

## Improving Hysteresis Performance Steel Frames with Diagonal Bracing

Morteza Jamshidi\*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

m.jamshidi@iauc.ac.ir

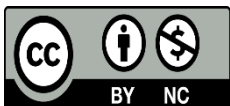
### Keywords:

CBF,  
hysteresis performance,  
energy dissipation,  
IPE damper,  
passive control.

### Abstract

A concentrically braced frame (CBF) is a conventional frame to provide lateral strength and stiffness. CBFs have less ductility and energy dissipation capacity. Studies on the lateral behavior of CBF show that the ductility and seismic behavior of these frames are intensively affected by the compression element behavior; and stiffness and strength reduction after the compression element buckling decreases the CBF performance under cyclic loading considerably. In this paper, a steel yielding device constructed with waste materials is proposed to improve the hysteresis performance of the CBFs. The hysteresis performance of the proposed device is studied through experimental and numerical studies. Experimental and numerical studies show the stable hysteresis performance of the proposed device and its appropriate energy dissipation capacity. In the case of the studied device, no strength and stiffness reduction is observed up to 18 mm axial displacement. 2. On the other hand, achieving equivalent viscous damping ratio for the damper constructed with IPE80 without the use of sophisticated tools is noticeable.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

# بهبود عملکرد هیستریزیس قاب‌های فولادی مجهز به مهاربندهای قطری

مرتضی جمشیدی\*

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

m.jamshidi@iauc.ac.ir

تاریخ پذیرش: 10 آبان 1402

تاریخ دریافت: 13 تیر 1402

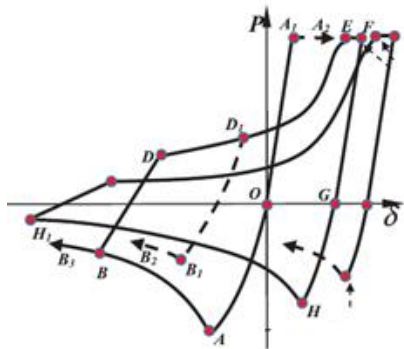
## چکیده

قاب مهاربندی شده همگرا یک قاب متعارف برای ایجاد مقاومت جانبی و سختی سازه است. این قاب‌ها شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی کمتری نسبت به سایر سیستم‌های مشابه دارند. مطالعات بر روی رفتار جانبی قاب‌های مهاربندی شده همگرا نشان می‌دهد که شکل‌پذیری و رفتار لرزه‌ای این قاب‌ها به شدت تحت تأثیر رفتار عضو فشاری می‌باشد و کاهش سختی و مقاومت پس از کماتش عضو فشاری، عملکرد قاب‌های مهاربندی شده همگرا را تحت بارگذاری چرخه‌ای به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. در این مقاله، یک المان تسلیم شونده فولاد، ساخته شده از قطعات دورریز برای بهبود عملکرد چرخه‌ای قاب مهاربندی شده قطری پیشنهاد شده است. عملکرد هیستریزیس المان پیشنهادی از طریق مطالعات آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی و عددی، عملکرد چرخه‌ای پایدار المان پیشنهادی و ظرفیت اتلاف انرژی مناسب آن را نشان می‌دهد. در مورد المان مورد مطالعه، تا ۱۸ میلی متر تغییر مکان محوری، کاهش مقاومت و سختی مشاهده نمی‌شود. از سوی دیگر دستیابی به نسبت میرایی ویسکوز معادل برای میراگر ساخته شده در این مقاله بدون استفاده از ابزارهای پیچیده قابل توجه است.

کلید واژگان: قاب مهاربندی شده همگرا، عملکرد هیستریزیس، اتلاف انرژی، میراگر *IPE*، کنترل غیرفعال

## 1- مقدمه

مهاربندی شده همگرا را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد [20] (شکل 1).



شکل 1- رفتار هیستریزیس قاب‌های مهاربندی شده همگرا تحت بارگذاری چرخه‌ای

بنابراین، جلوگیری و یا به تاخیر انداختن پدیده کماتش منجر به رفتار شکل‌پذیر قاب‌های مهاربندی شده همگرا می‌شود. در این مقاله، یک تیر ساده 200 میلی‌متری ساخته شده با مقاطع IPE دورریز (به عنوان یک راهکار عملی و اقتصادی) برای ارتقا رفتار چرخه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرا پیشنهاد شده است. ظرفیت خمشی این تیر ساده که تابعی از هندسه مقطع IPE است به گونه‌ای تنظیم می‌شود که کمتر از ظرفیت عضو مورب در کماتش فشاری باشد. بنابراین کماتش عضو فشاری با تسلیم خمشی تیر ساده در فیور پیشنهادی جایگزین خواهد شد. تسلیم خمشی فیوز IPE تحت بارگذاری چرخه‌ای انرژی لرزه‌ای را مستهلک می‌کند. از این رو آسیب‌ها در تیر ساده 200 میلی‌متری متمرکز می‌شوند. بنابراین محاسبه و اجرای مناسب فیوز IPE عملکرد انعطاف‌پذیر قاب‌های مهاربندی شده همگرا را تضمین می‌کند.

