نمونه ها انجام و نمودار تنش - کرنش حاصل در شکل ۵ مشاهده می شود.



شکل ۹. مش بندی استفاده شده در مدل سازی عددی.



شکل ۱۰. نمایش ترسیمی مدل های سخت شوندگی فولاد.

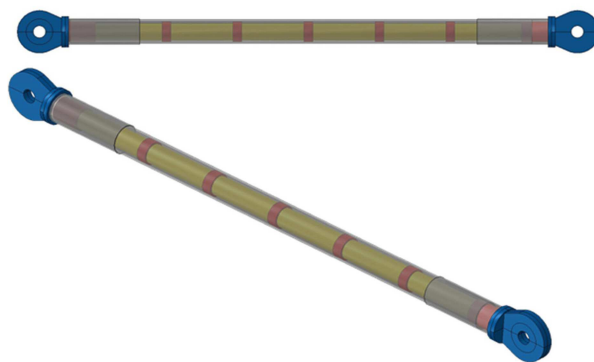
جدول ۱. ضرایب به کار رفته در مدل سخت شوندگی ترکیبی.

σ_0 (MPa)	C (MPa)	γ	$Q_{infinite}$ (MPa)	b
۳۵۰	۸۰۰۰	۷۵	۱۱۰	۴

۱.۴. مدل سازی سخت شوندگی چرخه‌یی

اساساً رفتار فولاد تحت بارگذاری چرخه‌یی و بارگذاری یکطرفه متفاوت است. وقوع پدیده‌ی سخت شوندگی کرنشی تحت بارگذاری چرخه‌یی از ویژگی‌های ذاتی فولاد است و تأثیر قابل توجهی در رفتار چرخه‌یی مهاربند کماتنش تاب دارد. به منظور در نظر گرفتن رفتار سخت شوندگی فولاد تحت بارگذاری چرخه‌یی می‌توان از الگوهای سخت شوندگی ایزوتروپیک^{۱۴}، سیمناطیک^{۱۵} و الگوهای ترکیبی^{۱۶} استفاده کرد. در الگوی ایزوتروپیک، سطح تسلیم با حفظ شکل با افزایش سطح تنش گسترش می‌یابد. در حالی که در الگوی سیمناطیک، شکل و اندازه‌ی سطح تسلیم ثابت است و فقط در فضای تنش جا به جا می‌شود. مدل‌های سخت شوندگی ذکر شده در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند.

بر اساس مطالعات انجام شده‌ی رُسی^{۱۷} (۲۰۱۵)،^[۱۹] برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌یی مهاربندهای کماتنش تاب استفاده از الگوهای ایزوتروپیک و سیمناطیک به تنهایی الگوی مناسبی نیست و استفاده از الگوی ترکیبی انتخاب مناسب‌تری است. الگوی ترکیبی، که به الگوی سخت شوندگی ترکیبی شابوش^{۱۸} معروف است، در واقع ترکیب غیرخطی دو الگوی ایزوتروپیک و سیمناطیک است. در نوشتار حاضر از الگوی پیشرفته‌ی ترکیبی شابوش استفاده و ضرایب به کار رفته در آن در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که ضرایب مذکور از نوشتارهای ژیا و کومورا^{۱۹} (۲۰۱۴)^[۲۰] و مازولانی^{۲۰} و همکاران (۲۰۰۹)^[۲۱] استخراج شده‌اند.

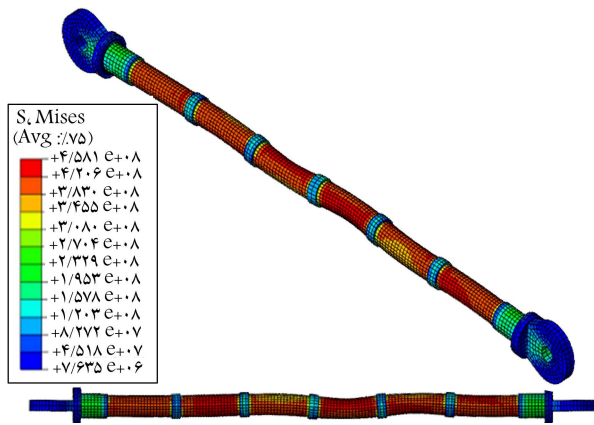


شکل ۸. نمایش اجزاء تشکیل دهنده‌ی مهاربند پیشنهادی در مدل عددی.

