

طراحی بهینه و بررسی عملکرد چرخه‌ی سیستیم دوگانه‌ی قاب خمشی فولادی متوسط مجهز به مهاربند ضرب‌داری دو طبقه‌ی کمانش‌تاب مرکزگرا

محمدرضا احدپور خانقاه (دانشجوی دکتری)

اسماعیل محمدی ده‌چشمه (دانشجوی دکتری)

وحید بروجردیان* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۱/۲، ص. ۵۱-۶۰، (پژوهشی)

در سال‌های اخیر، سیستم‌های باربر جانبی مرکزگرا به دلیل کاهش جابه‌جایی پسماند، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. یکی از جدیدترین این نوع سیستم‌ها، مهاربندهای مرکزگرای کمانش‌تاب هستند. در این تحقیق به بررسی عملکرد چرخه‌ی سازی ۹ طبقه با سیستم دوگانه‌ی مجهز به مهاربند کمانش‌تاب مرکزگرا با کابل پیش‌تنبیده پرداخته شده است. با تغییر سه پارامتر مؤثر بر عملکرد مهاربند شامل تنش تسلیم هسته، میزان پیش‌تندگی و نسبت مساحت کابل به هسته‌ی کمانش‌تاب، ۶۲ مدل سازی در نرم‌افزار OpenSEES شبیه‌سازی شد. با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح نمودار هیستریزس سازه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ی، محاسبه و ترسیم شد. طراحی بهینه برای این مدل‌ها بر اساس کم‌ترین جابه‌جایی پسماند و بیش‌ترین جذب انرژی ممکن انجام شد. در پایان با مقایسه‌ی که انجام شد، مشخص شد که سازه با مهاربند مرکزگرای بهینه در مقایسه با سازه با مهاربند کمانش‌تاب می‌تواند در ازای ۳۷ درصد کاهش ظرفیت جذب انرژی، ۶ درصد از جابه‌جایی پسماند سازه بکاهد.

واژگان کلیدی: سیستم مرکزگرا، فولاد، تغییر شکل پسماند، جذب انرژی، مهاربند کمانش‌تاب.

reza_ahadpour@civileng.iust.ac.ir
esmaeil_mohammadi@civileng.iust.ac.ir
broujerdian@iust.ac.ir

۱. مقدمه

۱.۱. پیشینه‌ی تحقیق

استفاده می‌شود. از ویژگی‌های سیستم‌های نوین مرکزگرا می‌توان به متمرکز کردن آسیب‌ها در فیوزهای جذب انرژی، تعویض‌پذیری اجزای جذب انرژی، کاهش جابه‌جایی‌های پسماند بعد از زلزله، کاهش هزینه‌های تعمیر پس از زلزله، کاهش اثرات نامطلوب P-Delta و کاهش آسیب در اجزای سازه‌ی و غیرسازه‌ی اشاره کرد.

مهاربند کمانش‌تاب مرکزگرا (SC-BRB)^۲ از ترکیب رفتار مهاربند کمانش‌تاب برای جذب انرژی و ایجاد سازوکار مرکزگرایی کمک می‌گیرد. مهاربندهای کمانش‌تاب اگر چه جذب انرژی مناسبی دارند، جابه‌جایی پسماند زیاد ایجاد شده در آنها باعث ایجاد لزوم ترکیب آنها با سیستم مرکزگرا شده است. اولین و مهم‌ترین مشخصه‌ی سیستم‌های مرکزگرا، سازوکار بازگرداندگی^۳ آن است که در ترکیب با عضو که قابلیت استهلاک انرژی بالایی دارد، رفتار چرخه‌ی پرچمی شکل^۴ را تولید می‌کند.^{۱،۵} مهم‌ترین روش برای تولید نیروی بازگرداندگی و ایجاد منحنی دوخطی کشسانی، استفاده از سازوکار پیش‌تندگی^۵ و بازشوندگی^۶ است. سازوکار مورد استفاده برای ایجاد نیروی بازگرداندگی^۷ در سازه‌های مهاربندی به نحوی است که با اعمال نیروی محوری بین اجزای هم‌محور مهاربند و صفحات فولادی فاصله ایجاد می‌شود و با

در دهه‌های اخیر، با توجه به زلزله‌های رخ داده در ایران و سایر نقاط جهان، مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ی سازه‌ها بسیار مورد توجه بوده است. معمولاً سازوکار جذب و اتلاف انرژی در مقابل نیروهای لرزه‌ی، ورود به ناحیه‌ی غیرخطی رفتار مصالح است. با ورود اجزای سازه به ناحیه‌ی غیرخطی، طبعاً جابه‌جایی پسماند بعد از زلزله در سازه قابل مشاهده است. در نتیجه برای ترمیم سازه بعد از زلزله نیاز به حذف جابه‌جایی‌های پسماند است. با توجه به هزینه‌های زیاد حذف جابه‌جایی‌های پسماند و تعمیر اجزای سازه، گاهی اوقات تصمیم به تخریب سازه گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر، برای کاهش جابه‌جایی‌های پسماند و جذب انرژی ورودی ناشی از زلزله در سازه‌ها، سیستم‌های نوین لرزه‌ی با نام سیستم‌های مرکزگرا^۱ توسعه یافته‌اند. در سیستم‌های نوین مرکزگرا، برای جذب انرژی ورودی لرزه‌ی، از فیوزهای جذب انرژی و برای کاهش جابه‌جایی‌های پسماند، از کابل‌های پیش‌تنبیده در سازه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۳/۱۳۹۹، اصلاحیه ۱۹/۵/۱۳۹۹، پذیرش ۲۰/۷/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55635.2758

اجزای مهاربند (ترکیب بهینه) که منجر به ایجاد کمترین جابه‌جایی پسماند در عین ایجاد کمترین کاهش ظرفیت جذب انرژی در سازه شود، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین نیاز است تا مقایسه‌ی بین این سیستم نوین مرکزگرا با سیستم‌های سنتی پیشین انجام شود تا اهمیت استفاده از این سیستم بهتر درک شود.

۲.۱. هدف تحقیق

در این تحقیق به بررسی عملکرد سیستم دوگانه‌ی فولادی مجهز به مهاربند کمناش‌تاب مرکزگرا و طراحی بهینه‌ی آن پرداخته شده است. با هدف یافتن طرح بهینه این سیستم در یک قاب خمشی ۹ طبقه، یک مطالعه‌ی پارامتریک بر اساس خصوصیات مهاربند SC-BRB مورد نظر شامل میزان پیش‌تندگی کابل‌های مهاربند، نسبت مساحت کابل به هسته‌ی جاری‌شونده‌ی مهاربند و تنش تسلیم هسته‌ی مهاربند انجام می‌شود. به این منظور از نرم‌افزار اجزای محدود OpenSEES استفاده می‌شود. به منظور صحت‌سنجی فرایند مدل‌سازی عددی، از داده‌های آزمایشگاهی موجود استفاده می‌شود. برای نشان دادن مزایای سیستم طراحی‌شده‌ی بهینه، مهاربند BRB^{۱۳} (یا کمناش‌تاب) و مهاربند SC-BRB با هم مقایسه می‌شوند.

۲. روش تحقیق

۲.۱. معرفی سیستم مرکزگرای مورد استفاده

در صورتی که به صورت موازی از یک سازوکار بازشوندگی و پیش‌تندگی (مطابق نمودار هیستریزس شکل ۱ - ب) و یک هسته‌ی کمناش‌تاب (مطابق نمودار هیستریزس شکل ۱ - پ) استفاده شود، دو نمودار هیستریزس مهاربند کمناش‌تاب و مهاربند مرکزگرا با هم ترکیب می‌شوند و نمودار هیستریزس به صورت پرچمی شکل مطابق شکل ۱ - الف را تشکیل می‌دهند.

