## بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی شکلپذیری حلقه فولادی مرکب جهت نصب در مهاربندهای هممحور

محمّدعلی کافی\*۱، علی خیرالدین۲ و محمّد حجفروش۳

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان <sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان <sup>۳</sup> دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۶/۵/۹، پذیرش: ۹۷/۶/۳۱، نشر آنلاین: ۹۷/۶/۳۱)

#### چکیدہ

الشكا يجزون

در دهمهای گذشته، تحقیقات مختلفی جهت افزایش شکل پذیری مهاربندهای هممحور صورت گرفته است. یکی از روشهای افزایش شکل پذیری و کنترل کمانش عضو فشاری مهاربندها، استفاده از المان شکل پذیر حلقه فولادی است. حلقه تعبیه شده تحت اثر نیروی محوری در مهاربند، تحت خمش قرار گرفته و با استفاده از جمع شدن و بازگشت به حالت اولیه و ورود به مرحله غیرخطی و تشکیل مفاصل خمیری، در استهلاک انرژی زلزله تأثیر به سزایی خواهد داشت. از آنجایی که تنوع حلقه های فولادی محدود و تهیه آن ها متناسب با ظرفیت مورد نیاز سازه مقدور نیست، لذا اتخاذ روشی جهت افزایش ظرفیت باربری حلقه های موجود از جمله کمبودهای پژوهشی در این زمینه می باشد. هدف از این مقاله، افزایش ظرفیت باربری المان حلقه با استفاده از دو حلقه متداخل فولادی است که فضای بین آن ها توسط ماده پلاستیک صنعتی (یا تفلون) پر شده است. در این پژوهش، علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی، مدل سازی عددی با استفاده از نرمافزار BAQUS و تحت اثر بار چرخه ای، مطالعه شده است. نتایج حاصله نشان داده است که تحلیل نظری المان مورد معل مداری عددی با استفاده از نرمافزار BAQUS و تحت اثر بار چرخه ای، مطالعه شده است. نتایج حاصله نشان داده است که تحلیل نظری المان مورد مطالعه از دقت لازم برخوردار بوده و با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی دارد. همچنین المان مورد مطالعه دارای منحنی هیسترزیس پهن بوده و می تواند شکل پذیری و جذب انرژی مناسبی از خود نشان دهد که ضریب شکل پذیری کششی آن ۲/۷۲ می باشد. بر این اساس، بیشترین نیروی کششی قابل تحمل المان و جابه جایی قائم نظیر آن به ترتیب ۱۹/۹۶ کیلونیوتن و ۱۶/۱۰ میلی متر می باشد. این مقادیر در اثر اعمال نیروی فشاری به ترتیب ۱۰۱/۵۵

كليدواژدها: آزمايشگاهي، المان محدود، حلقه فولادي، شكل پذيري، مهاربند هممحور.

#### ۱– مقدمه

برای پایداری و مقاومسازی سازهها در برابر نیروی زلزله باید از روشهایی استفاده کرد تا آسیبهای وارد به سازه به حداقل برسد. برای تحقق چنین امری میتوان دو روش کلی را پیشنهاد کرد. روش اول؛ ساخت سازههایی با ضریب اطمینان بالاست، به مفهوم ساخت سازهای که دارای مقاومت و سختی بالایی باشد، که این روش از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست و توجیهی برای وارده از طرف زمین به سازه و اتلاف این انرژی در سازه میباشد. وارده از طرف زمین به سازه و اتلاف این انرژی در سازه میباشد. اتلاف انرژی در سازه توسط بعضی از اعضای تعبیهشده در آن صورت میگیرد که از آسیبدیدگی اعضای اصلی سازه جلوگیری میکند. به همین جهت، انتخاب اولیه در طراحی لرزهای سازهها، استهلاک ازرژی زلزله و شکلپذیری سازهها از طریق تغییر

شکلهای غیر الاستیک اعضا و اتصالات آنها میباشد (Marshall و ۲۰۱۰، ۲۰۱۰).

مهاربندهای هممحور از جمله رایچترین سیستمهای مقاوم لرزهای در ساختمانها بهشمار میآیند. مهاربندهای هممحور به دلیل داشتن مزایایی چون سختی زیاد، سهولت و پایین بودن هزینه اجرا، تغییر شکل کم و حساسیت کمتر به نوع اتصالات، همواره موردتوجه خاص طراحان قرار گرفته است. این سیستم مقاوم لرزهای دارای سرعت بالای بازسازی پس از وقوع زلزله نیز میباشد. زیرا تعمیر و بازسازی سازهها پس از وقوع زلزله، تابع سیستمهای مهاربندی به دلیل حضور در یک یا چند دهانه، نسبت به سیستم قاب خمشی که شامل عناصر سازهای در کل سازه میباشد، از سرعت بازسازی بیشتری برخوردار هستند. این مزیت

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۳۳۳۵۴۱۵۱ - ۲۳

آدرس ايميل: mkafi@semnan.ac.ir (م. ع. كافي)، kheyroddin@semnan.ac.ir (ع. خيرالدين)، mhajforoush@semnan.ac.ir (م. حجفروش).

می تواند در کنار کاهش هزینههای بازسازی در سیستمهای مهاربندی، از درجه اهمیت بیشتری نیز برخوردار گردد (Abbasnia و همکاران، ۲۰۰۸). در کنار تمامی این مزایا، ضعف عمده مهاربندهای هممحور، کمانش عضو فشاری مهاربند در هنگام وقوع زلزله و محدود شدن شکل پذیری و کاهش ظرفیت باربری سازه میباشد (Murthy، ۲۰۰۵). بهنحوی که پس از کمانش عضو فشاری، چندان جذب انرژی وجود نداشته و سازه با کوچک ترین نیروی وارده دچار آسیب و خسارت می شود. از طرفی کم بودن شکل پذیری مهاربندهای هم محور، موجب کاهش ضریب رفتار سازه می گردد که نتیجه به کار گیری چنین سیستم مقاومی، افزایش نیروی زلزله وارده به سازه خواهد شد. با توجه به شکل پذیری پایین مهاربندهای هم محور، عملکرد لرزهای آنها اندک است که به همین جهت، برخی آییننامههای ساختمانی از جمله استاندارد ۲۸۰۰، کاربرد آنها را محدود کردهاند. بنابراین در سازههای با مهاربندی هممحور، افزایش شکل پذیری گام بسیار مهمی در جهت بهبود عملکرد سازه محسوب میشود.

