

## میراگر فلزی پوسته‌ای تودرتو با رویکرد بهبود در رفتار هیستریزیس

علیرضا رئیسی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا میردامادی<sup>۲</sup>، محمدعلی رهگذر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی (واحد اصفهان (خوراسگان))، اصفهان، ایران.  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.  
<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۲  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶

### کلمات کلیدی:

کنترل کنشگیر  
میراگر هیستریزیس  
میرایی انرژی  
روش اجزا محدود  
آزمون بارگذاری

**خلاصه:** با بهره‌گیری از ایده‌ی مهار سازه‌ها با استفاده از ابزارهای میراکننده‌ی انرژی زلزله، میراگر نوینی به نام میراگر پوسته‌ای تودرتوی ناهم‌راستا توسط نگارندگان این پژوهش پیشنهاد شده است. ساختمان این میراگر از یک پوسته‌ی استوانه‌ای بزرگ فلزی که سه پوسته‌ی استوانه‌ای کوچک را در بر گرفته است، ساخته شده است. برای ساخت این میراگر از روش‌های جوشکاری یا ریخته‌گری فلز می‌توان بهره برد. چیدمان عضوهای پوسته‌ای این میراگر در فرایند بارگذاری لرزه‌ای می‌تواند به‌سان فنرهای فرابازگشتی با ترکیب سری و موازی سبب بالارفتن عملکرد دستگاه شوند. برای ارزیابی عملکرد دستگاه، مدل‌هایی از این میراگر به روش آنالیز عددی (اجزا محدود) آنالیز و داده‌های بدست آمده با دو نمونه‌ی آزمایشگاهی هم‌سنجی شده است. نمودارهای چرخه‌ای بدست آمده از آزمایش در هم‌سنجی نتایج عددی به کارگرفته شده است تا داده‌های مهم مکانیکی مانند میرایی، سختی مؤثر و نیروی تسلیم که برای استفاده از میراگرها در سازه‌ها مورد نیاز است از آنالیز عددی معتبر بدست آید. در این پژوهش برای ارتقا در عملکرد دستگاه و اندرکنش بیشتر عضوهای داخلی این میراگر، نسبتی برای ضخامت پوسته‌ها پیشنهاد شده است و با تحلیل‌های عددی، سودمندی در نظر گرفتن این نسبت در ضخامت عضوهای داخلی میراگر با ارزیابی داده‌های مکانیکی بدست آمده و مقایسه آنها با نمونه‌های ابتدایی به اثبات رسیده است. همچنین در نمودارهای چرخه‌ای بارگذاری که از تحلیل‌های عددی بر روی این میراگر ارتقا یافته حاصل شده است، نتایج مناسب تری در میرایی انرژی و سایر ویژگی‌های مکانیکی برای این میراگر به دست آمده است.

### ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که مهندسان سازه (و زلزله) با آن روبه‌رو هستند، حفظ ایمنی جانی ساکنان در برابر خطرهای ناشی از زمین‌لرزه است. در طراحی‌های سنتی، همه‌ی عضوهای سازه به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که کارکرد آنها در برابر نیروهای جانبی مانند زمین‌لرزه، در ناحیه‌ی بازگشتی<sup>۱</sup> (ارتجاعی) قرار گیرد، بدین‌سان در رویکردهای نوین طراحی، سازه‌ها به شیوه‌ای طراحی می‌شوند که عضوهای پایه‌ای که فراهم‌کننده‌ی پایداری در سازه هستند با بیشینه مقاومت طراحی شوند و عضوهای ناپایه‌ای که فروریزی جزئی در آنها

عامل فروپاشی در سازه نمی‌گردد، امکان تغییرشکل‌های فرابازگشتی<sup>۲</sup> در آنها مهیا شود. در این روش طراحی، پاره‌ی بیشینه‌ی انرژی ورودی از زمین‌لرزه، توسط این عضوها گرفته و میرا می‌شود [۱-۳]. بهره‌گیری از سامانه‌های ویژه‌ای که در سازه بتوان دیدگاه بالا را پیاده‌سازی نمود به گسترش روش‌های نوینی در طراحی سازه انجامیده است که با نام «مهار (کنترل) سازه» شناخته می‌شود که خود به رسته‌های گوناگونی: مهار کنشگر<sup>۴</sup> (کنترل فعال)، مهار نیمه کنشگر<sup>۵</sup> (کنترل نیمه فعال) و مهار کنشگیر<sup>۶</sup> (کنترل غیرفعال)،

2 Plastic  
3 Control Structure  
4 Active Ccontrol  
5 Semi-active Control  
6 Passive Control

1 Elastic

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alireza\_reisi@yahoo.com



بادبندهای کمانش تاب فلزی [۱۳، ۱۴] را نیز نام برد. عملکرد مکانیکی میراگرهای پرکاربردی که در بالا بیان شد همگی برپایه ی جاری شدن ورق های فلزی در ساختمان میراگرها است گرچه به تازگی پژوهش هایی در ارتباط با به کارگیری مواد و متریال های ویژه با خواص برگشت پذیر بالا نظیر استفاده از آلیاژهای حافظه دار [۱۵، ۱۶] در عضوهای الحاقی به سازه ها نیز شده است، ولی با توجه به توان بیشتر پوسته ها در برتافتن نیروهای خارجی، برای اولین بار میراگر لوله ای (پوسته استوانه ای) با فکر ساده ی به کارگیری لوله برای ساخت میراگر، پیشنهاد و مورد آزمایش قرار گرفت [۱۷-۱۹]. این میراگر با وجود سادگی، از کارایی بسیار خوبی در برآوردن میرایی در سازه برخوردار است. میراگر پوسته ای هم راستا کوششی در بهبود ساختمان میراگرهای پوسته ای و به کارگیری مفهوم دو یا چند سطح کنترل برای میراگرها است [۲۰]. در ادامه برپایه ی ساختمان میراگرهای پوسته ای، میراگری معرفی خواهد شد که در آن از ترکیب چیدمان پوسته های استوانه ای در راستای افزایش عملکرد میراگرهای پوسته ای استفاده شده است.

## ۲- ساختمان میراگر

ساختمان میراگر پیشنهادی براساس پوسته های استوانه ای تودرتوی ناهم راستا (NESD)<sup>۶</sup> طراحی شده است [۲۱]. شکل ۱ شمای این دستگاه را نشان می دهد. این میراگر از چهار پوسته ی استوانه ای (یا لوله) به قطر بیرونی ۴۰۶، ۲۱۹ و ۱۶۸ میلی متر و طول ۱۵۰ میلی متر با ضخامت های گوناگون برای پوسته ها ساخته شده است. همه ی ابعاد به کار رفته براساس استاندارد لوله های سازمان نفت امریکا<sup>۷</sup> [۲۲]، انتخاب شده است. قطرهای هریک از پوسته ها با توجه به هندسه ی قرارگیری لوله های درونی در لوله ی بیرونی برگزیده شده است. بنابراین، با تغییر در ضخامت پوسته های بیرونی و درونی می توان به بازه ی ظرفیت وسیعی برای این میراگر دست یافت. از این روی ابعاد پوسته ها یکتا پنداشته شده است و تنها ضخامت آنها تغییر خواهد کرد.

