



پانزدهمین کنگره ملی مهندسی عمران،

۲۲ و ۲۳ اردیبهشت ماه ۱۴۰۵

دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران



## بررسی رفتار تیر پیوند شکل پذیر با مقطع جعبه ای دارای باز شو در سیستم های مهاربندی

### واگرا

رسول حاجی شریفی<sup>۱\*</sup>، فرهاد بهنام فر<sup>۲</sup>، پرهام معمارزاده<sup>۳</sup>، سید محمد متولی امامی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد ؛ rasoulhajisharifi@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران؛ farhad167@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران؛

Parham.memarzadeh@iau.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشیار، مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد،

ایران؛ Parham.memarzadeh@iau.ac.ir

<sup>۵</sup> استادیار مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد،

ایران؛ sm.emami@iau.ac.ir

<sup>۶</sup> استادیار، مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد،

ایران؛ sm.emami@iau.ac.ir

\* نویسنده مسؤول: رسول حاجی شریفی

### چکیده

قاب های مهاربندی شده ی واگرا به عنوان یکی از پرکاربردترین سیستم های باربر جانبی در جهان شناخته شده اند، که به کمک تیرهای پیوند انرژی را به خوبی مستهلک می کنند. در قاب های واگرا تیر پیوند مهمترین عضو قاب محسوب می شوند. بنابراین بررسی این تیرها از این جهت می تواند مهم باشد. معمولاً استفاده از تیرهای پیوند کوتاه به علت مشکلات اجرایی مانند نزدیک بودن صفحات اتصال تیر به مهاربند، اصطکاک آن ها در حین زلزله یا ملاحظات معماری هنگام ساخت امری مشکل ساز است. لذا تمایل به استفاده از تیرهای پیوند با طول بلند بیشتر است. این در حالی است که شکل پذیری و سختی در تیرهای پیوند کوتاه بیشتر از تیرهای پیوند بلند می باشد. در این پژوهش با استفاده از یک کار آزمایشگاهی و روش تحلیل عددی در نرم افزار ABAQUS مد نظر است، با مقطع پیشنهادی در نظر گرفته شده برای تیر پیوند، برای تیرهای پیوند با طول بلند، شکل پذیری را افزایش داد. رفتار تیر پیوند برای طول های بزرگتر از  $2.6 \frac{M_p}{V_p}$  خمشی خواهد بود یا به عبارتی نیروی خمشی تعیین کننده ی شکست و تسلیم شدن تیر می باشد. هدف این پژوهش این است که، برای چنین تیرهایی رفتاری آنها را بتوان از خمشی به برشی تغییر داد، یا به عبارتی بتوان کاری انجام داد که، برای تیرهای پیوند با طول بلند و رفتار خمشی، مقاومت برشی هم حاکم شود و اتلاف انرژی به صورت برشی اتفاق بیفتد.

**کلمات کلیدی:** مهاربند واگرا، تیر پیوند شیاردار، رفتار برشی، اتلاف انرژی، مقطع جعبه ای

### ۱- مقدمه

در طراحی لرزه ای سازه های فولادی، سیستم های مقاوم جانبی نقش بسیار مهمی در حفظ ایمنی و کاهش خسارات ناشی از زلزله ایفا می کنند. در این زمینه، سیستم مهاربندی واگرا (Eccentrically Braced Frames – EBFs) یکی از پرکاربردترین و موفق ترین روش ها محسوب می شود که با استفاده از تیرهای پیوند (Link Beams) به عنوان نواحی شکل پذیر و مستهلک کننده انرژی، امکان تحمل تغییر شکل های غیرالاستیک کنترل شده را فراهم می آورد [۱،۲]. این سیستم ها به دلیل تلفیق ویژگی های سیستم های قاب خمشی و مهاربندی، تعادلی مطلوب بین سختی، مقاومت و شکل پذیری ارائه می دهند. این سیستم ها سختی مناسبی در برابر بارهای جانبی دارند، که باعث کاهش تغییر شکل ها در سازه می گردند. از سوی دیگر در بارهای جانبی شدید از جمله زمین لرزه های قوی، از قابلیت جذب انرژی و شکل پذیری مطلوبی برخوردار هستند. بدین ترتیب دو نیاز اساسی سازه برای مقابله با نیروهای جانبی، یعنی سختی و شکل پذیری، توسط این سیستم ها تأمین می گردد. در سیستم مهاربندی واگرا تیر پیوند مهمترین عضو قاب محسوب می شوند. بنابراین بررسی این تیرها از این جهت می تواند مهم باشد.

