مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۷۵-۸۳

Original Article

بررسی تأثیر ابعاد و شکل صفحه‌ی اتصال سوراخ‌دار در عملکرد لرزه‌یی مهاربند هم‌گرا

عبداله چراغی (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

سید مهدی زهرائی* (استاد)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه تهران

در این نوشتار با ایجاد سوراخی در صفحه‌ی اتصال چند نمونه مهاربند قطری، سعی در تأمین شکل‌پذیری و بهبود عملکرد لرزه‌یی قاب شده و عملکرد نمونه‌ها با انجام تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS بررسی شده است. جهت جلوگیری و یا تعویق کمانش در اعضاء مهاربندها، سوراخ‌هایی روی صفحات اتصال به نحوی طراحی شده است که قبل از رسیدن مهاربند به بار بحرانی کمانشی خود، به تسلیم برسد و به جذب و استهلاک انرژی زلزله کمک کند. همچنین تأثیر شکل سوراخ‌ها و نیز آثار زلزله‌ی حوزه‌ی دور و نزدیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تحلیل، گویای منحنی‌های هیسترزیس پایدارتر و استهلاک انرژی بیشتر در نمونه‌های پیشنهادی است، به طوری که در منحنی رفتاری نمونه‌های منتخب تا تغییرمکان حدود ۲ سانتی‌متر نیز افت عملکردی مشاهده نشده است، اما مهاربند معمولی در تغییرمکان چرخه‌یی کمتر از ۱ سانتی‌متر دچار کمانش شده و افت عملکرد آن مشهود است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل تاریخچه زمانی، گویای افزایش تغییرمکان نهایی حدود ۱۳-۴۳ درصدی و کاهش برش پایه‌ی ۱۹-۳۷ درصدی طی بارگذاری لرزه‌یی است.

واژگان کلیدی: مهاربند هم‌گرا، شکل‌پذیری، صفحه‌ی اتصال سوراخ‌دار، تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.

amircheraghi62@gmail.com
mzahrai@ut.ac.ir

۱. مقدمه

مهاربندهای هم‌گرا از متداول‌ترین سیستم‌های باربر جانبی هستند و مزایای نسبی آن‌ها در مقایسه با قاب‌های خمشی از جمله سهولت اجرا و هزینه‌ی پایین‌تر، سبب توسعه‌ی به‌کارگیری آن‌ها در کشور شده است. تجارب زلزله‌های گذشته همچون بم، حاکی از نقص ذاتی رفتار این‌گونه مهاربندها در عملکرد غیرشکل‌پذیر به واسطه‌ی کمانش زودهنگام عضو فشاری به‌علاوه‌ی ضعف‌های اجرایی به واسطه‌ی عدم به‌کارگیری نیروی انسانی ماهر بوده است، که سبب بروز عملکرد نامناسب و در نتیجه بروز آسیب‌های کلی در این‌گونه سازه‌ها شده است. استعداد ذاتی جهت کمانش داخل و یا خارج از صفحه، اندرکنش میان‌قاب بنایی با مهاربند و نقایص عمده در طراحی و اجرا از عوامل تأثیرگذار در رفتار لرزه‌یی این نوع مهاربندها هستند، که باید مدنظر قرار گیرند. عدم رفتار یکنواخت تحت چرخه‌های بارگذاری کششی و فشاری و در نتیجه از بین‌رفتن قسمت عمده‌یی از ظرفیت مهاربند پس از کمانش عضو فشاری سبب انجام مطالعات گسترده‌یی بر روی روش‌های ممکن جهت تعویق کمانش و دست‌یابی به ظرفیت تسلیم مهاربندها شده است. تمرکز خسارت و آسیب در نقطه‌یی از پیش تعیین‌شده با رفتار لرزه‌یی شکل‌پذیر مانند استفاده از المان زانویی و یا تیر پیوند قائم نیز همواره مورد مطالعات گسترده‌یی قرار گرفته است. معمولاً در این موارد طراحی به گونه‌یی است که عضو فیوزشونده، قسمت قابل توجهی از انرژی ورودی به سازه را با ورود به مرحله‌ی غیرخطی و تشکیل مفاصل خمیری مستهلک و از ورود سایر اعضاء سازه به مرحله‌ی غیرخطی و همچنین کمانش اعضاء مهاربند جلوگیری کند. علاوه بر این ایده‌ی استفاده از فیوزها از جمله مواردی است که به‌طور گسترده در جهت اصلاح رفتار لرزه‌یی این‌گونه مهاربندها مورد توجه قرار گرفته است.

برخی پژوهشگران در پژوهشی در سال ۲۰۱۴،[۱] در قالب یک طرح پژوهشی با تکیه بر ایده‌ی استفاده از فیوزها، نوع جدیدی از آنها را به صورت استفاده از دو ستون صلب قوی متصل به تیرهای رابط صلب کوتاه درون سقف ارائه کرده و نتایج به‌دست‌آمده حاکی از تمرکز خرابی در تیرهای رابط و کاهش آسیب در سایر اعضاء اصلی بوده است. در پژوهش دیگری در همان سال،[۲] با مطالعه‌ی رفتار مهاربندهای هم‌گرا، کاهش در سطح مقطع عضو اصلی مهاربند با مقطع نبشی در نزدیکی اتصالات جهت بهبود رفتار لرزه‌یی مهاربندها بررسی شده و نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی قاب یک طبقه، گویای کاهش محسوس نیاز لرزه‌یی و عملکرد مناسب‌تر اتصالات بوده است، به طوری که نمودارهای هیسترزیس پایدار بدون افت مقاومت محسوس حاصل شده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۸،[۳] با

* نویسنده مسئول

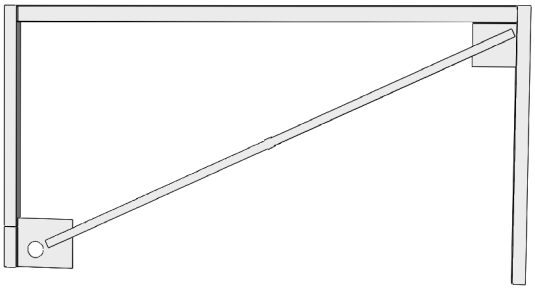
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۷/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۱۷، پذیرش ۱۳۹۴/۱/۲۲.