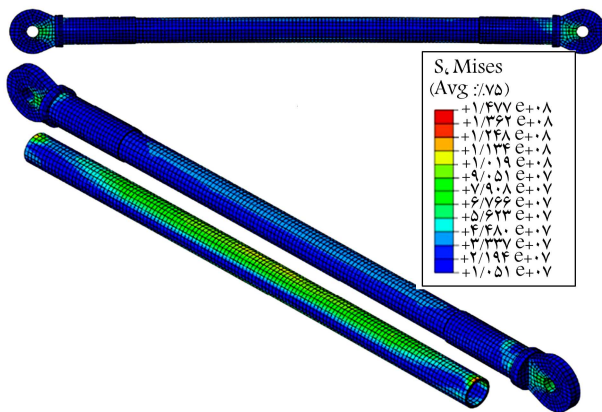
عددی، شامل هر سه عامل غیرخطی هندسی^۸، مصالح^۹ و تماس^{۱۰} است. نرم افزار استفاده شده باید قابلیت شبیه‌سازی تمام عوامل ذکر شده را با دقت مناسب داشته باشد. همچنین به دلیل وقوع پدیده‌هایی نظیر کماتنش موضعی و کلی در عضو تحت بارگذاری چرخه‌یی و همچنین وقوع کرنش‌های خمیری تا سطح نسبتاً زیاد، حلگر نرم افزار باید قابلیت بالایی در پایداری و ادامه‌ی حل داشته باشد. بر اساس بررسی‌های به عمل آمده، دو نرم افزار پیشرفته‌ی انسیس^{۱۱} و آباکوس^{۱۲} قابلیت‌های مورد نیاز برای مدل سازی تفصیلی رفتار مهاربند پیشنهادی را دارند. نهایتاً در پژوهش حاضر، مدل سازی‌های عددی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است. از نظر فیزیکی، مهاربند پیشنهادی در مطالعه‌ی حاضر، متشکل از دو لوله‌ی تودرتو بوده است، که برای هر دو لوله با توجه به ضخامت پایین نسبت به قطر و طول نمونه، استفاده از المان‌های پوسته‌یی مناسب به نظر می‌رسد. اما با توجه به این‌که از نظر رفتاری، مسئله‌ی مورد مدل سازی شامل رفتار غیرخطی پیچیده بوده و به خصوص وقوع کماتنش موضعی در آن محتمل است؛ لذا المان‌های پیوسته‌ی حجمی انتخاب مناسب‌تری خواهند بود. در حالتی که پدیده‌هایی نظیر کماتنش کلی یا موضعی رخ دهند و المان‌ها، کرنش خمیری بالایی تجربه کنند، المان‌های پیوسته نمایش بهتری از رفتار عضو خواهند داشت. همچنین توزیع تنش و تغییرشکل‌های رخ داده در المان‌های پیوسته در مقایسه با المان‌های پوسته‌یی، بهتر نمایش داده خواهد شد.

المان‌های پیوسته در آباکوس به دو صورت ۸ گره‌یی (مرتبه‌ی اول، خطی) و ۲۰ گره‌یی (مرتبه‌ی دوم، غیرخطی) قابل استفاده هستند. بر اساس راهنمای نرم افزار، در مدل سازی پدیده‌هایی نظیر کماتنش، در صورت استفاده از المان‌های خطی مرتبه‌ی اول (C3D8) وقوع پدیده‌ی قفل شدگی برشی^{۱۳} محتمل است و باید کنترل شود. استفاده از روش انتگرال گیری کاهش یافته، احتمال وقوع قفل شدگی برشی را کاهش می‌دهد. با وجود این، در مطالعه‌ی حاضر به منظور بررسی رفتار عضو پیشنهادی با دقت بیشتر، از المان‌های غیرخطی ۲۰ گره‌یی استفاده شده است. المان‌های مرتبه‌ی دوم، توزیع تنش خصوصاً در محل‌های تغییرشکل موضعی را بهتر نمایش می‌دهند. به علاوه المان‌های مرتبه‌ی دوم نسبت به المان‌های مرتبه‌ی اول، نمایش بهتری از وقوع تغییرشکل‌ها ارائه می‌کنند.

بر اساس توضیحات ارائه شده، المان استفاده شده در پژوهش حاضر، المان ۲۰ گره‌یی است، که در حالت انتگرال گیری کاهش یافته استفاده می‌شود. نمایش المان مذکور در آباکوس به صورت C3D20R است. بر این اساس، در تمام موارد از دست‌کم دو المان در ضخامت استفاده شده است. در شکل ۸، مش بندی استفاده شده در شبیه‌سازی عددی و اجزاء مختلف مدل عددی و در شکل ۹، مش بندی استفاده شده مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲. تغییرشکل هسته‌ی داخلی بعد از اتمام چرخه‌های بارگذاری.