رفتار تیرهای پیوند در سیستم های مهاربندی واگرا به شدت به طول تیر و نسبت آن به ظرفیت های مقطعی بستگی دارد. طبق آیین نامه ها و تحقیقات مرجع،



تیرهای پیوند در سه دسته کوتاه، متوسط و بلند طبقه‌بندی می‌شوند. تیرهای کوتاه (با طول کمتر از 1.6 برابر نسبت  $\frac{M_p}{V_p}$ ) عمدتاً تحت تأثیر نیروهای برشی قرار دارند و در جان تیر تغییر شکل‌های برشی غالب‌اند. تیرهای متوسط (طول بین 1.6 تا 2.6 برابر  $\frac{M_p}{V_p}$ ) دارای رفتار ترکیبی خمشی-برشی بوده و تیرهای بلند با طول (بیشتر از 2.6 برابر  $\frac{M_p}{V_p}$ ) عمدتاً خمشی رفتار می‌کنند [۳،۴]. این تفکیک، اهمیت ویژه‌ای در طراحی و تحلیل سازه دارد چرا که میزان شکل‌پذیری و نحوه تسلیم تیر پیوند به طول آن وابسته است.

در تیر پیوند برشی، اتلاف انرژی توسط رفتار غیر ارتجاعی برشی جان تیر پیوند در تمام طول تیر پیوند صورت می‌گیرد. و در تیر پیوند خمشی، اتلاف انرژی با شکل‌گیری مفاصل خمشی غیر ارتجاعی در دو انتهای تیر پیوند انجام می‌شود. لذا می‌توان گفت: اتلاف انرژی در برش به دلیل اینکه در تمام طول تیر جاری شدن برشی صورت می‌گیرد، پربازده‌تر و مفیدتر از اتلاف انرژی در خمش می‌باشد. ولی مشکلی که وجود دارد این است که استفاده از تیرهای پیوند کوتاه به علت مشکلات اجرایی مانند نزدیک بودن صفحات اتصال تیر به مهاربند، اصطکاک آن‌ها در حین زلزله یا ملاحظات معماری هنگام ساخت امری مشکل ساز است. لذا تمایل به استفاده از تیرهای پیوند با طول بلند بیشتر است. از این جهت موضوع پیشنهادی، موضوعی جدیدی بوده و می‌تواند قابلیت‌های اجرایی فراوانی را می‌تواند داشته باشد.

در بیشتر مطالعات قبلی رفتار تیرهای پیوند کوتاه مورد ارزیابی قرار گرفته است. اما در این پژوهش تصمیم بر این است که، رفتار تیرهای پیوند بلند بررسی شود. با انجام این پژوهش و ایده‌ای که مد نظر است یعنی ایجاد بازشوهایی در جان تیر پیوند، می‌توان برای تیرهای پیوند با طول بلند، شکل‌پذیری را افزایش داده و با وجود طول بلند تیر، رفتار آن را از خمشی تنها به برشی تغییر داد.

مقاطع جعبه‌ای در تیرهای پیوند به دلیل توزیع یکنواخت تنش‌ها، سختی پیچشی بالا و مقاومت مناسب در برابر کمناش موضعی، به خصوص در تیرهای کوتاه و متوسط، کاربرد فراوانی یافته‌اند [۵]. مقطع پیشنهادی برای تیر پیوند در این پژوهش به صورت جعبه‌ای بوده، که در جان آن شیارهایی تعبیه شده است. دلیل استفاده از مقطع جعبه‌ای به جای مقطع I شکل این است که: معمولاً در مقطع I شکل جان نازک می‌باشد و اگر بخواهیم در جان تیر سوراخ ایجاد کنیم، خطر کمناش برشی یا موضعی افزایش پیدا می‌کند. اما در مقطع جعبه‌ای معمولاً جان از جان مقطع I شکل ضخیم‌تر است، پس خطر کمناش برشی یا موضعی دیگر وجود ندارد، از طرفی با ایجاد بازشو در دو جان مقطع جعبه‌ای می‌توان رفتار برشی را حاکم کرد.