سیستمهای مقاوم در برابر نیروهای جانبی به منظور حفظ قابلیت و کارایی سازه، میبایست دو مشخصه مهم سختی و شکل پذیری را در کنار مشخصه مقاومت به همراه داشته باشند. در دهههای گذشته، تحقیقات مختلفی به منظور افزایش شکل پذیری مهاربندهای هممحور انجام شده است که از آن جمله میتوان به مطالعات Mualla (۲۰۰۰) Butterworth و ۲۰۰۲) و clark و همکاران (۲۰۰۰) در استفاده از اتصالات اصطکاکی اشاره کرد. میراگرهای اصطکاکی بر پایه استهلاک انرژی بهوسیله لغزش و بالاتر بردن زمان تناوب ارتعاشی سیستم عمل میکنند. در همین زمینه نیز تحقیقاتی به منظور بهبود اتصالات اصطکاکی انجام شده است.

Grigorian و همکاران (۱۹۹۳) به منظور افزایش مقاومت سایشی و بالابردن کارایی میراگرهای اصطکاکی از فلز برنج ما بین سطوح لغزش استفاده کردند.

Pall و Pall (۱۹۸۲) نیز یک نوع میراگر اصطکاکی به-خصوص برای مهاربندهای متقاطع با استفاده از اتصال لوبیایی طراحی کردند. از مطالعات دیگر در زمینه افزایش شکل پذیری مهاربندهای هممحور، می توان به مطالعات Rezaieian (۲۰۰۲) و Roufegarinejad و Toor) در خصوص استفاده از غلاف پوششی به منظور افزایش بار کمانش مهاربند تحت نیروی فشاری اشاره کرد. به کارگیری مهاربندهای کمانش تاب، یکی دیگر از روشهای افزایش شکل پذیری مهاربندهای هم محور و کنترل کمانش آن تحت فشار می باشد.

استفاده از المانهای شکل پذیر با عملکرد خمشی- برشی در محلی از مهاربند، از جمله روشهای دیگر در زمینه افزایش شکل پذیری مهاربندهای هم محور به حساب می آید. در این

خصوص نیز می توان به مطالعات Chen و Chen ۱۹۹۰)، Vetr، (۱۹۹۰)، Lu و Thomopoulos و Thomopoulos (۲۰۰۳)، Akbari و Thomopoulos (۲۰۰۳) اشاره کرد. از انواع مختلف المان های خمشی، المان زانویی و مهاربندهای دارای المان زانویی است که توسط Balendra (۱۹۹۷) در طی ۷ سال مورد بررسی قرار گرفت. حساسیت طراحی این المان نسبت به طول آن و ایجاد نیروی برشی در ستون قاب، از معایب این سیستم به شمار می آید.

Tsie TADAS را معرفی کرد. عدم قابلیت استفاده از این المان در TADAS را معرفی کرد. عدم قابلیت استفاده از این المان در مهاربندهای ضربدری و مشکلات اجرایی آن از معایب المان معرفی شده محسوب می شود. در سال های اخیر المان شکل پذیر خمشی با دیدگاههای جدید نیز مطرح شده است. در این خصوص می توان به مطالعات Malek و همکاران (۲۰۰۶) در به کارگیری میراگر غیرفعال حلقوی با مقطع قوطی در محل تقاطع مهاربند ضربدری اشاره کرد. همچنین تحقیقات گستردهای در جهت افزایش شکل پذیری مهاربندها با استفاده از وسایل ویسکو- هایپرالاستیک در ساختار مهاربندی، توسط krishnaMurth (۲۰۰۵) انجام شده است که نتایج آن نیز، در راستای افزایش استهلاک انرژی زلزله در سیستم می باشد.

Abbasnia و همکاران (۲۰۰۸) المان خمشی حلقه فولادی را جهت افزایش شکل پذیری مهاربندهای هممحور پیشنهاد کردند. آنها از یک لوله فولادی بدون درز با قطر خارجی ۲۲۰، ضخامت ۱۲ و طول ۱۰۰ میلیمتر بهره گرفتند. تصویر آزمایش آنها در شکل (۱) ارائه شده است. المان معرفی شده، با اضافه شدن در انتهای عضو مهاربندی، می تواند علاوه بر افزایش شکل پذیری، از کمانش عضو فشاری نیز جلوگیری کند. بنابراین در صورت به-کارگیری المان شکل پذیر حلقه، تسلیم عضو مهاربندی بر کمانش آن مقدم مي گردد. اين المان به عنوان يک عضو فدا شونده و يا به اصطلاح فیوز، با تغییر شکلهای خمشی و غیر الاستیک خود در هنگام زلزله، موجب استهلاک انرژی مخرب زلزله می گردد. از آنجایی که ظرفیت باربری حلقه فولادی از بار کمانش مهاربند کمتر در نظر گرفته می شود، اعضای اصلی سازه در حالت الاستیک باقیمانده و از آسیبدیدگی آنها جلوگیری میشود. در نتیجه تمامى خرابىها به المان حلقه محدود خواهد شد. آنها همچنين گزارش کردند که المان شکل پذیر حلقه فولادی، دارای منحنی هیسترزیس پهن و متقارن بوده و میتواند به عنوان جاذب بسیار مناسب انرژی زلزله در مهاربندهای هممحور به کار رود. از دیگر مزایای این ایده می توان به هزینه پایین، اجرای آسان و امکان تعویض حلقه فولادی بعد از آسیب دیدن آن در زلزله اشاره و تولید انبوه آن را به عنوان یک سیستم اجرایی در کشور معرفی کرد.