استفاده از ترکیب میله‌ی نازک فولادی محصورشده با الیاف پلیمری، گونه‌ی نوینی از المان‌های جاذب انرژی در قاب‌های مهاربندی ارائه و الیاف پلیمر سبب جلوگیری از کمانش میله‌ی نازک فولادی در فشار و افزایش بار بحرانی کمانش شده است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی مذکور بیانگر رفتار کششی و فشاری یکسان مهاربند در ترکیب با این سیستم و افزایش استهلاک انرژی از مزایای آن بوده است. در پژوهش دیگری نیز (۲۰۱۲)،[۴] با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس واقعی، نوعی اتصال جدید مجهز به میراگر شکاف‌دار و میراگر لاستیکی مورد ارزیابی قرارگرفته و نتایج آزمایش حاکی از آن بوده است که رفتار شکل‌پذیر اتصال، موجب تمرکز استهلاک انرژی و تغییرشکل‌های خمیری در خود و مانع از انتقال آن به تیر و ستون شده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۸،[۵] با انجام مطالعات عددی بر روی امکان استفاده از میراگر شکاف‌دار در دیوارهای برشی فولادی و ایجاد شیارهای عمودی بر روی دیوارهای برشی نصب‌شده روی مدل سازه‌ی ۳ طبقه، عملکرد لرزه‌یی مدل مذکور بررسی شده و این نتیجه به‌دست آمده است که عملکرد برشی و خمشی شیارها به‌عنوان عضو مستهلک‌کننده‌ی انرژی سبب پایداری چرخه‌های هیسترزیس، افزایش شکل‌پذیری و نیز افزایش استهلاک انرژی زلزله شده است. به طور کلی مطالعات پژوهشی گویای تأثیر زیاد شکل، ابعاد، و چیدمان سوراخ‌ها در میراگرهای شکاف‌دار بوده است، به طوری که بهینه‌یابی آن‌ها، سبب افزایش کارایی و بهبود عملکرد لرزه‌یی این‌گونه سیستم‌هاست. در سال ۲۰۱۳ نیز پژوهشگران،[۶] با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۸ نمونه صفحات فولادی شکاف‌دار، روابطی جهت چیدمان مناسب میراگرهای شکاف‌دار در تسلیم برشی یا خمشی ارائه کرده‌اند. همچنین برخی دیگر (۲۰۱۰)،[۷] با ارائه‌ی ایده‌یی نوین به مطالعه‌ی رفتار یک نوع میراگر شکاف‌دار فلزی تغییرمکانی، که از یک صفحه‌ی نازک سوراخ‌دار جوش‌شده داخل غلاف فلزی تشکیل شده است، پرداخته‌اند. سپس با بررسی چند نوع چیدمان مختلف در تعداد و محل قرارگیری سوراخ‌ها، عملکرد لرزه‌یی آنها را مورد ارزیابی قرار داده و نتایج تحلیل عددی و نیز آزمایشگاهی آن‌ها گویای تأثیر زیاد نوع چیدمان و تعداد سوراخ‌ها و نیز کاهش محسوس سختی مجموعه‌ی مهاربند، پایداری منحنی‌های هیسترزیس، و افزایش مقاومت در برابر خستگی تحت چرخه‌های با تعداد کم بارگذاری در صورت طراحی بهینه از محاسن آن بوده است. همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۸،[۸] با مطالعه‌ی رفتار میراگرهای شکاف‌دار با استفاده از ۹ نمونه‌ی مختلف، آثار پارامترهای هندسی در رفتار آنها مورد بررسی قرارگرفته است. در مطالعه‌یی در سال ۲۰۱۰،[۹] نیز با استفاده از روش‌های بهینه‌یابی، مطالعات بسیاری بر روی شکل و ابعاد بهینه‌ی میراگرهای شکاف‌دار به منظور رفتار مناسب و استهلاک انرژی بالا انجام شده است. همچنین پژوهش‌های بسیاری بر روی شکل و ابعاد میراگرهای شکاف‌دار و نیز میراگرهای هیسترزیس جهت حصول شکل هندسی مناسب با قابلیت استهلاک انرژی و افزایش شکل‌پذیری آنها انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های انجام‌شده در دانشگاه استنفورد در سال ۲۰۱۱،[۱۰] اشاره کرد. در این راستا در پژوهش دیگری در همان سال،[۱۱] مطالعاتی بر روی شکل‌های مختلف میراگرهای شکاف‌دار انجام شده و نتایج مطالعات عددی در پژوهش مذکور حاکی از منحنی‌های هیسترزیس پایدارتر در صورت استفاده از شکل‌های سهموی است. علاوه بر این مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار مهاربند فولادی در ترکیب با میراگرهای شکاف‌دار،[۱۲] حاکی از تأثیر محسوس آنها در تعویق کمانش و بهبود عملکرد لرزه‌یی مهاربندهای هم‌گرا بوده است. مطالعاتی از این قبیل جهت بهبود عملکرد لرزه‌یی و شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌گرا همواره در حال انجام بوده و در این نوشتار نیز به یکی از این موارد ابتکاری پرداخته شده است.

۲. معرفی ایده‌ی پژوهش

با بررسی انجام‌شده بر روی رفتار مهاربندهای هم‌محور ملاحظه می‌شود که شکل‌پذیری و عملکرد لرزه‌یی آنها به شدت تحت تأثیر رفتار عضو فشاری است و کاهش شدید سختی و مقاومت پس از کمانش المان فشاری، سبب افت محسوس عملکرد آن طی بارگذاری چرخه‌یی می‌شود. لذا اتخاذ راهکاری جهت جلوگیری از کمانش عضو و یا به تأخیرانداختن آن سبب بهبود شکل‌پذیری آن خواهد شد. در این پژوهش با ایجاد سوراخی در صفحه‌ی اتصال یک طرف مهاربند، به منظور ایجاد نقطه ضعفی از پیش تعیین‌شده و استفاده از ظرفیت جذب انرژی در اثر تغییرشکل آن، سعی در اصلاح رفتار مهاربندهای هم‌گرا شده است (شکل ۱). ظرفیت خمشی صفحه‌ی اتصال، که متأثر از قطر سوراخ و نیز نسبت قطر سوراخ به عرض ورق است، به گونه‌یی انتخاب شده است که کمتر از ظرفیت کمانشی عضو فشاری باشد و عملاً احتمال وقوع کمانش در عضو اصلی منتفی شود. تغییرشکل سوراخ دایره‌یی تحت بارگذاری چرخه‌یی سبب اتلاف انرژی و تمرکز خسارت در این ناحیه می‌شود و در صورت طراحی و اجرای مناسب، متضمن رفتار مناسب‌تر قاب خواهد بود. جهت انتخاب صحیح نسبت قطر سوراخ به عرض ورق، که از این پس D/B نامیده می‌شود، لازم است که در ابتدا ظرفیت کمانشی عضو مهاربند و سپس کاهش سطح مقطع لازم محاسبه شود. در این پژوهش، ۳ مدل مهاربند قطری به شرح جدول ۱ مورد آزمایش قرارگرفته است.

در کلیه‌ی نمونه‌ها، مقطع مهاربند از ترکیب ۲ پروفیل ناودانی نمره ۱۴ به‌عنوان مقطعی پرکاربرد و متداول در سازه به‌صورت قوطی‌شکل انتخاب شده است. جهت بررسی رفتار لرزه‌یی مهاربند معمولی در بارگذاری چرخه‌یی، در نمونه‌ی اول مهاربند قطری از مقطع ۲UNP۱۴ بدون هیچ‌گونه تغییر خاص، مدل‌سازی و ارزیابی شده است. در مدل‌های دوم و سوم با ایجاد سوراخ‌های دایروی با قطرهای ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر بر روی ورق اتصال کناری مهاربند، رفتار آن‌ها تحت بارگذاری چرخه‌یی ارزیابی شده است. انتظار می‌رفت ایجاد سوراخ در ورق اتصال، سبب بهبود عملکرد لرزه‌یی مهاربند شود و با تغییرشکل خود تحت بارگذاری زلزله به‌عنوان



شکل ۱. طرح پیشنهادی.

جدول ۱. نمونه‌های به‌کاررفته در تحلیل.

نمونه‌ها	طول قاب	ارتفاع قاب	مقطع مهاربند	خصوصیات نمونه	نسبت D/B
۱	۵	۳	۲UNP۱۴	معمولی	—
۲	۵	۳	۲UNP۱۴	سوراخ‌دار	۰/۴
۳	۵	۳	۲UNP۱۴	سوراخ‌دار	۰/۷۵

عضو مستهلک کننده‌ی انرژی جهت کاهش سختی، کاهش برش پایه، و در نتیجه کاهش تنش در اعضاء اصلی در رفتار لرزه‌یی قاب مؤثر واقع شود. سپس با استفاده از روش اجزاء محدود به بررسی عملکرد لرزه‌یی نمونه‌ها پرداخته شده است.