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که با ایجاد شیار یا بازشو در جان تیر پیوند، به ویژه در تیرهای بلند، رفتار تیر از خمشی صرف به رفتاری برشی تبدیل می‌شود که این امر موجب تمرکز تغییر شکل‌های پلاستیک در جان و افزایش شکل‌پذیری تیر پیوند می‌گردد [۶،۷]. این تغییر مکانیزم تسلیم می‌تواند به بهبود پاسخ هیستریزس و اتلاف انرژی کمک کند و از شکست‌های ترد جلوگیری نماید. بنابراین، طراحی دقیق بازشوها و بررسی اثرات آنها بر عملکرد لرزه‌ای تیرهای پیوند جعبه‌ای امری حیاتی است.

در پژوهش حاضر، با استفاده از یک کار آزمایشگاهی و روش تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS، اثر ابعاد، شکل، و موقعیت بازشو در جان تیرهای پیوند جعبه‌ای با طول‌های بلند بررسی شده است. نتایج حاصل می‌تواند راهنمای مناسبی برای طراحی بهینه تیرهای پیوند دارای بازشو در سیستم‌های مهاربندی و اگر آفرام آورد و به افزایش ایمنی و دوام سازه‌های فولادی کمک کند.

## ۲- پیشینه تحقیق

در طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی، استفاده از سیستم مهاربندی و اگر (EBF) به عنوان یکی از مؤثرترین گزینه‌ها برای افزایش شکل‌پذیری و اتلاف انرژی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. در این سیستم، بخش عمده انرژی ناشی از زلزله در ناحیه‌ای موسوم به تیر پیوند مستهلک می‌شود. مکانیزم عملکرد تیر پیوند بستگی زیادی به مشخصات هندسی و مکانیکی آن دارد. بر این اساس، مطالعات گسترده‌ای در سه دهه گذشته برای بررسی رفتار غیرخطی این اعضا انجام شده است.

Engelhardt و Popov (1989) یکی از اولین مطالعات نظام‌مند را در خصوص رفتار تیرهای پیوند بلند انجام دادند و مشخص نمودند که در تیرهای با طول زیاد، رفتار عمدتاً خمشی بوده و تمرکز تغییر شکل‌های غیرالاستیک در نواحی انتهایی تیر رخ می‌دهد [۸]. در ادامه، Richards و Uang (2003) به بررسی تیرهای کوتاه پرداختند و پروتکل‌هایی برای ارزیابی ظرفیت شکل‌پذیری آنها پیشنهاد کردند [۹]. به موجب آیین‌نامه AISC 341 تیرهای پیوند از نظر طول به سه دسته کوتاه ( $L < 1.6 \frac{M_p}{V_p}$ )، متوسط ( $1.6 \frac{M_p}{V_p} \leq L \leq 2.6 \frac{M_p}{V_p}$ ) و بلند ( $L > 2.6 \frac{M_p}{V_p}$ ) تقسیم می‌شوند [۲]. و همان‌طور که در قسمت‌های



قبل گفته شد، برای هر طولی رفتار خاصی برای تیر پیوند مورد انتظار است.

در زمینه نوع مقطع، مقاطع جعبه‌ای به دلیل خواصی همچون تقارن، سختی پیچشی بالا و مقاومت مناسب در برابر کمانش موضعی، به عنوان گزینه مناسبی برای استفاده در تیرهای پیوند معرفی شده‌اند (Xu et al. (2021). با انجام آزمایش‌های چرخه‌ای روی تیرهای پیوند جعبه‌ای نشان دادند که این مقاطع در مقایسه با مقطع I شکل دارای پایداری بهتری تحت بارگذاری رفت و برگشتی هستند [۱۰].