شکل ۱- نحوه جانمایی حلقه فولادی در مهاربند قطری (Abbasnia و همکاران، ۲۰۰۸)

المان حلقه فولادی را میتوان در انواع مهاربندها بهکار برد. Bazzaz و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۵) شکلپذیری و جذب انرژی حلقه فولادی در مهاربندهای نیم دروازهای را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که المان حلقه قابلیت جذب بالای انرژی زلزله در سیستم مهاربند دروازهای را دارد و میتواند به عنوان یک فیوز سازهای، جهت افزایش شکلپذیری در این مهاربندها به کار رود. این نتیجه در راستای تحقیق Esmaeeli (۲۰۱۱) نیز میباشد.

ظرفیت باربری حلقه فولادی تابعی از طول، شعاع، ضخامت و تنش تسیم آن است و این امر موجب می شود تا با تغییر هر یک از عوامل فوق بتوان امكان طراحي المان حلقه متناسب با نيازهاي سازه را فراهم نمود (Abbasnia و همکاران، ۲۰۰۸). با افزایش نیروی محوری مهاربند، میبایست قطر حلقه کاهش و ضخامت آن افزایش یابد. به عبارت دیگر، ظرفیت باربری المان حلقه محدود بوده و با افزایش قطر، میزان شکلپذیری آن کاهش و با افزایش ضخامت، میزان شکل پذیری آن افزایش می یابد. اگرچه ظرفیت باربری المان حلقه به عنوان یک فیوز سازهای میبایست همواره کمتر از نیروی محوری مهاربندها در نظر گرفته شود، ولی با افزایش ظرفیت مهاربندی ناگزیر به استفاده از فیوزهای با ظرفیت بالاتر خواهیم بود. لیکن استفاده از حلقههای موجود در بازار و مقرون به صرفه بودن مصالح، مسئله مهمی است که باید بدان توجه گردد. با توجه به این که لولههای بدون درز در قطر و ضخامتهای مختلف در بازار موجود نیست، لذا برای حل این مشکل روشهایی پیشنهاد شده است. از آن جمله میتوان به مطالعه Andalib و همکاران (۲۰۱۴) که به بررسی رفتار حلقههای ساخته شده از ورقهای فولادی در مهاربندهای هممحور پرداخته

شد، اشاره کرد. در این تحقیق مقایسهای بین حلقههای جوشی با خطوط مختلف جوش و حلقههای پیچی انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که اتصال حلقههای ساخته شده از ورق به ورقهای ولیکن در مدل پیچی امکان جداشدگی افزایش می ابد و ظرفیت باربری کاهش پیدا می کند. همچنین آزمایشهای انجام شده روی کاهش شکل پذیری شده و باعث رفتار ترد و شکننده آنها می شود. بنابراین پس از معرفی المان شکل پذیر حلقه فولادی به عنوان یک سیستم اتلاف انرژی غیرفعال نوین، تحقیقات جدید می بایست در جهت افزایش ظرفیت باربری آن انجام گیرد. به همین منظور پیشنهاد استفاده از حلقههای تودرتو با ضخامت کم موجود در بازار و پر کردن آنها با مواد مقاوم فشاری مطرح شد.

هدف از این مقاله، بررسی افزایش ظرفیت باربری المان شکل پذیر حلقه، با قرار دادن دو حلقه فولادی تودرتو و فاصلهدار که فضای بین آنها بهوسیله مواد پلاستیک صنعتی به نام تفلون پر شده است، میباشد. این المان جدید مانند یک فیوز خمشی برای محدوده بارهای وارده عمل کرده و از ورود دیگر اعضای سازه به مرحله غیرخطی جلوگیری مینماید. بدین منظور رفتار المان جدید توسط مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی با استفاده از نرمافزار المان محدود غیرخطی ABAQUS (۲۰۱۱) مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۲- مشخصات المان مورد مطالعه

شکل (۲)، ابعاد المان پیشنهادی و چگونگی قرارگیری آن در نقطه اتصال یک مهاربند قطری به صفحه اتصال گوشه را نمایش میدهد. بر این اساس، المان موردنظر از دو حلقه فولادی با قطر خارجی ۱۷۰ و ۹۰ میلیمتر و قطر داخلی ۱۵۶و ۸۰ میلیمتر و با طول ۵۰ میلیمتر از لوله مانیسمان (بدون درز) از نوع ST37 تهیه شده است.

دو حلقه فولادی توسط چهار پیچ پر مقاومت با رده مقاومتی ۸/۸ و به صورت عمود بر هم و با قطر و طول به ترتیب ۱۰ و ۷۰ میلیمتر به هم متصل شدهاند و فضای بین آنها بهوسیله ماده پلاستیک صنعتی (یا تفلون) پرشده است. مشخصات مکانیکی حلقه و ورقهای اتصال و ماده پرکننده تفلون در جدول (۱) ارائه شده است.







(ب) شکل ۲- مشخصات المان پیشنهادی و چگونگی قرارگیری آن در مهاربند هممحور

جدول ۱- مشخصات مکانیکی اعضاء اجزاى مدول تنش تنش تشكيل كرنش الاستيسيته نهایی تسليم دهنده  $(N/mm^2)$ نهایی المان (N/mm<sup>2</sup>)  $(N/mm^2)$ پیشنهادی حلقهها و ۲/۱×۱۰<sup>۵</sup> ۰/٣ ۳۷۰ 74. ورقهای اتصال مادہ 10. ٠/٣ ۲۴ ۱۵ پر کنندہ (تفلون)

#### ۳- آزمایش حلقه فولادی مرکب

مطابق شکلهای (۳) و (۴)، برای اتصال المان شکلپذیر موردنظر به دستگاه آزمایش، از ورقهای فولادی از نوع ST37 استفاده شده است. در این پژوهش بار اعمالشده، بار چرخهای

شبیهسازی شده بار زلزله طبق پروتکل آییننامه ATC 40 (۱۹۹۲) میباشد که تاریخچه بارگذاری آن در شکل (۵) مشاهده میگردد. بر این اساس، ماکزیمم جابهجایی بارگذاری برابر ۲۴ میلیمتر و تعداد چرخههای با دامنه جابهجایی ماکزیمم برابر ۴ و جابهجایی تسلیم میراگر برابر ۵ میلیمتر مفروض میباشد.

