

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

عبدااله جواغی (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

سید مهدی زهرائی\* (استاد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۵)  
دوره ۲ - شماره ۳/۲، ص. ۸۳-۷۵

در این نوشتار با ایجاد سوراخی در صفحه‌ی اتصال چند نمونه مهاربند قطری، سعی در تأمین شکل‌پذیری و بهبود عملکرد لرزه‌ی 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 حوزی دور و نزدیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تحلیل، گویای منحنی‌های هیستریزس 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 چرخه‌ی کمتر از ۱ سانتی‌متر دچار کمانش شده و افت عملکرد آن مشهود است. همچنین نتایج به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی، گویای افزایش تغییرمکان نهایی حدود ۱۳-۴۳ درصدی و کاهش برش پایه‌ی ۱۹-۳۷ درصدی طی بارگذاری لرزه‌ی است.

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

## ۱. مقدمه

و یا تیر پیوند قائم نیز همواره مورد مطالعات گسترده‌ی قرار گرفته است. معمولاً در این موارد طراحی به گونه‌ی 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 به طور گسترده در جهت اصلاح رفتار لرزه‌ی این‌گونه مهاربندها مورد توجه قرار گرفته است. برخی پژوهشگران در پژوهشی در سال ۲۰۱۴،<sup>[۱]</sup> 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 به دست آمده حاکی از تمرکز خرابی در تیرهای رابط و کاهش آسیب در سایر اعضاء اصلی بوده است. در پژوهش دیگری در همان سال،<sup>[۲]</sup> با مطالعه‌ی رفتار مهاربندهای هم‌گرا، کاهش در سطح مقطع عضو اصلی مهاربند با مقطع نبشی در نزدیکی اتصالات جهت بهبود رفتار لرزه‌ی مهاربندها بررسی شده و نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی قاب یک طبقه، گویای کاهش محسوس نیاز لرزه‌ی و عملکرد مناسب‌تر اتصالات بوده است، به طوری که نمودارهای هیستریزس پایدار بدون افت مقاومت محسوس حاصل شده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۸،<sup>[۳]</sup> با

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 میان قاب بنایی با مهاربند و نقایص عمده در طراحی و اجرا از عوامل تأثیرگذار در رفتار لرزه‌ی این نوع مهاربندها هستند، که باید مدنظر قرار گیرند. عدم رفتار یکنواخت تحت چرخه‌های بارگذاری کششی و فشاری و در نتیجه از بین رفتن قسمت عمده‌ی از ظرفیت مهاربند پس از کمانش عضو فشاری سبب انجام مطالعات گسترده‌ی بر روی روش‌های ممکن جهت تعویق کمانش و دستیابی به ظرفیت تسلیم مهاربندها شده است. تمرکز خسارت و آسیب در نقطه‌ی از پیش تعیین شده با رفتار لرزه‌ی شکل‌پذیر مانند استفاده از المان زانوئی

\* نویسنده مسئول

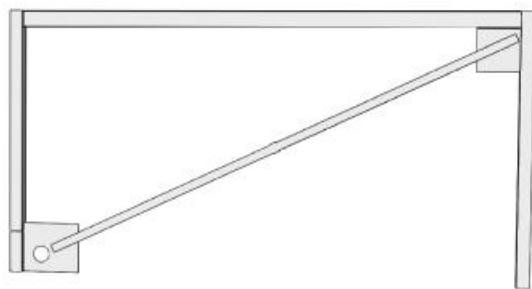
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۱۷، پذیرش ۱۳۹۴/۱/۲۲