## 2- پیکربندی فیوز IPE و ایده آن

پدیده کماتش یک شکست غیر شکل‌پذیر است که باید با یک شکست شکل‌پذیر مانند تسلیم خمشی و یا برشی جایگزین شود. در راستای شکست شکل‌پذیر، یک مفصل پلاستیکی برای اتلاف انرژی القائی باید تشکیل شود. پروفیل IPE با طول 200 میلی‌متر برای ساخت یک تیر ساده تک دهانه استفاده می‌شود. تکیه‌گاه این تیر

قاب‌های مهاربندی شده همگرا یکی از گسترده‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر نیروی لرزه‌ای هستند. آنها به دلیل سختی بالا و همچنین سهولت اجرا به طور گسترده به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بار جانبی استفاده می‌شوند. پس از زلزله، خسارات احتمالی در عناصر کمتری از قاب‌های مهاربندی شده در مقایسه با قاب‌های خمشی متمرکز می‌شود. از این رو هزینه تعمیر این قاب‌ها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. کماتش زود هنگام عضو فشاری و از دست دادن سختی شدید چالش اصلی انواع قاب‌های همگرا (با مهاربندی V، مهاربندی V معکوس، مهاربندی X و مهاربندی مورب) است. این موضوع منجر به عملکرد غیر شکل‌پذیر تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌شود. بنابراین، مطالعات متعددی برای بهبود عملکرد هیستریزیس و همچنین رفتار لرزه‌ای این نوع سیستم مهاربندی انجام شد [1-4].

برای ارتقاء عملکرد جانبی قاب‌های مهاربندی شده همگرا دو راهکار پیشنهاد شده است. راهکار نخست استفاده از مهاربندهای کماتش تاب است. در این راهکار برای بهبود عملکرد مهاربند، رفتار عضو قطری تحت فشار بر اساس رفتار کششی آن تنظیم خواهد شد [5-9]. راهکار دوم که در این مقاله به آن پرداخته شده است، استفاده از فیوز سازه‌ای است. با تمرکز آسیب بر روی این المان، اعضای اصلی سازه محافظت خواهند شد. این راهکار توسط بسیاری از محققین مورد ارزیابی قرار گرفته و پیکربندی‌های مختلفی از فیوزهای سازه‌ای معرفی شده است [10-19].

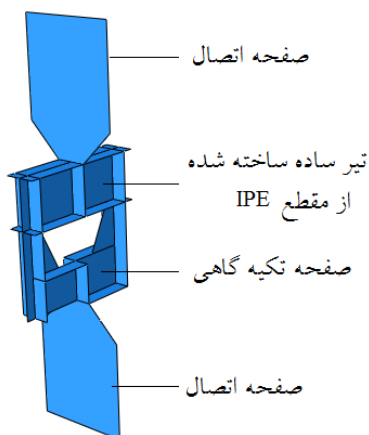
فیوز<sup>1</sup> IPE پیشنهادی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی مورب را اصلاح خواهد کرد. این فیوز قابل ساخت از مصالح دورریز بوده و به راحتی قابل ساخت و اجرا می‌باشد. از این رو، میراگر فیوز IPE را می‌توان به عنوان یک فیوز سازه‌ای مقرون به صرفه معرفی کرد.

مطالعات بر روی رفتار جانبی قاب‌های مهاربندی شده همگرا نشان می‌دهد که شکل‌پذیری و رفتار لرزه‌ای این قاب‌ها به شدت متأثر از رفتار عضو قطری تحت فشار می‌باشد. کاهش سختی و مقاومت پس از کماتش عضو قطری تحت فشار، عملکرد هیستریزیس قاب‌های

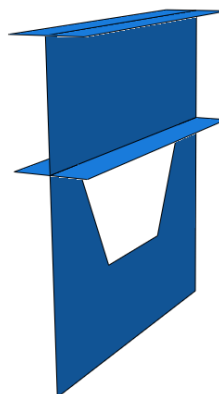
<sup>1</sup> - I-Profile European

هیستریزیس سیستم‌های قاب های مهاربندی شده همگرا، تیر تک دهانه باید به گونه‌ای طراحی شود که قبل از کماتش عضو مهاربندی، تسلیم شود. برای افزایش مقاومت برشی تیر تک دهانه و صفحه تکیه گاهی از تعدادی سخت‌کننده استفاده می‌شود (شکل 2). بکارگیری میراگر فیوز IPE پیشنهادی در یک قاب مهاربندی شده مورب در شکل 3 نشان داده شده است.

صفحه‌ای می‌باشد که دارای برش ذوزنقه‌ای است. این صفحه، صفحه تکیه‌گاهی نام‌گذاری شده است. تیر و صفحه تکیه‌گاهی آن با دو صفحه اتصال به عضو مهاربندی مورب متصل می‌شوند. بار محوری عضو مهاربندی به صورت بار متمرکز بر وسط تیر ساده تک دهانه اعمال می‌شود. این بار می‌تواند موجب کماتش عضو مهاربندی گردد و یا باعث تسلیم تیر تک دهانه مونتاژ شده شود. برای بهبود عملکرد