یکی از موضوعات مهم در طراحی اجرایی، ایجاد باز شو در جان تیر پیوند برای عبور تأسیسات یا کاهش وزن است. تحقیقات مختلفی اثر این باز شوها را بر رفتار سازه‌ای اعضای تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی کرده‌اند Lee و Bruneau (2008) با بررسی دیوارهای برشی فولادی سوراخ‌دار، نشان دادند که اگر ابعاد و موقعیت باز شو به درستی طراحی شود، افت ظرفیت قابل ملاحظه‌ای رخ نمی‌دهد [۱۱]. این یافته توسط Zhao و Dusicka (2014) در مطالعه عددی بر روی تیرهای پیوند EBF تأیید شد، جایی که استفاده از باز شو در جان تیر موجب تمرکز تغییر شکل در جان و بهبود شکل پذیری کلی عضو شد [۱۲].

در ایران نیز پژوهشگرانی چون صبور قمی و همکاران (۱۳۹۸) رفتار لرزه‌ای تیرهای پیوند با مقاطع غیرمتعارف را بررسی کرده و نقش شکل مقطع و نحوه تسلیم تیر پیوند در پایداری چرخه‌ای آن‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها بر اهمیت استفاده از مقاطع شکل پذیر در محل تیر پیوند برای جلوگیری از گسیختگی زودهنگام تأکید کرده‌اند [۱۳].

با وجود مطالعات انجام شده، هنوز جنبه‌هایی از رفتار تیرهای پیوند با باز شو در مقاطع جعبه‌ای به صورت کامل روشن نشده‌اند. برای مثال، تأثیر موقعیت‌های مختلف باز شو نسبت به مرکز تیر، اثر توأم کمانش موضعی و کمانش پیچشی-جانبی در حضور باز شو، و تأثیر چند باز شوی متوالی از جمله مواردی هستند که نیازمند بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی بیشتری‌اند.

### ۳- مقطع تیر پیوند

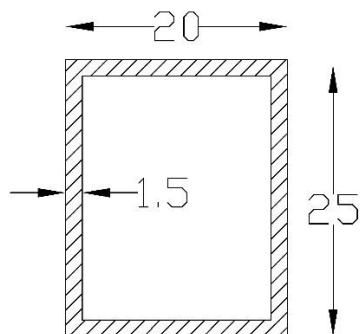
مطابق با ضوابط آیین‌نامه AISC 341، تیر پیوند در سیستم مهاربندی و اگر باید توانایی تحمل تغییر شکل‌های غیرالاستیک پایدار را داشته و رفتار هیستریزس مناسبی را تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان دهد [۲]. در این راستا، مقطع تیر پیوند باید مطابق با محدودیت‌های فشردگی و لاغری جان و بال در AISC 360 انتخاب شود تا از وقوع کمانش موضعی زودهنگام جلوگیری شود [۱۴].

در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران، به‌ویژه در ویرایش ۱۴۰۱، ضوابط تحلیل و طراحی تیرهای پیوند به‌صورت مفصل بیان شده و الزاماتی برای انتخاب مقطع مناسب و تحلیل دقیق آن ارائه گردیده است [۱۵].

#### ۳-۱ مقطع پیشنهادی تیر پیوند

در این پژوهش، به‌منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای و افزایش ظرفیت شکل‌پذیری تیر پیوند، از مقطع جعبه‌ای (Box section) استفاده شده است. این نوع مقطع به دلیل تقارن هندسی، توزیع یکنواخت تنش، سختی پیچشی بالاتر و مقاومت مناسب در برابر کمانش موضعی، عملکرد پایدارتری تحت بارگذاری چرخه‌ای از خود نشان می‌دهد. همچنین، مقاطع جعبه‌ای در مقایسه با مقاطع باز، رفتار هیستریزس منظم‌تری داشته و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری را فراهم می‌کنند. همچنین برای حاکم کردن رفتار برشی در جان تیر پیوند، شیارهایی را در جان مقطع جعبه‌ای ایجاد کرده‌ایم.