در این آزمایش، نیرو توسط دو جک فشاری با ظرفیت ۲۰ تن و به صورت چرخهای اعمال میشود. مقادیر اندازه گیری شده در آزمایش به صورت نیرو- جابه جایی است و در هر مرحله میزان جابه جایی های قائم حلقه توسط دو کرنش سنج ۱۰ سانتی متری در اثر اعمال نیروی کششی و فشاری ثبت می شوند. یک کرنش سنج نیز روی ناودانی مهاربند نصب شده است تا به وسیله آن بتوان میزان انحراف عمودی سیستم آزمایش را کنترل نمود و در صورت وجود انحراف نسبت به اصلاح سیستم اقدام کرد.



شکل ۳- جزئیات ورقهای اتصال (ابعاد به سانتیمتر)





شكل ۴- جزئيات و نحوه انجام آزمايش



شکل ۵- تاریخچه بارگذاری در آییننامه ATC 40 (۱۹۹۲)

۳- ۱- نتایج آزمایش حلقه فولادی مرکب

شکل (۶)، المان پیشنهادی را در دو حالت کشش و فشار نشان می دهد. با اعمال نیروی فشاری، حلقه خارجی به خوبی تغییر شکل داده و به شکل بیضی در آمده است. با توجه به وجود مواد پلاستیکی پرکننده در فضای بین دو حلقه و پیچهای پر مقاومت، این پیچها در فشار ناشی از نیرو به خوبی مقاومت کرده و تغییر شکل و نیرو به خوبی به حلقه داخلی منتقل شده است که تغییر شکل حلقه داخلی نیز به خوبی قابل مشاهده است. مطابق نتیجه شکل حلقه داخلی نیز به خوبی قابل مشاهده است. مطابق نتیجه زمایشگاهی، در اثر اعمال نیروی کششی، شکست المان در حلقه خارجی و در محل اتصال حلقه به ورقهای اتصال رخ داده است. که در محل حداکثر لنگر خمشی پلاستیک اتفاق می افتد. در مرحله کشش که حلقه خارجی شکسته شد، تغییر شکلی در المان دیده نمی شود که نشان دهنده این است که مواد پلاستیکی به-خوبی بعد از شکست نیرو را منتقل نمی کنند و عملاً المان در کشش کار نمی کند.

در شکل (۷)، نتایج تحلیل بار چرخهای المان مورد مطالعه با عنوان منحنی هیسترزیس نیرو- جابهجایی قائم نشان داده شده است. بر این اساس، منحنی به دست آمده پهن بوده و نشان دهنده قابلیت بالای شکل پذیری المان میباشد و باوجود استفاده از مواد پرکننده در حلقه، جذب انرژی خوبی از خود نشان داده و ظرفیت حلقه در برابر تغییر مکان نسبت به تک حلقه فولادی (Abbasnia و همکاران، ۲۰۰۸) افزایش یافته است. برای بهتر نشان دادن رفتار المان، پوش منحنی هیسترزیس نیرو- جابهجایی قائم به یک نمودار دوخطی تبدیل شد. در این نمودار، مقدار vA با ترسیم منحنی الاستوپلاستیک معادل بر روی پوش منحنی هیسترزیس بار- تغییر مکان به دست میآید. مقدار uAنیز جابهجایی نهایی و یا تغییر شکل نظیر ۲۰ درصد افت بار حداکثر میباشد.



(الف)



شکل ۶- رفتار المان پیشنهادی تحت نیروی کششی و فشاری

در شکل (۸)، رفتار المان پیشنهادی در اثر اعمال بار چرخهای، توسط پوش منحنی هیسترزیس نیرو- جابهجایی قائم حلقه فولادی مرکب و نمودار دوخطی نشان داده شده است. همچنین در جدول (۲)، خلاصه منحنی عملکرد دو خطی و پوش منحنی هیسترزیس المان مورد مطالعه ارائه شده است.

مطابق شکل (۸)، رفتار المان در بارهای کششی و فشاری متفاوت است. المان موردنظر دارای بیشینه نیروی کششی به میزان ۹۹/۴۸ کیلونیوتن در جابهجایی ۱۶/۰۱ میلیمتر میباشد. درحالیکه این مقادیر در اثر اعمال نیروی فشاری به ترتیب ۱۰۱/۵۵ کیلونیوتن و ۱۱/۵۰ میلیمتر نتیجه شده است. بنابراین بیشینه نیروی فشاری ۲ درصد بیشتر از بیشینه نیروی کششی به دست آمده است.





شکل ۸- پوش منحنی هیسترزیس و منحنی عملکرد دوخطی المان پیشنهادی

Abbasnia و همکاران (۲۰۰۸) میزان ظرفیت باربری المان تک حلقه فولادی را در حالت کششی و فشاری به ترتیب ۸۷/۷ و کردند. بنابراین ظرفیت باربری المان مورد مطالعه در این پژوهش به میزان ۱۲ و ۲۸ درصد نسبت به المان تک حلقه افزایش یافته است. حضور پلاستیک فشرده در فضای بین حلقهها موجب گردید که ظرفیت فشاری المان بیشتر گردد. درحالیکه حلقه فولادی تنها دارای ظرفیت کششی بالاتری بود و دلیل آن تغییر قطر افقی حلقه و تأثیر آن بر بازوی بار در معادله تعادل حلقه می باشد.