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 کمناش میله‌ی نازک فولادی در فشار و افزایش بار بحرانی کمناش 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)<sup>[۱]</sup> با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس واقعی، نوعی اتصال جدید مجهز به میراگر شکاف‌دار و میراگر لاستیکی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آزمایش حاکی از آن بوده است که رفتار شکل‌پذیر اتصال، موجب تمرکز استهلاک انرژی و تغییر شکل‌های خمیری در خود و مانع از انتقال آن به تیر و ستون شده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۸<sup>[۲]</sup> 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 سازی ۳ طبقه، عملکرد لرزه‌ی مدل مذکور بررسی شده و این نتیجه به دست آمده است که عملکرد برشی و خمشی شیارها به‌عنوان عضو مستهلک‌کننده‌ی انرژی سبب پایداری چرخه‌های هیستریزیس، 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 لرزه‌ی این‌گونه سیستم‌هاست. در سال ۲۰۱۳ نیز پژوهشگران<sup>[۳]</sup> 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)<sup>[۴]</sup> با ارائه ایده‌ی نوین به مطالعه‌ی رفتار یک نوع میراگر شکاف‌دار فزنی تغییر مکانی، 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 لرزه‌ی 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 هیستریزیس، 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<sup>[۵]</sup> با مطالعه‌ی رفتار میراگرهای شکاف‌دار با استفاده از ۹ نمونه‌ی مختلف، آثار پارامترهای هندسی در رفتار آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۰<sup>[۶]</sup> 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 هیستریزیس جهت حصول شکل هندسی مناسب با قابلیت استهلاک انرژی و افزایش شکل‌پذیری آنها انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های انجام شده در دانشگاه استنفورد در سال ۲۰۱۱<sup>[۷]</sup> اشاره کرد. در این راستا در پژوهش دیگری در همان سال<sup>[۸]</sup> مطالعاتی بر روی شکل‌های مختلف میراگرهای شکاف‌دار انجام شده و نتایج مطالعات عددی در پژوهش مذکور حاکی از منحنی‌های هیستریزیس پایدارتر در صورت استفاده از شکل‌های سهموی است. علاوه بر این مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار مهاربند فولادی در ترکیب با میراگرهای شکاف‌دار<sup>[۹]</sup> حاکی از تأثیر محسوس آنها در تعویق کمناش و بهبود عملکرد لرزه‌ی مهاربند‌های هم‌گرا بوده است. مطالعاتی از این قبیل جهت بهبود عملکرد لرزه‌ی 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 انجام شده بر روی رفتار مهاربند‌های هم‌محور ملاحظه می‌شود که شکل‌پذیری و عملکرد لرزه‌ی آنها به شدت تحت تأثیر رفتار عضو فشاری است و کاهش شدید سختی و مقاومت پس از کمناش المان فشاری، سبب افت محسوس عملکرد آن طی بارگذاری چرخه‌ی می‌شود. لذا اتخاذ راهکاری جهت جلوگیری از کمناش عضو و یا به تأخیر انداختن آن سبب بهبود شکل‌پذیری آن خواهد شد. در این پژوهش با ایجاد سوراخی در صفحه‌ی اتصال یک طرف مهاربند، به منظور ایجاد نقطه‌ی ضعفی از پیش تعیین‌شده و استفاده از ظرفیت جذب انرژی در اثر تغییر شکل 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 گونه‌ی انتخاب شده است که کمتر از ظرفیت کمناشی عضو فشاری باشد و عملاً احتمال وقوع کمناش در عضو اصلی منفی شود. تغییر شکل سوراخ دایره‌ی تحت بارگذاری چرخه‌ی 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 کمناشی عضو مهاربند و سپس کاهش سطح مقطع لازم محاسبه شود. در این پژوهش، ۳ مدل مهاربند قطری به شرح جدول ۱ مورد آزمایش قرار گرفته است.

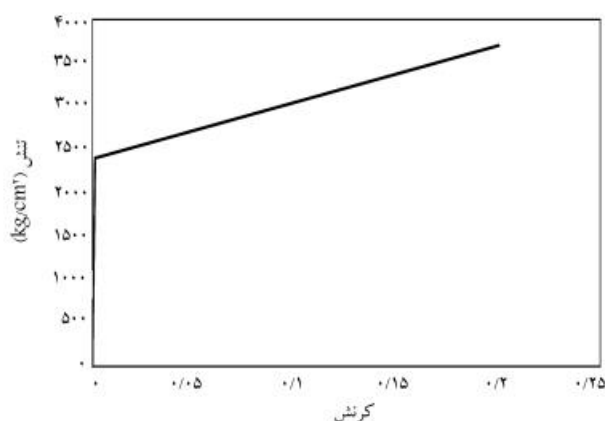
در کلیه‌ی نمونه‌ها، مقطع مهاربند از ترکیب ۲ پروفیل ناودانی نمره ۱۴ به‌عنوان مقطعی پرکاربرد و متداول در سازه به‌صورت قوطی شکل انتخاب شده است. جهت بررسی رفتار لرزه‌ی مهاربند معمولی در بارگذاری چرخه‌ی، در نمونه‌ی اول مهاربند قطری از مقطع ۲UNP۱۴ بدون هیچ‌گونه تغییر خاص، مدل‌سازی و ارزیابی شده است. در مدل‌های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



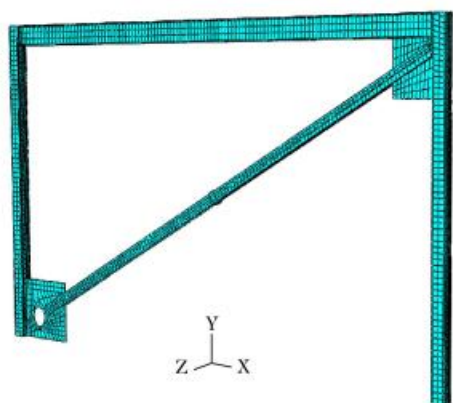
شکل ۱. طرح پیشنهادی.

جدول ۱. نمونه‌های به‌کاررفته در تحلیل.

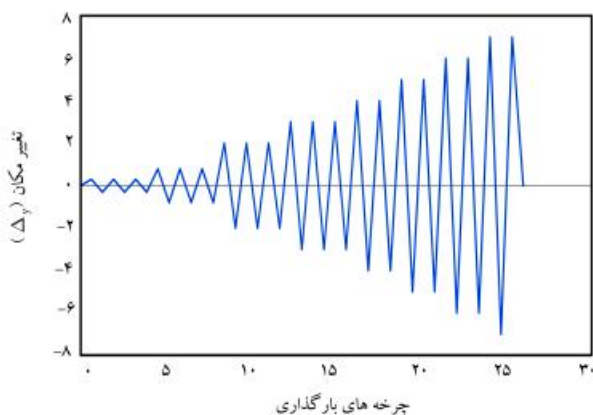
| نمونه‌ها | طول قاب | ارتفاع قاب | مقطع مهاربند | خصوصیات نمونه | نسبت D/B |
|----------|---------|------------|--------------|---------------|----------|
| ۱        | ۵       | ۳          | ۲UNP۱۴       | معمولی        | --       |
| ۲        | ۵       | ۳          | ۲UNP۱۴       | سوراخ‌دار     |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



شکل ۲. منحنی تنش - کرنش فولاد.