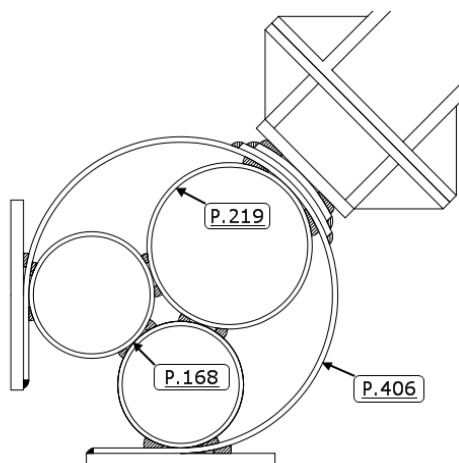
چیدمان پوسته های درونی به گونه ای برگزیده شده است که بسان ترکیبی از فنرهای سری و موازی کار کنند. پوسته ی بیرونی 406.P به منزله ی پوسته ی محیطی و عضو اصلی، کارکرد هدایت

دسته بندی می شوند [۴]. بهره مندی از روش های مهار سازه ها، برای افزایش میرایی، جایگزین روش های پیشین طراحی سازه ها شده است. این سامانه ها نقش عضوهای مهارکننده ی رفتار دینامیکی سازه را به عهده می گیرند تا سهمی از انرژی ورودی از زمین لرزه را که - در نبود آن ها - به طور مستقیم به همه ی عضوهای سازه منتقل می شود در خود گرفته و میرا کنند. با این رویکرد عضوهای مکانیکی ویژه ای برای سازه ها تعریف و طراحی خواهد شد که به وسیله ی آن بتوان عمل کرد سازه را در تعریف عضوهای پایه ای (پایدار) و عضوهای ناپایه ای برای میرایی انرژی ورودی به سازه، بهتر نمود. میراگرهای کنشگیر که معرفی یک گونه ی کاربردی آن هدف این پژوهش است، بیشتر به سرچشمه ی بیرونی انرژی نیاز نداشته و کنش آن ها نیازمند حرکت (و سرعت) بارگذاری در سازه است. از کاربردی ترین افزارهای کنشگیر میرایی، می توان میراگرهای جاری شونده<sup>۱</sup> (تسلیمی)، سایشی<sup>۲</sup> (اصطلاکی) و سیال لزج<sup>۳</sup> (ویسکوز) را نام برد [۵]

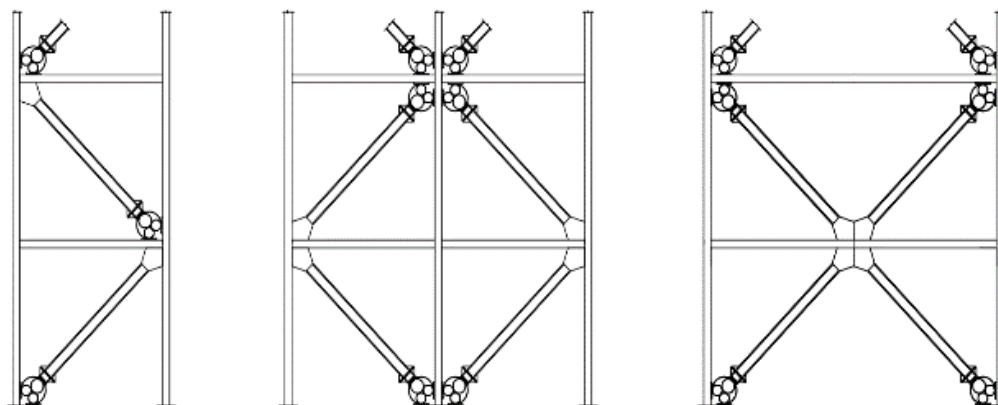
از بین پرکاربردترین سازوکارهای میرایی انرژی، میراگرهای جاری شونده ی فلزی است که در ساختمان آنها از مواد و مصالح فلزی با توانایی جاری شوندگی بالا استفاده می شود. یکی از شناخته شده ترین افزارهایی که در این گروه می توان نام برد با نام میراگر (ADAS)<sup>۴</sup> شناخته می شود [۶]. این میراگر به شکل ساعت شنی ساخته شده است. از گونه های پیشرفته تر آن که برای بهبود عمل کرد الگوی نخستین این میراگر پیشنهاد شده است با نام عمل کرد الگوی<sup>۵</sup> (TADAS) شناخته می شود که با به کارگیری صفحه های فولادی سه گوش، ساخته شده است [۷]. میراگر جاری شونده ی U شکل، با استفاده از نوارهای باریک فولادی U شکل ساخته شده است که در آزمون های بارگذاری چرخه ای، رفتار مناسبی در میرایی انرژی از خود نشان داده است [۸]. میراگرهای صفحه ای شیاردار گونه ی دیگری از میراگرهای فلزی هست که از ورق هایی فلزی شیاردار (بازشو) ساخته شده است که در هنگام بارگذاری، در آن ها تغییر شکل های خمیری درون صفحه ای به وجود می آید [۹]. از میراگرهای شناخته شده دیگر می توان به میراگرهای فلزی شانه ای [۱۰]، میراگر آکاردئونی [۱۱]، میراگر بلوکی فلزی [۱۲] و با توجه به عملکرد هیستریزس

- 1 Yield Damper
- 2 Friction Damper
- 3 Viscous Fluid Damper
- 4 Added Damping And Stiffness
- 5 Triangular Added Damping And Stiffness

6 Nested-Eccentric-Shells Damper  
7 APL Specification 5L, American Petroleum Institute



شکل ۱. میراگر پوسته‌ای NESD [۲۱]  
Fig. 1. Nested-eccentric-shells damper



شکل ۲. شمای گوناگون به کارگیری میراگر پوسته‌ای تودرتو در قاب سازه [۲۱]  
Fig. 2. Schematic of NESD installations in diagonal and/or inverted-V braced frames

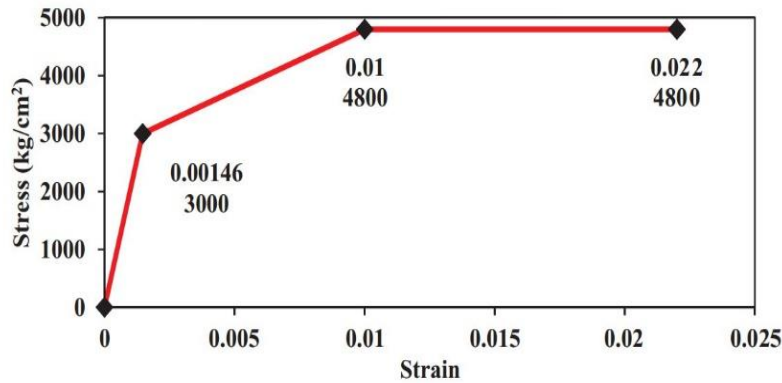
با توان کمتری- می‌تواند ادامه یابد. شمای گوناگون جاگذاری میراگر پوسته‌های استوانه‌ای ناهم‌راستا در بادبندهای قاب سازه در شکل ۲ نمایان است. برای پیوند این میراگر به تیرو ستون نیازی به ورق پیوند<sup>۱</sup> نمی‌باشد، ولی برای پرهیز از کاهش یا افزایش زاویه ۹۰ درجه‌ی تکیه‌گاه‌های میراگر، سفارش می‌شود از اتصال گیردار خمشی برای تیر و ستون در قاب استفاده شود.

### ۳- مدل‌سازی عددی میراگر

چنانچه در پژوهش [۲۱] بیان شده است، در آنالیز مکانیکی برای مدل‌سازی این میراگر در نرم افزار اجزاء محدود<sup>۲</sup> [۲۳]، ویژگی مصالح