میزان ضریب شکل پذیری المان مورد مطالعه ( $\mu$ ) در حالت اعمال نیروی کششی ( $^{\mu}$ ) و فشاری ( $^{-}\mu$ ) و ضریب شکل پذیری متوسط ( $_{ave}$ ) به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) ارائه شده است. Abbasnia و همکاران (۲۰۰۸) ضریب شکل پذیری المان حلقه فولادی تنها را ۴/۶۶ گزارش کردند که در این مطالعه ضریب شکل پذیری المان پیشنهادی به میزان ۴۷ درصد کمتر از ضریب شکل پذیری حلقه فولادی تنها بهدست آمده است. این موضوع

می تواند به دلیل وجود مواد پرکننده پلاستیکی با مقاومت فشاری بالا در فضای بین حلقه ها باشد. همچنین سختی الاستیک اولیه المان مورد مطالعه در دو حالت اعمال نیروی کششی  $(K_e^+)$  و فشاری  $(K_e^-)$  به ترتیب در روابط (۴) و (۵) ارائه شده است. این سختی نسبت به حلقه فولادی تنها در حالت کششی و فشاری به ترتیب به میزان ۱۶ و ۱۰ درصد کاهش یافته است.

$$\mu^{+} = \frac{\Delta_{u}^{+}}{\Delta_{y}^{+}} = \frac{16.01}{5.78} = 2.77 \tag{1}$$

$$\mu^{-} = \frac{\Delta_{u}^{-}}{\Delta_{y}^{-}} = \frac{11.5}{5.32} = 2.16 \tag{(7)}$$

$$\mu_{ave} = \frac{\mu^+ + \mu^-}{2} = \frac{2.77 + 2.16}{2} = 2.47 \tag{(7)}$$

$$K_e^+ = \frac{P_y}{\Delta_y^+} = \frac{99.48}{5.78} = 17.21 \text{ KN}$$
 (\*)

$$K_e^- = \frac{P_y}{\Delta_y^-} = \frac{101.55}{5.32} = 19.09$$
 KN ( $\Delta$ )

مقدار	پارامتر	
عملکرد کششی		
174/4.	$P_{max}^+(KN)$	
۹٩/۴۸	$P_u^+(\mathrm{KN}) = 0.8  P_{max}^+$	
18/•1	$\Delta_u^+(\text{mm})$	
۵/YA	$\Delta_y^+(mm)$	
1 Y/T 1	$K_e^+$	
عملكرد فشارى		
188/90	$P_{max}^{-}(KN)$	
1 • 1/۵۵	$P_u^-(\mathrm{KN}) = 0.8 \ P_{max}^-$	
۱ ۱/۵ •	$\Delta_u^-(mm)$	
۵/۳۲	$\Delta_{\mathcal{Y}}^{-}$ (mm)	
۱۹/۰۹	$K_e^-$	

جدول ۲- رفتار کلی المان مورد مطالعه تحت بار چرخهای

منحنیهای انرژی - جابهجایی قائم و انرژی تجمعی -جابهجایی قائم المان مورد مطالعه به ترتیب در شکلهای (۹) و (۱۰) ارائه شده است. با توجه به چرخه بارگذاری آزمایش، در هر مرحله انرژی جذب شده محاسبه و سپس به صورت تجمعی این انرژیها محاسبه گردیده است. مطابق شکل (۹)، مقدار ماکزیمم انرژی در چرخههای غیر الاستیک برابر با ۵۵۴ ژول و مقدار ماکزیمم انرژی در چرخههای الاستیک برابر با ۲۶۰ ژول می باشد. این مقادیر در خصوص المان تک حلقه فولادی به ترتیب ۴۱۹۸/۵

قادر است تا در آخرین چرخه غیرالاستیک و الاستیک به ترتیب تا ۳۱ و ۵۸ درصد جذب انرژی بالاتری از خود نشان دهد. مطابق از ۲۱ برابر انرژی آخرین چرخه الاستیک میباشد که بیانگر این مفهوم است که جذب انرژی در چرخههای غیرالاستیک بسیار بیشتر از چرخههای الاستیک میباشد. بر این اساس، المان مورد مطالعه با داشتن شکل پذیری بالا به عنوان فیوز سازهای تحت بار چرخهای معرفی می گردد. مطابق شکل (۱۰)، مجموع انرژی مستهلک شده المان مورد مطالعه در کل آزمایش برابر با ۳۴۰۰ ژول میباشد. بنابراین المان موردنظر از لحاظ جذب انرژی بالا در محدوده غیرخطی، گزینه مناسبی جهت نصب در مهاربندهای هم-ومطالعات محققان میاشد. جدول (۳)، مقایسه عملکردی المان همکاران (۲۰۰۶) میباشد. جدول (۳)، مقایسه عملکردی المان مورد مطالعه و المان تک حلقه فولادی را نشان میدهد.