شکل ۳. نمونه‌ی اجزاء محدود مهاربند قطری پیشنهادی.



شکل ۴. بارگذاری پیشنهادی ATC-۲۴. [۱۲]

## ۵. بررسی تأثیر شکل سوراخ در عملکرد نمونه‌های

### پیشنهادی

شکل مقطع کاهش یافته از جمله عوامل مؤثر در عملکرد لرزه‌ی 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 کاهش یافته وجود ندارد؛ لذا، در این قسمت بررسی تأثیر شکل سوراخ در عملکرد نمونه‌های پیشنهادی

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

## ۳. خصوصیات مصالح

فولاد به‌کاررفته از نوع ST۳۷ بوده و منحنی تنش - کرنش آن به‌صورت دو خطی و مطابق شکل ۲ در نظر گرفته 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 - 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

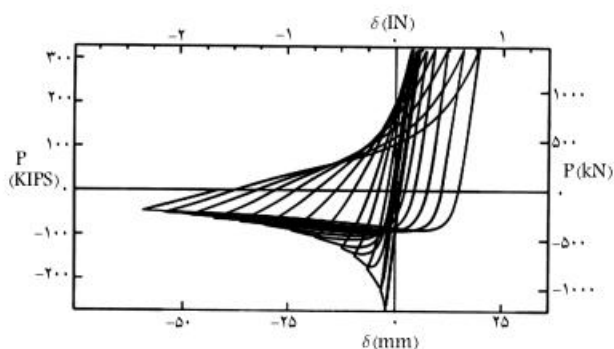
### ۱.۴. تحلیل استاتیکی غیرخطی

در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS [۱۲]، انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر روی مدل سه بعدی به بررسی رفتار مهاربند اصلاح شده 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 افزایش یافته در جهت محور x و در گام‌های زمانی ۱٪ ثانیه با لحاظ اثر تغییرشکل‌های بزرگ جهت کماتش 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 ۱/۲۵-۵/۱-۱-۲-۳ برابر تغییرمکان تسلیم در ۳ چرخه و بیشتر از آن تا تغییرمکان بیشینه در ۲ چرخه انجام شده است. [۱۲]

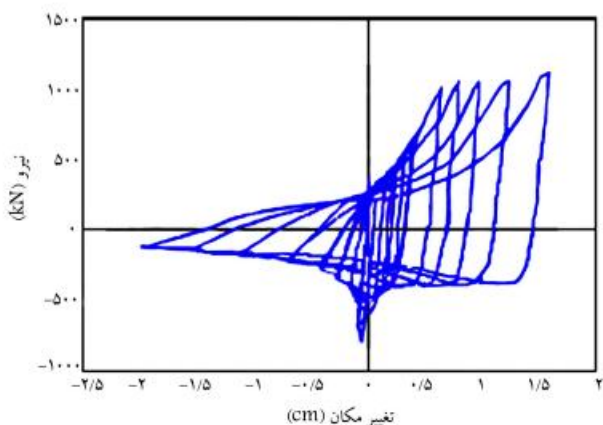
### ۲.۴. تحلیل تاریخچه‌ی زمانی

در این بخش جهت بررسی رفتار سیستم تحت بارگذاری لرزه‌ی، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از مؤلفه‌ی افقی شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴)، لومپارتا 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 ۱٪ 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 ۶. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی آزمایشگاهی. [۱۵]



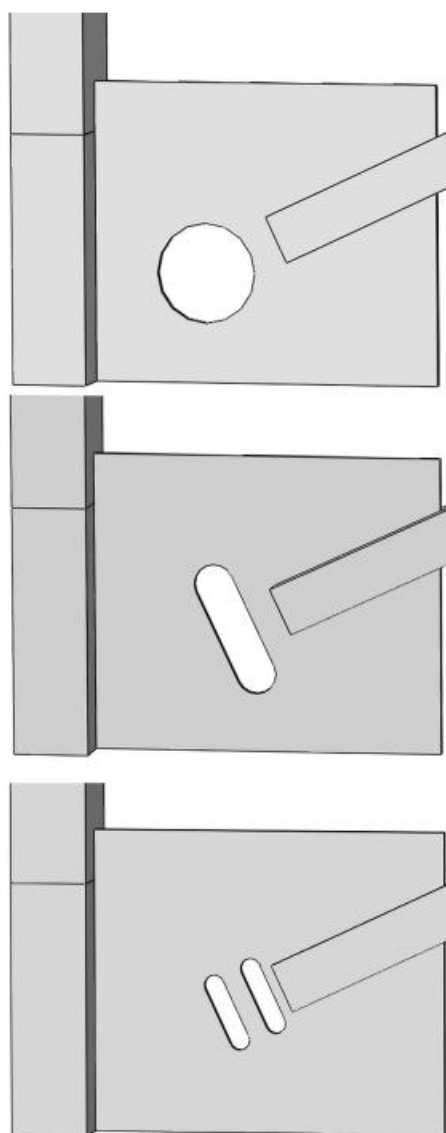
شکل ۷. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی عددی.