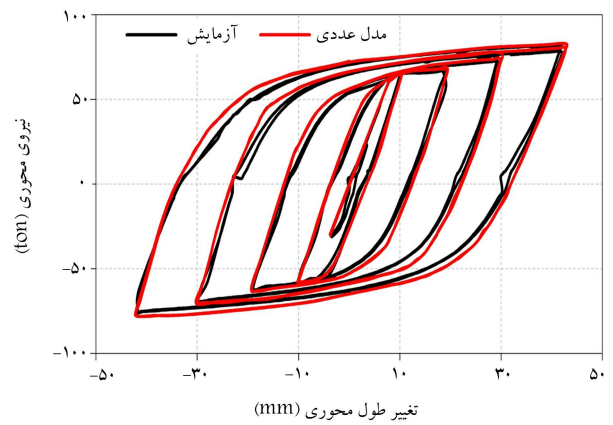
شکل ۱۳. تغییرشکل غلاف خارجی بعد از اتمام چرخه‌های بارگذاری.

تغییرشکل هسته‌ی داخلی و غلاف خارجی در انتهای پروتکل نشان می‌دهد که پرش‌های جزئی در نمودار حاصل از آزمایش، به دلیل نشست‌های احتمالی و جزئی روغن در مجموعه‌ی سیستم بارگذاری است. بارگذاری به ترتیب در شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود.

مود کمانش هسته‌ی داخلی در شکل ۱۲ مشهود است و این موضوع نشان از عملکرد مناسب مدل عددی در مدل‌سازی تماس بین هسته‌ی داخل و غلاف خارجی دارد. بر اساس کاتورتش ارائه شده در هر شکل، بیشینه‌ی تنش ایجاد شده در غلاف خارجی، حدود ۱۴۸ مگاپاسکال بوده است، که این موضوع نشان می‌دهد رفتار غلاف خارجی کاملاً در محدوده‌ی کشسان بوده و غلاف خارجی هیچ گونه مشارکتی در باربری محوری نداشته است. بیشینه‌ی تنش ایجاد شده در هسته‌ی داخلی برابر ۴۵۸ مگاپاسکال بوده است، که نشان می‌دهد هسته‌ی داخلی، طبق انتظار کاملاً به مرحله‌ی تسلیم رسیده است. خاطر نشان می‌سازد که مکانیزم اصلی اتلاف انرژی در این نوع مهاربند، تسلیم متوالی هسته در چرخه‌های کششی و فشاری است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ضمن معرفی نوع جدیدی از مهاربند کمانش‌تاب متشکل از دو لوله‌ی تودرتو، رفتار آن تحت بارگذاری چرخه‌یی به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. در راستای تکمیل مطالعات عددی پیشین انجام گرفته



شکل ۱۱. منحنی‌های هیستریزس حاصل از مدل‌های عددی و آزمایش.

۲.۴. مدل‌سازی تماس^{۲۱} بین اعضاء

در نمونه‌ی پیشنهادی، تمام بار محوری توسط لوله‌ی داخلی تحمل می‌شود و لوله‌ی خارجی فقط از کمانش لوله‌ی داخلی محافظت می‌کند و که آن هم فقط از طریق تماس دو لوله به هم تأمین می‌شود. به همین دلیل مدل‌سازی تماس گسترده بین سطح داخلی لوله‌ی خارجی و سطح خارجی لوله‌ی داخلی از نکات کلیدی در شبیه‌سازی رفتار مهاربند پیشنهادی است.

از بین تئوری‌های مختلف موجود در مدل‌سازی تماس، بر اساس رهنمودهای موجود در نرم‌افزار آباکوس، در پژوهش حاضر از الگوریتم پیشرفته‌ی پنالتی^{۲۲} استفاده شده است. رفتار تماسی بین دو لوله در جهت نرمال باید به گونه‌یی باشد که پس از برقراری تماس بین هر دو سطح، اولاً نفوذی بین دو سطح رخ ندهد و ثانیاً با تغییر شرایط بارگذاری، امکان جدایش دو سطح و برقراری مجدد تماس فراهم شود. همچنین با توجه به وجود اصطکاک در تماس دو سطح آهن به آهن، لازم است در مدل‌سازی رفتار تماسی دو سطح تماس، نیروی اصطکاک لحاظ شود. رفتار تماسی ذکر شده با استفاده از ضریب اصطکاک شبیه‌سازی شده است. در برخی مطالعات، مقدار ضریب اصطکاک مناسب برابر ۰/۱ تا ۰/۲ پیشنهاد شده و در آنها برای تعیین ضریب اصطکاک بین دو سطح فولاد به فولاد روغن‌کاری شده در مهاربندهای کمانش‌تاب، مطالعات آزمایشگاهی و عددی متعددی، [۲۴-۲۲] انجام و مقدار ضریب اصطکاک تعیین شده است.