۳. خصوصیات مصالح

فولاد به‌کاررفته از نوع ST۳۷ بوده و منحنی تنش ـ کرنش آن به‌صورت دو خطی و مطابق شکل ۲ در نظرگرفته شده است. مصالح مورد استفاده به‌صورت غیرخطی مدل‌سازی و گزینه‌ی سخت‌شوندگی ترکیبی فعال شده است. این نوع سخت‌شوندگی در واقع ترکیبی از گزینه‌های ایزوتروپیک و سینماتیک بوده و با استفاده از داده‌هایی از نیمه‌ی اول چرخه‌ی نمودار تنش ـ کرنش در آزمایش کشش به‌دست آمده است. در این نوع سخت‌شوندگی می‌توان بازه‌هایی برای تعریف مشخصات مصالح در نظر گرفت، که هر بازه، محدوده‌ی متفاوتی از کرنش‌ها را پوشش می‌دهد.

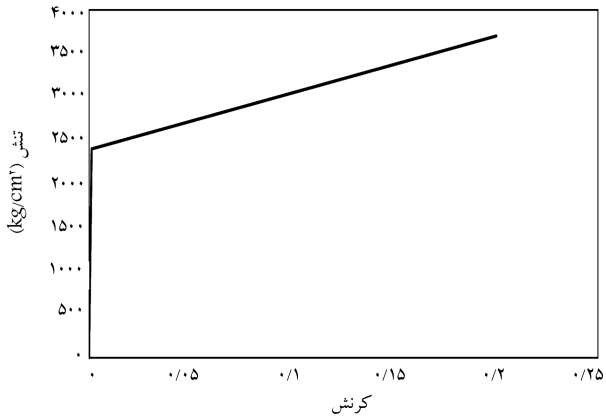
۴. شرح روش اجزاء محدود

۱.۴. تحلیل استاتیکی غیرخطی

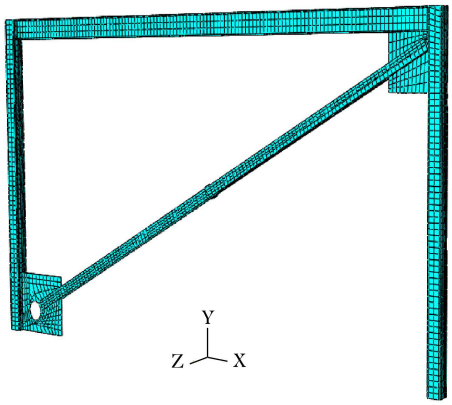
در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS،[۱۳] و انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر روی مدل سه بُعدی به بررسی رفتار مهاربند اصلاح‌شده پرداخته شده است (شکل ۳). المان مورد استفاده از نوع SOLID بوده و تحلیل با لحاظ اثر تغییرشکل‌های بزرگ انجام شده است. به دلیل اینکه در بیشتر استانداردهای معتبر دنیا از الگوی بارگذاری به شیوه‌ی افزایش تغییرمکان جهت ارزیابی رفتار سازه‌ها استفاده می‌شود، در این پژوهش نیز جهت انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی از الگوی تغییرمکان افزاینده در جهت محور x و در گام‌های زمانی ۰/۱ ثانیه با لحاظ اثر تغییرشکل‌های بزرگ جهت کمانش اعضا استفاده شده است. همچنین سعی شده است الگوی بارگذاری تقریباً مطابق با بارگذاری عملی به روش کنترل تغییرمکان بر طبق پیشنهاد ATC-۲۴ مطابق شکل ۴ انجام شود، که براساس آن چرخه‌های بارگذاری روی نمونه‌های آزمایشگاهی بر مبنای ۰/۱۲۵-۰/۵-۱-۲-۳ برابر تغییرمکان تسلیم در ۳ چرخه و بیشتر از آن تا تغییرمکان بیشینه در ۲ چرخه انجام شده است.[۱۴]

۲.۴. تحلیل تاریخچه‌ی زمانی

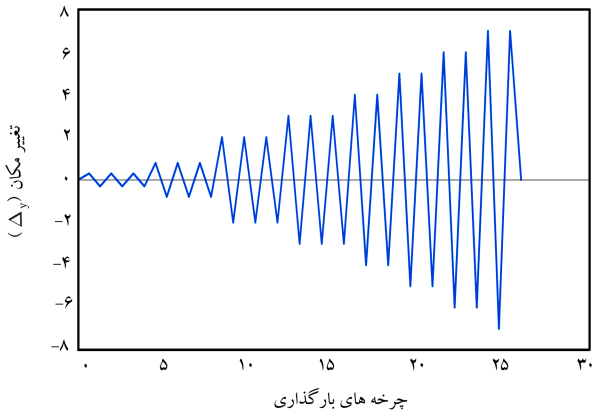
در این بخش جهت بررسی رفتار سیستم تحت بارگذاری لرزه‌یی، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از مؤلفه‌ی افقی شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ی نورثریج (۱۹۹۴)، لوماپریتا در ایالات متحده (۱۹۸۹) و نیز شتاب‌نگاشت چی‌چی تایوان (۱۹۹۹) انجام شده است. جهت انجام تحلیل، درجه آزادی انتقالی در جهت x آزاد و سپس شتاب‌نگاشت‌های مذکور در بازه‌های زمانی ۰/۰۱ ثانیه به تکیه‌گاه‌ها اعمال و منحنی تغییرات برش پایه‌ی قاب ترسیم شده است. همچنین به منظور امکان مقایسه‌ی بهتر نتایج و تخمین میزان تأثیر نمونه‌ی پیشنهادی، ابتدا کلیه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها به PGA مقیاس و سپس مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲. منحنی تنش ـ کرنش فولاد.



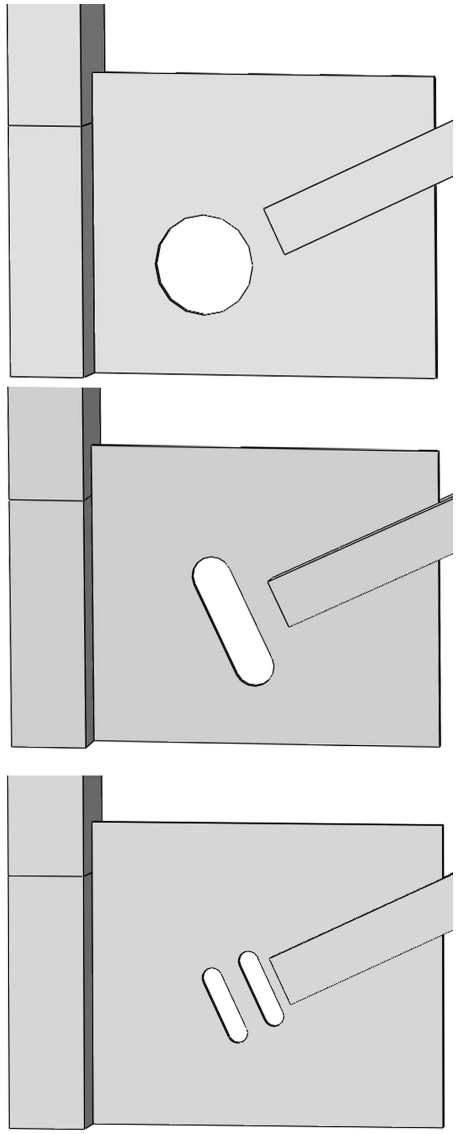
شکل ۳. نمونه‌ی اجزاء محدود مهاربند قطری پیشنهادی.