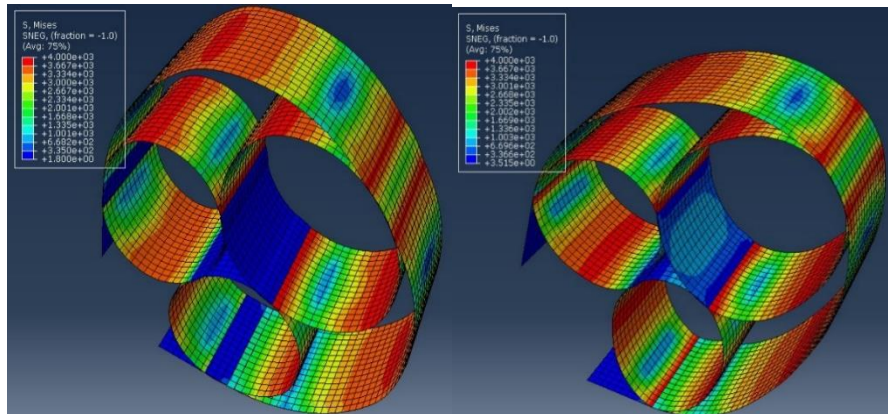
تنش کششی و فشاری را به پوسته‌های درونی ایفا می‌کند. از سویی با جاسازی لوله‌های درونی در لوله‌ی بیرونی، پایداری کلی میراگر نیز افزایش خواهد یافت. دو پوسته‌ی درونی P.168 نقش تکیه‌گاه‌های دستگاہ را ایفا می‌کنند و در کنار هم به‌سان دو فنر غیرخطی موازی کار می‌کنند. پوسته‌ی P.219 با ترکیب دو پوسته‌ی پیشین به شمای فنری سری کار خواهد کرد و پوسته‌ی بیرونی P.406 نیز شمایی موازی با چیدمان فنرهای معادل پیش‌گفته‌ی پوسته‌های P.219 و P.168 خواهد داشت. از این رو می‌توان به ترکیبی کارا از فنرهایی با چیدمان سری و موازی در ساختمان میراگر دست‌یافت که در گونه‌های پیشین میراگرهای پوسته‌ای بی‌مانند است. ایمنی دستگاہ نیز در این چیدمان افزایش خواهد یافت؛ چرا که اگر یکی از پوسته‌های بیرونی یا درونی در هنگام بارگذاری گسیخته شود، عملکرد کلی دستگاہ - البته

1 Guest plate  
2 ABAQUS, Version 6.13-1



شکل ۳. نمودار تنش-کرنش ایده آل شده مصالح CT20 [۲۴]

Fig. 3. Stress-strain diagram defined in the software for CT20 Steel



شکل ۴. تنش-رنگ مدل عددی میراگر در فشار (چپ) و کشش (راست)

Fig. 4. Stress contours and deformed shapes for NESD

محدود (استاتیکی غیرخطی) سه بعدی این مدل‌ها برپایه پروتکل بارگذاری پیشنهادی آژانس فدرال مدیریت بحران آمریکا [۲۶] با ده گام بارگذاری دوتایی (بیست گام) با ضریب افزایشی ۱/۴ برای هر گام انجام پذیرفته است. در نرم‌افزار برای مدل‌های میراگر، المان از جنس "پوسته"<sup>۲</sup> با ویژگی S4R<sup>۳</sup> و سخت‌شوندگی ایزوتروپیک<sup>۴</sup>، با پذیرش اثر تغییرشکل‌های بزرگ<sup>۵</sup> و روش کاهش انتگرال<sup>۶</sup> در حل، شناسانده شده است. شمایی از مدل‌سازی این میراگر را در حالت بارگذاری کشش و فشاری در شکل ۴ نشان داده شده است.

بکار رفته شده در آنالیز چنانچه در شکل ۳ نشان داده شده است از نمودار سه خطی تنش-کرنش ایده آل شده ی مصالح [۲۴] برای لوله‌هایی با جنس CT20 برپایه ی آیین نامه ی GOST<sup>۱</sup> [۲۵] استفاده شده است. نمودار تنش-کرنش ایده آل شده ی این درگام نخست تعداد دوازده عدد مدل میراگر پیشنهادی با ضخامت‌های گوناگون برای پوسته‌های میراگر در نرم‌افزار مدل‌سازی گردید [۲۱]. باتوجه به تأثیر ویژه‌ی پوسته‌ی پیرامونی در افزایش توان کلی میراگر، سعی شده است از دوازده ضخامت در دسترس (اشتایل) از ۶/۴ تا ۱۹/۱ میلی‌متر برای لوله‌ی شبیه به این پوسته (406.P) استفاده شود. برای پوسته‌های داخلی (P.168 و P.219) نیز از سه ضخامت یکسان ۶/۴، ۸/۷ و ۱۱/۱ میلی‌متر استفاده شده است. آنالیز المان

2 Shell  
3 Four-Node Reduction shell element  
4 Isotropic hardening  
5 Large deformation effects  
6 Reduced integration

1 GOCT 8733; Seamless cold and warm deformed pipes



شکل ۵. شیوه ی جاگذاری نمونه آزمایشگاهی در دستگاه بارگذاری چرخه ای

Fig. 5. Test setup of NESD



شکل ۶. بیشینه تغییرشکل در کشش و فشار برای یک نمونه در واپسین چرخه بارگذاری [۲۱]

Fig. 6. Maximum displacement of NESD

#### ۴- ساخت و آزمایش میراگر

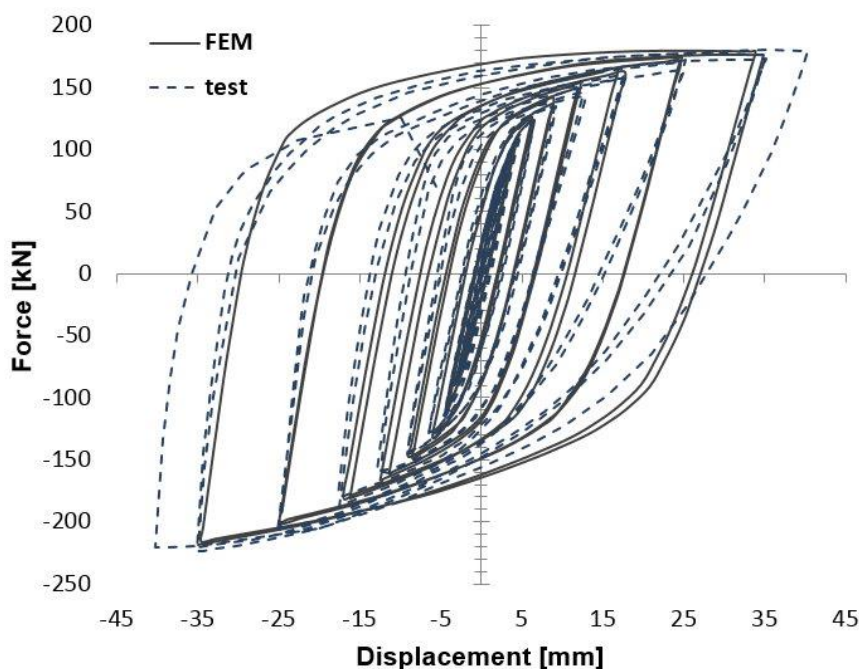
برای هم سنجی داده های عددی، دو نمونه ی آزمایشگاهی همسان با دو مدل عددی ساخته و زیر بارگذاری برابر با پروتکل بارگذاری پیش گفته قرار گرفتند. در ساخت میراگر برای پیوند پوسته های استوانه ای در کالبد میراگر از روش جوشکاری قوس الکتریکی<sup>۱</sup> استفاده شده است؛ ولی برای کاهش اثر مخرب جوشکاری و افزایش عملکرد میراگر، از روش های ریخته گری فلز - گرچه هزینه برتر است - پیشنهاد می شود. آزمایش نمونه های آزمایشگاهی میراگرها

1 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

بر اساس پروتکل بارگذاری فزاینده تا پیمودن سیکل کامل بارگذاری یا شکست عضوهای میراگر به شیوه ی جابه جایی-کنترل<sup>۲</sup> انجام شده است. هدف از آزمایش، ارزیابی واقعی و هم سنجی<sup>۳</sup> داده های مدل های عددی با دست کم دو نمونه واقعی بوده است. شیوه ی جایگذاری یکی از این نمونه ها در شکل ۵ و بیشینه تغییرشکل در کشش و فشار برای این نمونه در واپسین چرخه بارگذاری در شکل ۶ نشان داده شده است.