ارزیابی منحنی‌های هیستریزیس به دست آمده 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 هیستریزیس نمونه‌ی اول حاکی از رفتار نامطلوب و غیرشکل‌پذیر مهاربند هم‌محور بوده و افت مقاومت و کاهش محسوس سختی قاب پس از کماتش عضو فشاری قابل مشاهده است (شکل ۸). کماتش مهاربند در برش پایه حدود ۶۵ تن سبب ناپایداری منحنی هیستریزیس و افت شدید عملکرد سازه شده است، که تطابق خوبی با بارکمانشی محاسباتی مقطع داشته و مؤید صحت نتایج تحلیل بوده و همان‌طور که اشاره شده است، اندک تفاوت موجود نیز ناشی از عواملی نظیر جزئیات مدل‌سازی و شرایط بارگذاری بوده است. عدم تقارن در رفتار کششی و فشاری مهاربند سبب بروز کماتش زود هنگام شده و عملاً بخش عمده‌ی ظرفیت مقطع بدون استفاده مانده است. همان‌طور که 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 در گوشه‌های قاب امکان کماتش صفحه‌ی اتصال کناری و نیز وقوع

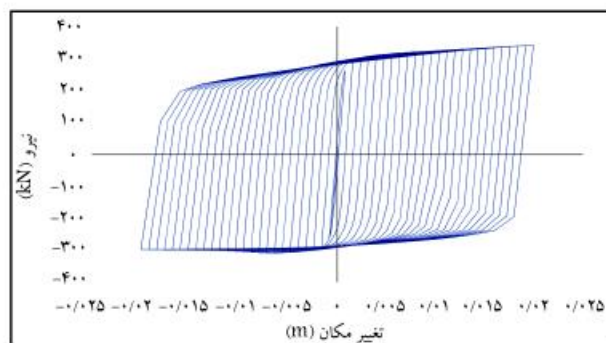


شکل ۵. شکل‌های مورد استفاده در تحلیل.

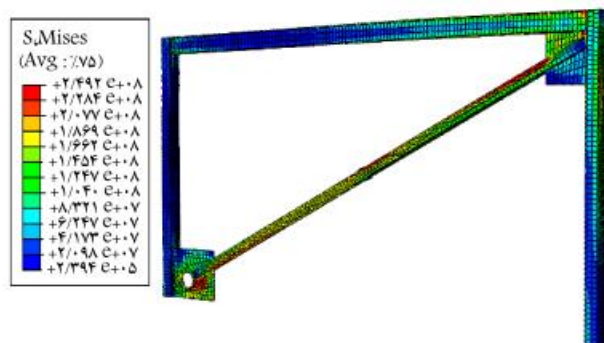
مورد ارزیابی واقع شده است. اصولاً در این‌گونه موارد، شکل‌هایی مانند مربع یا مستطیل به دلیل وجود گوشه‌های تیز مستعد تمرکز تنش و نیز وجود جریان‌های گردابی تنش مناسب به نظر نمی‌رسند؛ در نتیجه، شکل‌های بدون گوشه‌های باریک نظیر بیضی و دایره از مناسب‌ترین انواع مقاطع کاهش‌یافته به شمار می‌آیند. بدین منظور از ۳ شکل سوراخ دایره‌ی و لویبایی 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

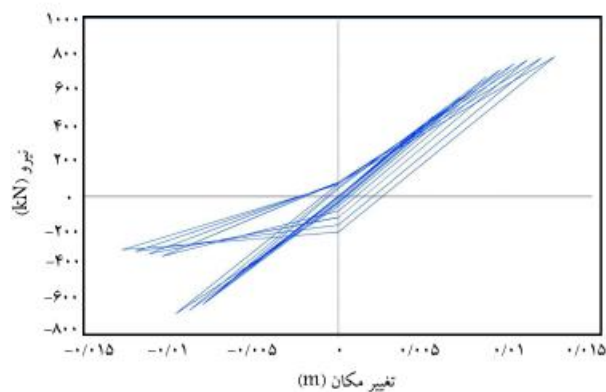
جهت بررسی صحت نتایج و اطمینان از تطبیق مشخصات و پارامترهای به‌کاررفته در مدل عددی با شرایط واقعی، در ابتدا یک مدل واقعی ساخته شده در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ی [۱۳] با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.



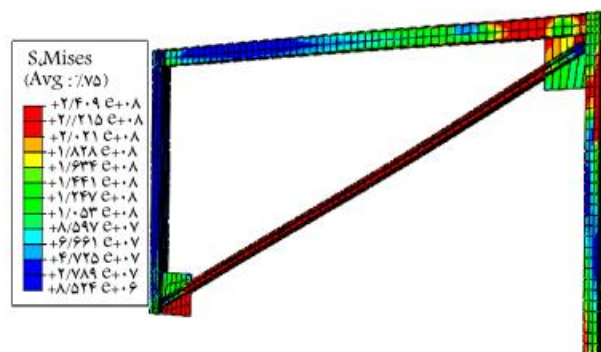
شکل ۱۱. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی سوم  $D/B = 0.75$



شکل ۱۲. توزیع تنش فون میسز در نمونه‌ی دوم.