شکل ۴. بارگذاری پیشنهادی ATC-۲۴.[۱۴]

۵. بررسی تأثیر شکل سوراخ در عملکرد نمونه‌های پیشنهادی

شکل مقطع کاهش‌یافته از جمله عوامل مؤثر در عملکرد لرزه‌یی نمونه‌ی پیشنهادی بوده است و باید در طراحی مدنظر قرار گیرد. امروزه با توسعه‌ی دستگاه‌های برش اتوماتیک از لحاظ اجرایی مشکلی جهت استفاده از انواع مقاطع کاهش‌یافته وجود ندارد؛ لذا، در این قسمت بررسی تأثیر شکل سوراخ در عملکرد نمونه‌های پیشنهادی

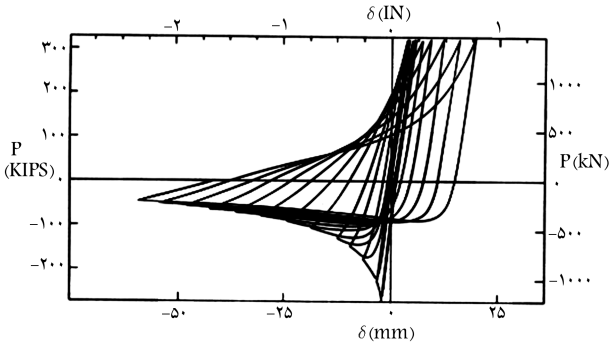


شکل ۵. شکل‌های مورد استفاده در تحلیل.

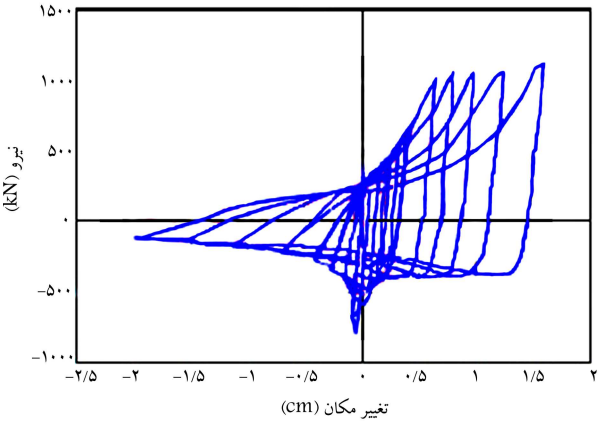
مورد ارزیابی واقع شده است. اصولاً در این‌گونه موارد، شکل‌هایی مانند مربع یا مستطیل به دلیل وجود گوشه‌های تیز مستعد تمرکز تنش و نیز وجود جریان‌های گردابی تنش مناسب به نظر نمی‌رسند؛ در نتیجه، شکل‌های بدون گوشه‌های باریک نظیر بیضی و دایره از مناسب‌ترین انواع مقاطع کاهش‌یافته به شمار می‌آیند. بدین منظور از ۳ شکل سوراخ دایره‌یی و لوبیایی مطابق شکل ۵ جهت یافتن شکل مناسب و بهینه‌ی مقطع کاهش‌یافته استفاده و میزان شکل‌پذیری و استهلاک انرژی آنها بررسی شده است.

۶. سنجش صحت مدل عددی

جهت بررسی صحت نتایج و اطمینان از تطبیق مشخصات و پارامترهای به‌کاررفته در مدل عددی با شرایط واقعی، در ابتدا یک مدل واقعی ساخته‌شده در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌یی،[۱۴] با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.



شکل ۶. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی آزمایشگاهی.[۱۵]



شکل ۷. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی عددی.

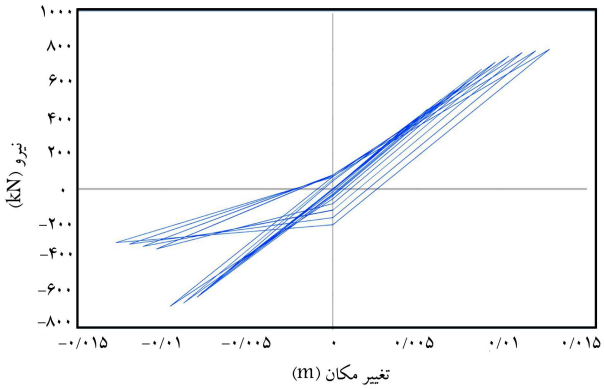
ارزیابی منحنی‌های هیسترزیس به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی گویای تطبیق مناسب نتایج بوده است. همچنین مختصر تفاوت موجود، حاصل از شرایط بارگذاری و نیز جزئیات مدل‌سازی از جمله عدم مدل‌سازی جوش اتصال و نظایر آن بوده است (شکل‌های ۶ و ۷).

۷. بررسی نتایج تحلیل

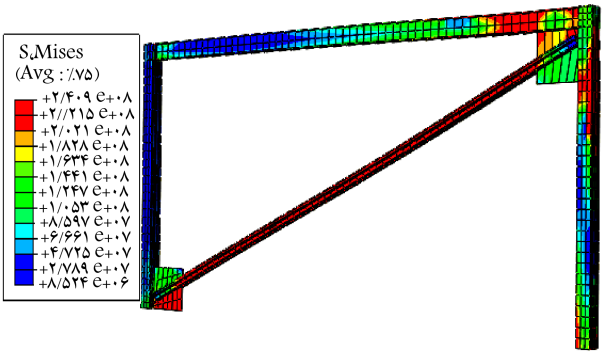
۱.۷. نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی

همان‌طور که از ابتدا نیز قابل تصور بوده است، بررسی نمودار هیسترزیس نمونه‌ی اول حاکی از رفتار نامطلوب و غیرشکل‌پذیر مهاربند هم‌محور بوده و افت مقاومت و کاهش محسوس سختی قاب پس از کمانش عضو فشاری قابل مشاهده است (شکل ۸). کمانش مهاربند در برش پایه حدود ۶۵ تن سبب ناپایداری منحنی هیسترزیس و افت شدید عملکرد سازه شده است، که تطابق خوبی با بارکمانشی محاسباتی مقطع داشته و مؤید صحت نتایج تحلیل بوده و همان‌طورکه اشاره شده است، اندک تفاوت موجود نیز ناشی از عواملی نظیر جزئیات مدل‌سازی و شرایط بارگذاری بوده است. عدم تقارن در رفتارکششی و فشاری مهاربند سبب بروزکمانش زودهنگام شده و عملاً بخش عمده‌یی از ظرفیت مقطع بدون استفاده مانده است.

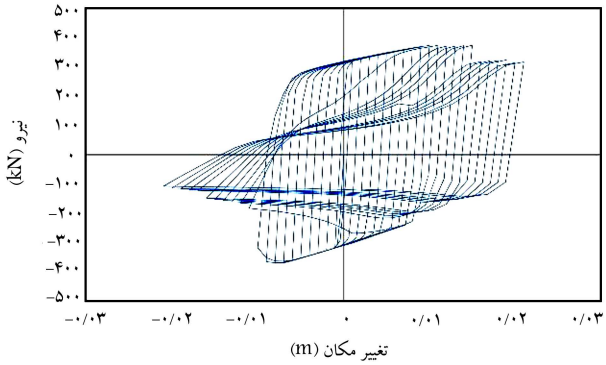
همان‌طورکه در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نحوه‌ی توزیع تنش‌های فون‌میسز در نمونه‌ی اول حاکی از تمرکز تنش‌های مذکور در طول مهاربند و نیز محل اتصال به ستون است و احتمال وقوع خرابی و خسارت در این نقاط را افزایش می‌دهد. تمرکز شدید تنش درگوشه‌های قاب امکان کمانش صفحه‌ی اتصال کناری و نیز وقوع



شکل ۸. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی ۱ (معمولی).