در این تحقیق از نوعی مهاربند مرکزگرا که در سال ۲۰۱۷ توسط ونگ و همکاران^[۱۰] ابداع شده است، استفاده می‌شود. این سیستم که از ترکیب کابل‌های فولادی پیش‌تندگی با مهاربند کمناش‌تاب ساخته شده است، مطابق شکل ۲ از قطعات زیر تشکیل شده است:

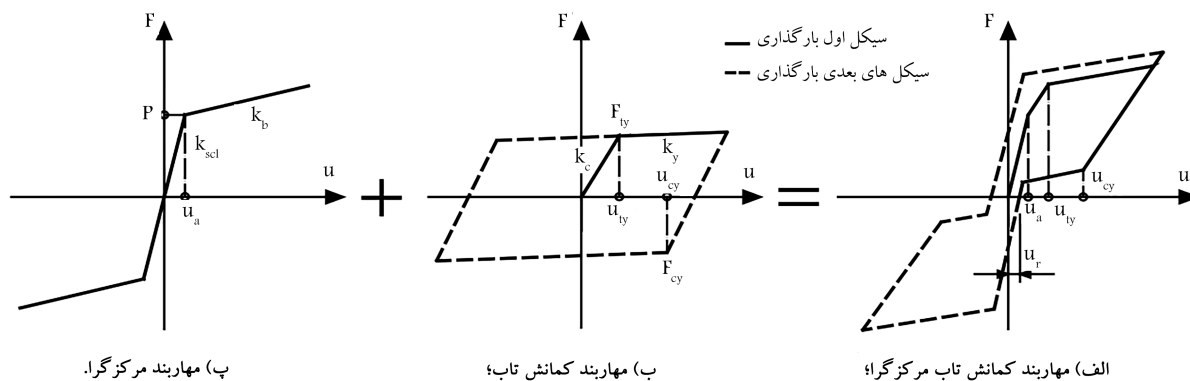
۱. انتهای سمت راست ورق هسته به غلاف میانی جوش می‌شود، صفحات محدودکننده^{۱۴} در تمام طول ورق هسته جوش می‌شوند و ورق انتهایی^{۱۵} و ورق عرضی^{۱۶} به انتهای غلاف میانی جوش می‌شوند.
۲. غلاف میانی و هسته در درون غلاف خارجی قرار می‌گیرند.

حذف نیروی جانبی، کابل‌های پیش‌تندگی که در طول مهاربند قرار دارند، اعضا را به حالت اولیه برمی‌گرداند.^[۳]

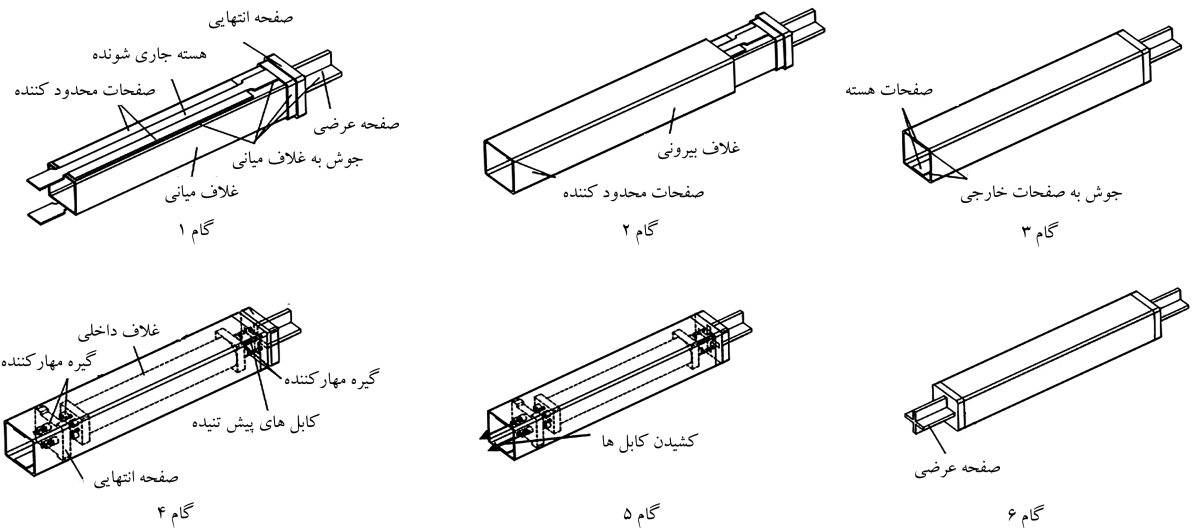
در سال ۲۰۱۲ میار و همکاران به ارائه‌ی نوعی سیستم جدید مهاربند SC-BRB پرداختند. در این مطالعه از آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA)^۸ به عنوان عامل ایجاد مرکزگرایی و نیز به عنوان جاذب انرژی استفاده شده است. این آلیاژ علاوه بر جذب انرژی مناسب، جابه‌جایی پسماند بسیار کمی دارد و در صورتی که بتوان آن را در فرایند تغییر طول مهاربند وارد کرد این خاصیت به مهاربند منتقل می‌شود.^[۵] در تحقیقاتی در سال ۲۰۱۵ به جای آلیاژ حافظه‌دار از پلیمر مسلح شده با الیاف بازالت (BFRP)^۹ به عنوان کابل‌های پیش‌تندگی برای ایجاد خاصیت مرکزگرایی استفاده شد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که این الیاف ظرفیت افزایش طول مناسبی دارد و برای استفاده به عنوان کابل^۱ داخل مهاربند کمناش‌تاب مرکزگرا مناسب است.^[۶] لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ نوع دیگری از مهاربند مرکزگرا با آلیاژ حافظه‌دار شکلی را ساختند و تحت بارگذاری چرخه‌یی و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی قرار دادند و توانایی کاهش پاسخ سازه را ارزیابی کردند.^[۷] شی و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأثیر پارامترهای طراحی مهاربند مرکزگرای با آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر عملکرد لرزه‌یی و فروریزش سازه را بررسی کردند.^[۸] در سال ۲۰۱۹ کاری و همکاران به کمک آلیاژ SMA مدل مهاربند کمناش‌تاب مرکزگرای جدیدی را معرفی کردند.^[۹]

در سال ۲۰۱۷ ونگ و همکاران مدلی را با استفاده از کابل‌های فولادی پیش‌تندگی^{۱۱} ساختند که قابلیت اجرایی بالاتری داشت. در این تحقیق به مدل‌سازی این مدل پرداخته شده است و جزئیات این مهاربند در قسمت‌های بعدی به طور مفصل بیان شده است.^[۱۰]

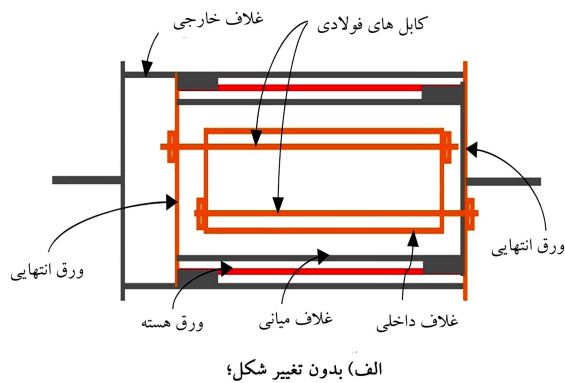
دانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷، زوو و همکاران در سال ۲۰۱۹ و هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ از ترکیب فنرهای دیسکی پیش‌تندگی با صفحات محدودکننده^{۱۲} مهاربندهایی با خاصیت مرکزگرایی ساختند. همچنین دانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ عملکرد لرزه‌یی مهاربند مرکزگرای ابداعی ساخته شده با فنر دیسکی را بررسی کردند. استفاده از فنر دیسکی باعث می‌شد تا مراحل ساخت مهاربند در عمل ساده‌تر و اجرایی‌تر باشد. فنرهای دیسکی توانایی ایجاد نیروی پیش‌تندگی بالایی را دارند و کمتر دچار زوال نیروی پیش‌تندگی ناشی از تغییر طول می‌شوند. به همین دلیل کنترل بسیار مناسبی بر جابه‌جایی پسماند دارند.^[۱۱-۱۵] همان‌طور که مشاهده شد بیشتر تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر به دنبال ابداع روش‌های متنوع برای ساخت مهاربند با خاصیت مرکزگرایی بوده‌اند. اما کمبود بررسی‌های بیشتر بر روی این مهاربندها از جمله بررسی برای یافتن ترکیب مناسب



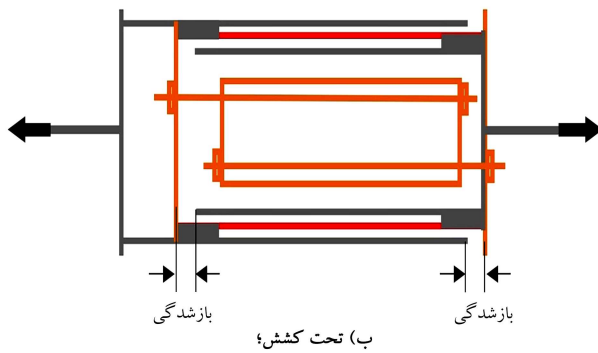
شکل ۱. نمودار هیستریزس [۶]



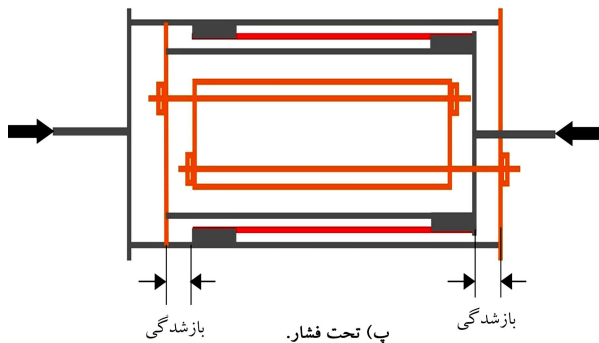
شکل ۲. اجزای مهاربند مرکزگرایی مورد استفاده در تحقیق حاضر. [۱۰]



الف) بدون تغییر شکل؛



ب) تحت کشش؛



پ) تحت فشار.