شکل ۸. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی ۱ (معمولی).

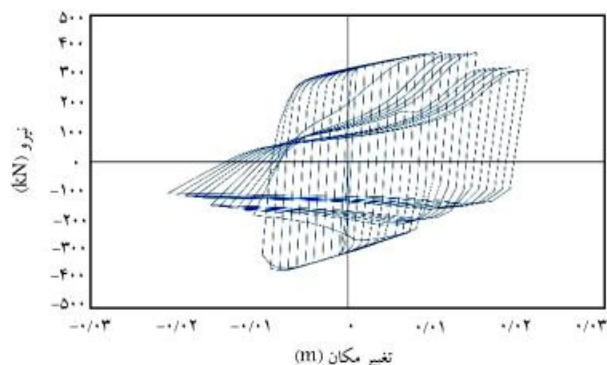


شکل ۹. توزیع تنش فون میسز در نمونه‌ی اول (معمولی).

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

حفره‌ی ایجاد شده در صفحه‌ی اتصال، نقش عضو مستهلک‌کننده‌ی انرژی را به خوبی ایفا کرده و تغییر شکل مداوم قسمت کاهش یافته و خمیری شدن مقطع در این قسمت موجب بهبود محسوس عملکرد مهاربند شده است. به نظر می‌رسد رفتار متقارن این نمونه ناشی از سختی داخلی صفحه‌ی کمتر و در نتیجه امکان تغییر شکل و اعوجاج ورق میانی تحت نیروهای پایین‌تر بوده است. در نهایت، تعویق کماتش مهاربند سبب بروز رفتار شکل پذیر و منحنی هیستریزیس پایدار شده است. این تذکر لازم است که در صورت استفاده از نمونه‌ی مذکور، افزایش ابعاد ورق اتصال کناری جهت تأمین طول جوش مورد نیاز عضو اصلی مهاربند و نیز امکان تعبیه‌ی سوراخ دایروی در آن باید در طراحی صفحه‌ی اتصال مدنظر باشد. همچنین کنترل احتمال وقوع کماتش 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 سخت‌کننده به صورت تک یا دبل در صورت نیاز به عنوان یک راهکار مؤثر باید در دستور کار قرار گیرد.

به‌طور کلی و با توجه به نتایج پژوهش می‌توان گفت کاربرد عضو پیشنهادی در کنترل ارتعاشات لرزه‌یی سازه‌ها موجب می‌شود تا تغییر شکل‌های غیرارتجاعی در آنها متمرکز شود و خسارات وارده به سازه‌ی اصلی به شدت کاهش یابد. کانتور تنش فون میسز نمونه‌های پیشنهادی بیان‌گر آن است که عمده‌ی تغییر شکل‌های غیرخطی در قسمت کاهش یافته متمرکز شده و تغییر شکل آن‌ها حاکم بر رفتار مهاربند بوده است. تغییر شکل مداوم در سوراخ دایروی و تبدیل آن به بیضی تحت تنش‌های

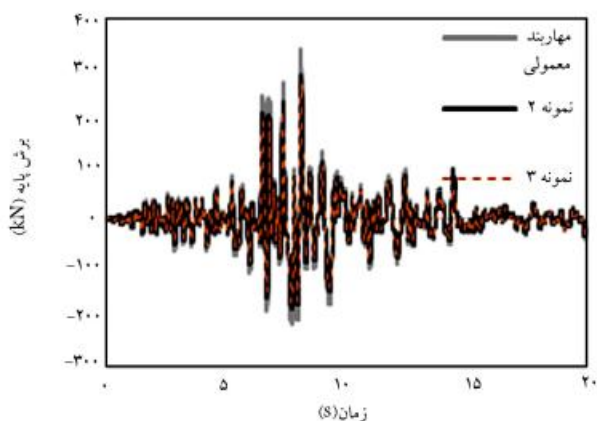


شکل ۱۰. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی دوم  $D/B = 0.4$

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

یکی از عوامل تأثیرگذار در طراحی قسمت کاهش یافته، محاسبه‌ی سطح مقطع مناسب جهت کاهش ظرفیت باربری محوری و در نتیجه تعویق کماتش عضو اصلی مهاربند است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، بررسی منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های دوم و سوم حاکی از رفتار مناسب‌تر نسبت به نمونه‌ی معمولی است، لیکن عدم کاهش کافی در ممان اینرسی قسمت کاهش یافته در نمونه‌ی دوم موجب کماتش 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، تغییر مکان‌های 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.



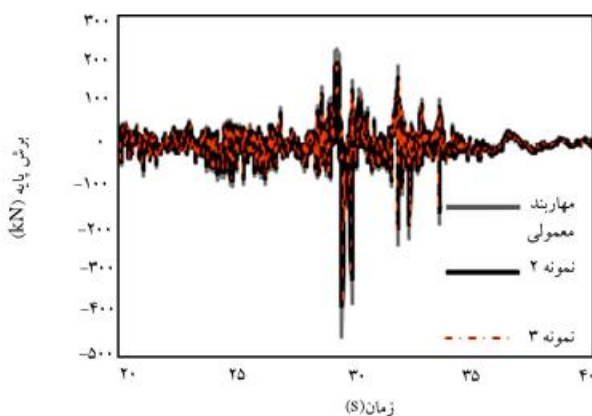


شکل ۱۵. تغییرات برش پایه‌ی نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی نورتریج.