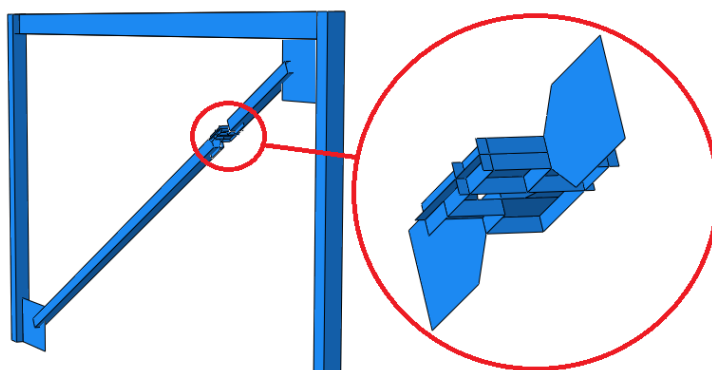


ب



الف

شکل 2- میراگر فیوز IPE؛ الف) تیر ساده تک دهانه و صفحه تکیه گاهی. ب) صفحه اتصال و سخت کننده های مورد استفاده در میراگر پیشنهادی



شکل 3- بکارگیری میراگر فیوز IPE پیشنهادی

## 3- مطالعه تحلیلی

اصلی خمش برابر با  $23.22 \times 10^3 \text{ mm}^3$  است. با فرض اینکه  $L$  و  $F_y$  به ترتیب برابر با 140 میلی‌متر و 300 مگاپاسکال هستند،  $P_e$  برابر است با:

$$P_e = \frac{4 \times 23.22 \times 10^3 \times 300}{200} \quad (6)$$

$$\cong 139.3 \text{ kN}$$

با توجه به هندسه فیوز IPE پیشنهادی (شکل 2)، ممکن است بخشی از انرژی تحمیلی از طریق تسلیم برشی پانل‌های ایجاد شده مستهلک گردد. این فیوز از دو صفحه برشی تشکیل شده است. مقاومت تسلیم برشی هر پانل را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$F_{vy} = \frac{F_y}{\sqrt{3}} bt \quad (7)$$

که در آن  $b$  ارتفاع پانل است که 74.8 میلی‌متر است و  $t$  ضخامت پانل است که 3.8 میلی‌متر است. بنابراین برای هر پانل برشی، مقاومت تسلیم برشی تقریباً 49 کیلو نیوتن خواهد بود. در نتیجه، مقاومت تسلیم برشی فیوز پیشنهادی ساخته شده با IPE80، 98 کیلو نیوتن است.

## 4- مطالعات آزمایشگاهی

عملکرد چرخه‌ای فیوز IPE و جذب انرژی آن از طریق تست چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. برای شناسایی خواص مصالح، آزمایش کششی منطبق بر استاندارد ASTM - E8، روی دو کوپن گرفته شده از مقطع IPE انجام شد (شکل 4).

برای انتخاب IPE مناسب، ابتدا باید ظرفیت کمانشی عضو قطری محاسبه شود. مقاومت کمانشی الاستیک ( $P_e$ ) عضو فشاری برابرست با:

$$P_e = F_e A_g \quad (1)$$

که در آن  $F_e$  تنش کمانش الاستیک (رابطه اوپلر)، به شرح زیر است:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2)$$

که در آن  $\lambda$  ضریب لاغری عضو مهاربندی مورب است. تقاضای خمشی ( $M_u$ ) ناشی از اعمال نیروی متمرکز  $P_e$  روی تیر ساده تک دهانه با طول  $L$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

$$M_u = \frac{P_e L}{4} \quad (3)$$

$M_p$  ظرفیت خمشی پلاستیک تیر ساده تک دهانه است و می‌توان آن را با معادله (4) محاسبه کرد:

$$M_p = F_y Z \quad (4)$$

که در آن  $Z$  اساس مقطع پلاستیک حول محور اصلی است.

بنابراین  $Z$  سطح مقطع IPE مورد استفاده برای فیوز پیشنهادی باید به صورت زیر باشد:

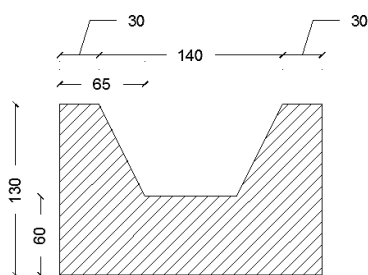
$$M_p = M_u \rightarrow F_y Z = \frac{P_e L}{4} \quad (5)$$

$$Z = \frac{P_e L n}{4 F_y}$$

برای مطالعه عملکرد هیستریزس فیوز پیشنهادی، مدل ساخته شده از IPE80 با استفاده از دستگاه یونیورسال مورد آزمایش قرار گرفته است. اساس مقطع پلاستیک سطح مقطع IPE80 حول محور

پیکربندی فیوز IPE پیشنهاد شده در این مطالعه در شکل 2 نشان داده شده است. این فیوز از یک تیر ساده تک دهانه ساخته شده از مقطع IPE، صفحات اتصال و صفحه تکیه‌گاهی سخت شده تشکیل شده است.