$$\frac{E_P}{E_e} = \frac{5543}{260} = 21.32\tag{(6)}$$



شکل ۹- منحنی انرژی- جابهجایی قائم المان مورد مطالعه



المان مورد مطالعه

جدول ۳- مقایسه رفتاری المان پیشنهادی با المان تک حلقه

المان المان المان المان تک   نیشنهادی پیشنهادی حلقه فولادی   ظرفیت باربری کششی (کیلونیوتن) ۸۹/۴۸ ۷۲/۷   ظرفیت باربری فشاری (کیلونیوتن) ۵۵/۱۰۰ ۷۳/۷   ضریب شکلپذیری ۲/۴۷ ۹۹/۶۶   بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای ۳۶۰۰ ۵۵/۱۰۰   بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای ۲۶۰۰ ۳۶۰۸   الاستیک (ژول) ۲۶۰۰ ۲۶۰۰   الاستیک (ژول) ۲۶۰۰ ۲۶۰۰	فولادى		
پیشنهادی حلقه فولادی   ظرفیت باربری کششی (کیلونیوتن) ۸۹/۴۸ ۷/۷۸   ظرفیت باربری فشاری (کیلونیوتن) ۸۹/۴۸ ۷۳/۷   ضرفیت باربری فشاری (کیلونیوتن) ۸۹/۴۸ ۷۳/۷   ضریب شکلپذیری ۷۴ ۹۹/۴۸   سیت باربری فشاری (کیلونیوتن) ۸۹/۴۸ ۹۹/۴۸   فریت باربری فشاری (کیلونیوتن) ۸۹/۴۸ ۹۹/۴۸   سیشترین انرژی جذب شده در چرخههای ۳۶۰ ۹۹/۴۸   بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای ۲۶۰ ۹۹/۴۸   الاستیک (ژول) ۲۶۰ ۹۹/۴۸	المان تک	المان	
ظرفیت باربری کششی (کیلونیو تن) ۸۹/۴۹ ۷۲/۸   ظرفیت باربری فشاری (کیلونیو تن) ۵۵/۴۰ ۷۳/۷   ضریب شکل پذیری ۲/۴۷ ۶۹/۶۰   بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای ۳۹۵۸۵ ۵۵/۴۰   فیرالاستیک (ژول) ۲۶۰ ۲/۹۸   الاستیک (ژول) ۲۶۰ ۲۶۰	حلقه فولادى	پیشنه <i>ادی</i>	
ظرفیت باربری فشاری (کیلونیوتن) ۱۰۱/۵۵ ۷۳/۷ ضریب شکلپذیری ۲/۴۷ ۴/۶۶ بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای غیرالاستیک (ژول) بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای ۱۴۰۰ ۲۶۰ ۲۶۰	AY/Y	१९/۴٨	ظرفیت باربری کششی (کیلونیوتن)
ضریب شکل پذیری ۲/۴۷ ۴/۶۶ بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای غیرالاستیک (ژول) بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای الاستیک (ژول)	٧٣/٧	۱۰۱/۵۵	ظرفیت باربری فشاری (کیلونیوتن)
بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای غیرالاستیک (ژول) بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای الاستیک (ژول)	4199	۲/۴۷	ضریب شکلپذیری
غیرالاستیک (ژول) بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای الاستیک (ژول)	F191/0 00FT	A A F W	بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای
بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای الاستیک (ژول)		6611	غيرالاستيک (ژول)
الاستيک (ژول)	۳۷/۸۶	78.	بیشترین انرژی جذب شده در چرخههای
			الاستيک (ژول)

#### ۴- مدلسازی و تحلیل نظری المان مورد مطالعه

محلیل نظری المان مورد مطالعه در نرمافزار ABAQUS و به صورت سهبعدی انجام شد. برای مدلسازی المان پیشنهادی در نرمافزار از المان C3D8R که یک المان سهبعدی ششوجهی هشت گرهی میباشد، استفاده شده است. همچنین جهت در نظر گرفتن اثرات پیچها روی المان، از سطح تماس Tie که موجب می گردد رفتار حلقهها در کشش و فشار در آن نواحی یکسان گردد، بهره گرفته شد. درحالی که سایر نواحی المان توسط سطح تماس Surface to Surface المان توسط منحنی تنش- کرنش ماده پرکننده تفلون جهت استفاده در نرم-افزار، ارائه شده است. بارگذاری المان تحت اثر بار چرخهای طبق پروتکل آیین مده 10 ATC (۱۹۹۲) انجام شده است.

در شکل (۱۲)، توزیع تنش فون مایزس و گسیختگی در المان پیشنهادی تحت بارگذاری یک سیکل و در اثر بار کششی نشان داده شده است. بر این اساس، تنشهای محیطی در حلقه خارجی از تنشهای محیطی حلقه داخلی و ماده پرکننده تفلون بیشتر است. بنابراین شکست المان مطابق نتیجه آزمایشگاهی در حلقه خارجی و در محل اتصال حلقه به ورقهای اتصال رخ میدهد. بر این اساس، نرمافزار المان محدود ABAQUS برای تحلیل غیرالاستیک المان مورد مطالعه مناسب میباشد.



شکل ۱۱- نمودار تنش- کرنش دوخطی تفلون در نرمافزار ABAQUS



شکل ۱۳- مقایسه منحنی هیسترزیس آزمایشگاهی و تحلیلی نیرو - جابهجایی قائم المان مورد مطالعه

Andalib و همکاران (۲۰۱۴) با بهکارگیری المان تکحلقه در مهاربندهای نیم دروازهای، گزارش کردند که ظرفیت باربری المان در کشش و فشار به ترتیب ۱۱۴/۶۴ و ۸۴/۴۲ کیلونیوتن میباشد. درحالی که میزان جذب انرژی المان حدود ۴۲۰۰ ژول محاسبه گردید. در مقایسه نتایج المان پیشنهادی در این مطالعه میتوان متذکر شد که میزان جذب انرژی در صورت بهکارگیری حلقههای تودرتو و پلاستیک فشرده در فضای بین آنها تا ۳۲ درصد افزایش میابد.

#### ۵- نتیجهگیری

در این مقاله، افزایش ظرفیت باربری حلقه فولادی به عنوان یک فیوز خمشی جهت افزایش شکل پذیری و کنترل کمانش عضو فشاری مهاربندهای هممحور، به شیوه نوینی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، المان حلقه فولادی مرکب که از دو حلقه متداخل فولادی و ماده پلاستیکی با مقاومت فشاری بالا تشکیل شده است، مورد ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی قرار گرفت. در بررسیهای آزمایشگاهی مشخص شد که المان پیشنهادی دارای قابلیت جذب بالای انرژی زلزله در سیکلهای رفت و برگشتی است و می تواند گزینه مناسبی جهت نصب در مهاربندهای هم محور به حساب آید. همچنین ظرفیت کششی المان شکل پذیر پیشنهادی به میزان ۹۹/۴۸ کیلونیوتن در جابهجایی ۱۶/۰۱ میلیمتر می باشد. این مقادیر در خصوص ظرفیت فشاری به ترتیب ۱۰۱/۵۵ کیلونیوتن و ۱۱/۵۰ میلیمتر میباشد. در المان پیشنهادی، ضریب شکل پذیری نسبت به تک حلقه فولادی کاهش می یابد. این در حالی است که ظرفیت کششی و فشاری آن افزایش یافته است. المان پیشنهادی قادر است که در حالت غیرالاستیک بیش از ۲۱ برابر حالت الاستیک، انرژی زلزله را جذب نماید که این حکایت از شکل یذیری المان مورد مطالعه دارد. در مدل سازی عددی المان پیشنهادی نیز مشخص شد که نتایج تحلیل سهبعدی المان با نرم-افزار ABAQUS از دقت لازم برخوردار بوده و با نتایج آزمایشگاهی