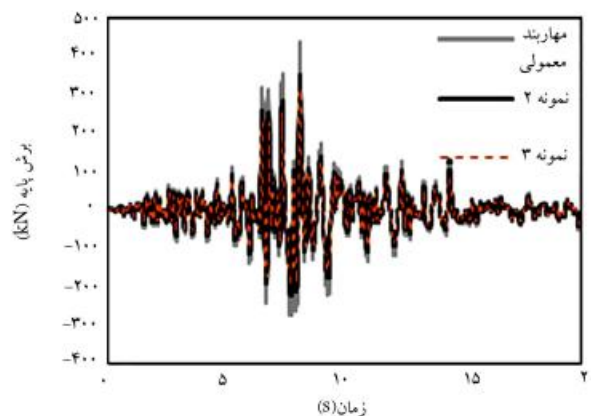
جدول ۲. نتایج تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی.

| شماره‌ی نمونه | برش بیشینه (kN)   |                 |
|---------------|-------------------|-----------------|
|               | زلزله‌ی لوماپریتا | زلزله‌ی نورتریج |
| معمولی ۱      | ۴۵۳               | ۳۶۱             |
| ۲             | ۳۶۲               | ۳۸۴             |
| ۳             | ۳۲۰               | ۳۸۱             |

چنین آثاری روی سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. وقوع زلزله‌های مخربی همچون چی چی و کوبه و نیز زلزله‌ی مخرب بم در کشور سبب توجه بیشتر به بحث مکانیزم عملکرد و پارامترهای لرزه‌ی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک شده است. در این مرحله، جهت بررسی رفتار نمونه‌های پیشنهادی تحت بارگذاری لرزه‌ی 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 چی چی تایوان (۱۹۹۹) به عنوان زلزله‌های شاخص ثبت شده‌ی نزدیک گسل و شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ی لندرز در ایالات متحده (۱۹۹۲)، زلزله‌ی کوچائلی ترکیه (۱۹۹۹)، و شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴) به عنوان زلزله‌های دور از گسل استفاده و منحنی‌های هیستریزس 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 هیستریزس به دست آمده از بارگذاری لرزه‌ی در مقایسه با تجزیه و تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت تغییر مکان چرخه‌ی معمولاً به صورت کاملاً نامنظم بوده و تفسیر نتایج مشکل‌تر است، لیکن کاهش محسوس برش پایه، افزایش دوره‌ی تناوب سیستم و نیز افزایش تغییر مکان نهایی قاب در صورت استفاده از اتصال پیشنهادی مطابق شکل‌های ۱۶ الی ۲۱ کاملاً مشهود است. افزایش تغییر مکان 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 لرزه‌ی سازه می‌شود. نکته‌ی مهم در تفاوت رفتار نمونه‌های پیشنهادی تحت زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک است، به طوری که میزان تفاوت در برش پایه‌ی ایجاد شده در سازه تحت زلزله‌های حوزه‌ی دور در نمونه‌های پیشنهادی، کاهش محسوس‌تری نسبت به زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک دارد. به نظر 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 ۱۳. تغییرات برش پایه‌ی نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی چی چی.



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.

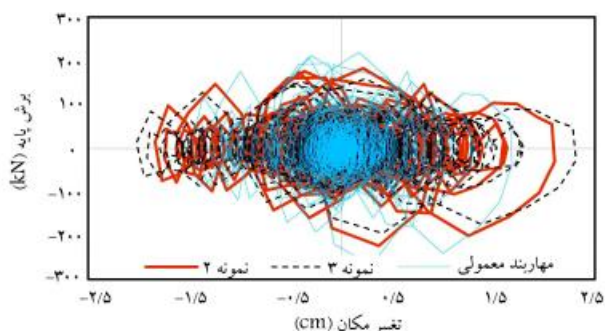
## ۲.۷. نتایج تحلیل تاریخیچه زمانی

در این قسمت با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی نمونه‌های پیشنهادی، عملکرد لرزه‌ی آنها ارزیابی شده است. جهت بررسی تأثیر اتصال پیشنهادی در کاهش سختی سیستم و نهایتاً میزان انرژی جذب شده در زلزله به عنوان عاملی تأثیرگذار در رفتار کلی سازه، میزان برش پایه‌ی به دست آمده طی هر ۳ شتاب‌نگاشت در کلیه‌ی نمونه‌ها محاسبه شده است. مقایسه‌ی میزان جذب نیرو و برش پایه‌ی به دست آمده از هر ۳ شتاب‌نگاشت مطابق با شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، مؤید جذب نیروی کمتر نمونه‌ی پیشنهادی و رفتار مناسب‌تر آن است. بررسی نتایج به دست آمده 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 سازه‌ی می‌شود (جدول ۲).