به همین منظور در این پژوهش از مقطع جعبه‌ای به ابعاد  $25 \times 20$  سانتی‌متر و با ضخامت  $1/5$  سانتی‌متر، مطابق شکل (۱) استفاده شده است. و طبق روابط (۱) و (۲) کنترل فشردگی و محدودیت نسبت پهنا به ضخامت برای مقطع در نظر گرفته شده، انجام شده است.



شکل ۱- مقطع در نظر گرفته شده برای تیر پیوند

$$\frac{b}{t} \leq 0.55 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \rightarrow \frac{20}{1.5} = 13.34 \leq 0.55 \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6}{1.15 \times 2400}} = 15.17 \rightarrow \text{ok} \quad (1)$$

$$\frac{h}{t} \leq 0.64 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \rightarrow \frac{25}{1.5} = 16.67 \leq 0.64 \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6}{1.15 \times 2400}} = 17.65 \rightarrow \text{ok} \quad (2)$$

در روابط فوق  $b$ ،  $h$  و  $t$  به ترتیب اندازه بال، جان و ضخامت مقطع جعبه‌ای هستند. همچنین  $E$ ،  $F_y$  و  $R_y$  به ترتیب مدول الاستیسیته، تنش تسلیم مشخصه فولاد و نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به تنش تسلیم مشخصه فولاد است.

## ۲-۳ ابعاد و فواصل بازشوهای جان

برای مقطع در نظر گرفته شده، لنگر پلاستیک مقطع و برش پلاستیک مقطع به ترتیب از روابط (۳) و (۴) بدست می‌آید.

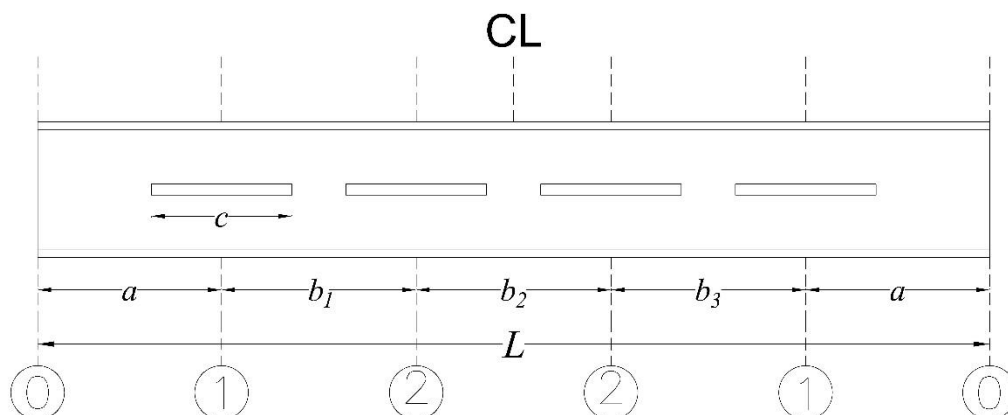
$$z = 1068 \text{ cm}^3 \rightarrow M_p = z f_y = 1068 \times 2400 = 2563200 \text{ kg.cm} \quad (3)$$

$$V_p = 0.6 f_y A_w = 95040 \text{ kg} \quad (4)$$

در روابط فوق  $Z$  اساس مقطع پلاستیک و  $A_w$  مساحت جان مقطع تیر پیوند می‌باشند.