شکل ۳. طرح مدل ونگ و همکاران.

۳. غلاف میانی داخلی غلاف خارجی قرار می‌گیرد تا جایی که انتهای غلاف میانی به اجزای انتهایی هسته ۱۷ برسد و سپس انتهای سمت چپ هسته به دیواره داخلی غلاف بیرونی جوش می‌شود.

۴. کابل‌های فولادی از غلاف داخلی عبور می‌کنند: چهار کابل به یک سمت بسته ۱۸ می‌شوند، سپس غلاف داخلی درون غلاف میانی قرار می‌گیرد و چهار کابل فولادی دیگر در سمت دیگر غلاف داخلی به کمک صفحه انتهایی ۱۹ بسته می‌شود. سپس چهار کابل فولادی قبلی به صفحه‌ی انتهایی دیگر بسته می‌شوند.

۵. کابل‌ها از یک سمت پیش‌تنیده می‌شوند تا به سطح پیش‌تنیدگی طراحی برسند.

۶. صفحه‌ی انتهایی و صفحه‌ی عرضی به مهاربند جوش می‌شوند.

غلاف‌های میانی و خارجی سیستم SC-BRB دوکارکرد دارند: کارکرد اول برای سیستم BRB است که غلاف میانی و خارجی هنگام فشار از کمانش هسته جلوگیری می‌کنند. کارکرد دوم برای سیستم SC-BRB است به این صورت که با حرکت غلاف‌ها نسبت به یکدیگر طول کابل فولادی پیش‌تنیده بیشتر می‌شود و پس از آنکه نیروهای خارجی برداشته می‌شوند، کابل‌های پیش‌تنیده مهاربند را به موقعیت اولیه برمی‌گردانند. برای توضیح بیشتر نحوه‌ی جذب انرژی و ظرفیت مرکزگرایی مهاربند SC-BRB، عملکرد آن تحت کشش و فشار در شکل ۳ نشان داده شده است. اجزای اصلی در شکل ۳ - الف قبل از اعمال کشش و فشار مشاهده می‌شوند. هنگامی که مهاربند تحت کشش قرار می‌گیرد، غلاف میانی صفحه‌ی انتهایی سمت راست را از غلاف بیرونی خارج می‌کند. (شکل ۳ - ب) این در حالی است که صفحه‌ی انتهایی سمت چپ به وسیله بخش‌های انتهایی هسته ثابت باقی می‌ماند و از غلاف میانی فاصله می‌گیرد. بنابراین دو بازشدگی شکل می‌گیرند. در همین حین هسته تا حد جاری شدن افزایش طول پیدا می‌کند و جذب انرژی اتفاق می‌افتد. همچنین فاصله‌ی بین دو صفحه‌ی انتهایی افزایش پیدا می‌کند و باعث کشیده شدن کابل‌های پیش‌تنیده می‌شود. هنگامی که کشش برداشته شود کابل‌های پیش‌تنیده به طول اولیه بازمی‌گردند و باعث مرکزگرایی مهاربند می‌شوند. شکل ۳ - پ سازوکار فشاری را نمایش می‌دهد.

در شکل ۴ در مقاطع عرضی مهاربند پیشنهادی ونگ و همکاران مشاهده

می‌شود.

رفتار هسته‌ی کمانش تاب پس از مرحله‌ی جاری شدن تعیین می‌شوند که تقریباً در تمام انواع مهاربندهای کمانش‌تابی که تا به حال آزمایش شده‌اند، ثابت است.^[۵] در این تحقیق مقادیر نرمال β برابر با $1/2$ و مقادیر ω برابر با $1/35$ در نظر گرفته شد.

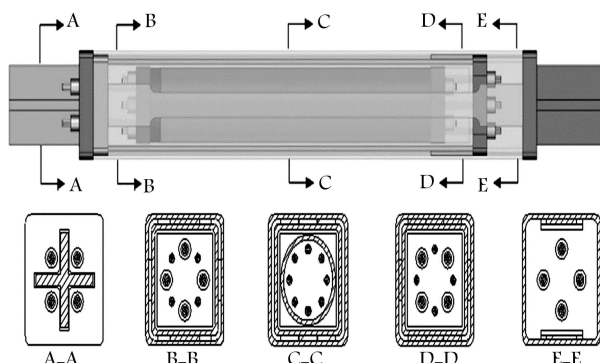
۳.۲. مشخصات مدل‌های عددی

در این تحقیق رفتار سیستم دوگانه با شکل‌پذیری متوسط مجهز به مهاربند SC-BRB مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور یک ساختمان ۹ طبقه با قاب‌های پیرامونی سیستم دوگانه‌ی SC-BRB با ۳ دهانه به طول ۵ متر در دو جهت افقی x و y به روش حالت حدی ضریب بار و مقاومت و تحلیل استاتیکی معادل و بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان^[۱۷] آیین‌نامه‌ی AISC-۳۴۱^[۱۶]، آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰^[۱۸]، مبحث ششم مقررات ملی ساختمان^[۱۹] و آیین‌نامه‌ی ASCE-۷^[۲۰] و به کمک نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۶ طراحی شد. در محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌یی، منطقه برای شهر تهران با خطرپذیری نسبی خیلی زیاد و خاک نوع ۲ با کاربری ساختمان مسکونی در نظر گرفته شد. در سازه‌ی طراحی شده، سقف سازه از نوع کامپوزیت، بار مرده‌ی کف‌سازی اسکلت و دال برابر با 740 کیلوگرم بر متر مربع، بار زنده 250 کیلوگرم بر متر مربع و بار تیغه‌بندی 150 کیلوگرم بر متر مربع است. ضریب رفتار طراحی برای سیستم‌های قاب خمشی همراه با مهاربند کمانش‌تاب مطابق آیین‌نامه‌ی ASCE-۷^[۲۰] برابر ۸ در نظر گرفته شد. کنترل لازم برای آن که دریافت غیرخطی طراحی از حد مجاز آیین‌نامه‌یی (دو درصد) بیشتر نشود، انجام شده است. همچنین ضوابط طراحی سیستم با شکل‌پذیری متوسط در نظر گرفته شده است.

مقاطع طراحی برای این ساختمان در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل‌های ۵ تا ۷ به ترتیب نمای سه‌بعدی، نمای دوبعدی و پلان ساختمان ۹ طبقه‌ی طراحی شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. همان‌طور که از پلان سازه‌ی مورد نظر مشخص است، قاب‌های میانی در این سازه قاب‌های باربر ثقلی‌اند. ارتفاع طبقات برابر با $3/2$ متر است. برای تعیین پارامترهای طراحی بهینه، ظرفیت مهاربند مرکزگرا با ظرفیت سیستم مهاربند کمانش‌تاب طراحی شده برای ساختمان ۹ طبقه، معادل‌سازی

جدول ۱. مقاطع اعضای سازه مورد بررسی (واحد میلی‌متر).