2 Displacement control

3 Calibration



شکل ۷. برازش نمودار بارگذاری چرخه‌ای برای یک مدل عددی و آزمایشگاهی همسان [۲۱]  
**Fig. 7. Load-displacement curve tests versus FEA results**

را می‌توان در پیکربندی عضوهای میراگر واریسی نمود. مراد آن‌که عضوهایی که مشابه فنرهای سری در پیکره‌ی میراگر قرار گرفته‌اند باید دارای سختی الاستیک یکسانی داشته باشند تا یکی [عضو- فنر] زودتر (یا دیرتر) از دیگری از مرز تغییرشکل بازگشتی نگذرد. بنابراین در این میراگر، جفت پوسته‌ی P.168 و تک پوسته‌ی P.219 باید سختی الاستیک برابری داشته باشند. برای انجام این کار، از نگره‌ی انرژی در آنالیز سازه‌ها (قانون دوم کاستیگلیانو) می‌توان بهره برد [۲۷]. رابطه‌ی (۱) برای به دست آوردن سختی حلقه (پوسته‌ی دو بعدی) با توجه به شکل ۸ پیشنهاد نموده است.

$$y_{A/B} = \int_0^\theta \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial p} r d\theta$$

$$M = (F + p)r \cdot \cos \theta \quad ; \text{where } p \rightarrow 0 \quad (1)$$

$$y_{A/B} = \frac{Fr^3}{EI} \int_0^\theta \cos^2 \theta d\theta$$

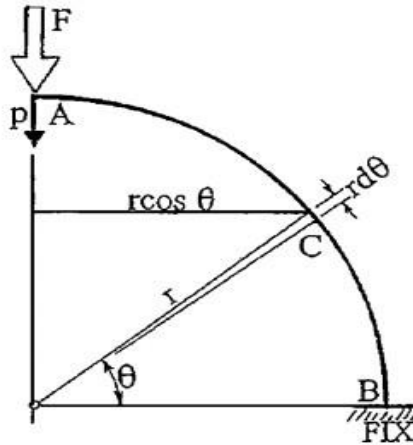
در رابطه‌ی بالا  $y_{A/B}$  اندازه‌ی جابه‌جایی نقطه‌ی A نسبت به B در یک قطاع حلقه است. برای دستیابی به نسبت ضخامت بهینه

در شکل ۷ نمودار چرخه‌ای هیستریزیس یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی در برابر نمودار چرخه‌ی هیستریزیس مدل همسان عددی برازش شده است. همان‌طور که در این شکل، نشان داده شده است، همگونی بسیار خوبی در نمودارهای بارگذاری عددی و آزمایشگاهی دیده می‌شود. هدف از هم‌سنجی نمودار عددی و آزمایشگاهی در یک فرآیند رفت و برگشتی برای باز تعریف ویژگی‌های مکانیکی در گام اول برای نمونه‌های همسان عددی و آزمایشگاهی بوده است و در گام بعدی تسری یافته‌های این هم‌سنجی به سایر نمونه‌های عددی به منظور تأیید نمودارهای چرخه‌ای آنها انجام پذیرفته است.

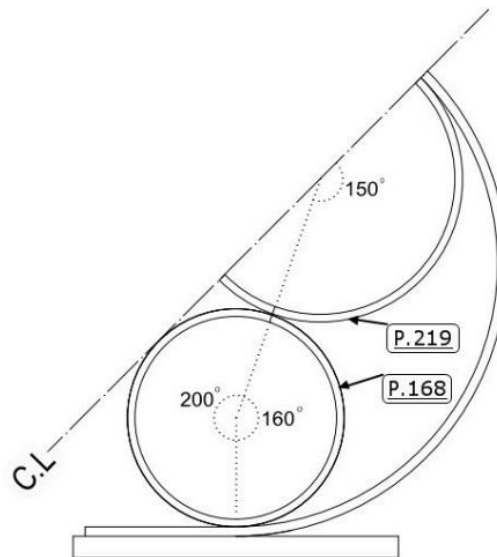
#### ۵- پیشنهاد رابطه‌ای برای بهسازی نسبت ضخامت پوسته‌های درونی میراگر

با واکاوی در عملکرد مکانیکی میراگر پیشنهادی می‌توان به این نکته رسید که برای افزایش عملکرد کلی میراگر باید راهکاری در نظر گرفته شود تا عضوهای میراگر به بیشترین اندرکنش در هنگام تلاش نیروهای درونی برسند. برای دسترسی به این هدف باید روندی برگرفته شود که در اثنای ورود میراگر به مرز رفتار غیرخطی همه‌ی عضوهای درونی آن به‌یکباره رفتار غیرخطی داشته باشند. این سازوکار

1 Deflection



شکل ۸. قطاع حلقه (پوسته‌ی دوبعدی) برای برآورد سختی [۲۷]  
 Fig. 8. Loop segment (two-dimensional shell) to estimate hardness



شکل ۹. زاویه‌ی عضوهای درونی میراگر  
 Fig. 9. The angle of the internal damper members

دوازده مدل عددی سازگار با رابطه‌ی پیشنهادی نسبت ضخامت بهینه‌ی پوسته‌های درونی در نرم‌افزار المان محدود، مدل‌سازی و آنالیز عددی شده است. این مدل‌ها با نام کوتاه شده M-NESD<sup>1</sup> شناسه شده است. ضخامت پوسته‌های این دوازده مدل در جدول ۱ نگاشته شده است.

در تحلیل عددی مدل‌ها براساس سفارش آیین‌نامه شورای فناوری کاربردی آمریکا<sup>۲</sup> [۲۸]، بیشینه‌ی تغییرشکل پلاستیک ( $D_p$ ) در تحلیل چرخه‌ای، پنج برابر تغییرشکل جاری‌شدن

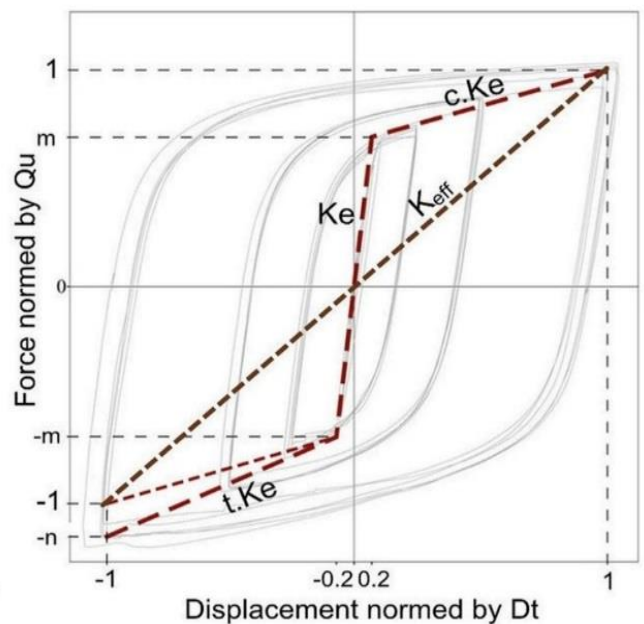
برای پوسته‌های درونی میراگر، نیروی قطاع‌های عضوهای نشان داده شده در شکل ۸، به روش تحلیل ماتریسی محاسبه شده است سپس بنا به اصل سازگاری تغییرمکان‌ها با هم اندازه انگاشتن تغییر مکان برای نقطه تماس قطاعی از پوسته‌ی P.219، با زاویه‌ی ۱۵۰ درجه، با قطاعی از پوسته‌ی P.168 به زاویه‌های ۱۶۰ درجه (و ۲۰۰ درجه)، (شکل ۹)، که از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید، نسبت ضخامت بهینه برای این دو پوسته با رابطه‌ی (۲) پیشنهاد می‌شود.

$$\frac{t_{P.219}}{t_{P.168}} = 1.7 \quad (2)$$

1 Modified-NESD  
 2 Applied Technology Council (ATC-24)

جدول ۱. ضخامت مدل‌های عددی برای میراگر M-NESD  
Table 1. Thickness of numerical models for M-NESD

| شماره‌گذاری | ضخامت هر عضو [میلی‌متر] |       |       |
|-------------|-------------------------|-------|-------|
|             | P.168                   | P.219 | P.406 |
| M-NESD.1    | ۳.۲۰                    | ۶.۴۰  | ۶.۴۰  |
| M-NESD.2    | ۳.۲۰                    | ۶.۴۰  | ۱۰.۳۰ |
| M-NESD.3    | ۳.۲۰                    | ۶.۴۰  | ۱۴.۳۰ |
| M-NESD.4    | ۴.۸۰                    | ۸.۷۰  | ۷.۱۰  |
| M-NESD.5    | ۴.۸۰                    | ۸.۷۰  | ۱۱.۱۰ |
| M-NESD.6    | ۴.۸۰                    | ۸.۷۰  | ۱۵.۹۰ |
| M-NESD.7    | ۶.۰۰                    | ۱۱.۱۰ | ۸.۷۰  |
| M-NESD.8    | ۶.۰۰                    | ۱۱.۱۰ | ۱۱.۹۰ |
| M-NESD.9    | ۶.۰۰                    | ۱۱.۱۰ | ۱۷.۵۰ |
| M-NESD.10   | ۷.۹۰                    | ۱۴.۳۰ | ۹.۵۰  |
| M-NESD.11   | ۷.۹۰                    | ۱۴.۳۰ | ۱۲.۷۰ |
| M-NESD.12   | ۷.۹۰                    | ۱۴.۳۰ | ۱۹.۱۰ |