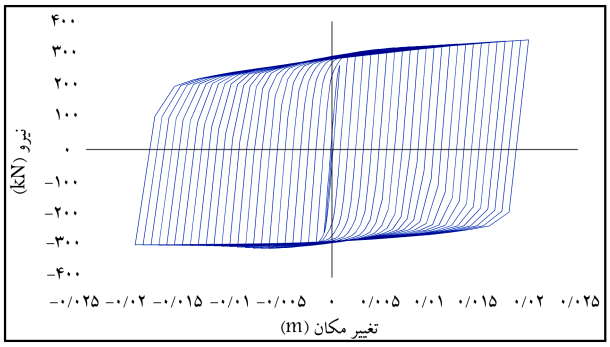
شکل ۹. توزیع تنش فون‌میسز در نمونه‌ی اول (معمولی).



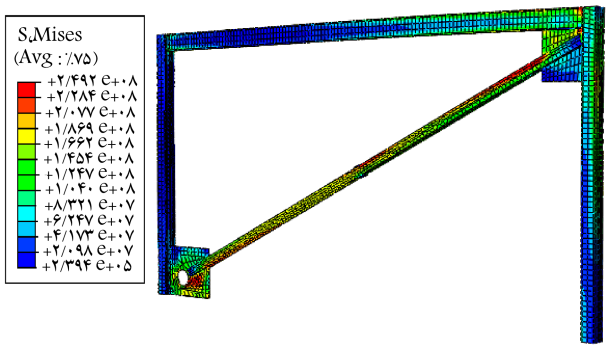
شکل ۱۰. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی دوم $D/B = ۰/۴$.

آسیب در اتصالات را بسیار محتمل می‌کند و باید در طراحی این اعضا مدنظر قرار گیرد.

یکی از عوامل تأثیرگذار در طراحی قسمت کاهش‌یافته، محاسبه‌ی سطح مقطع مناسب جهت کاهش ظرفیت باربری محوری و در نتیجه تعویق کمانش عضو اصلی مهاربند است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، بررسی منحنی‌های هیسترزیس نمونه‌های دوم و سوم حاکی از رفتار مناسب‌تر نسبت به نمونه‌ی معمولی است، لیکن عدم کاهش کافی در ممان اینرسی قسمت کاهش‌یافته در نمونه‌ی دوم موجب کمانش عضو اصلی مهاربند و عدم دست‌یابی به عملکرد مورد انتظار شده است. لیکن نمونه‌ی سوم، یعنی نمونه با نسبت D/B بزرگ‌تر، به دلیل نرمی بیشتر و امکان اعوجاج در سوراخ دایروی تحت نیروهای کمتر، تغییرمکان‌های بیشتری را تحمل کرده و افت عملکردی در آن مشاهده نشده است. چرخه‌های پایدار بدون افت مقاومت، گویای رفتار لرزه‌یی مناسب و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ی مذکور است.



شکل ۱۱. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی سوم $D/B = ۰/۷۵$.

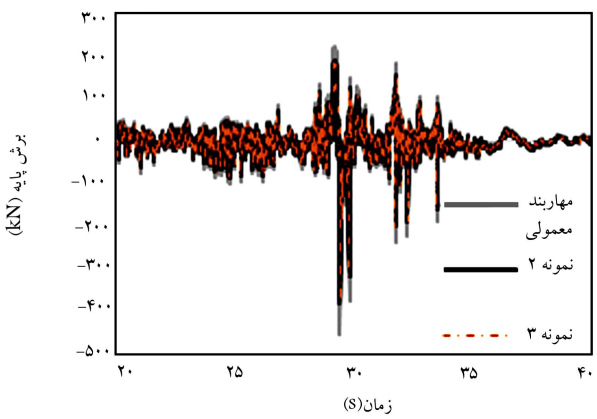


شکل ۱۲. توزیع تنش فون‌میسز در نمونه‌ی دوم.

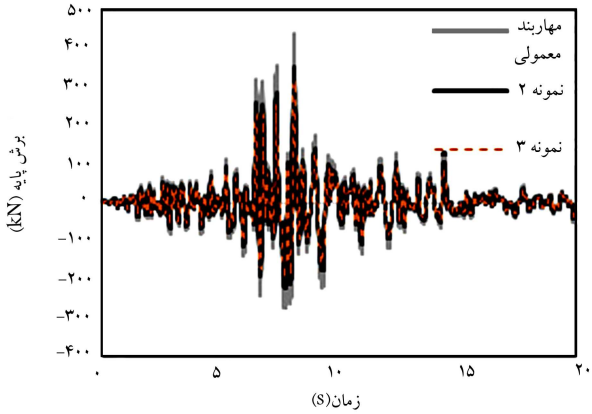
نحوه‌ی توزیع تنش‌های فون‌میسز گویای تمرکز تنش‌های مذکور در قسمت کاهش‌یافته و کاهش محسوس آن در سایر قسمت‌هاست. تمرکز شدید تنش‌ها و نیز وقوع کرنش‌های خمیری بالا در قسمت فوقانی و تحتانی ناحیه‌ی کاهش‌یافته تحت بارگذاری چرخه‌یی سبب جذب انرژی و کاهش تنش در سایر قسمت‌ها شده است (شکل ۱۲).

حفره‌ی ایجادشده در صفحه‌ی اتصال، نقش عضو مستهلک‌کننده‌ی انرژی را به خوبی ایفا کرده و تغییرشکل مداوم قسمت کاهش‌یافته و خمیری‌شدن مقطع در این قسمت موجب بهبود محسوس عملکرد مهاربند شده است. به نظر می‌رسد رفتار متقارن این نمونه ناشی از سختی داخل صفحه‌ی کمتر و در نتیجه امکان تغییرشکل و اعوجاج ورق میانی تحت نیروهای پایین‌تر بوده است. در نهایت، تعویق کمانش مهاربند سبب بروز رفتار شکل‌پذیر و منحنی هیسترزیس پایدار شده است. این تذکر لازم است که در صورت استفاده از نمونه‌ی مذکور، افزایش ابعاد ورق اتصال کناری جهت تأمین طول جوش موردنیاز عضو اصلی مهاربند و نیز امکان تعبیه‌ی سوراخ دایروی در آن باید در طراحی صفحه‌ی اتصال مدنظر باشد. همچنین کنترل احتمال وقوع کمانش خارج از صفحه‌ی ورق اتصال به دلیل کاهش ممان اینرسی ناشی از افزایش ابعاد و ایجاد سوراخ از عوامل تعیین‌کننده در عملکرد اتصال پیشنهادی است و استفاده از ورق سخت کننده به‌صورت تک یا دوبل در صورت نیاز به‌عنوان یک راهکار مؤثر باید در دستورکار قرار گیرد.

به‌طورکلی و با توجه به نتایج پژوهش می‌توان گفت کاربرد عضو پیشنهادی در کنترل ارتعاشات لرزه‌یی سازه‌ها موجب می‌شود تا تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در آنها متمرکز شود و خسارات وارده به سازه‌ی اصلی به‌شدت کاهش یابد. کانتور تنش فون‌میسز نمونه‌های پیشنهادی بیان‌گر آن است که عمده‌ی تغییرشکل‌های غیرخطی در قسمت کاهش‌یافته متمرکز شده و تغییرشکل آن‌ها حاکم بر رفتار مهاربند بوده است. تغییرشکل مداوم در سوراخ دایروی و تبدیل آن به بیضی تحت تنش‌های



شکل ۱۳. تغییرات برش‌پایه‌ی نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی چی‌چی.



شکل ۱۴. تغییرات برش پایه‌ی نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی لوماپریتا.