اعضا	طبقات		
	۳-۱	۴-۶	۷-۹
ستون گوشه	IPB۴۵۰	IPB۳۰۰	IPB۲۲۰
ستون پیرامونی	IPB۶۰۰	IPB۳۶۰	IPB۲۴۰
ستون میانی	IPB۴۵۰	IPB۳۰۰	IPB۲۲۰
تیر پیرامونی	IPE۴۰۰	IPE۳۳۰	IPE۳۰۰
تیر میانی	IPE۳۰۰	IPE۳۰۰	IPE۳۰۰
مساحت هسته‌ی BRB (میلی‌متر مربع)	۳۵۴۸	۲۲۵۸	۱۶۱۲



شکل ۴. مقاطع مختلف مهاربند پیشنهادی و ننگ و همکاران.^[۱۰]

۲.۲. معرفی روش طراحی

بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ی AISC-۳۴۱، مقاومت طراحی باید معادله‌ی زیر را ارضا کند:^[۱۶]

$$\phi P_n \geq P_u \quad (1)$$

که در آن ϕP_n مقاومت طراحی مهاربند و P_u نیروی وارد به مهاربند در حالت حدی نهایی است. در مهاربند مرکزگرا، مقاومت طراحی برابر مجموع نیروی تسلیم هسته‌ی فولادی، $P_{y_{sc}}$ و نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌های فولادی، $P_{i-strand}$ است. پس:^[۵]

$$\begin{aligned} \phi P_n &= \phi(P_{y_{sc}} + P_{i-strand}) \\ &= \phi/9(F_{y_{sc}}A_{sc} + F_{i-strand}A_{strand}) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن $F_{y_{sc}}$ تنش تسلیم هسته‌ی فولادی، A_{sc} سطح مقطع هسته‌ی فولادی، A_{strand} سطح مقطع کل کابل‌های فولادی، $F_{i-strand}$ نیروی پیش‌تنیدگی کابل فولادی و ϕ ضریب کاهش مقاومت برابر با $0/9$ در کشش و فشار است. رفتار مرکزگرایی مهاربند تابعی از نسبت بین نیروی کابل‌های پیش‌تنیده و نیروی کرنش سخت‌شوندگی هسته‌ی فولادی مهاربند است که بر اساس AISC-۳۴۱ مطابق رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\alpha_{sc} = \frac{F_{i-strand}A_{strand}}{\beta\omega F_{y_{sc}}A_{sc}} \quad (3)$$

ضریب β مربوط به مقاومت فشاری هسته‌ی فولادی، ضریب ω مربوط به کرنش سخت‌شوندگی فولاد و α_{sc} ضریبی است که نسبت بین دو نیرو را بیان می‌کند. با جایگذاری رابطه‌ی ۳ در روابط ۱ و ۲، سطح مقطع هسته‌ی فولادی و کابل‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{sc} = \frac{P_u}{\phi F_{y_{sc}}(1 + \alpha_{sc}\beta\omega)} \quad (4)$$

$$A_{strand} = \frac{\alpha_{sc}\beta\omega F_{y_{sc}}A_{sc}}{F_{i-strand}} \quad (5)$$

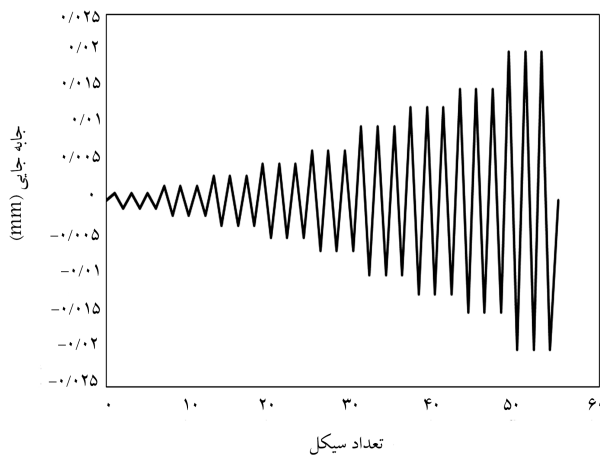
ضریب α_{sc} در واقع پارامتری است که جدایش بین نیروی پیش‌تنیدگی ابتدایی کابل و سخت‌شوندگی هسته کمانش‌تاب را مشخص می‌کند. ضریب β ضریب اصلاح مقاومت فشاری هسته کمانش‌تاب و ω ضریب تصحیح کرنش سخت‌شوندگی برای هسته کمانش‌تاب است. ضرایب β و ω مطابق آیین‌نامه‌ی فولاد آمریکا بر اساس منحنی تنش - کرنش هسته‌ی فولادی به دست می‌آیند. مقادیر β و ω بر اساس

می‌شود، سپس با استفاده از ظرفیت به دست آمده و به کمک روابط ۴ و ۵ و با فرض نسبت‌های مختلف مساحت کابل پیش‌تنیده به مساحت هسته‌ی کمانش‌تاب، تنش تسلیم هسته و مقدار نیروی پیش‌تنیدگی کابل، مقادیر مساحت هسته و کابل به دست می‌آید. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، پیش‌تنیدگی کابل‌های مهاربند، نسبت مساحت کابل به هسته‌ی جاری‌شونده مهاربند و تنش تسلیم هسته‌ی مهاربند هستند. تنش تسلیم هسته ۲۴۰ و ۳۶۰ مگاپاسکال، نسبت نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌ها به مقاومت تسلیم (R_I) برابر با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ و نسبت مساحت کابل به هسته‌ی جاری‌شونده‌ی مهاربند (R_A) برابر با ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ∞ در نظر گرفته شده است. با در نظرگیری این پارامترها در مجموع ۶۲ مدل سازه‌ی با مهاربندهای متفاوت بررسی می‌شود.

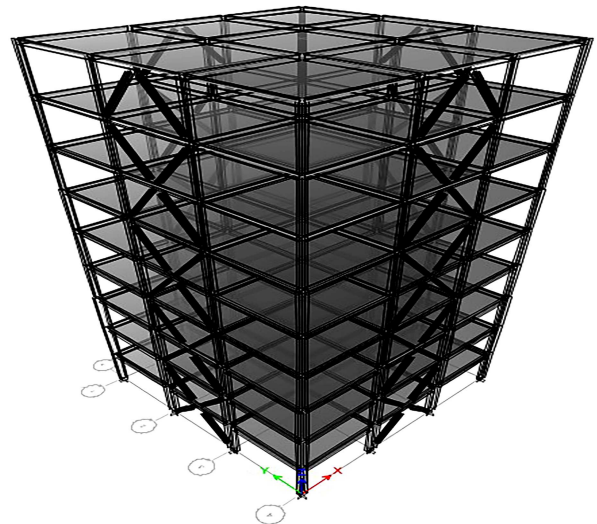
برای تعیین حالت بهینه سیستم دوگانه‌ی مجهز به مهاربند SC-BRB با مشخصات مختلف، سازه‌ی تحت بارگذاری چرخه‌ی استاتیکی با توزیع مثالی و تحت الگوی مرجع^[۱۰] قرار می‌گیرد. برای محاسبه‌ی رفتار غیرخطی مدل‌ها از نرم‌افزار OpenSEES استفاده می‌شود. مدل‌سازی در این نرم‌افزار به صورت دوطرفه انجام شده است و برای در نظرگیری اثر پی دلتای بارهای ثقلی یک ستون تکیه‌کننده^{۲۰} با اتصالات مفصلی به یک سمت سازه‌ی دو بعدی مدل شده اضافه می‌شود. از تغییرشکل‌های چشمه‌ی اتصال در سیستم جلوگیری شده است و مدل‌سازی چشمه‌ی اتصال به صورت صلب فرض شده است. برای مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از مصالح Steel ۰۲ و برای مدل‌سازی پیش‌تنیدگی در مهاربند از مصالح Ma-Init Stress terial استفاده شده است. همچنین برای آنکه مهاربندها لنگر و برش تحمل نکنند از جزء Truss در مدل‌سازی آنها استفاده شد. با استفاده از نتایج تحلیل‌ها، برای تمام مدل‌ها بیشینه کرنش ماندگار (محل برخورد چرخه‌ی آخر منحنی هیستریزس با محور طولی) و بیشینه میزان استهلاک انرژی (مساحت داخلی منحنی هیستریزس مدل‌ها) استخراج می‌شوند. حالت بهینه حالتی است که علاوه بر کاهش مؤثر جابه‌جایی پسماند، جذب انرژی قابل قبولی نیز داشته باشد.