در این مطالعه، فیوز IPE ساخته شده از IPE80 به طول 200 میلی‌متر، آزمایش شده است. هندسه صفحه تکیه‌گاهی در شکل 6 نشان داده شده است. ضخامت صفحه تکیه‌گاهی، سخت‌کننده‌ها و ورق‌های اتصال به ترتیب 20 میلی‌متر، 10 میلی‌متر و 20 میلی‌متر است. برای اتصال تمام اجزای فیوز IPE از جوشکاری شیار نفوذ کامل استفاده می‌شود (شکل 7). نمونه مونتاز شده با آهک رنگ‌آمیزی شده است (شکل 8).



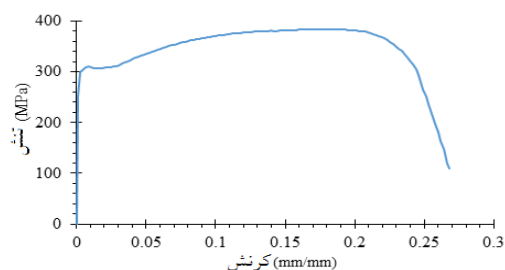
شکل 6- هندسه صفحه تکیه‌گاهی (همه ابعاد بر حسب mm هستند)



الف ب

شکل 4- الف) دستگاه تست یونیورسال؛ ب) نمونه برای آزمون کشش

نمودار تنش- کرنش مستخرج از آزمایش کشش در شکل 5 نشان داده شده است. طبق این نمودار، مدول الاستیک، تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش شکست به ترتیب برابر با 200540.9 مگاپاسکال، 300 مگاپاسکال، 383.6 مگاپاسکال و 26.8% است. نسبت پواسون برابر با 0.3 در نظر گرفته می‌شود.



شکل 5- نمودار تنش-کرنش به دست آمده از آزمون کشش

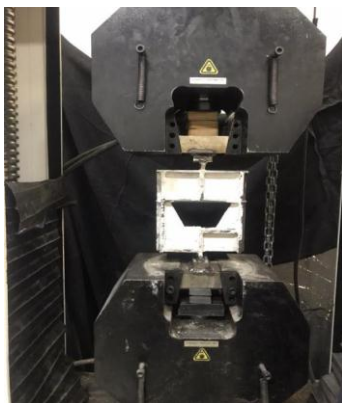


ب



الف

شکل 7- الف) جوشکاری شیار نفوذ کامل نمونه؛ ب) نمونه ساخته شده



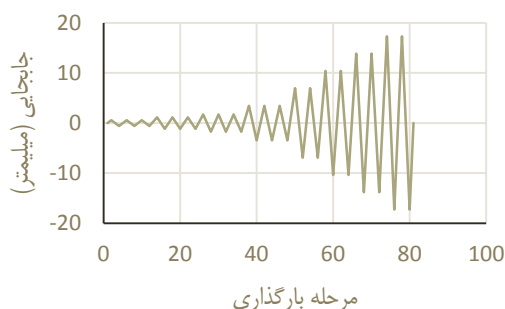
شکل 9- میراگر فیوز IPE در دستگاه تست یونیورسال

همانطور که در شکل 11 الف) نشان داده شده است، پوسته ریزی آهک از پانل‌های برشی (ورق جان تیر ساده در میراگر IPE) آغاز می‌شود. به عبارت دیگر، عملکرد غیر ارتجاعی از طریق تسلیم برشی پانل‌ها آغاز می‌شود. تغییر شکل پلاستیک پانل‌های برشی موجب استهلاک انرژی تحمیل شده به سیستم می‌گردد. با افزایش تغییر شکل وسط دهانه تیر ساده (بخشی از میراگر نشان داده شده در شکل 2-ب)، تسلیم خمشی بال مقطع IPE آغاز می‌شود. با تسلیم بال IPE، ظرفیت اتلاف انرژی نمونه آزمایشی افزایش می‌یابد. در نهایت، میراگر فیوز IPE در خیزی حدود 18 میلی متر در وسط دهانه تیر ساده



شکل 8- رنگ آمیزی فیوز IPE پیشنهادی با آهک

تیر ساده تک دهانه تحت یک بار متمرکز است که به صورت چرخه‌ای از طریق عضو محوری قاب مهاربندی شده اعمال می‌شود. برای شبیه‌سازی اثرات جزء محوری قاب مهاربندی شده، از دستگاه تست یونیورسال استفاده می‌شود. از این رو، نمونه فیوز پیشنهادی IPE توسط دستگاه تست یونیورسال با سرعت 0.04 میلی متر بر ثانیه مطابق با بارگذاری پروتکل ATC40 آزمایش شد (شکل 9 و 10).



شکل 10- چرخه بارگذاری مورد استفاده در این مطالعه

#### 4-1- ضریب شکل پذیری و میرایی

شکل پذیری معیاری برای اندازه گیری تغییر شکل پلاستیک قبل از گسیختگی است. این ضریب از رابطه 8 محاسبه می شود.