۵. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش با نتایج حاصل از

مدل عددی

مدل عددی تحت همان پروتکل بارگذاری استفاده شده در آزمایش، تحلیل شده است، که منحنی هیستریزس حاصل از آن در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. منحنی هیستریزس حاصل از مدل عددی از نظر ساختاری، متقارن است و هیچ‌گونه افت سختی یا مقاومت در منحنی مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان از عملکرد مناسب مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار عضو مورد مطالعه دارد.

همچنین برای مقایسه‌ی بهتر نتایج، نمودار حاصل از آزمایش نیز در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، انطباق مناسبی بین نتایج مدل عددی و نتایج حاصل از آزمایش وجود دارد. این امر ضمن تأیید کفایت عضو پیشنهادی به عنوان عضو مهاربند کمانش‌تاب، صحت و دقت مدل‌سازی عددی را نیز نشان می‌دهد.

نچسب است، که از نظر اجرایی نسبتاً مشکل است) و افزایش سرعت ساخت را به همراه دارد. همچنین حذف بتن پُرکننده موجب سبکی عضو مهاربند می‌شود، که این امر موجب سهولت حمل، نصب و برچیدن احتمالی می‌شود.

با توجه به این‌که در آزمون‌های آزمایشگاهی، ظرفیت سیستم بارگذاری از مهمترین عوامل تعیین‌کننده در طراحی نمونه است، در مطالعه‌ی حاضر، سیستم بارگذاری تا ظرفیت ۲۵۰ تن توسعه داده شده است، که این مقدار می‌تواند جهت آزمایش اعضاء مهاری برای کاربرد در ساختمان‌های مسکونی کوتاه‌مرتبه به کار رود.

کاربرد عضو مهاری محدود به سازه‌های ساختمانی نیست و در سایر سازه‌ها، خصوصاً سازه‌های ساخته شده از اعضاء لوله‌یی نظیر سازه‌های دریایی قابل استفاده است. کاربرد اعضاء ذکر شده در سازه‌های دریایی توسط نویسندگان بررسی شده است، که البته در مرحله‌ی نگارش نتایج است.

توسط نویسندگان نوشتار حاضر (حیدری و مالک)، نمونه‌ی آزمایش بر اساس مطالعه‌ی پارامتریک گسترده‌ی ایشان (۲۰۱۷)^[۸] طراحی و ساخته شده است. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان از عملکرد مناسب عضو پیشنهادی به عنوان مهاربند کماتش‌تاب با رفتار متقارن و پایدار تحت بارگذاری چرخه‌یی دارد.

سطح زیر منحنی هیستریزیس معرف میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ی تحت بارگذاری چرخه‌یی است. با توجه به شکل پایدار و متقارن چرخه‌های هیستریزیس حاصل از آزمایش و مدل‌سازی عددی، عضو پیشنهادی قابلیت جذب انرژی بالایی تحت بارهای رفت و برگشتی نظیر زلزله دارد.

از نظر کاربرد ساختمانی و مقایسه با مهاربندهای رایج پُر شده با بتن، در مهاربند پیشنهادی نیازی به استفاده از بتن محصورکننده نیست. این موضوع صرفه‌جویی در مصرف مصالح، سهولت ساخت اعضاء مهاری (اجرای بتن مستلزم اجرای ماده‌ی

پانوشتها

1. buckling restrained brace
2. all-steel buckling restrained brace
3. Yoshino et al
4. Fotoohabadi
5. Loadcell
6. data logger
7. hot rolled seamless
8. non-linear geometry
9. material non-linearity
10. contact
11. SNSYS
12. ABAQUS
13. shear locking
14. isotropic hardening
15. kinematic hardening
16. combined hardening
17. Rossi
18. chaboche combined isotropic/ kinematic model
19. Jia and Kuwamura
20. Mazzolani
21. contact
22. penalty algorithm

منابع (References)