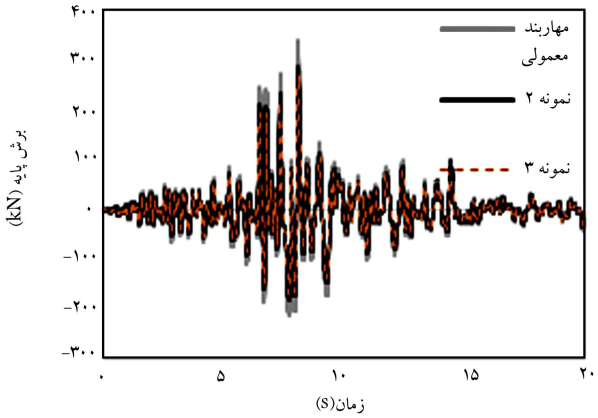
فشاری و کششی، موجب ورود این قسمت به مرحله‌ی غیرخطی و افزایش میزان استهلاک انرژی سیستم شده است.

۲.۷. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی

در این قسمت با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی نمونه‌های پیشنهادی، عملکرد لرزه‌یی آنها ارزیابی شده است. جهت بررسی تأثیر اتصال پیشنهادی در کاهش سختی سیستم و نهایتاً میزان انرژی جذب‌شده در زلزله به عنوان عاملی تأثیرگذار در رفتار کلی سازه، میزان برش پایه‌ی به‌دست‌آمده طی هر ۳ شتاب‌نگاشت در کلیه‌ی نمونه‌ها محاسبه شده است. مقایسه‌ی میزان جذب نیرو و برش پایه‌ی به‌دست‌آمده از هر ۳ شتاب‌نگاشت مطابق با شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، مؤید جذب نیروی کمتر نمونه‌ی پیشنهادی و رفتار مناسب‌تر آن است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کاهش محسوس سختی و برش پایه‌ی قاب به میزان حدود ۱۹-۳۰ درصد طی شتاب‌نگاشت‌های اعمالی است، که موجب کاهش نیروهای طراحی و در نتیجه سطح مقطع عناصر سازه‌یی می‌شود (جدول ۲).

۳.۷. بررسی میزان تأثیر زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک در عملکرد نمونه‌های پیشنهادی

به دلیل تفاوت خصوصیات زلزله هم به لحاظ دامنه و هم محتوای بسامدی برای ساختگاه‌ها در فواصل دور و نزدیک به چشمه‌ی لرزه‌زا، لزوم مطالعه و مقایسه‌ی

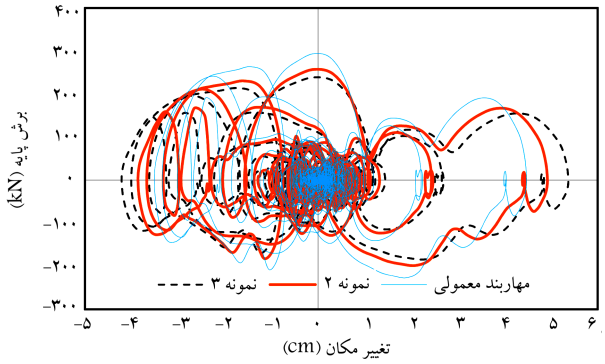


شکل ۱۵. تغییرات برش پایه‌ی نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی نورثریج.

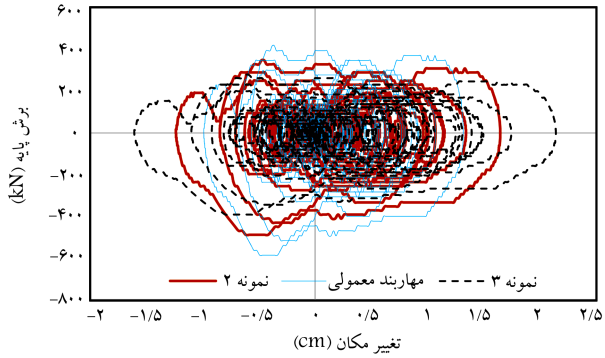
جدول ۲. نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی.

شماره‌ی نمونه	برش بیشینه (kN)		
	زلزله‌ی لوماپریتا	زلزله‌ی نورثریج	زلزله‌ی چی‌چی
معمولی ۱	۴۵۳	۳۶۱	۴۷۰
۲	۳۶۲	۲۹۵	۳۸۴
۳	۳۲۰	۲۷۰	۳۸۱

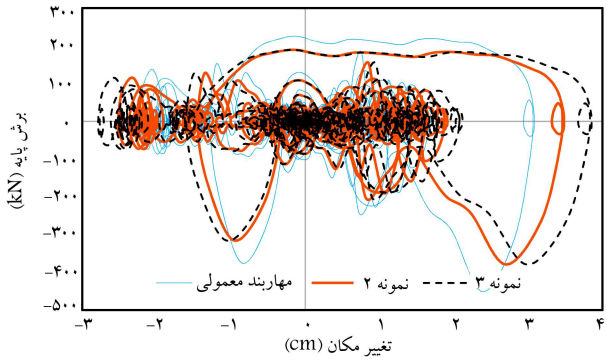
چنین آثاری روی سازه‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. وقوع زلزله‌های مخربی همچون چی‌چی و کوبه و نیز زلزله‌ی مخرب بم در کشور سبب توجه بیشتر به بحث مکانیزم عملکرد و پارامترهای لرزه‌یی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک شده است. در این مرحله، جهت بررسی رفتار نمونه‌های پیشنهادی تحت بارگذاری لرزه‌یی و میزان استهلاک انرژی سازه و نیز بررسی رفتار نمونه‌های پیشنهادی تحت زلزله‌های دور و نزدیک، شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ی بم (۲۰۰۳)، زلزله‌ی لوماپریتا در ایالات متحده (۱۹۸۹)، و نیز شتاب‌نگاشت چی‌چی تایوان (۱۹۹۹) به‌عنوان زلزله‌های شاخص ثبت‌شده‌ی نزدیک گسل و شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ی لندرز در ایالات متحده (۱۹۹۲)، زلزله‌ی کوچائلی ترکیه (۱۹۹۹)، و شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورثریج (۱۹۹۴) به‌عنوان زلزله‌های دور از گسل استفاده و منحنی‌های هیسترزیس تحت هر ۶ شتاب‌نگاشت مذکور ترسیم و ارزیابی شده است. جهت امکان مقایسه‌ی نتایج، ابتدا کلیه‌ی شتاب‌نگاشت‌های مذکور به PGA مقیاس و سپس استفاده شده است. اگرچه منحنی‌های هیسترزیس به‌دست‌آمده از بارگذاری لرزه‌یی در مقایسه با تجزیه و تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت تغییرمکان چرخه‌یی معمولاً به‌صورت کاملاً نامنظم بوده و تفسیر نتایج مشکل‌تر است، لیکن کاهش محسوس برش پایه، افزایش دوره‌ی تناوب سیستم و نیز افزایش تغییرمکان نهایی قاب در صورت استفاده از اتصال پیشنهادی مطابق شکل‌های ۱۶ الی ۲۱ کاملاً مشهود است. افزایش تغییرمکان حدود ۱۳-۴۳ درصدی و کاهش برش پایه حدود ۱۹-۳۷ درصدی، مؤید افزایش شکل‌پذیری مهاربند با استفاده از نمونه‌ی پیشنهادی است و در صورت طراحی و اجرای مناسب، سبب بهبود عملکرد لرزه‌یی سازه می‌شود. نکته‌ی مهم در تفاوت رفتار نمونه‌های پیشنهادی تحت زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک است، به طوری که میزان تفاوت در برش پایه‌ی ایجادشده در سازه تحت زلزله‌های حوزه‌ی دور در نمونه‌های پیشنهادی، کاهش محسوس‌تری نسبت به زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک دارد. به‌نظر می‌رسد کاهش سختی سازه و در نتیجه افزایش زمان تناوب سازه در نمونه‌های پیشنهادی سبب تأثیر بیشتر زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک به سبب تطابق محتوای بسامدی شده است. البته نتیجه‌ی مذکور روند ثابتی نداشته است و مثلاً طی زلزله‌ی بم مطابق با شکل ۱۷، شاهد کاهش حدود ۳۵٪