شکل ۱۰. سنجنده‌های مکانیکی در تحلیل غیرخطی چرخه‌ای  
Fig. 10. Mechanical parameters in the nonlinear cyclic analysis

در بردارنده‌ی: نیروی جاری شدن  $(Q_y)$ ، نیروی نهایی  $(Q_{ll})$ ، نسبت نیروی جاری شدن به نهایی  $(m)$ ، بیش‌مقاومت کششی  $(n)$ ، سختی الاستیک  $(K_e)$ ، ضریب سختی دوم در فشار  $(c)$ ، ضریب سختی دوم در کشش  $(t)$  و سختی مؤثر  $(K_{eff})$  است که در جدول ۲ برآورد شده است. چنانچه در این جدول نمایان است اندازه‌ی همه‌ی

$(\delta_y)$ ، در هر راستا (مثبت و منفی) پنداشته شده است. سایر سنجنده‌های مکانیکی در چرخه‌های بارگذاری<sup>۱</sup> براساس پروتکل بارگذاری پیش‌گفته در تحلیل المان محدود غیرخطی برای مدل‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این سنجنده‌های مکانیکی که

1 Hysteretic loops



جدول ۲. سنجنده‌های مکانیکی برای مدل‌های میراگر M-NESD

Table 2. Mechanical parameters for M-NESD

| شماره‌گذاری | Qy [kN] | m    | Qu [kN] | n    | δy [mm] | Dt [mm] | K <sub>e</sub> [kN/mm] | c    | t    | K <sub>eff</sub> [kN/mm] | Sr = K <sub>eff</sub> / K <sub>e</sub> |
|-------------|---------|------|---------|------|---------|---------|------------------------|------|------|--------------------------|--|
| M-NESD.1    | ۴۶.۱۷   | ۰.۶۲ | ۷۴.۴۷   | ۱.۳۰ | ۸.۱۰    | ۴۰.۶۰   | ۵.۶۸                   | ۰.۱۵ | ۰.۲۷ | ۲.۰۶                     | ۰.۳۶                                   |
| M-NESD.2    | ۱۲۳.۷۲  | ۰.۶۴ | ۱۹۳.۴۴  | ۱.۲۱ | ۵.۶۰    | ۲۸.۳۰   | ۲۱.۸۹                  | ۰.۱۴ | ۰.۲۲ | ۷.۳۱                     | ۰.۳۳                                   |
| M-NESD.3    | ۲۴۳.۵۸  | ۰.۶۵ | ۳۷۶.۲۰  | ۱.۱۶ | ۴.۴۰    | ۲۲.۰۰   | ۵۵.۲۶                  | ۰.۱۴ | ۰.۲۰ | ۱۷.۹۵                    | ۰.۳۲                                   |
| M-NESD.4    | ۵۷.۲۵   | ۰.۶۷ | ۸۴.۸۷   | ۱.۲۶ | ۷.۶۰    | ۳۷.۹۰   | ۷.۵۵                   | ۰.۱۲ | ۰.۲۲ | ۲.۴۷                     | ۰.۳۳                                   |
| M-NESD.5    | ۱۴۴.۴۵  | ۰.۶۴ | ۲۲۶.۳۲  | ۱.۱۹ | ۵.۳۰    | ۲۶.۶۰   | ۲۷.۱۴                  | ۰.۱۴ | ۰.۲۱ | ۹.۰۴                     | ۰.۳۳                                   |
| M-NESD.6    | ۳۰۳.۰۹  | ۰.۶۵ | ۴۶۸.۲۳  | ۱.۱۵ | ۴.۲۰    | ۲۰.۹۰   | ۷۲.۴۸                  | ۰.۱۴ | ۰.۱۹ | ۲۳.۳۹                    | ۰.۳۲                                   |
| M-NESD.7    | ۸۷.۲۳   | ۰.۶۳ | ۱۳۸.۱۵  | ۱.۲۳ | ۶.۴۰    | ۳۲.۲۰   | ۱۳.۵۶                  | ۰.۱۵ | ۰.۲۴ | ۴.۶۸                     | ۰.۳۴                                   |
| M-NESD.8    | ۱۶۶.۷۶  | ۰.۶۴ | ۲۶۰.۶۰  | ۱.۱۸ | ۵.۰۰    | ۲۵.۲۰   | ۳۳.۱۰                  | ۰.۱۴ | ۰.۲۱ | ۱۱.۰۴                    | ۰.۳۳                                   |
| M-NESD.9    | ۳۶۹.۵۰  | ۰.۶۵ | ۵۶۶.۷۸  | ۱.۱۳ | ۳.۸۰    | ۱۹.۰۰   | ۹۷.۳۳                  | ۰.۱۳ | ۰.۱۸ | ۳۱.۲۶                    | ۰.۳۲                                   |
| M-NESD.10   | ۱۰۴.۶۴  | ۰.۶۳ | ۱۶۵.۱۲  | ۱.۲۱ | ۶.۰۰    | ۳۰.۰۰   | ۱۷.۴۲                  | ۰.۱۴ | ۰.۲۳ | ۵.۹۴                     | ۰.۳۴                                   |
| M-NESD.11   | ۱۹۰.۷۲  | ۰.۶۴ | ۲۹۷.۲۱  | ۱.۱۷ | ۴.۸۰    | ۲۴.۰۰   | ۳۹.۷۰                  | ۰.۱۴ | ۰.۲۰ | ۱۳.۱۱                    | ۰.۳۳                                   |
| M-NESD.12   | ۴۴۲.۶۹  | ۰.۶۵ | ۶۷۷.۰۴  | ۱.۱۲ | ۳.۶۰    | ۱۸.۰۰   | ۱۲۳.۰۵                 | ۰.۱۳ | ۰.۱۸ | ۳۹.۰۳                    | ۰.۳۲                                   |