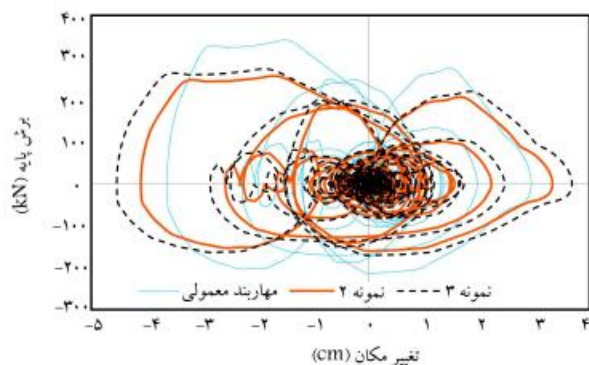
## ۳.۷. بررسی میزان تأثیر زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک در عملکرد

### 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 ۲۰. منحنی هیستریزس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی لندنز.



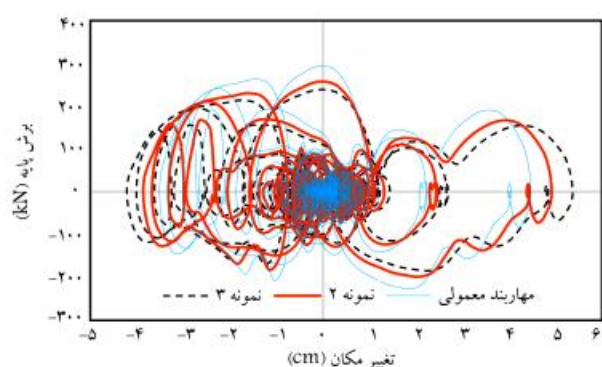
شکل ۲۱. منحنی هیستریزس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی نورث‌ریچ.

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.

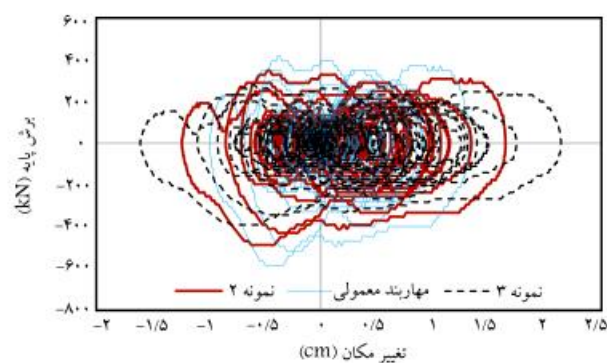
## ۸. بررسی آثار شکل مقطع کاهش‌یافته

### ۸.۱. مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزس

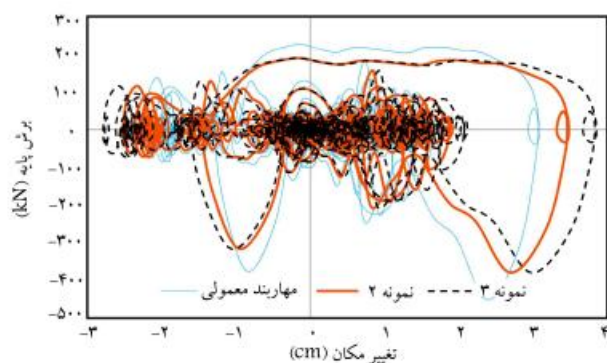
بررسی منحنی‌های هیستریزس در هر ۳ شکل پیشنهادی، مؤید رفتار مناسب و استهلاک انرژی مناسب آنهاست. منحنی‌های هیستریزس پایدار بیان‌گر شکل‌پذیری مناسب نمونه‌های پیشنهادی است. لیکن مطابق شکل ۲۲، در تغییر مکان‌های بیشتر، کماتش ورق اتصال به واسطه‌ی طول زیاد بعد مقطع لویبایی تک، سبب افت منحنی‌های هیستریزس شده است. 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 هیستریزس مقطع لویبایی دابل 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 لویبایی نیز از جمله موارد تأثیرگذار در رفتار چرخه‌ی این مقطع است. طراحی ظرفیت خمشی مجموعه‌ی سوراخ‌ها به طوری که ظرفیت کمتری از بار نهایی کماتش 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 مدنظر قرار گیرد، لیکن طراحی مقاطع تک‌سوراخ حساسیت‌های کمتری دارد. در



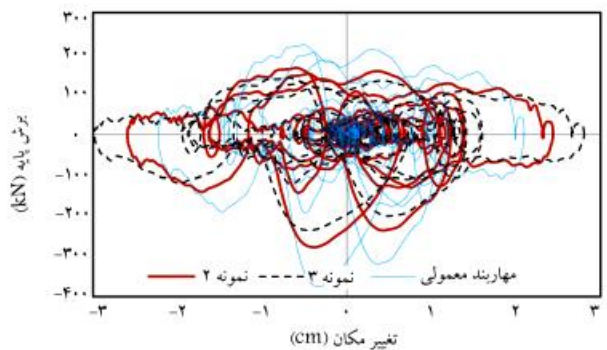
شکل ۱۶. منحنی هیستریزس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی لوماپریتا.



شکل ۱۷. منحنی هیستریزس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی بم.



شکل ۱۸. منحنی هیستریزس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی چی‌چی.



شکل ۱۹. منحنی هیستریزس نمونه‌های قطری تحت زلزله‌ی کوچاالی.