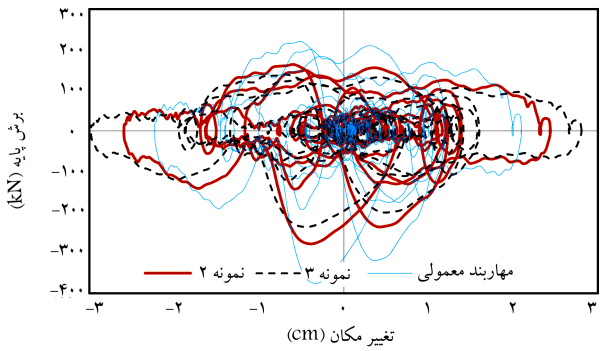
شکل ۱۶. منحنی هیسترزیس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی لوماپریتا.



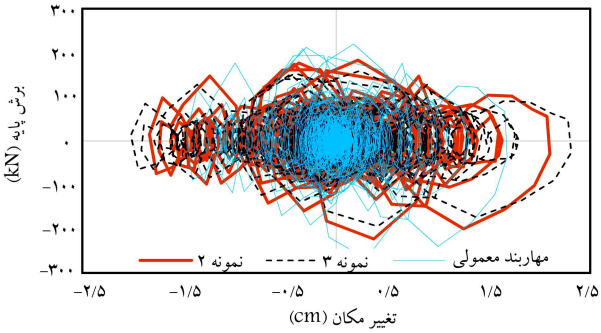
شکل ۱۷. منحنی هیسترزیس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی بم.



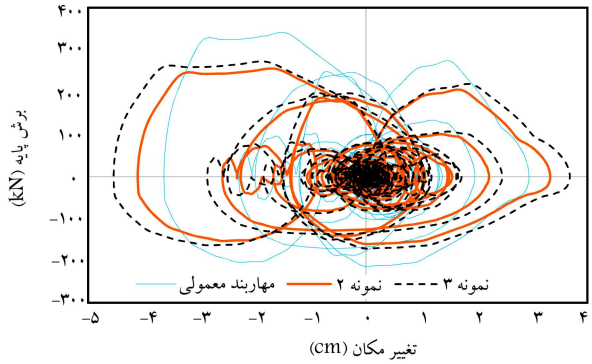
شکل ۱۸. منحنی هیسترزیس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی چی‌چی.



شکل ۱۹. منحنی هیسترزیس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی کوچائلی.



شکل ۲۰. منحنی هیسترزیس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی لندرز.



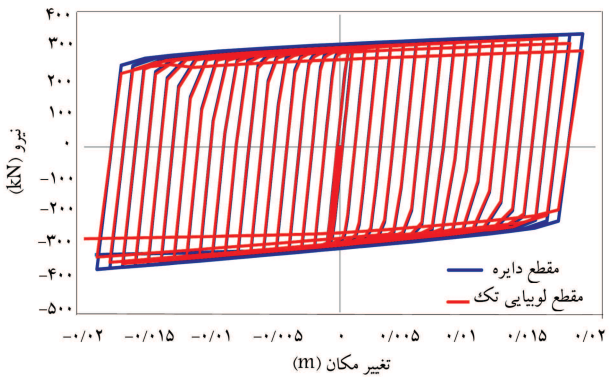
شکل ۲۱. منحنی هیسترزیس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی نورثریج.

در میزان برش پایه‌ی وارد به سازه هستیم. به نظر می‌رسد با توجه به پیچیدگی‌های رفتاری زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک، مطالعات بیشتر جهت حصول نتیجه‌ی مناسب و درک رفتار این‌گونه زلزله‌ها ضروری است.

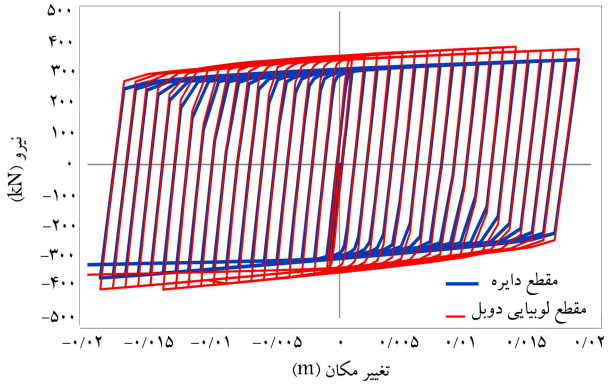
۸. بررسی آثار شکل مقطع کاهش‌یافته

۱.۸. مقایسه‌ی منحنی‌های هیسترزیس

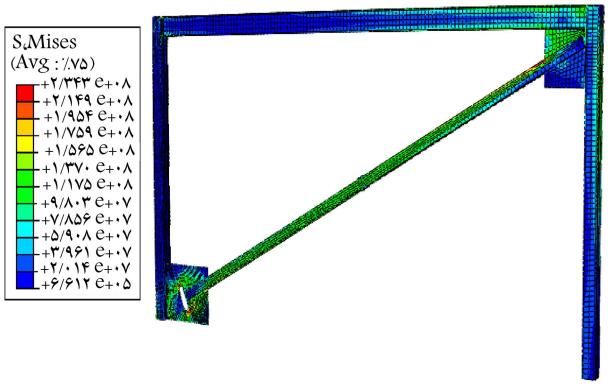
بررسی منحنی‌های هیسترزیس در هر ۳ شکل پیشنهادی، مؤید رفتار مناسب و استهلاک انرژی مناسب آنهاست. منحنی‌های هیسترزیس پایدار بیانگر شکل‌پذیری مناسب نمونه‌های پیشنهادی است. لیکن مطابق شکل ۲۲، در تغییرمکان‌های بیشتر، کمانش ورق اتصال به واسطه‌ی طول زیاد بُعد مقطع لوبیایی تک، سبب افت منحنی‌های هیسترزیس شده است. به نظر می‌رسد کاهش سختی ورق اتصال در صورت ایجاد سوراخ در آن از عوامل تأثیرگذار در رفتار کلی قاب بوده است، که باید در طراحی مدنظر قرار گیرد. استفاده از انواع سخت‌کننده در اطراف مقطع کاهش‌یافته از جمله راه‌کارهایی است که می‌توان از آن استفاده کرد. همچنین چرخه‌های هیسترزیس مقطع لوبیایی دوبل مطابق با شکل ۲۳، حاکی از سختی بیشتر مقطع و در نتیجه برش پایه‌ی بیشتر نسبت به مقطع دایروی است. طراحی این مقطع نیز پیچیدگی و حساسیت بیشتری نسبت به مقاطع تک‌سوراخ دارد و فاصله‌ی بین دو شکاف لوبیایی نیز از جمله موارد تأثیرگذار در رفتار چرخه‌یی این مقطع است. طراحی ظرفیت خمشی مجموعه‌ی سوراخ‌ها به طوری که ظرفیت کمتری از بار نهایی کمانش عضو اصلی مهاربند داشته باشد و نیز تعیین فواصل مناسب جهت شرکت تمامی سوراخ‌ها در استهلاک و شکل‌پذیری آنها از موارد تأثیرگذار بوده است و حتماً باید مد نظر قرار گیرد، لیکن طراحی مقاطع تک‌سوراخ حساسیت‌های کمتری دارد. در



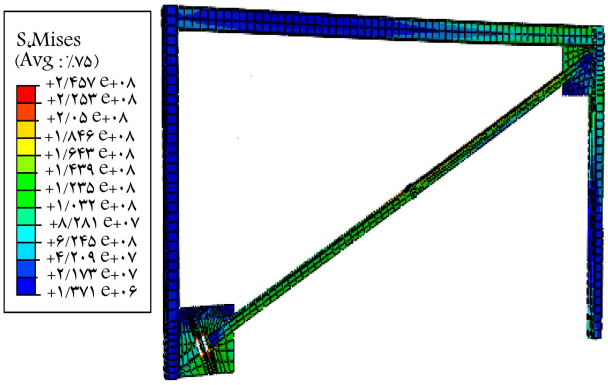
شکل ۲۲. مقایسه‌ی منحنی‌های هیسترزیس نمونه‌های دایروی و لوبیایی تک.