جدول ۳. نسبت میرایی برای مدل‌های میراگر M-NESD

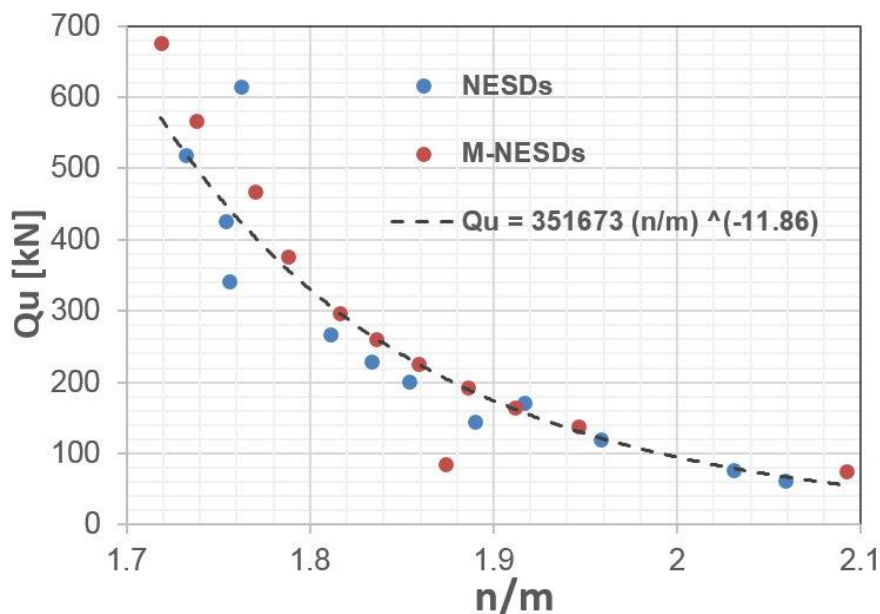
Table 3. Damping ratio for M-NESD

| شماره‌گذاری | A <sub>h</sub> [J] | A <sub>e</sub> [J] | A <sub>h</sub> / A <sub>e</sub> | ξ <sub>eq</sub> [%] |
|-------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|
| M-NESD.1    | ۸۶۱۵               | ۱۳۵۸               | ۶.۳۴                            | ۵۱                  |
| M-NESD.2    | ۱۴۸۱۱              | ۲۵۷۵               | ۵.۷۵                            | ۴۶                  |
| M-NESD.3    | ۲۳۹۰۳              | ۳۹۵۸               | ۶.۰۴                            | ۴۸                  |
| M-NESD.4    | ۸۵۹۴               | ۱۵۳۶               | ۵.۵۹                            | ۴۵                  |
| M-NESD.5    | ۱۷۳۶۷              | ۲۸۶۳               | ۶.۰۷                            | ۴۸                  |
| M-NESD.6    | ۲۸۲۳۸              | ۴۷۳۴               | ۵.۹۷                            | ۴۷                  |
| M-NESD.7    | ۱۲۷۶۷              | ۲۰۴۶               | ۶.۲۴                            | ۵۰                  |
| M-NESD.8    | ۱۸۵۵۳              | ۳۰۸۴               | ۶.۰۲                            | ۴۸                  |
| M-NESD.9    | ۳۰۵۷۰              | ۵۰۶۷               | ۶.۰۳                            | ۴۸                  |
| M-NESD.10   | ۱۴۱۸۴              | ۲۳۱۲               | ۶.۱۳                            | ۴۹                  |
| M-NESD.11   | ۲۰۱۳۹              | ۳۴۰۳               | ۵.۹۲                            | ۴۷                  |
| M-NESD.12   | ۳۵۹۶۳              | ۵۹۱۴               | ۶.۰۸                            | ۴۸                  |
| میانگین     |                    |                    | ۶.۰۲                            | ۴۷                  |

هیستریزیس) استفاده شده است. هر یک از سنجنده‌های A<sub>e</sub> و A<sub>h</sub> نمایانگر اندازه‌ی انرژی میرا شده و اندازه‌ی انرژی انباشت شده در یک چرخه‌ی کامل بارگذاری غیرخطی است. اندازه‌ی نسبت میرایی از چرخه‌های بارگذاری برای هر یک از مدل‌های میراگر M-NESD در جدول ۳ برآورد شده است.

سنجنده‌های مکانیکی مدل‌های بهسازی شده‌ی M-NESD در سنجش با مدل‌های بهسازی نشده NESD [۲۱]، به شکل چشمگیری افزایش یافته‌اند.

برای برآورد نسبت ویرایی ویسکوز رابطه‌ی (۳) برای نسبت میرایی ویسکوز [۲۹] از چرخه‌ی بارگذاری غیرخطی چرخه‌ای



شکل ۱۱. توان نهایی مدل‌ها در سنجش با نسبت  $n/m$   
 Fig. 11. The ultimate force of the models in  $n/m$  ratio

برروی ویژگی‌های مکانیکی میراگر انجام خواهد شد و رابطه‌های کاربردی در این زمینه باروش برازش منحنی پیشنهاد خواهد شد. برای عیان تر شدن بهسازی ضخامت پوسته‌های درونی، مدل‌های نمودار شکل ۱۱ بر پایه‌ی نسبت  $n/m$  و تاب نهایی مدل‌ها برای مدل‌های ابتدایی NESD و مدل‌های بهسازی شده‌ی M-NESD، ترسیم شده است. چنانچه از این نمودار برمی‌آید یک رابطه‌ی بازگونه میان تاب نهایی مدل‌ها با نسبت افزایشی توان کششی به فشاری وجود دارد. این پدیده چنانچه در نمودارهای شکل ۱۲ نمایان است برای سختی مدل‌ها نیز پیش‌بینی می‌شود. با نگاه به این نمودارها دیده می‌شود سختی مدل‌ها با افزایش نسبت توان کشش به فشار، رابطه‌ای کاهنده دارد. می‌توان این‌طور بیان کرد که هرچه توان کلی دستگاه در تنش نهایی و سختی افزایش می‌یابد رفتار میراگر در کشش و فشار همگون‌تر می‌شود.

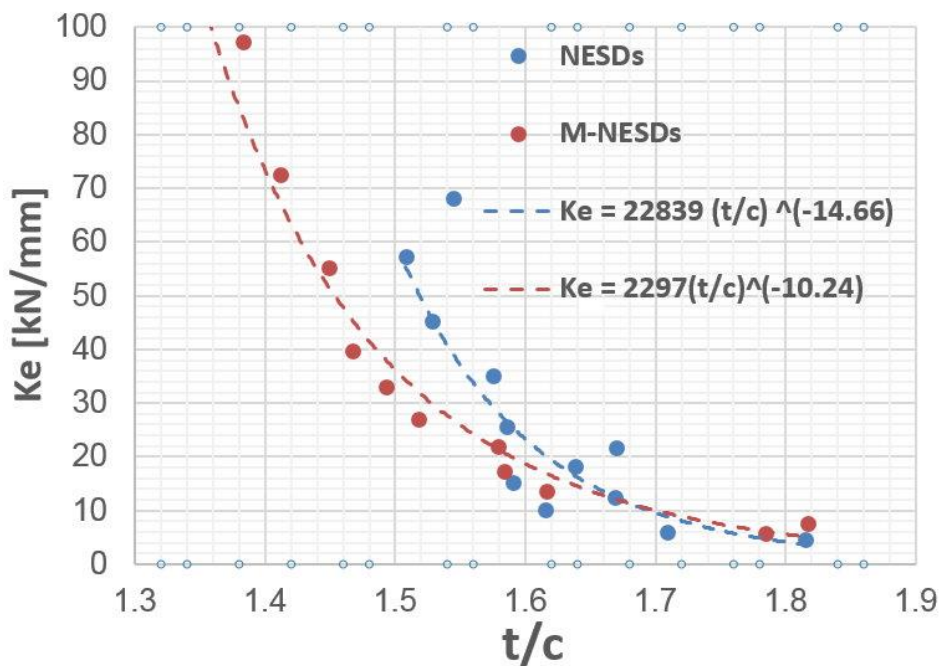
نمودار شکل ۱۳ برای ارزیابی بهتر رفتار مکانیکی مدل‌ها ترسیم شده است. در این نمودار تعداد نه جفت از مدل‌های بهسازی شده و نشده که دارای ضخامت یکسان برای پوسته‌های 406.P و 219.P هستند و تنها در پوسته‌ی 168.P دارای ناهمسانی هستند، ترسیم شده است. چنانچه در این نمودار دیده می‌شود با بهسازی در نسبت ضخامت پوسته‌های درونی میراگر، توان کلی میراگر افزایش می‌یابد. این رفتار می‌تواند در اثر اندرکنش بیشتر پوسته‌های درونی در میراگر