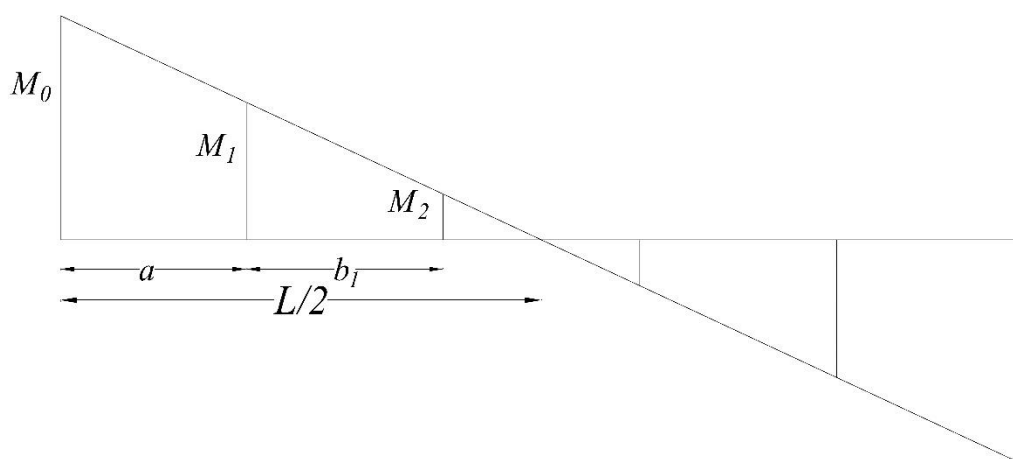
مطابق آیین‌نامه AISC 341 تیرهای پیوند به سه دسته کوتاه ( $L < 1.6 \frac{M_p}{V_p}$ )، متوسط ( $1.6 \frac{M_p}{V_p} \leq L \leq 2.6 \frac{M_p}{V_p}$ ) و بلند ( $L > 2.6 \frac{M_p}{V_p}$ ) تقسیم می‌شوند [۲]. برای مقطع در نظر گرفته شده در این پژوهش مقادیر فوق محاسبه شده است، و تیر پیوند با طول بلند مد نظر قرار گرفته شده است.

برای این که در فاصله بین شیارها تسلیم افقی اتفاق بیفتد، برش افقی بین شیارها را محاسبه کرده و برابر برش تسلیم قرار می‌دهیم. شکل (۲) نمای جانبی یک تیر پیوند با مقطع جعبه‌ای همراه با جان دارای باز شو را نشان می‌دهد. آرایش سوراخ‌ها در این شکل به گونه‌ای است که در مقطع صفر یا همان بر تکیه‌گاه تسلیم خمشی، و در چند مقطع افقی به سمت وسط دهانه تسلیم برشی اتفاق بیفتد. این مکانیزم برای شیارها به صورت متقارن در طرفین دهانه خواهد بود. و چون بیشترین مقدار برش در تار خنثی تیر وجود دارد، برای تسلیم برشی شیارها، آنها را به صورت افقی (شیار) در نظر گرفته‌ایم.



شکل ۲- نمای جانبی تیر پیوند با شیار

برش در طول تیر ثابت خواهد بود، ولی لنگر خمشی در طول تیر به صورت خطی تغییر می کند. نمودار لنگر خمشی به صورت شکل (۳) می باشد.  $M_0$  تا  $M_2$  به ترتیب لنگر خمشی در مقاطع صفر تا دو هستند.



شکل ۳- نمودار لنگر خمشی تیر پیوند

در بر تکیه گاه تسلیم خمشی داریم، یعنی  $M_0 = M_p$  همچنین برای این که در مقطع ۱ و در چند مقطع افقی دیگر به سمت وسط دهانه تسلیم برشی اتفاق بیفتد، برش افقی بین سوراخ ها ( $V$ ) را محاسبه کرده و برابر برش تسلیم قرار داده می شود. و مطابق رابطه (۵) زیر این کار انجام می شود.