۴.۲. صحت‌سنجی روند مدل‌سازی عددی

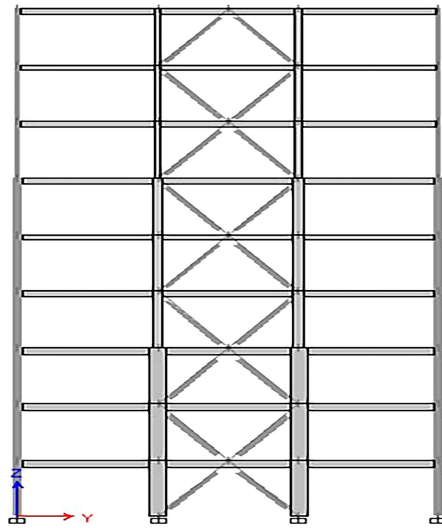
در این قسمت با استفاده از نتایج آزمایشگاهی^[۱۰] یک نمونه مهاربند مرکزگرا، روند مدل‌سازی عددی مورد استفاده در نرم‌افزار OpenSEES صحت‌سنجی می‌شود. در شکل ۸ الگوی بارگذاری وارده به مهاربند را در آزمایش نشان می‌دهد. هر نمونه



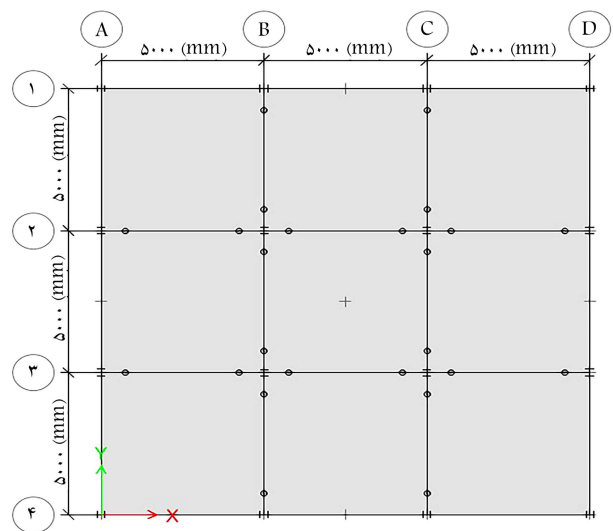
شکل ۸. الگوی بارگذاری وارده به مهاربند.^[۱۰]



شکل ۵. نمای سه‌بعدی قاب طراحی شده در نرم‌افزار ETABS



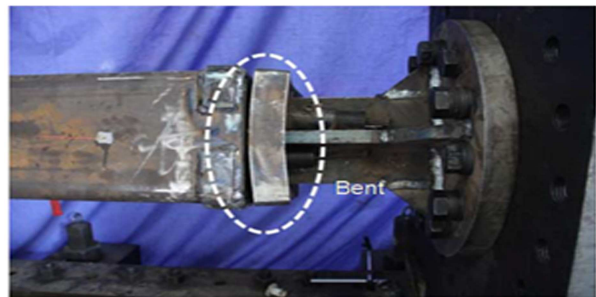
شکل ۶. نمای قاب طراحی شده در نرم‌افزار ETABS.



شکل ۷. پلان قاب طراحی شده در نرم‌افزار ETABS.



الف) خمیدگی ورق انتهایی؛



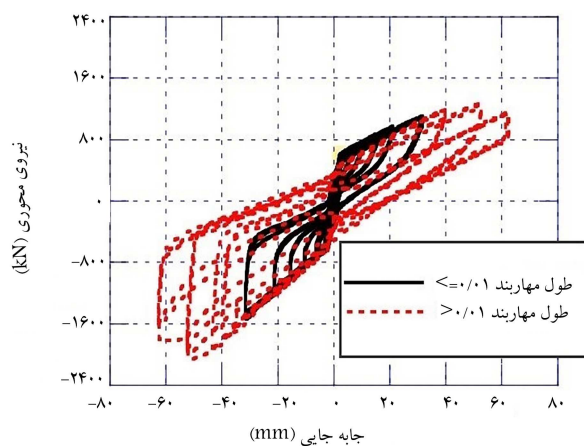
ب) برآمدگی غلاف خارجی.

شکل ۱۱. تغییر شکل‌های نمونه تحت آزمایش. [۱۰]

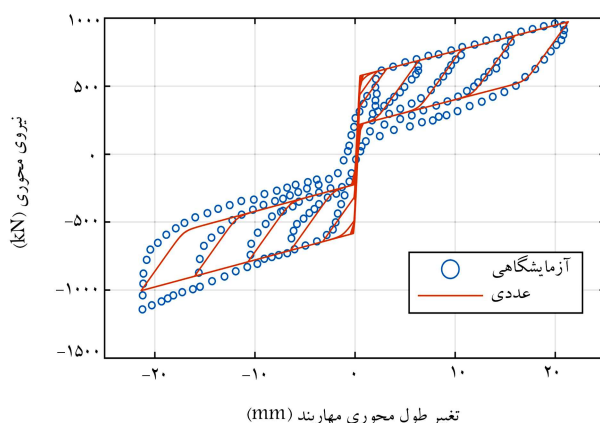
صرف نظر شده است. در چرخه‌ی آخر بارگذاری مطابق شکل ۱۱ - الف نیروی پیش‌تیدگی کابل‌ها باعث خمیدگی ورق‌های انتهایی می‌شود و مطابق شکل ۱۱ - ب غلاف بیرونی دچار برآمدگی می‌شود؛ چراکه غلاف بیرونی و میانی در آزمایش به اندازه‌ی کافی سخت نبودند تا بتوانند جلوی کمانش هسته را بگیرند (به خصوص هنگامی که هسته با قسمت میانی غلاف تماس پیدا می‌کرد). سه عامل برآمدگی غلاف‌ها، خمیدگی ورق‌های انتهایی و جاری شدن کابل در چرخه‌ی آخر سبب نزدیک شدن دو سر کابل و در نتیجه از بین رفتن نیروی پیش‌تیدگی می‌شود. این مسئله باعث کاهش خاصیت مرکزگرایی، افزایش جابه‌جایی پسماند و افت نمودار در چرخه‌ی آخر است و اختلاف اندک بین مدل‌سازی و آزمایش از این جا ناشی می‌شود که در جهت اطمینان به دلیل جذب انرژی کمتر در مدل‌سازی عددی می‌توان از این اختلاف چشم‌پوشی کرد. باید در نظر داشت که طراحی به گونه‌ی باشد تا از برآمدگی غلاف‌ها، خمیدگی ورق‌های انتهایی و حتی جاری شدن کابل‌های پیش‌تیده جلوگیری شود.

۳. نتایج تحقیق و بحث در نتایج

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ سه نمونه از نمودارهای هیستریزس سازه با تنش تسلیم هسته‌ی مهاربند ۲۴۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. مقدار نسبت مساحت کابل به هسته (R_A) و نسبت تنش پیش‌تیدگی (R_I) به تنش جاری شدن کابل در شکل ۱۲ به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۱، در شکل ۱۳ برابر ۱ و ۰/۳، و در شکل ۱۴ برابر ۵ و ۰/۵ است. انتظار می‌رود که با افزایش نسبت مساحت کابل به هسته و افزایش پیش‌تیدگی، مساحت داخل نمودار هیستریزس کاهش یابد و در مقابل منحنی محور افقی را در اعداد پایین‌تری قطع کند که نشان‌دهنده‌ی کاهش جابه‌جایی پسماند است. نتایج مدل‌سازی‌ها که در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ به عنوان نمونه آورده شده‌اند، مؤید این ادعا است.



شکل ۹. منحنی هیستریزس مهاربند مرکزگرایی آزمایش شده. [۱۰]

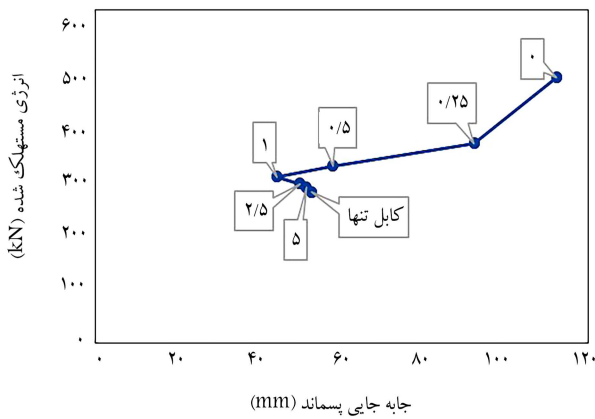


شکل ۱۰. مقایسه‌ی نمودار آزمایشگاهی [۱۰] و عددی نیرو - جابه‌جایی مهاربند مرکزگرایی.