$$\xi_{eq} = \frac{A_h}{4\pi A_e} \quad (3)$$

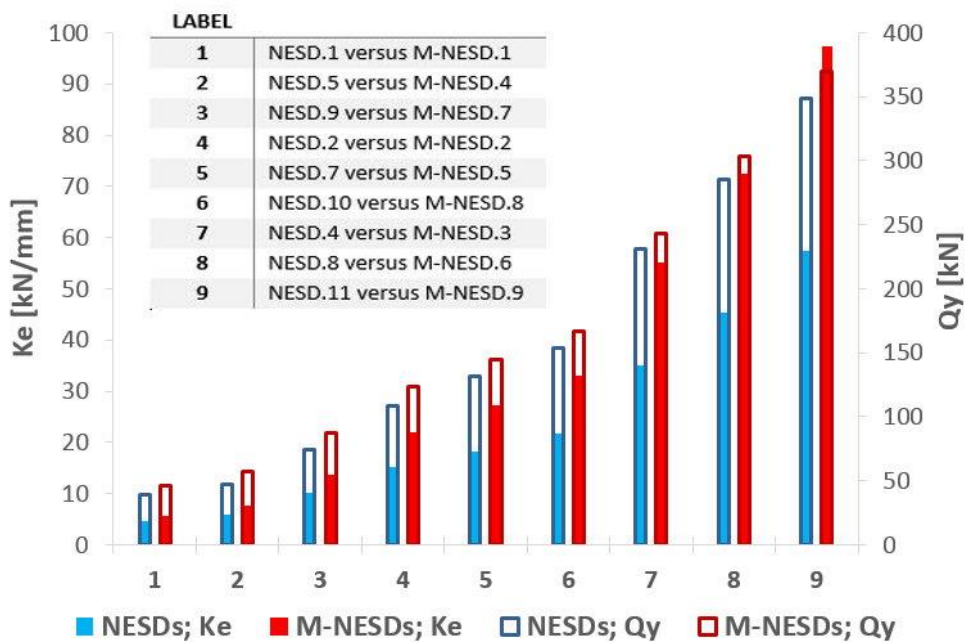
با توجه به برآورد نسبت میرایی برای هر مدل M-NESD، میانگین نسبت میرایی ۴۷ درصد به‌دست آمده است که این اندازه از نسبت میرایی برای دستگاه میراکننده‌ی انرژی بدون بهره‌مندی از ساختار پیچیده و هزینه بالا، بسیار مناسب می‌باشد. اندازه‌ی میرایی با بهسازی در ضخامت پوسته‌ها، ۴ درصد نسبت به مدل‌های بهسازی نشده افزایش یافته است. از سویی با دقت در نمودار شکل ۶ دیده می‌شود که مساحت زیر منحنی ( $A_h$ ) در چرخه‌های هیستریزس در نمونه‌ی آزمایشگاهی اندکی کمتر از نمونه‌ی عددی است. این اندازه در حدود ۳ درصد برآورد شده است. از این رو برای برآورد نسبت میرایی، در اندازه‌های درج شده برای  $A_h$  با رویکردی پروانگارانه این سنجنده با ۵ درصد کاهش در جدول ۳ درج شده است.

## ۶- کاوش در داده‌های مکانیکی

در بخش پیشین داده‌های دوازده مدل عددی میراگر پیشنهادی که ضخامت پوسته‌های داخلی آنها بهسازی شده بود، بدست آمد، در این بخش با نگاه به داده‌های بدست آمده از آنالیز عددی در این پژوهش با مقاله [۲۱]، سنجش‌هایی با کمک نمودارهای کاربردی



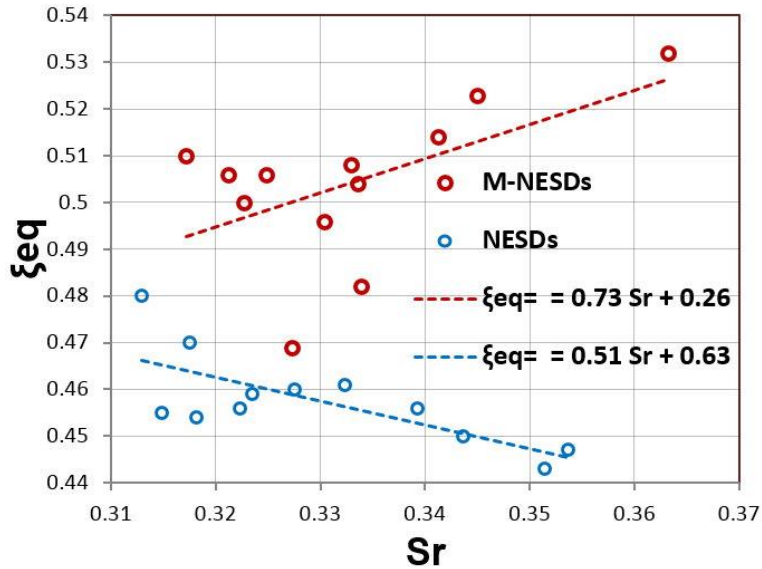
شکل ۱۲. سختی مدل‌ها در سنجش با نسبت  $t/c$   
 Fig. 12. The stiffness in  $t/c$  ratio



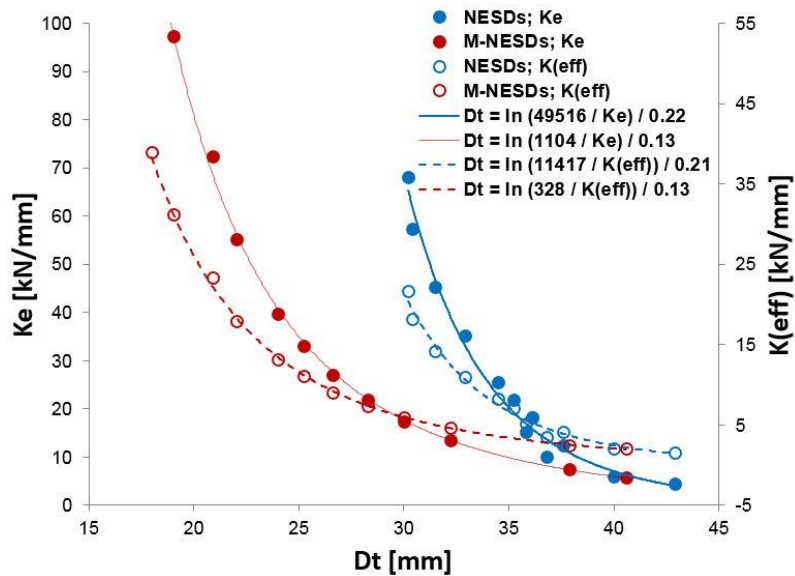
شکل ۱۳. سختی و تنش جاری شدن برای مدل‌های بهسازی شده و نشده  
 Fig. 13. The stiffness and stress for the NESD vs M-NESD models

برای سنجش نسبی سختی مؤثر به سختی الاستیک، پیشتر سنجنده‌ای با نام  $Sr$  در جدول ۲ برای بیان نسبت سختی مؤثر به سختی بازگشتی شناسه شده است. با توجه به این سنجنده و نسبت

باشد، چرا که این پوسته‌ها به شیوه‌ی پیوسته و هم‌زمان وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند و رفتار کلی بهتری برای میراگر در برخورد داشت.



شکل ۱۴. نسبت میرایی در برابر نسبت  $Sr$   
 Fig. 14. Damping vs  $Sr$  ratio



شکل ۱۵. تغییر شکل پلاستیک وابسته به سختی الاستیک یا مؤثر  
 Fig. 15. Plastic deformation is dependent on elastic or effective stiffness

همچنین برای برآورد بیشینه تغییر شکل پلاستیک میراگر پیشنهادی وابسته به سختی الاستیک یا سختی مؤثر، نمودار شکل ۱۵ برآش شده است. چنانچه از این نمودار برمی آید بیشینه تغییر شکل پلاستیک نمی تواند کمتر از یک کرانه‌ی کمینه‌ای باشد. این اندازه برای مدل‌های NESD، به نزدیک ۳۰ میلی‌متر و برای مدل‌های M-NESD، نزدیک به ۲۰ میلی‌متر برآورد شده است.

میرایی، نمودار شکل ۱۴ برآش شده است. در این نمودار مدل‌های با تاب جاری‌شوندگی بالاتر، اندازه‌ی  $Sr$  کمتری دارند. از سویی در مدل‌های بهسازی شده با افزایش  $Sr$ ، نسبت میرایی افزایش می‌یابد؛ درحالی که این روند در مدل‌های بهسازی نشده باژگونه است. این پدیده نیز در راستای گفتار پیشین در افزایش عملکرد بهتر مدل‌های بهسازی شده است.