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (8)$$

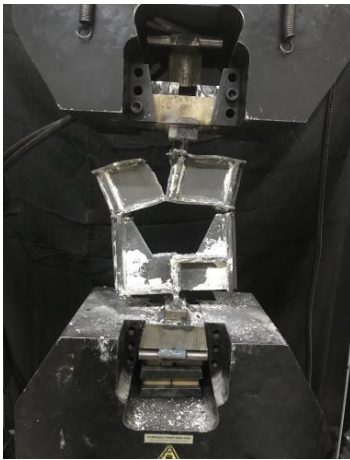
با افزایش ضریب شکل پذیری یک سیستم، ظرفیت جذب انرژی و در نتیجه ضریب رفتار آن افزایش می یابد. رفتار مناسب یک تیر ساخته شده با سطح مقطع IPE باعث می شود که میراگر فیوز IPE پیشنهادی

عملکرد هیستریزس با ضریب شکل پذیری مناسب داشته باشد. ضریب شکل پذیری فیوز IPE آزمایش شده 6 است. این ضریب، نسبت جابجایی 18 متری (به عنوان جابجایی نهایی) به جابجایی 3 میلی متری (به عنوان جابجایی تسلیم) است.

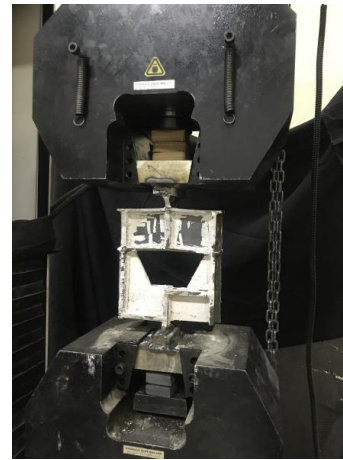
گسیخته می شود. پارگی از بال فوقانی شروع شده و به سمت بال پایین امتداد می یابد. این موضوع، تسلیم خمشی در فیوز IPE پیشنهادی را تایید می نماید. به عبارت دیگر، اگرچه پانل های برشی تسلیم شدند، اما عملکرد هیستریزس میراگر پیشنهادی همچنان پایدار می باشد. این پایداری به دلیل مقاومت بال های IPE است. هنگامی که مقدار کرنش در بال فوقانی (یا تحتانی) به مقدار حداکثر خود می رسد، ناپایداری عملکرد هیستریزس آغاز می شود (بعبارت دیگر مقاومت و سختی متناظر با چرخه ها کاهش می یابد) و فرآیند پارگی آغاز می شود. تسلیم خمشی یک شکست انعطاف پذیر است که می تواند عملکرد چرخه ای مناسب فیوز IPE و در نتیجه عملکرد قاب مهاربندی شده قطری را تضمین کند. سطح مقطع IPE حول محورهای اصلی خمشی متقارن است. از این رو انتظار می رود که فیوز IPE عملکرد تقریباً یکسانی را تحت بارگذاری متمرکز چرخه ای داشته باشد. بنابراین، بر خلاف قاب متداول مهاربندی شده قطری، عملکرد هیستریزس قاب های مهاربندی شده قطری مجهز به فیوز IPE پیشنهادی باید تقریباً متقارن باشد.

عملکرد هیستریزس میراگر فیوز IPE در شکل 12 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، این نمودار تقریباً متقارن است و از حلقه های قوی تشکیل شده است که رفتار بسیار مناسب میراگر پیشنهادی را نشان می دهد.



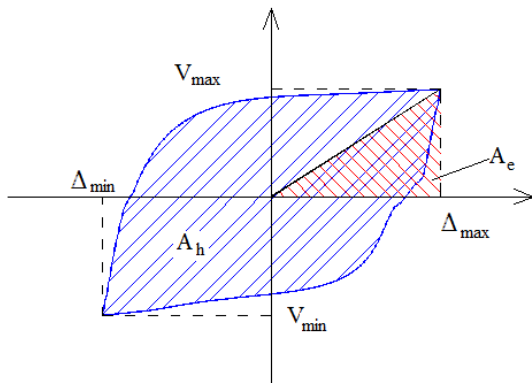


ب

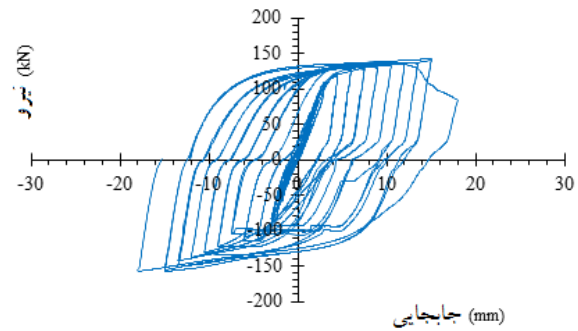


الف

شکل 11- الف) پوسته شدن آهک در پانل برشی. ب) پارگی نمونه



شکل 13- نمودار نیرو-جابجایی برای محاسبه میرایی ویسکوز معادل



شکل 12- عملکرد هیستریزیس میراگر پیشنهادی ساخته شده

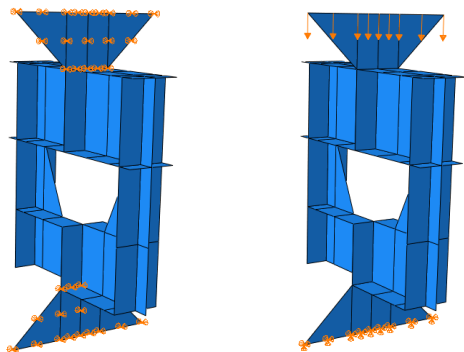
IPE80

نسبت میرایی ویسکوز معادل ( $\zeta_{eq}$ ) از رابطه 9 محاسبه می‌شود:

$$\zeta_{eq} = \frac{A_h}{4 \pi A_e} \quad (9)$$

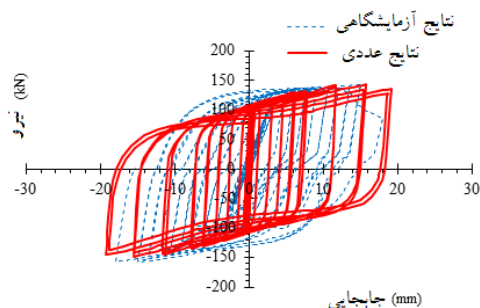
به ترتیب مقدار انرژی تلف شده در یک چرخه بارگذاری و مقدار انرژی ذخیره شده در یک سیستم الاستیک خطی هستند (شکل 13). قاب‌های مهاربندی شده همگرا، نسبت میرایی ذاتی پایینی دارند. بنابراین، افزودن یک دستگاه اتلاف انرژی به سیستم قاب‌های مهاربندی شده همگرا، برای افزایش نسبت میرایی آنها ارزشمند است. این موضوع می‌تواند ارتعاش جانبی سیستم را کاهش

Merge/Cut Instances با یکدیگر به صورت یکپارچه در آورده شده اند.



الف ب

شکل 14- الف) نحوه بارگذاری و تعریف تکیه‌گاه در نمونه مدلسازی شده (ب) تعریف تکیه‌گاه جانبی در صفحات اتصال



شکل 15- نمودار هیستریزس عددی (منحنی پیوسته) در مقایسه با داده های تجربی (نقطه چین)

دهد. بر اساس نمودار هیستریزس مستخرج از مطالعه آزمایشگاهی، نسبت میرایی ویسکوز معادل در سیکل کشش و همچنین در سیکل فشار محاسبه و در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- میرایی ویسکوز معادل

سیکل	$\Delta$	$V$	$A_h$	$A_e$	$\zeta$
	(mm)	(kN)	(J)	(J)	(%)
کششی	15	142.7	6239	1070	46.4
فشاری	15	157.7	6239	1183	42

نسبت میرایی ویسکوز معادل در سیکل کشش 46.4 و همچنین برای سیکل تراکم برابر با 42 است. دستیابی به چنین میزان نسبت میرایی، کارایی میراگر فیوز پیشنهادی IPE را تایید می‌کند.

## 5- مطابقت عددی

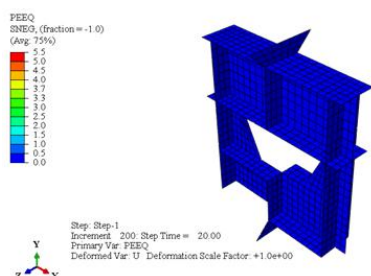
برای بررسی عددی عملکرد هیستریزس، فیوز IPE پیشنهادی از طریق نرم‌افزار اجزا محدود (FE) ABAQUS مدلسازی شد. مقطع IPE، صفحات اتصال، سخت‌کننده‌ها، و صفحه تکیه‌گاهی سخت شده با استفاده از یک المان پوسته (Shell) چهار گره ای کاهش یافته R4S مدل‌سازی و مش‌بندی شدند. علاوه بر این، اثرات غیرخطی جابجایی‌های بزرگ در نظر گرفته شد. نمونه از طریق لبه پایین صفحه تکیه‌گاهی نگه داشته می‌شود. برای این لبه نگهدارنده، جابجایی در تمام جهات و همچنین چرخش حول تمام محورها محدود شد. در طول تحلیل چرخه ای، بارهای کششی و فشاری بر روی نمونه FE از طریق جابجایی اعمال شده بر روی لبه بالایی صفحه اتصال طبق پروتکل ATC 40 اعمال شد (شکل 14-الف). با تعبیه تکیه‌گاه های جانبی از کمانش خارج از صفحه دو صفحه اتصال در بالا و پایین المان فیوز پیشنهادی جلوگیری شده است (شکل 14-ب).

از آنجا که تمامی المانهای فیوز پیشنهادی با استفاده از جوش شیار با نفوذ کامل به یکدیگر متصل شده اند، لذا پس از قرار گرفتن قطعات در کنار یکدیگر تمامی اعضا با استفاده از دستور

کیلونیوتن است). نقطه B منحنی پوش تقریباً با مقاومت نهایی نمونه مطابقت دارد. توزیع تنش ون مایسز و کرنش پلاستیک معادل نمونه در نقطه B در شکل 18 نشان داده شده است. بر اساس شکل 18، بال‌های IPE در میانه دهانه تسلیم شدند. بر اساس مطالعه FE، مقاومت تسلیم خمشی 142 کیلو نیوتن است که نزدیک به مقاومت خمشی تحلیلی است (139/3 کیلو نیوتن). توزیع تنش ون مایسز و کرنش پلاستیک معادل نمونه در نقطه C در شکل 19 نشان داده شده است. این نقطه مربوط به تغییر شکل 19 میلی متری است که شکل‌پذیری مناسب میراگر مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

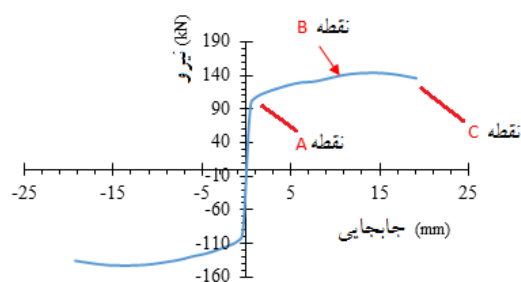
### 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم کنترل غیرفعال جدید به صورت تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار چرخه‌ای فیوز پیشنهادی ساخته شده با استفاده از مقطع IPE مورد ارزیابی قرار گرفت.