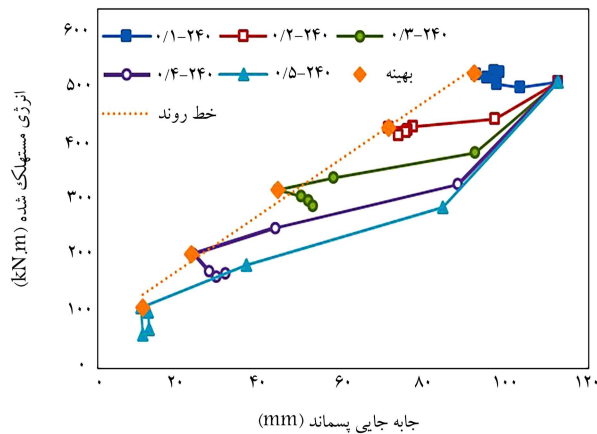
مطابق این الگو بارگذاری شده است. بارگذاری به صورت جابه‌جایی محور بوده و هر جابه‌جایی به صورت سه چرخه‌ی رفت و برگشتی انجام شده است. مقدار هر جابه‌جایی از حاصل ضرب مقادیر الگوی بارگذاری در شکل ۸ در طول مهاربند به دست می‌آید.

شکل ۹ منحنی هیستریزس مهاربند مورد آزمایش را نشان می‌دهد. مطابق این شکل پس از جابه‌جایی‌های ۱/۱۰۰ طول (۳۲ میلی‌متر)، کابل‌های فولادی گسیخته می‌شود و خاصیت مرکزگرایی از بین می‌رود. از طرفی در جابه‌جایی ۱/۱۵۰ طول (۲۱ میلی‌متر)، کابل فولادی گسیخته نمی‌شود، اما به حد جاری شدن می‌رسد و این امر باعث کاهش نیروی پیش‌تیدگی و در نتیجه کاهش خاصیت مرکزگرایی می‌شود. بنابراین جابه‌جایی ۱/۱۵۰ معیار مهاربند برای ایجاد رفتار مرکزگرایی مناسب است. چون جابه‌جایی ۱/۱۵۰ مهاربند علاوه بر جذب انرژی بالا جابه‌جایی پسماند بسیار کمی داشته است.

شکل ۱۰ منحنی نیرو - جابه‌جایی کل مهاربند را برای مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری نشان می‌دهد. نتایج نشانگر تطابق مناسب مدل آزمایشگاهی و عددی به خصوص در کشش است. هنگامی که مهاربند فشرده می‌شود اصطکاک بین هسته و غلاف‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری فشاری نسبت به ظرفیت باربری کششی می‌شود و از طرفی این اصطکاک باعث جذب انرژی بالاتر می‌شود و مساحت محصور داخل نمودار را افزایش می‌دهد که در مدل‌سازی عددی در جهت اطمینان از این استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک بین دو عضو در هنگام فشار



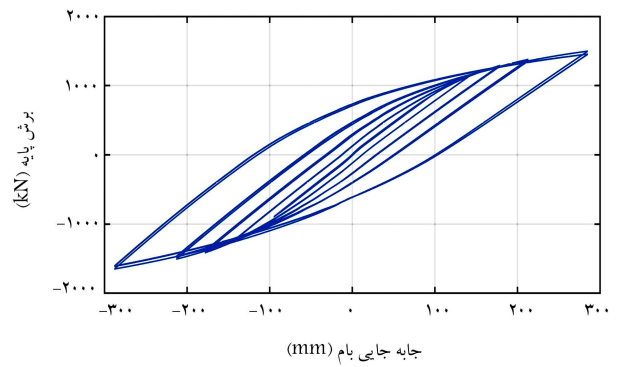
شکل ۱۵. نمودار جذب انرژی - جابه‌جایی پسماند برای تنش تسلیم 240° مگاپاسکال، نسبت پیش‌تنیدگی $0/3$ و نسبت مساحت‌های مختلف.



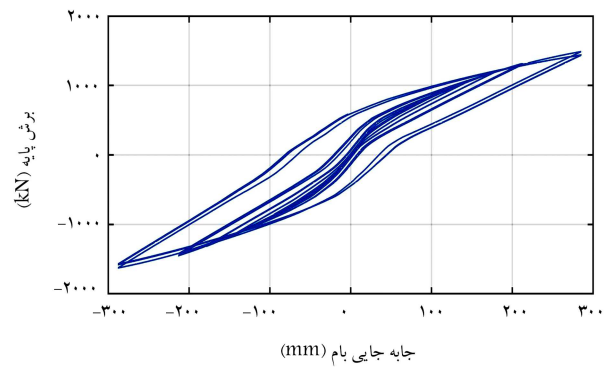
شکل ۱۶. نمودار جذب انرژی - جابه‌جایی پسماند برای تنش تسلیم 240° مگاپاسکال، نسبت پیش‌تنیدگی‌های مختلف و نسبت مساحت‌های مختلف.

خواهد داشت تا جایی که بعد از نسبت مساحت ۱ جابه‌جایی پسماند نه تنها کاهش نمی‌یابد، بلکه افزایش نسبت مساحت باعث افزایش جابه‌جایی پسماند می‌شود. علت این پدیده را می‌توان در افزایش نیروی پیش‌تنیدگی به علت افزایش مساحت کابل‌ها جستجو کرد. با افزایش نسبت مساحت کابل به هسته، مساحت کابل‌ها و در نتیجه مقدار نیروی پیش‌تنیدگی افزایش می‌یابد و همین نیروی پیش‌تنیدگی زیاد می‌تواند به خودی خود منجر به ایجاد تغییر شکل‌های پسماند در سازه شود. پس نسبت مساحت ۱ در این نسبت پیش‌تنیدگی حالت بهینه خواهد بود؛ زیرا با افزایش نسبت مساحت به جابه‌جایی پسماند افزوده می‌شود و با کاهش آن از مقدار ۱، جذب انرژی درازای جاری شدن هسته اتفاق می‌افتد و از حالت بهینه فاصله می‌گیرد.

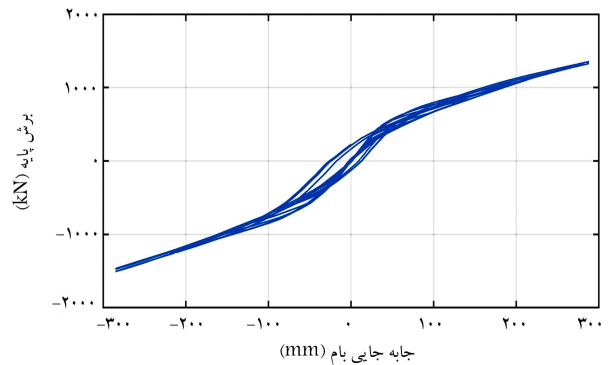
در شکل ۱۶ نمودار جذب انرژی - جابه‌جایی پسماند برای تنش تسلیم 240° مگاپاسکال، نسبت پیش‌تنیدگی‌های مختلف و نسبت مساحت‌های مختلف رسم شده است. نسبت مساحت‌های کابل به هسته مانند شکل ۱۵ به ترتیب از کمترین مقدار در انتهای راست نمودار تا بیشترین مقدار در انتهای دیگر به ترتیب قرار گرفته‌اند. مقادیر بهینه بر روی شکل مشخص شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش مقدار پیش‌تنیدگی خاصیت مرکزگرایی افزایش می‌یابد و تأثیر تغییرات نسبت مساحت بر روی نمودار بیشتر می‌شود، یعنی دامنه‌ی تغییرات نمودار در نسبت پیش‌تنیدگی‌های بالاتر، بیشتر است. حال، برای تعیین حالت بهینه بین تمام نسبت‌های پیش‌تنیدگی، از میان حالات بهینه‌ی نسبت مساحت‌ها یک خط برازش داده شد و نقطه‌ی که بیشترین



شکل ۱۲. منحنی هیستریزس سازه با مهاربند با نسبت مساحت $0/25$ و نسبت پیش‌تنیدگی $0/1$.



شکل ۱۳. منحنی هیستریزس سازه با مهاربند با نسبت مساحت ۱ و نسبت پیش‌تنیدگی $0/3$.