$$V = \frac{(M_1 - M_2)}{d} = 0.6 F_y (b_1 - c) 2 t_w \quad (5)$$

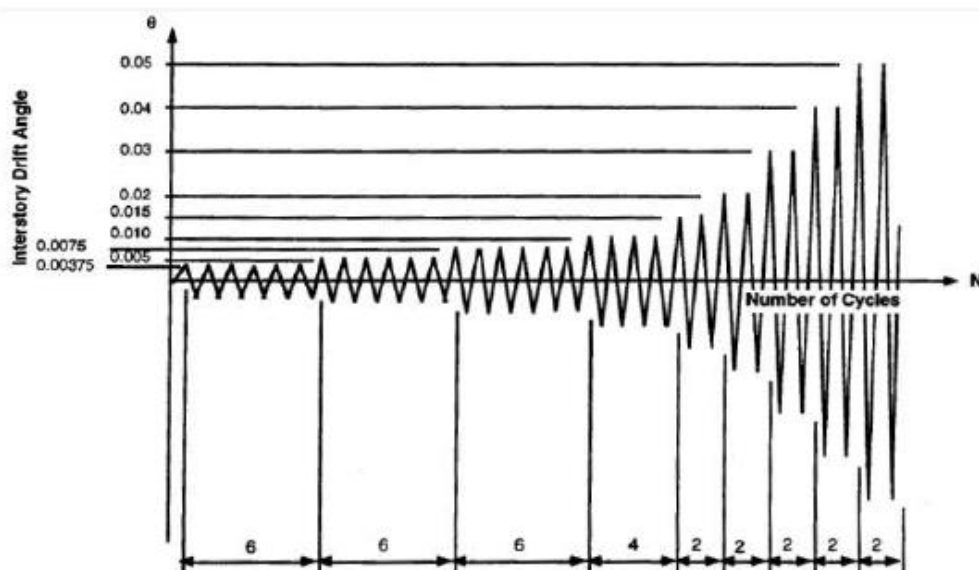
در رابطه فوق  $d$  ارتفاع آزاد جان،  $b_1$  فاصله مقطع ۱ و ۲، طول شیار و  $t_w$  ضخامت جان می باشد.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش دو نمونه شامل نمونه شاهد (conventional link beam) یا بدون شیار و نمونه شیار دار (innovative link beam) مورد آزمایش قرار گرفته اند. طول نمونه ها بزرگتر از  $2.6 \frac{M_p}{V_p}$  در نظر گرفته شده است. که نشان دهنده تیر پیوند با طول بلند است. با توجه به اینکه رفتار تیر پیوند در دو نیمه تیر پیوند یکسان است. نصف طول تیر پیوند در آزمایشگاه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. برای ساخت مقطع جعبه ای در آزمایشگاه از جوش شکاری با نفوذ کامل و فولاد St37 استفاده شده است. همچنین برای تعیین مشخصات مصالح استفاده شده در آزمایشگاه تست کوپن هم انجام شده است. در



این آزمایش بارگذاری به صورت رفت و برگشت بر حسب پروتکل بارگذاری SAC انجام شده است [۱۶]. که منحنی این پروتکل مطابق شکل (۴) می باشد. در شکل (۵) نیز ستاپ آزمایشگاه و نمایش داده شده است.



شکل ۴- پروتکل بارگذاری چرخه ای SAC



شکل ۵- ستاپ آزمایشگاه

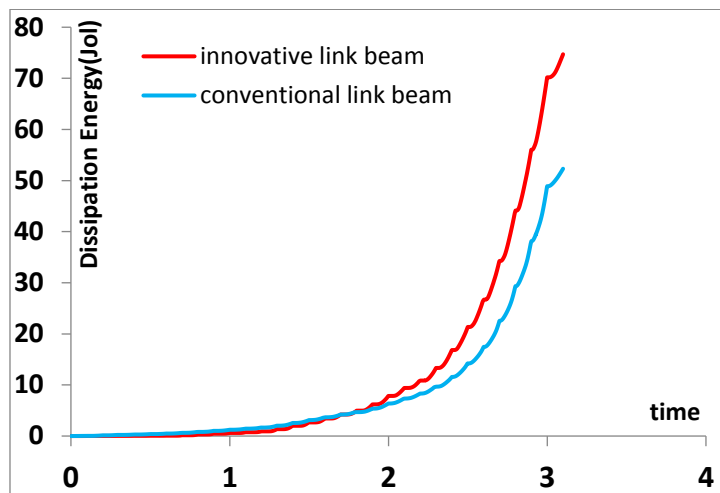
#### ۴- نتیجه و جمع بندی

همان طور که قبلاً بیان شد، در تیر پیوند برشی، اتلاف انرژی توسط رفتار غیر ارتجاعی برشی جان تیر پیوند در تمام طول تیر پیوند صورت می گیرد. و در تیر پیوند خمشی، اتلاف انرژی با شکل گیری مفاصل خمشی غیر ارتجاعی در دو انتهای تیر پیوند انجام می شود. در این پژوهش با وجود طول بلند و رفتار خمشی تیر، در تمام طول تیر به ویژه در فاصله بین شیارهای افقی تسلیم برشی اتفاق افتاد. و رفتار برشی در طول تیر پیوند حاکم شده و شکل پذیری و اتلاف



انرژی تیر پیوند بیشتر شده است.