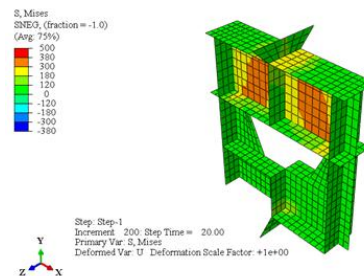
ب

شکل 17- الف) توزیع تنش ون مایسز در نقطه A ب) کرنش پلاستیک معادل در نقطه A

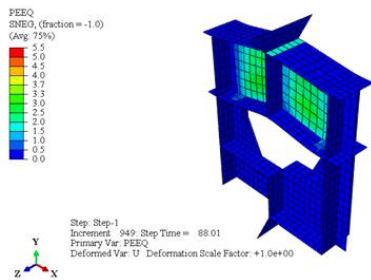


شکل 16- منحنی پوش نمودار هیستریزس

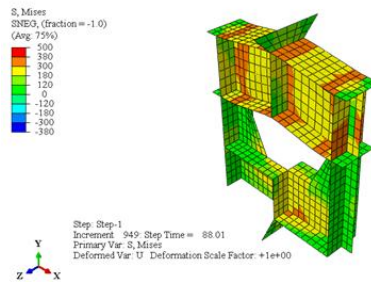
در شکل 15، منحنی با خط ممتد رسم شده با استفاده از مطالعه FE تطابق مناسبی را بین نتایج آزمایشگاهی و مطالعه عددی نشان می‌دهد. منحنی پوش نمودار هیستریزس FE در شکل 16 نشان داده شده است. طبق منحنی پوش، اولین جابجایی تسلیم قابل توجه برابر با تغییر شکل 0.51 میلی‌متر است که مربوط به بار متمرکز 99.5 کیلونیوتن است (نقطه A در شکل 16). توزیع تنش ون مایسز و کرنش پلاستیک معادل نمونه در نقطه A در شکل 17 نشان داده شده است. مطابق شکل 17، در این مرحله، صفحات برشی تسلیم شدند. بر اساس تحلیل FE، مقاومت تسلیم برشی 99.5 کیلونیوتن است که نزدیک به مقاومت برشی تحلیلی محاسبه شده در بخش 3 است (98



الف

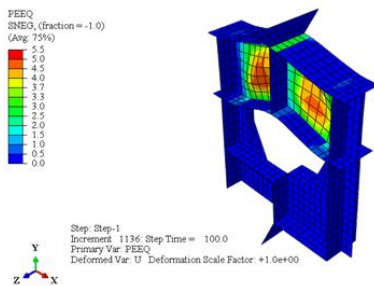


ب

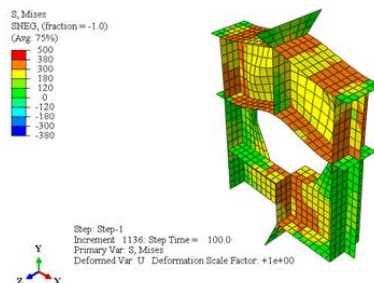


الف

شکل 18- الف) توزیع تنش ون مایسزدر نقطه B ب) کرنش پلاستیک معادل در نقطه B



ب



الف

شکل 19- الف) توزیع تنش ون مایسزدر نقطه C ب) کرنش پلاستیک معادل در نقطه C

[3] علوی نیا، سید مجید؛ حسین زاده، لیلا؛ قمری، علی؛ اکبرپور، عباس. بررسی رفتار میراگرهای شکاف‌دار فولادی در سازه‌های بتنی. آنالیز سازه - زلزله، دوره 18 شماره 1 سال 1400.

[4] محمدی، مسعود؛ کافی، محمد علی؛ خیرالدین، علی؛ رونق، حمیدرضا. مطالعه آزمایشگاهی فیوز نوین کم‌انرژی‌ناپذیر کامپوزیتی برای مهارندهای هم‌محور تحت بار چرخه‌ای. مهندسی سازه و ساخت، دوره 8 شماره 4 سال 1400.

[5] Castaldo, P. Tubaldi E. Selvi F. Gioiella L. Seismic performance of an existing RC structure retrofitted with buckling restrained braces. *Journal of Building Engineering*. 2021; 33, 101688.

[6] Iwata M. Kato T. Wada A. Buckling-restrained braces as hysteretic dampers. In *Behaviour of steel structures in seismic areas 2021*; (pp. 33-38): CRC Press.

[7] Ozelik R. Dikiciasik Y. Erdil, E. F. The development of the buckling restrained braces with new end restrains. *Journal of constructional steel research*, 2017; 138, 208-220.

[8] Xie, Q. State of the art of buckling-restrained braces in Asia. *Journal of constructional steel research*, 2005; 61(6), 727-748.