1. Xie, Q. "State of the art of buckling-restrained braces in Asia", *Journal of Onstructional Steel Research*, **61**(6), pp. 727-748 (2005).
2. Lai, J.-W. and Tsai, K.-Ch. "Research and application of buckling restrained braces in Taiwan", *ANCER Annual Meeting 2004, Hawaii, USA* (2004).
3. Yoshino, T. and Karino, Y. "Experimental study on shear wall with braces: Part 2: summaries of technical papers of annual meeting", *Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section*, **11**, pp 403-404 (1971).
4. Xu, L., Chen, P. and Li, Z. "Development and validation of a versatile hysteretic model for pre-compressed self-centering buckling-restrained brace", *J. Constr. Steel Res.*, **177**, 106473 (Feb 2021).
5. Wang, C.L., Qing, Y., Wu, J. and et al. "Analytical and experimental studies on buckling-restrained brace with gap-supported tendon protection", *J. Constr. Steel Res.*, **164**, 10580 (Jan 2020).
6. Dehghani, M. and Tremblay, R. "Design and full-scale experimental evaluation of a seismically enduring steel buckling-restrained brace system", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **47**(1), pp. 105-129 (Jan 2018).
7. Jia, L.J., Ge, H., Maruyama, R. and et al. "Development of a novel high-performance all-steel fish-bone shaped buckling-restrained brace", *Eng. Struct.*, **138**, pp. 105-119 (May 2017).
8. Heidary-Torkamani, H. and Maalek, S. "Conceptual numerical investigation of all-steel tube-in-tube buckling restrained braces", *J. Constr. Steel Res.*, **139**, pp. 220-235 (2017).
9. Alhamaydeh, M., Abed, F. and Mustapha, A. "Key parameters in fl uencing performance and failure modes for BRBs using nonlinear FEA", *JCSR*, **116**, pp. 1-18 (2016).
10. Yin, Z.Z. and Bu, F. "Overall stability analysis of improved buckling restrained braces", *Open Civ. Eng. J.*, **10**(1), pp. 61-75 (2016).
11. Kersting, R.A.; Fahnestock, L.A. and López, W.A. "Seismic design of steel buckling-restrained braced frames: A guide for practicing engineers", *NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 11*, NIST GCR 15-917-34 (2015).
12. Piedrafita, D., Cahis, X., Simon, E. and et al. "A new perforated core buckling restrained brace", *Eng. Struct.*, **85**, pp. 118-126 (2015).
13. Atlayan, O. and Charney, F.A. "Hybrid buckling-restrained braced frames", *J. Constr. Steel Res.*, **96**, pp. 95-105 (2014).

14. Mahmoudi, M. and Zaree, M. "Determination the response modification factors of buckling restrained braced frame", *Procedia Eng.*, **54** (2005), pp. 222-231 (2013).
15. Maalek, S. and Ghasemi, S. "The introduction of a buckling restrained bracing system", *14th Eur. Conf. Earthq. Eng.* (2010).
16. Omidi, H. "Presentation and development of the proposed double-tube system as buckling restrained brace", *M.Sc dissertation, College of Civil Engineering, University of Tehran, Iran* (2014).
17. Fotoohabadi, A. "An investigation of the behavior of steel frames equiped with double-tube buckling restrained braces", *M.Sc dissertation, College of Civil Engineering, University of Tehran, Iran* (2015).
18. AISC 341-10, "Seismic provisions for structural steel buildings", (2010).
19. Rossi, P.P. "Importance of isotropic hardening in the modeling of buckling restrained braces", *J. Struct. Eng.*, **141**(4), 04014124 (Apr 2015).
20. Jia, L.-J. and Kuwamura, H. "Prediction of cyclic behaviors of mild steel at large plastic strain using coupon test results", *J. Struct. Eng.*, **140**(2), 040130 (Feb 2014).
21. Mazzolani, F.M., Ricles, J.M. and Sause, R. "STESSA 2009", *Proceedings of the 6th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Philadelphia, Pennsylvania, USA, CRC Press*, (16-20 Aug 2009).
22. Eryaşar, E. "Experimental and numerical investigation of buckling restrained braces", *Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey* (2009).
23. Chou, C.-C. and Chen, S.-Y. "Subassemblage tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces", *Eng. Struct.*, **32**(8), pp. 2108-2121 (2010).
24. Genna, F. and Gelfi, P. "Analysis of the lateral thrust in bolted steel buckling-restrained braces. I: experimental and numerical results", *J. Struct. Eng.*, **13**(10), pp. 1231-1243 (2011).