(الف)



محل ۱۱- توریع نیس فون مایرس و نسیختگی در آلما مورد مطالعه

جهت صحتسنجی مدلسازی تحلیلی از تطابق منحنیهای هیسترزیس آزمایشگاهی و تحلیلی نیرو- جابهجایی قائم المان استفاده گردید که در شکل (۱۳) نشان داده شده است. چنان که مشاهده می گردد، بین دو منحنی آزمایشگاهی و تحلیلی انطباق خوبی برقرار است و میزان جذب انرژی بالایی از خود نشان میدهند. همچنین ظرفیت باربری المان در تحلیل آزمایشگاهی و عددی به یکدیگر نزدیک است. مطابق شکل (۱۳)، ظرفیت کششی و فشاری تحلیلی المان موردنظر از نتایج نظیر آزمایشگاهی کمتر است. بر این اساس، نیروی قابل تحمل المان مورد مطالعه در حالت کششی و فشاری به ترتیب ۱۱۷/۵ و ۱۱۳/۶ کیلونیوتن نتیجه شده است. این مقادیر نسبت به ظرفیت کششی و فشاری المان در آزمایشگاه، به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد کاهش را نشان میدهند. با توجه به عدم تأثير تغيير شكل هندسى حلقه در نرمافزار، اين موضوع در مطالعه Abbasnia و همکاران (۲۰۰۸) نیز به چشم مىخورد. بنابراين طراحى المان موردنظر بر اساس نتايج تحليلى در جهت اطمینان می باشد.

- Maheri MR, Akbari R, "Seismic behavior factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings", Journal of Engineering Structures,2003, 25 (12), 1505-1513.
- Malek S, Pabsang P, Lohghalam A, "Introducing a new inactive dissipate system and comparing it with TADAS dissipate", First International Congress on Seismic Retrofitting, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2006.
- Marshall JD, Charney FA, "A hybrid passive control device for steel structures", I: Development and analysis, Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66 (10), 1278-1286.
- Marshall JD, Charney FA, "A hybrid passive control device for steel structures", II: Physical testing, Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66 (10), 1287-1294.
- Mualla IH, Belev B, "Performance of steel frame with a new friction damper device under earthquake excitation", Journal of Engineering Structures 2002, 24 (3), 365-371.
- Murthy ANCK, "Application of Visco-Hyperelastic Devices in Structural Response Control structures", The Degree of Master of Sciense, Civil Engineering Department, Blacks-burg Polytechnic Institute, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- Pall AS, Marsh C, "Response of friction damped braced frames", Journal of Structural Division, 1982, 108, No. ST6.
- Rezaieian A, "Improving earthquake behavior of concentrically braced frames by being ductility them", Civil Engineering M.Sc. Thesis, Civil Engineering Department, Science & Technology University of Iran, Iran, 2002.
- Roufegarinejad A, Sabouri S, "Nonlinear behavior of yielding damped bracing frames", 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, 2002.
- Tehranizadeh M, "Passive energy dissipation device for typical steel frame building in Iran", Journal of Engineering Structures, 2000, 23 (6), 643-655.
- Thomopoulos K, Koltsakis E, "Connections of CHS concrete-filled diagonals of X-bracings", Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59 (6), 665-678.
- Tsai KC, EERI M, Chen HW, Hong CP, Su YF, "Design of steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic Resistant Construction", Journal of Earthquake Spectra, 1993, 9 (3), 505-528.
- Vetr MG, "Seismic behavior analysis and design of vertical sheering", Ph.D. Dissertation, T.U. Darmeatadt Germang, 1997.
- Vetr MG, Abbasnia R, Kafi MA, "Energy absorption increase in braced frame with concentrically braces", First International Congress on Seismic Retrofitting, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2006.

انطباق خوبی دارد. همچنین تحلیل نظری، نیروی قابل تحمل المان مورد مطالعه را در اثر اعمال نیروی کششی و فشاری به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد از نتایج آزمایشگاهی کمتر نشان میدهد. بر اساس نتایج تحلیلی، بیشترین تنشهای محیطی در حلقه خارجی و در محل اتصال به ورقهای فولادی رخ میدهد. یعنی همان محلی که المان موردنظر در آزمایشگاه از آنجا گسیخته شد.

#### ۶- مراجع

- Abbasnia R, Vetr MG, Ahmadi R, Kafi MA, "Experimental and Analytical Investigation on the Steel Ring Ductility", Sharif Journal of Science and Technology, 2008, 52, 41-48.
- Abbasnia R, Vetr MG, Kafi MA, "A study on functionality of dutiable element in ductility concentrically braces", 7<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2006.
- Andalib Z, Kafi MA, Kheyroddin A, Bazzaz M, "Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates", Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103, 77-88.
- ATC40. Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures, Washington (DC), 1992.
- Balendra T, Lim EL, Liaw CY, "Large-Scale Seismic Testing of Knee-Brace-Frame", Journal of Structural Engineering, 1997, 123 (1), 11-19.
- Bazzaz M, Kheyroddin A, Kafi MA, Andalib Z, "Evaluation of the seismic performance of off-center bracing system with ductile element in steel frames", Steel and Composite Structures, 2012, 12 (5), 445-464.
- Bazzaz M, Andalib Z, Kafi MA, Kheyroddin A, "Evaluating the performance of OBS-C-O in steel frames under monotonic load", Earthquakes and Structures, 2015, 8 (3), 697-710.
- Butterworth J, "Ductile concentrically braced frames using slotted bolted joints", SESOC Journal, 2000, 13 (1), 39-48.
- Chen CC, Lu LW, "Development and experimental investigation proceedings of a ductile CBF system", the 4<sup>th</sup> National Conference of Earthquake Engineering, 1990, 2, 575-584.
- Clark W, Tasia K, Aiken ID, Kimura I, "Evaluation of design methodologies for structures incorporating steel unbounded braces for energy dissipation", Proceedings of the 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, 2000, 22-40.
- Esmaeeli H, Kheyroddin A, kafei MA, Nikbakht H, "Comparison of Nonlinear Behavior of Steel Moment Frames Accompanies with RC Shear Walls or Steel Bracings" Journal of the Structural Design of Tall and Special Buildings, 2013, 22 (14), 1062-1074.
- Grigorian CE, Yang TS, Popov EP, M EERE, "Slotted bolted connection energy dissipaters", Journal of Earthquake Spectra, 1993, 9 (3), 491-504.
- Hibbitt D, Karlsson B, Sorensen P, "Abaqus Standard User's Manual", Version (6.11-3), 2011.