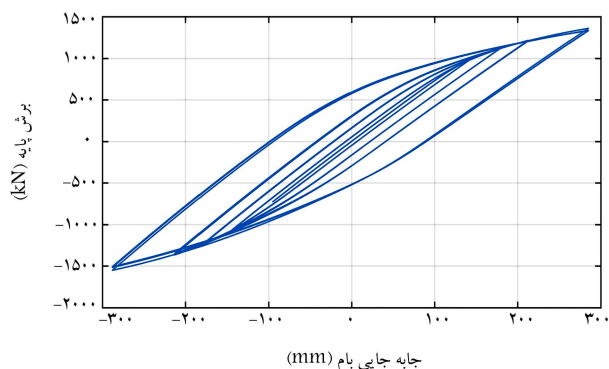
شکل ۱۴. منحنی هیستریزس سازه با مهاربند با نسبت مساحت ۵ و نسبت پیش‌تنیدگی $0/5$.

۱.۳. تعیین پارامترهای طرح بهینه

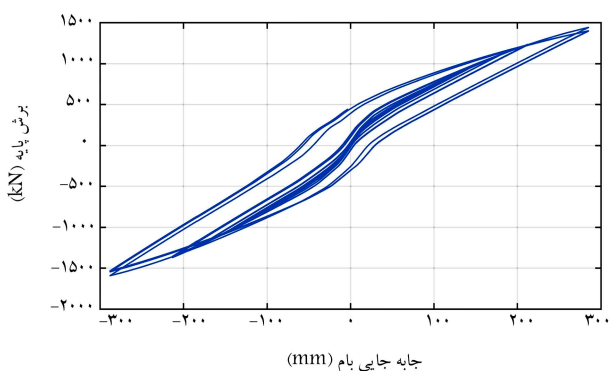
پس از مدل‌سازی و استخراج نتایج نمودار جذب انرژی - جابه‌جایی پسماند برای تمام نسبت مساحت‌ها (R_A)، تمام نسبت‌های پیش‌تنیدگی (R_I) و دو نسبت تنش تسلیم هسته رسم شد. در شکل ۱۵ یکی از این نمودارها برای نسبت پیش‌تنیدگی $0/3$ و تنش جاری شدن 240° مشاهده می‌شود. باید دقت شود که نسبت مساحت (R_A) بی‌نهایت به معنای استفاده از کابل تنها بدون هسته‌ی کمانش‌تاب است. مطابق شکل ۱۵ نسبت مساحت صفر (که نشان‌دهنده‌ی مهاربند کمانش‌تاب بدون کابل است) بیشترین جذب انرژی و البته بالاترین مقدار جابه‌جایی پسماند را دارد؛ هر چه از نسبت مساحت کاسته می‌شود سازه جابه‌جایی پسماند و جذب انرژی کمتری

به مهاربند با تنش تسلیم 360° نسبت پیش‌تندگی $0/3$ و نسبت مساحت ۱ است. حال، خصوصیات سازه در حالتی که با مهاربند کمان‌شتاب مرکزگرای بهینه شده طراحی شده باشد و حالتی که طراحی با مهاربند کمانش‌تاب باشد، مقایسه خواهد شد. باید توجه داشت که ظرفیت نیرویی طراحی مهاربند مرکزگرا و مهاربند کمانش‌تاب در هر دو سازه یکسان فرض شده است. در جدول ۳ مهاربند کمانش‌تاب مرکزگرا در حالت بهینه با مهاربند کمانش‌تاب مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در حالت بهینه مهاربند توانسته 60 درصد از جابه‌جایی پسماند سازه بکاهد، درحالی‌که جذب انرژی فقط 37 درصد کاهش داشته است.

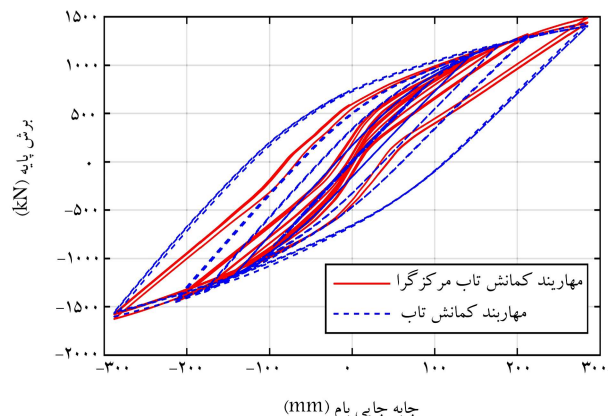
در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب نمودار برش پایه - جابه‌جایی مهاربند کمانش‌تاب



شکل ۱۸. نمودار برش پایه - جابه‌جایی سازه با مهاربند کمان‌شتاب.



شکل ۱۹. نمودار برش پایه - جابه‌جایی سازه با مهاربند کمان‌شتاب مرکزگرا.

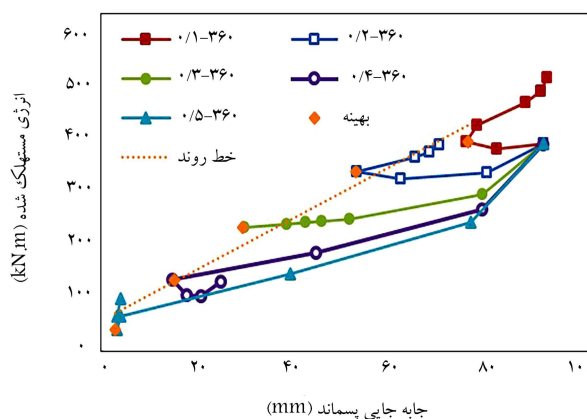


شکل ۲۰. مقایسه‌ی نمودار برش پایه - جابه‌جایی سازه با مهاربند کمان‌شتاب مرکزگرا و سازه با مهاربند کمان‌شتاب.

فاصله را از این خط دارد، به عنوان نقطه‌ی بهینه انتخاب شد. این نقطه برای تنش تسلیم 240° مگاپاسکال، نسبت پیش‌تندگی $0/3$ و نسبت مساحت ۱ را به دست می‌دهد. به طریق مشابه برای تنش تسلیم 360° مگاپاسکال، حالت بهینه‌ی انتخاب شد که نشان‌دهنده‌ی نسبت پیش‌تندگی $0/3$ و نسبت مساحت ۱ است (شکل ۱۷). در جدول ۲ مقدار جذب انرژی و جابه‌جایی پسماند دو حالت بهینه یکی با تنش تسلیم 240° و دیگری با تنش تسلیم 360° مگاپاسکال نشان داده شده است.

۲.۳. مقایسه‌ی مهاربندهای BRB و SC-BRB در سیستم‌های دوگانه

با توجه به نتایج تشریح شده در بخش ۳-۱ مشخص شد که بهترین عملکرد مربوط



شکل ۱۷. نمودار جذب انرژی - جابه‌جایی پسماند برای تنش تسلیم 360° مگاپاسکال، نسبت پیش‌تندگی‌های مختلف و نسبت مساحت‌های مختلف.

جدول ۲. جذب انرژی و جابه‌جایی پسماند برای تنش تسلیم 240° و 360° مگاپاسکال در حالت بهینه.

	مدل ۱۶	مدل ۴۷
تنش تسلیم هسته (مگاپاسکال)	240°	360°
نسبت پیش‌تندگی	$0/3$	$0/3$
نسبت مساحت کابل به هسته	۱	۱
جابه‌جایی پسماند (میلی‌متر)	۴۴	۲۹
جذب انرژی (کیلو نیوتن بر متر)	۳۲۴	۲۳۸

جدول ۳. درصد کاهش جذب انرژی و جابه‌جایی پسماند مهاربند در حالت بهینه نسبت به مهاربند کمانش‌تاب.