[9] Zhou Y. Shao H. Cao Y. Lui E. M. Application of buckling-restrained braces to earthquake-resistant design of buildings: A review. *Engineering Structures*. 2021; 246, 112991.

[10] Cheraghi A. Zahrai S. M. Cyclic testing of multilevel pipe in pipe damper. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019; 23(10), 1695-1718.

[11] Garivani S. Askariani, S. S. Aghakouchak A. A. Seismic design of structures with yielding dampers based on drift demands. Paper presented at the Structures.2020.

[12] Khoshkalam, M. Mortezaeholi M. H. Zahrai, S. M. Proposed modification for ADAS damper to eliminate axial force and improve seismic performance. *Journal of Earthquake Engineering*, 2022; 26(10), 5130-5152.

[13] Sun Y.-Z. Li G.-Q. Sun F.-F. Jiang J. Experimental study on behavior of steel tube dampers. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021; 25(10), 2106-2126.

نتایج اصلی این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

1- منحنی‌های هیستریزیس نشان‌دهنده رفتار پایدار و متقارن میراگر فیوز پیشنهادی IPE در کشش و فشار است. بعبارت دیگر استفاده از این فیوز در مهارندهای قطری می‌تواند ضعف عملکرد آنها در فشار را مرتفع نماید و اصلاح‌کننده رفتار نامناسب مهارندهای قطری در فشار باشد.

2- استفاده از فیوز پیشنهادی ساخته شده با استفاده از مقطع IPE80، موجب می‌گردد تا میرایی ویسکوز معادل سیستم به 46% در حالت کششی و 42% در حالت فشاری افزایش یابد.

3- ضریب شکل‌پذیری در آزمایش چرخه‌ای برای میراگر پیشنهادی ساخته شده با IPE80 به 6 رسید. این ضریب، نسبت جابجایی 18 میلی‌متری (به عنوان جابجایی نهایی) به جابجایی 3 میلی‌متری (به عنوان جابجایی تسلیم) است.

4- انرژی تلف شده در آخرین حلقه آزمایش ( $A_H$ ) برای چرخه‌های کشش و فشار به 6239 ژول شده است؛ در حالی که این مقدار در آخرین حلقه الاستیک ( $A_E$ ) به ترتیب به 1070 ژول برای چرخه کششی و 1183 ژول برای چرخه فشاری بوده است. بعبارت دیگر، نسبت میرایی ویسکوز معادل به ترتیب برابر با 46.4% برای سیکل‌های کششی و 42% برای سیکل‌های فشاری است که توانایی چشمگیر فیوز پیشنهادی در اتلاف انرژی ورودی را نشان می‌دهند.

5- ساخت میراگر فیوز IPE بسیار مقرون به صرفه است. زیرا می‌تواند از مواد دورریز ساخته شوند. و اجرای آنها برای انواع مختلف قاب‌های همگرا کاملاً عملیاتی است.

## مراجع

[1] Halim H. Hsu H.-L. Steel A-braced frame upgrade performance under various load characteristics. *Journal of constructional steel research*, 2020; 175, 106303.

[2] پاچیده، قاسم؛ کافی، محمدعلی؛ قلهکی، مجید. ارزیابی آزمایشگاهی و عددی سیستم نوین مهاربندی با عضو لوزی‌شکل مجهز به میراگر تسلیم شونده. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره 53 شماره 11 سال 1400.

[14] Wang W. Luo, Q. Wang, B. Song, J. Quan, C. Performance Research and Optimization of Corrugated Mild Steel Damper with considering Weld Failure. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26(6), 2802-2821.

[15] تنها، امیرحسین؛ اشرفی، حمیدرضا. عملکرد فیوز در قاب‌های فولادی با اتصالات المان زانو تحت بارگذاری چرخه‌ای. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره 55 شماره 7 مهرماه سال 1402.

[16] شجاعی فر، حمید؛ ملکی، احمد؛ لطف‌اللهی یقین، محمد علی. بررسی عملکرد قاب‌های خمشی فولادی نیمه صلب مجهز به میراگرهای غیرفعال منحنی شکل فولادی. مهندسی سازه و ساخت، دوره 9 شماره 4 سال 1401.

[17] انصاری، علیرضا؛ عباسی، سعید؛ رسولی، اصغر. تأثیر میراگر پیچشی-تسلیمی بر جذب انرژی ارتعاشی سازه. آنالیز سازه - زلزله، دوره 19 شماره 1 سال 1401.

[18] مودب، الهام؛ تیزهوش سردرودی، حسین. بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگر لوله‌ای جدید دوسطحی. مهندسی سازه و ساخت، دوره 8 شماره 3 سال 1400.

[19] کچوئی، علی؛ کافی، محمد علی؛ گرامی، محسن. بهبود رفتار پس از کماتش مهاربندهای همگرا با استفاده از فیوز موضعی مقید شده بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی و عددی. مهندسی سازه و ساخت، دوره 7 شماره 1 سال 1399.

[20] Zheng H.-D. Fan J. Analysis of the progressive collapse of space truss structures during earthquakes based on a physical theory hysteretic model. Thin-Walled Structures, 2018; 123, 70-81