### **EXTENDED ABSTRACT**

# Experimental and Analytical Study on Ductility of Steel Ring Filled with Compressive Plastic, Situated in Concentric Bracing System

Mohammad Ali Kafi<sup>\*</sup>, Ali Kheyroddin, Mohammad Hajforoush

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan 3513119111, Iran

Received: 01 August 2017; Accepted: 23 September 2018

#### **Keywords**:

Experimental, Finite element, Steel ring, Ductility, Braced frame.

#### 1. Introduction

Over the past few decades, a number of researches have been conducted to enhance the ductility of concentric braces, located in the plane of the frame as diagonal braces. The seismic performance of concentric braces is low because of their poor ductility. Therefore, some building codes, limit their usage. As mentioned by Murthy (2005), one of the weaknesses of these systems is lower ductility and early buckling under compressive loading. Various methods have been studied to increase the ductility of concentric braces. Bending members compared to axial members have more ductility. Hence, adding one bending member to the concentric bracing system leads to an increase in the ductility of such frames. The use of energy-dissipating fuses with bending is one such method (Thomopoulos, 2003). Regarding this, the usage of steel rings made of steel pipes as an energy dissipater has been considered for solving the weakness of ductility. The geometry of the steel ring would be changed provided that bending was applied. Eventually, these changing cause dissipation of energy from bending operation. The ductile bracing system has been commonly used throughout the world, and recently, it has gained wide attention for many applications in steel structures in order to increase the force reduction factor.

Following this, the main objective of this study is to assess evaluate experimentally the dynamic behavior of steel ring filled with compressive plastic (S.R.P.) situated at the intersection of the braces. In addition, this connection was modeled by means of finite element (FE) method employing ABAQUS software, where the effect of this type of connection on the performance and bearing capacity was investigated.

#### 2. Methodology

#### 2.1. Experimental study

The configuration of the S.R.P. ring is shown in Fig. 1, where ST37 steel was used for inner and outer rings. Another matter is that the plastic ring with high compressive strength was installed between two steel rings. The diameters of inner and outer steel rings are 90 and 170 mm, respectively. Meanwhile, the thickness of them is equal to 7mm. The subjected load in this research is cyclic for simulation of earthquake loads. The method of loading is according to the proposed method of ATC 40 code (1992). After preparation, the connection was embedded in the apparatus for applying a load, and then the related strain gauge and displacement gauge were attached. Later on, loading was performed using a hydraulic jack.

\* Corresponding Author

*E-mail addresses:* mkafi@semnan.ac.ir (Mohammad Ali Kafi), kheyroddin@semnan.ac.ir (Ali Kheyroddin), mhajforoush@semnan.ac.ir (Mohammad Hajforoush).



Fig. 1. Test configuration

#### 2.2. Numerical modeling

Based on the experimental data and results and to study the ductile specimen in more detail, the numerical software ABAQUS was used to model the ring, and the computational and experimental results were compared.

#### 3. Results and discussion

#### 3.1. Test results

Fig. 2 shows the hysteresis loops push force-vertical displacement plot. The maximum vertical displacement and corresponding vertical displacement of the system at the end of the tensile elastic limit are 16.01 mm and 5.78 mm, respectively. The maximum vertical displacement and corresponding vertical displacement of the system at the end of the compressive elastic limit are 11.50 mm and 5.32 mm, respectively. Concerning this matter, the brace with the S.R.P. ring shows a steady and wide hysteresis curve where a tensile ductility factor of 2.77 was achieved. The total dissipated energy at the end of the loading cycle is 33400 J.



Fig. 2. Hysteresis loop push force-displacement plot

#### 3.2. Investigation of stress distribution values in FE model

Based on an experimental study, as presented in Fig. 3, experimental results and numerical model were compared to each other. As shown in Fig. 3, the accuracy of the FE models is confirmed using outputs of experimental studies where the numerical curve has a good compatibility with the experimental curve. Another matter is that the maximum stress of this connection was obtained numerically in the failure zone, as indicated in experimental results (Fig. 4).



Fig. 3. Comparative hysteresis plots for the test



Fig. 4. Numerical model S.R.P.

#### 4. Conclusions

Results indicate that the S.R.P. constructed from steel plates and plastic has a suitable performance relative to the pipe ring and exhibits good ductility and energy absorption. The increase in displacement of element contribute to the reduction of displacement for the frame and therefore leading to more dissipation of energy using S.R.P. connection. In addition, this connection can enhance the ductility of concentric braces in seismic loads. Furthermore, the maximum tensile load and corresponding vertical displacement were 99.48 KN, 16.01 mm, respectively, and also the maximum compressive load and corresponding vertical displacement were 101.55 KN and 11.50 mm, respectively.

#### **5. References**

ATC40. Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures, Washington (DC), 1992.

Bazzaz M, Andalib Z, Kafi M A, Kheyroddin A, "Evaluating the performance of OBS-C-O in steel frames under monotonic load", Earthquakes and Structures, 2015, 8 (3), 697-710.

Hibbitt D, Karlsson B, Sorensen P, "Abaqus Standard User's Manual", Version (6.11-3), 2011.

- Murthy ANCK, "Application of Visco-Hyperelastic Devices in Structural Response Control", The Degree of Master of Sciense, Civil Engineering Department, Blacks-burg Polytechnic Institute, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- Thomopoulos K, Koltsakis E, "Connections of CHS concrete-filled diagonals of X-bracings", Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59 (6), 578-665.