## ۷- نتیجه گیری

افزایش سنجنده های مؤثر مکانیکی مانند نیروی جاری شدن و نیروی نهایی و همچنین سختی بازگشتی و فرابازگشتی بودیم.

### مراجع

- [1] Calvi, G., M. Priestley, and M. Kowalsky, *Displacement-based seismic design of structures*. Earthquake spectra, 2007. **24**(2): p. 1-24.
- [2] Plevris, V., G. Kremmyda, and Y. Fahjan, *Performance-Based Seismic Design of Concrete Structures and Infrastructures*. 2017: IGI Global.
- [3] Soong, T.T. and M.C. Constantinou, *Passive and active structural vibration control in civil engineering*. Vol. 345. 2014: Springer.
- [4] Soong, T.T. and G.F. Dargush, *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. 1997: Wiley.
- [5] Soong, T. and B. Spencer Jr, *Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice*. Engineering structures, 2002. **24**(3): p. 243-259.
- [6] Bergman, D.M. and S.C. Goel, *Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness*. 1987: Department of Civil Engineering, University of Michigan.
- [7] Tsai, K.-C., et al., *Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction*. Earthquake spectra, 1993. **9**(3): p. 505-528.
- [8] Suzuki, K. and A. Watanabe. *Experimental Study of U-shaped Steel Damper [J]*. in *Summary of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2*. 2000.
- [9] Chan, R.W. and F. Albermani, *Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation*. Engineering Structures, 2008. **30**(4): p. 1058-1066.
- [10] Garivani, S., A. Aghakouchak, and S. Shahbeyk, *Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers*. International Journal of Steel Structures, 2016. **16**(1): p. 177-196.
- [11] Motamedi, M. and F. Nateghi-A, *Study on mechanical characteristics of accordion metallic damper*. Journal of Constructional Steel Research, 2018. **142**: p. 68-77.
- [12] Amiri, H.A., E.P. Najafabadi, and H.E. Estekanchi, *Exper-*

در این پژوهش گونه‌ی نوآورانه‌ای از یک ابزار میراکننده‌ی انرژی زلزله در سازه پیشنهاد شده است. اگرچه این میراگر دارای نکته‌های مثبتی در بالابردن سازوکار گونه‌های پیشین به‌ویژه گونه‌هایی با ساختار پوسته‌ای دارد ولی دارای کاستی‌هایی نیز می‌تواند باشد. یکی از نکات ضعف این میراگر همانند سایر میراگرهای کنشگیر (به استثنای میراگرهای ویسکوز) عدم برگشت پذیری میراگر پس از وقوع زلزله است که پیشنهاد می‌شود با به کارگیری مواد ویسکوالاستیک در فضای خالی پوسته‌های استوانه‌ای تا حدودی این نقطه ضعف جبران شود. از طرفی برای افزایش کارایی و سودمندی این میراگر، پیشنهاد می‌شود برای پژوهش‌های پس از این، در آلیاژهای فلز به‌کار رفته بررسی‌هایی انجام شود و از آلیاژی برای پوسته‌ها استفاده شود (مانند آلیاژهای دارای سرب) که دارای ویژگی‌های فرابازگشتی بیشتری باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از اثرهای مخرب جوشکاری از روش‌های پیشرفته‌ی ریخته‌گری فلز در ساخت میراگر استفاده شود. از سوی دیگر از مزایای میراگر پیشنهادی می‌توان عملکرد ویژه‌ی پوسته‌ای، هزینه ساخت بسیار پایین، سازوکار چندگامه تا گسیختگی کامل، ساختمان ساده ولی با ساختار پیچیده مکانیکی، پایداری بالا، میرایی و توان بالای جاری شدن وغیره را برشمرد. گردآورد این پژوهش درباره‌ی میراگر پیشنهادی به عنوان گفتار پایانی در ادامه افزای شده است.

• در این پژوهش در راستای افزایش عملکرد میراگرهای فلزی، میراگر نوینی با ساختار پوسته‌ای با ساختمان ساده ولی دارای سازوکار مکانیکی پیچیده، پیشنهاد شده است.

• برای افزایش عملکرد پوسته‌های درونی، رابطه‌ای برای نسبت ضخامت پوسته‌های داخلی پیشنهاد شد. با به کارگیری این رابطه، عملکرد و اندرکنش پوسته‌های درونی در میراگر افزایش یافت که منجر به افزایش و بهبود سنجنده‌های مکانیکی در میراگر گردید.

• با بهسازی در نسبت ضخامت عضوهای داخلی میراگر، میرایی نسبی ۴ درصد افزایش و به ۴۷ درصد رسید که این مقدار از میرایی برای یک دستگاه میراکننده انرژی با ساختار و ساخت ساده و ارزان بسیار مطلوب است.

• در این پژوهش شاهد ارتقای کلی میراگر پیشنهادی در رفتار فراارتجاعی به دلیل اندرکنش بیشتر عضوهای داخلی با یکدیگر و

- Research, 2016. **127**: p. 120-135.
- [21] Reisi, A., H.R. Mirdamadi, and M.A. Rahgozar, *Numerical and experimental study of the nested-eccentric-cylindrical shells damper*. Earthquakes and Structures, 2020. **18**(5): p. 637-648.
- [22] Specification, A., *5L. 2004. Specification for Line Pipe*, 43rd Edition. Washington DC: American Petroleum Institute, 2004.
- [23] ABAQUS Finite Element Analysis Program 2013.
- [24] Abbasnia, R., et al., *Experimental and analytical investigation on the steel ring ductility*. Sharif J. Sci. Technol, 2008. **52**: p. 41-48.
- [25] GOST (ГОСТ) 8733, *Seamless cold and warm deformed pipes*. 1976. GOST Standards of the Russian Federation, Russia
- [26] FEMA, *FEMA 461: Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and non-structural components through laboratory testing*. 2006, Applied Technology Council Redwood City, CA.
- [27] Whidden, W.R. *Buried flexible steel pipe: Design and structural analysis*. 2009. American Society of Civil Engineers.
- [28] Krawinkler, H., *ATC-24: Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*. Redwood City, Report prepared for the Applied Technology Council, 1992.
- [29] Chopra, A.K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall. Inc., Upper Saddle River, NJ, 1995.
- imental and analytical study of block slit damper*. Journal of Constructional Steel Research, 2018. **141**: p. 167-178.
- [13] Iwata, M., T. Kato, and A. Wada, *Buckling-restrained braces as hysteretic dampers*. Behavior of steel structures in seismic areas, 2000: p. 33-38.
- [14] Jahangir, H., Daneshvar Khorram, M.H., Ghalehnovi, M., *Influence of Geometric Parameters on Perforated Core Buckling Restrained Braces Behavior (In Persian)*. Journal of Structural and Construction Engineering, 2018. **6**.
- [15] Asgarian, B. and S. Moradi, *Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces*. Journal of Constructional Steel Research, 2011. **67**(1): p. 65-74.
- [16] Jahangir, H. and M. Bagheri, *Evaluation of Seismic Response of Concrete Structures Reinforced by Shape Memory Alloys*. International Journal of Engineering, 2020. **33**(3): p. 410-418.
- [17] Maleki, S. and S. Bagheri, *Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study*. Journal of Constructional Steel Research, 2010. **66**(8-9): p. 1088-1095.
- [18] Maleki, S. and S. Mahjoubi, *Dual-pipe damper*. Journal of Constructional Steel Research, 2013. **85**: p. 81-91.
- [19] Mahjoubi, S. and S. Maleki, *Seismic performance evaluation and design of steel structures equipped with dual-pipe dampers*. Journal of Constructional Steel Research, 2016. **122**: p. 25-39.
- [20] Cheraghi, A. and S.M. Zahrai, *Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames*. Journal of Constructional Steel

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Reisi, H. R. Mirdamadi, M. A. Rahgozar, *The Nested-Eccentric-Shells Damper with an Improved Approach to Increasing Hysteresis Behavior*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(1) (2021) 21-34.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18975.7013](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18975.7013)