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

| نمونه   | $A_h$ | $A_e$ | $\zeta_{eq}$ (%) |
|---------|-------|-------|------------------|
| دایروی  | ۶۱۲   | ۲۵۹   | ۱۸٫۸۱            |
| بیضی    | ۵۶۴   | ۲۴۶   | ۱۸٫۲۵            |
| دو بیضی | ۷۳۶   | ۲۹۸   | ۱۹٫۶۶            |

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

### ۲.۸. مقایسه‌ی میرایی هیستریزیس معادل

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

$$\zeta_{eq} = A_h / 4\pi A_e \quad (1)$$

که در آن،  $A_e$  و  $A_h$  به ترتیب بیانگر استهلاک انرژی در یک چرخه‌ی بارگذاری و میزان انرژی ذخیره شده 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 به دست آمده گویای افزایش محسوس میزان میرایی معادل است. حصول میرایی حدود ۲۰٪ با توجه به عدم استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی پیچیده، مؤید عملکرد لرزه‌ی مؤثر المان پیشنهادی است (جدول ۳).

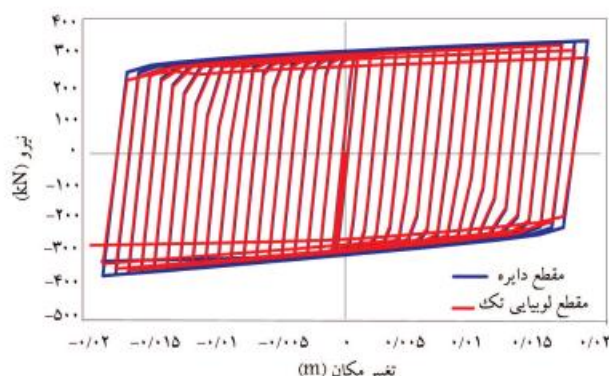
### ۹. نتیجه‌گیری

منحنی هیستریزیس نمونه‌های پیشنهادی نهایی (نمونه 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 کماتش وافت محسوس عملکرد لرزه‌ی شده است.

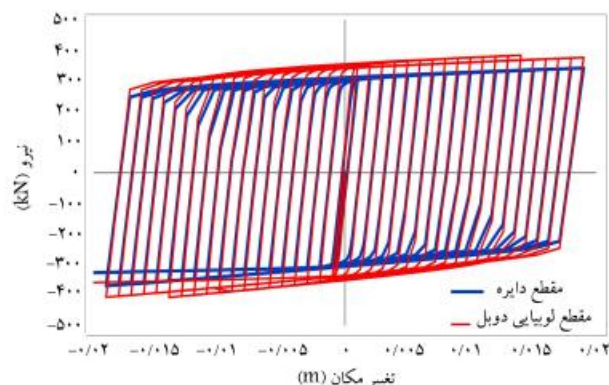
افزایش تغییرمکان حدود ۱۳-۴۳ درصدی و کاهش برش پایه حدود ۱۹-۳۷ درصدی طی بارگذاری لرزه‌ی، مؤید افزایش شکل‌پذیری مهاربند با استفاده از نمونه‌ی پیشنهادی است و در صورت طراحی و اجرای مناسب سبب بهبود عملکرد لرزه‌ی سازه می‌شود.

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 ضربه‌ی 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.

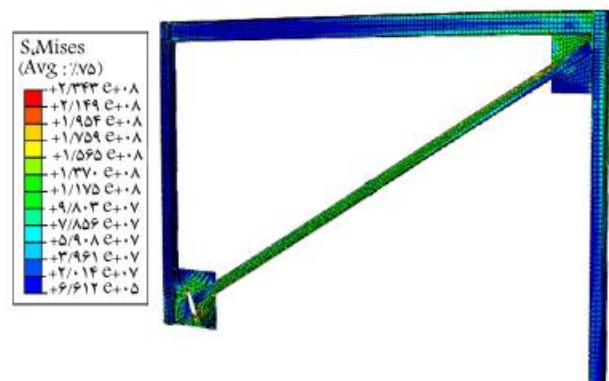
در پایان لازم به ذکر است که با توجه به نتایج مناسب به دست آمده در تحلیل عددی، ساخت مدل و انجام کار آزمایشگاهی جهت بررسی صحت نتایج باید در مرحله‌ی بعدی پژوهش در دستور کار قرار گیرد.



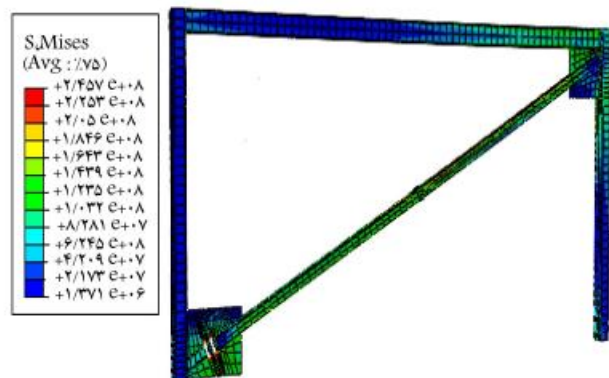
شکل ۲۲. مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های دایروی و لوبیایی تک.



شکل ۲۳. مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزیس 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.



## (References) منابع

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).