شکل ۲۳. مقایسه‌ی منحنی‌های هیسترزیس نمونه‌های دایروی و لوبیایی دوبل.



شکل ۲۴. تمرکز تنش‌ها در اطراف قسمت کاهش‌یافته در مقطع لوبیایی تک.



شکل ۲۵. تمرکز تنش‌ها در اطراف قسمت کاهش‌یافته در مقطع لوبیایی دوبل.

جدول ۳. مقایسه‌ی تأثیر شکل سوراخ در میرایی هیسترزیس معادل.

نمونه	A_h	A_e	ζ_{eq} (٪)
دایروی	۶۱۲	۲۵۹	۱۸٫۸۱
بیضی	۵۶۴	۲۴۶	۱۸٫۲۵
دوبیضی	۷۳۶	۲۹۸	۱۹٫۶۶

تمامی نمونه‌ها، تمرکز تنش‌ها در اطراف ناحیه‌ی کاهش‌یافته سبب کاهش محسوس تنش در سایر اعضاء مهاربند شده است (شکل‌های ۲۴ و ۲۵).

۲.۸. مقایسه‌ی میرایی هیسترزیس معادل

با توجه به نتایج تحلیل و نمودارهای هیسترزیس به‌دست‌آمده در چرخه‌های بارگذاری مشخص مطابق بارگذاری ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی ATC-۲۴، میزان میرایی ویسکوز معادل با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است:

$$\zeta_{eq} = A_h / ۴\pi A_e \qquad (۱)$$

که در آن، A_h و A_e به ترتیب بیانگر استهلاک انرژی در یک چرخه‌ی بارگذاری و میزان انرژی ذخیره‌شده در یک سیستم کشسان خطی هستند. جهت امکان مقایسه، کلیه‌ی مقادیر نسبت میرایی معادل برای تغییرمکان ۱۵ میلی‌متری روی کلیه‌ی نمونه‌ها محاسبه شده است. نتایج به‌دست‌آمده گویای افزایش محسوس میزان میرایی معادل است. حصول میرایی حدود ۲۰٪ با توجه به عدم استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی پیچیده، مؤید عملکرد لرزه‌یی مؤثر المان پیشنهادی است (جدول ۳).

۹. نتیجه‌گیری

منحنی هیسترزیس نمونه‌های پیشنهادی نهایی (نمونه‌ی ۳) تا اواخر تحلیل و تا تغییرمکان حدود ۲ سانتی‌متر پایدار بوده و باریک‌شدگی در آن مشاهده نشده است، در حالی که مهاربند معمولی در تغییرمکان حدود ۱ سانتی‌متر، دچار کمانش و افت محسوس عملکرد لرزه‌یی شده است.

افزایش تغییرمکان حدود ۱۳-۴۳ درصدی و کاهش برش پایه حدود ۱۹-۳۷ درصدی طی بارگذاری لرزه‌یی، مؤید افزایش شکل‌پذیری مهاربند با استفاده از نمونه‌ی پیشنهادی است و در صورت طراحی و اجرای مناسب سبب بهبود عملکرد لرزه‌یی سازه می‌شود.

با توجه به امکان برش صفحه‌ی اتصال توسط دستگاه برش اتوماتیک در کارخانه به هر شکل دلخواه، طرح پیشنهادی کاملاً اجرایی است و اجرای آن در انواع مهاربندهای همگرا از جمله مهاربند ضربدری و شورون بدون صرف هزینه‌ی زیاد امکان‌پذیر است. شکل هندسی مقطع کاهش‌یافته نیز از عوامل مهم و سوراخ دایروی به دلیل تقارن ابعاد و نیز عدم وجود گوشه‌های تیز از بهترین مقاطع است.

در پایان لازم به ذکر است که با توجه به نتایج مناسب به‌دست‌آمده در تحلیل عددی، ساخت مدل و انجام کار آزمایشگاهی جهت بررسی صحت نتایج باید در مرحله‌ی بعدی پژوهش در دستور کار قرار گیرد.

منابع (References)

1. Dougka, G., Dimakogianni, D. and Loannis, V. "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS 1-1) - experimental analysis", *J. of Constructional Steel Research*, **96**, pp. 69-80 (2014).
2. Legeron, F., Desjardins, E. and Ahmed, E. "Fuse performance on bracing of concentrically steel braced frames under cyclic loading", *J. of Constructional Steel Research,* **95**, pp. 242-255 (2014).
3. Bonetti, S.A. and Matamoros, A.B. "Fuse elements for special concentrically braced frames", *14th Int. Conf. on Earthquake Engineering,* Beijing, China (2008).
4. Koken, A. and Koroglu, M.A. "Waste rubber damper using on steel beam to column connection", *Int. J. of Arts & Sci.*, **5**, pp. 217-222 (2012).
5. Jacobson, A., Hitaka, T. and Nakashima, M. "Online test of building frame with slit-wall dampers capable of condition assessment", *J. of Constructional Steel Research*, **66**(11), pp. 1320-1329 (2008)
6. Saffari, H., Hedayat, A.A. and Poorsadeghi Nejad, M. "Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility", *J. of Constructional Steel Research*, **80**, pp. 138-152 (2013).
7. Franco, J.M., Cahis, X., Gracia, L. and Lopez, F. "Experimental testing of a new anti-seismic dissipater energy device based on the plasticity of metals", *J. of Engineering Structures*, **32**(9), pp. 2672-2682 (2010).
8. Chan, W.K. and Albermani, F. "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation", *J. of Engineering Structure*, **30**(4), pp. 1058-1066 (2008).
9. Ghabraie, K., Chan, R., Huang, X. and Min Zie, Y. "Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy", *J. of Engineering Structures,* **32**(8), pp. 2258-2267 (2010).
10. Ma, X., Borchers, E., Pena, A., Krawinkler, H. and Deierlein, G., *Design and Behavior of Steel Shear Plates with Openings as Energy Dissipating Fuses*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Report No. 173, 118 p. (2011).
11. Xu, Y.H., Li, A.Q., Zhou, X.D. and Sun, P. "Shape optimization study of mild steel slit dampers", *J. of Advanced Materials Research*, **168-170**, pp. 2434-2438 (2011).
12. Sang-Hoon, O. and Hong-Sik, R. "Ultimate absorption capacity of steel plate slit dampers subjected to shear force", *Int. J. of Steel Structures*, **2**(2), pp. 71-79 (2002).
13. ABAQUS Finite Element Analysis Program. Version 6.10.0. User's Manual (2010).
14. Krawinkler, H., *Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures*, Applied Technology Council, Report of ATC-24 (1992).
15. Black, G.R., Wenger, B.A. and Popov, E.P., *Inelastic Buckling of Steel Strut Under Cyclic Load Reversals*, Tech. Rep. UCB/EERC-80-40, EERC, Berkeley, CA (1980).