با وجود چنین شرایطی برای تیر پیوند می‌توان مشکلات اجرایی استفاده از تیرهای پیوند کوتاه مانند نزدیک بودن صفحات اتصال تیر به مهاربند، اصطکاک آن‌ها در حین زلزله یا ملاحظات معماری هنگام ساخت را برطرف کرد. شکل (۶) نمودارهای تحلیلی اتلاف انرژی برای تیر پیوند در حالت بدون شیار (conventional link beam) و شیاردار (innovative link beam) را نشان می‌دهد. و همان‌طور که مشخص است در حالت شیاردار اتلاف انرژی حدود ۴۳ درصد بیشتر از حالت بدون شیار است. که نتیجه بسیار خوبی می‌باشد، و نشان دهنده عملکرد خوب تیر پیوند پیشنهادی می‌باشد.



شکل ۶- نمودارهای اتلاف انرژی

## مراجع

- [1] Engelhardt, M.D., Popov, E.P. (1989). Behavior of Long Links in Eccentrically Braced Frames. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [2] AISC (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC 341-16)*. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [3] Richards, P.W., Uang, C.M. (2003). Testing protocols for short links in eccentrically braced frames. Journal of Constructional Steel Research, 59(12), 1441-1460.
- [4] Sabouri-Ghomi, S., Lee, J., Bruneau, M. (2019). Seismic behavior of eccentrically braced frames with links under cyclic loading. Engineering Structures, 195, 130-142.
- [5] Xu, Y., Ma, R., Zhang, J. (2021). Experimental study on the seismic behavior of box-section links with web openings in eccentrically braced frames. Journal of Structural Engineering, 147(4), 04021009.
- [6] Zhao, M., Dusicka, P. (2014). Enhancing link performance using web openings in eccentrically braced frames. Journal of Constructional Steel Research, 99, 89-100.
- [7] Nguyen, M.T., Nguyen, D.M., Tran, Q.T. (2023). Influence of web openings on seismic performance of box-section link beams in EBFs. Engineering Structures, 275, 115324.
- [8] Engelhardt, M.D., & Popov, E.P. (1989). *Behavior of Long Links in Eccentrically Braced Frames*. Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley.
- [9] Richards, P.W., & Uang, C.M. (2003). *Testing Protocols for Short Links in Eccentrically Braced Frames*. Journal of Constructional Steel Research, 59(12), 1441-1460.
- [10] Xu, Y., Ma, R., & Zhang, J. (2021). *Experimental Study on the Seismic Behavior of Box-Section Links with Web Openings in EBFs*. Journal of Structural Engineering, 147(4), 04021009.



[11] Lee, J., & Bruneau, M. (2008). *Energy Dissipation of Perforated Steel Plate Shear Walls*. Engineering Structures, 30(11), 2855–2864.

[12] Zhao, M., & Dusicka, P. (2014). *Enhancing Link Performance Using Web Openings in EBFs*. Journal of Constructional Steel Research, 99, 89–100.

[13] صبور قمی، س.، علوی، ح.، دهقانی، م. (1398). بررسی رفتار لرزه‌ای تیرهای پیوند با مقاطع ویژه در قاب‌های مهاربندی واگرا. نشریه مهندسی سازه ایران، ۱۱(۳)، ۲۰۳–۲۱۴.

[14] AISC (2016). *Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-16)*. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

[15] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم (ویرایش ۱۴۰۱). طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی. وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران.

[16] SAC 97-02, Protocol for fabrication, inspection, testing, and documentation of beam-column connection tests and other experimental specimens, No. SAC/BD-97-02, Version 1.1, 1997