	مدل ۱	مدل ۱۶
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	240°	240°
نسبت پیش‌تندگی	-	$0/3$
نسبت مساحت کابل به هسته	۰	۱
جابه‌جایی پسماند (میلی‌متر)	۱۱۲	۴۴
جذب انرژی (کیلو نیوتن بر متر)	۵۱۹	۳۲۴
درصد کاهش جابه‌جایی پسماند	-	$60/7$
درصد کاهش جذب انرژی	-	$37/6$

جانبی دوگانه‌ی خمشی همراه مهاربند مزبور، ساخته شد. با استفاده از نرم‌افزار OpenSEES همه‌ی مدل‌ها تحت بارگذاری چرخ‌های قرار گرفتند و مقدار جذب انرژی و جابه‌جایی پسماند آنها محاسبه شد. حالت بهینه‌ی مهاربند در سازه‌ی ۹ طبقه‌ی مورد بررسی در این مقاله (حالتی که در عین داشتن بیشترین جذب انرژی، کمترین جابه‌جایی پسماند را داشته باشد) تعیین شد. در ادامه مقایسه‌ی بین حالت بهینه‌ی مهاربند مرکزگرا با کابل پیش‌تنیده و مهاربند کمانش‌تاب معمولی در سازه‌ی معرفی شده انجام شد. خلاصه‌ی نتایج حاصل از این مطالعه، به طور مشخص برای سازه‌ی ۹ طبقه‌ی معرفی شده در این مقاله، در ادامه ارائه شده است:

- ۱- مهاربند با تنش تسلیم هسته ۳۶۰ مگاپاسکال، نسبت نیروی پیش‌تیدگی به نیروی تسلیم کابل ۰/۳ و نسبت مساحت کابل به هسته ۱ به عنوان طرح بهینه شناسایی شد.
- ۲- با افزایش نسبت مساحت کابل به هسته از مقدار ۰ تا ۱، از جابه‌جایی پسماند سازه کم می‌شود. با عبور از نسبت ۱، به دلیل افزایش بیش از حد نیروی پیش‌تیدگی کابل، مقدار جابه‌جایی سازه افزایش می‌یابد که مطلوب طراحی نیست.
- ۳- در تمام نسبت‌های پیش‌تیدگی (به غیر از پیش‌تیدگی ۰/۵) نسبت مساحت ۱ مقدار بهینه خواهد بود.
- ۴- با افزایش نسبت پیش‌تیدگی، تأثیرپذیری عملکرد مهاربند از نسبت مساحت بیشتر می‌شود.
- ۵- مهاربند مرکزگرای بهینه می‌تواند ۶۰ درصد از جابه‌جایی پسماند سازه‌ی ۹ طبقه‌ی معرفی شده بکاهد در حالی که جذب انرژی آن تنها ۳۷ درصد افت می‌کند.

و مهاربند کمانش‌تاب مرکزگرا آورده شده و در شکل ۲۰ هر دو نمودار بر روی یک دستگاه مختصات قرار گرفته‌اند تا بتوان آنها را مقایسه کرد. مشاهده می‌شود که مهاربند مرکزگرا به خوبی توانسته است جابه‌جایی پسماند مهاربند کمانش‌تاب را کاهش دهد؛ ضمن آن‌که جذب انرژی مناسبی دارد. هر دو پارامتر جابه‌جایی پسماند و جذب انرژی سازه می‌توانند با توجه به اهداف طراحی اهمیت متفاوتی داشته باشند. برای کاهش هزینه‌های اولیه‌ی ساخت نیاز است که جذب انرژی در سیستم اتفاق بیفتد (نباید انتظار داشت تمام اعضا کشسانی شوند و بعد از زلزله نیز کشسانی عمل کنند). در صورتی که ملاحظات اقتصادی بعد از زلزله مطرح باشد و بهره‌برداری سریع و نیز استفاده‌ی مجدد از ساختمان مدنظر باشد، باید انتظار داشت که جابه‌جایی پسماند کمی در سازه اتفاق بیفتد. هر چند که شاید بتوان این جابه‌جایی پسماند را به صفر رساند ولی می‌توان یک مقدار کمینه‌ی قابل قبولی نسبت به سایر طرح‌ها معرفی کرد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی یک نوع مهاربند کمانش‌تاب مرکزگرا با کابل پیش‌تنیده پرداخته شد. برای بررسی رفتار این نوع مهاربند در سازه‌ها از نظر میزان جذب انرژی و میزان کاهش جابه‌جایی پسماند سازه، ابتدا پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد مهاربند انتخاب شدند. این پارامترها شامل مقدار تنش تسلیم هسته مهاربند، نسبت نیروی پیش‌تیدگی کابل به نیروی تسلیم کابل و نسبت مساحت کابل به هسته بود. برای تنش تسلیم هسته دو مقدار ۲۴۰ و ۳۶۰ مگاپاسکال، برای نسبت پیش‌تیدگی ۵ مقدار ۰/۱ تا ۰/۵ و برای نسبت مساحت ۷ مقدار ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و بی‌نهایت در نظر گرفته شد. جمعاً تعداد ۶۲ مدل سازه‌ی ۹ طبقه با سیستم باربر

پانویس‌ها

منابع (References)

1. self-centering systems
 2. self-centering buckling-restrained brace
 3. restoring mechanism
 4. flag shaped
 5. pre-tensioned mechanism
 6. gap opening
 7. restoring force
 8. shape memory alloy
 9. basalt fiber-reinforced polymer
 10. tendon
 11. strand
 12. limiting plates
 13. buckling restrained brace
 14. restricting plates
 15. end plate
 16. cross plate
 17. limit plates
 18. anchor
 19. cover plate
 20. leaning column
1. Uang, C.-M. and Nakashima, M. "Steel buckling-restrained braced frames," *Earthq. Eng. From Eng. Seismol. to Performance-based Eng*, **2002**, pp. 1-37 (2004).
 2. Clark, P. W., Aiken, I.D., Kasai, K. and et al. "Large-scale testing of steel unbonded braces for energy dissipation," *In Advanced Technology in Structural Engineering*, pp. 1-5 (2000).
 3. Chancellor, N., Eatherton, M. Roke, D. and et al. "Self-centering seismic lateral force resisting systems: High performance structures for the city of tomorrow," *Buildings*, **4**(3), pp. 520-548 (2014).
 4. Zhu, S. and Zhang, Y. "Seismic analysis of concentrically braced frame systems with self-centering friction damping braces," *J. Struct. Eng.*, **134**(1), pp. 121-131, Jan (2008).
 5. Miller, D. J., Fahnestock, L.A. and Eatherton, M.R. "Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-

- restrained brace," *Eng. Struct.*, **40**, pp. 288-298, Jul (2012).
6. Zhou, Z., Xie, Q., Lei, X.C. and et al. "Experimental investigation of the hysteretic performance of dual-tube self-centering buckling-restrained braces with composite tendons," *J. Compos. Constr.*, **19**(6), pp. 04015011, Dec (2015).
 7. Li, R., Shu, G., Liu, Z. and et al. "Research and development of an innovative self-centering energy dissipation brace," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **27**(15), pp. 1-16 (2018).
 8. Shi, F., Ozbulut, O.E. and Zhou, Y. "Influence of shape memory alloy brace design parameters on seismic performance of self-centering steel frame buildings," *Struct. Control Heal. Monit.*, **27** (1), pp. 1-18 (2020).
 9. Kari, A., Ghassemieh, M. and Badarloo, B. "Development and design of a new self-centering energy-dissipative brace for steel structures," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **30**(6), pp. 924-938, Apr (2019).
 10. Wang, H., Nie, X. and Pan, P. "Development of a self-centering buckling restrained brace using cross-anchored pre-stressed steel strands," *J. Constr. Steel Res.*, **138**, pp. 621-632, Nov (2017).
 11. Dong, H., Du, X., Han, Q. and et al. "Performance of an innovative self-centering buckling restrained brace for mitigating seismic responses of bridge structures with double-column piers," *Eng. Struct.*, **148**, pp. 47-62, Oct (2017).
 12. Xu, L. H., Xie, X. S., Yao, S. Q. and et al. "Hysteretic behavior and failure mechanism of an assembled self-centering brace," *Bull. Earthq. Eng.*, **17**(6), pp. 3573-3592 (2019).
 13. Xu, L., Yao, S. and Sun, Y. "Development and validation tests of an assembly self-centering energy dissipation brace," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **116**, pp. 120-129 September 2018 (2019).
 14. Dong, H., Du, X., Han, Q. and et al. "Hysteretic performance of RC double-column bridge piers with self-centering buckling-restrained braces," *Bull. Earthq. Eng.*, **17**(6), pp. 3255-3281 (2019).
 15. Huang, H., Zhang, F., Zhang, W. and et al. "Numerical analysis of self-centering energy dissipation brace with arc steel plate for seismic resistance," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **125** April, pp. 105751 (2019).
 16. ANSI/AISC 341-10, "Seismic provisions for structural steel buildings (Including supplement No. 1)," *Am. Inst. Steel Constr.*, (2005).
 17. "Iranian National Building Code, Part 10th, Design and Construction of steel buildings", 2013/1392.
 18. "Iranian Building Codes And Standards, Iranian Code Of Practice For Seismic Resistant Design Of Buildings, Standard No.2800, 4th Edition", 2013/1392.
 19. "Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code (Part 6)," *Minim. Build. Loads*, (2013).
 20. ASCE, A. S. "Minimum design loads for buildings and other structures." *Reston, VA* (2016).