

## بررسی تأثیر مشخصات بال تیر پیوند قائم برشی بر عملکرد لرزه‌ای آن

امیر پارسا

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندس عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
a\_parsa@ut.ac.ir

سید مهدی زهرائی

استاد دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
mzahrai@ut.ac.ir

**کلید واژه‌ها:** کنترل غیرفعال، میراگرهای جاری‌شونده، پائل برشی، تیر پیوند قائم، ابعاد هندسی تیر پیوند قائم

### چکیده

خسارت‌های مالی و جانی به وجود آمده از زلزله در سال‌های اخیر، باعث شده توجه زیادی به کنترل ارتعاشات سازه و استفاده از میراگرها بشود. در بین میراگرها، میراگرهای تسلیمی و مخصوصاً آن دسته از این نوع میراگرها که در خارج از سقف طبقات می‌باشند مانند تیرهای پیوندقائم برشی به دلیل ارزانی و عدم خسارت عناصر اصلی سازه‌ای، موردتوجه بیشتری قرار گرفته است. این مقاله یک بررسی عددی درباره‌ی تأثیر ابعاد بال تیر پیوند قائم برشی بر عملکرد لرزه‌ای آن است.

تیر پیوند قائم یک میراگر تسلیمی هست که از طریق تسلیم برشی انرژی را تلف می‌کند و اغلب برش توسط جان تیر تحمل می‌شود از این‌رو بال‌های مقطع به‌طور مستقیم نقشی در تسلیم برشی و اتلاف انرژی ندارد و تنها نقشی که می‌توان برای بال‌ها قائل بود تأمین پایداری هست. این عدم پایداری احتمالی می‌تواند در اثر به وجود آمدن خمش، هرچند ناچیز باشد و یا در اثر انواع کمانش‌ها، چه کمانش موضعی چه کمانش کلی است. این مقاله در واقع بررسی این اثرات بال تیر پیوند قائم است.

مدل اول یک IPE160 است که نتایج آزمایشگاهی آن نیز موجود است و با مقایسه آن نتایج با نتایج مدل یک صحت‌سنجی صورت گرفته است (زهرایی، ۲۰۱۲). در ادامه با تغییر پهنای بال عملکرد لرزه‌ای آن را بررسی می‌کنیم. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در صورتی که تیر پیوند قائم مهار کافی داشته باشد با وجود کاهش طول بال هم چرخه‌های هیستریزس پایداری و با سطح اتلاف انرژی مناسب شکل گرفته است و اتلاف انرژی قابل توجهی دارند و با افزایش کرنش‌ها نمودار هیستریزس چاق‌تر می‌شود به نحوی که سایر اجزای اصلی سازه الاستیک باقی می‌ماند. با کاهش طول بال اندکی سختی سیستم کاهش یافته و چون تیر پیوند قائم یک میراگر تسلیمی بوده و مانند فیوز عمل می‌کند و سطح نیرویی در میراگر و به دنبال آن در کل سیستم نیز کاهش می‌یابد.

### مقدمه

اولین بار پوپوف و همکارانش در سال ۱۹۷۸، یک سامانه‌ی قاب بادبندی شده‌ی برون‌محور که در آن بادبند با خروج مرکزیت نسبت به گره تیر و ستون اجرا می‌شود را ارائه کرد که این سیستم هم شکل‌پذیری موجود در قاب‌های خمشی را تا حدی داشت و هم از طرفی سختی موجود در قاب‌های بادبندی شده را تا حدی ارضا می‌کرد (Roeder and Popov, 1978).

سامانه‌ی فوق‌گرفته‌ی توانایی بالایی در استهلاک انرژی دارد ولی دارای نقاط ضعفی نیز هست. در این سامانه تیر رابط بخشی از تیر طبقه هست و خرابی آن بسیار هزینه‌بر است چراکه به تأسیسات موجود در کف مربوطه، آسیب وارد می‌شود و همچنین اگر نیاز به تعویض این تیرها بعد از زلزله باشد، تعویض آن‌ها با خرابی کف همراه خواهد بود، از طرفی چون تیر رابط قسمتی از تیر اصلی سازه است، دارای مقطع سنگینی است و به دنبال آن بادبندها، اتصالات، ستون‌ها و تیر خارج از ناحیه پیوند، باید به حد کافی قوی باشند تا تیر پیوند بتواند نقش فیوز را ایفا کند.

با توجه به مشکلات اشاره‌شده، آریستزابالو اوکوایک رابط قابل تعویض به نام عضو زانویی معرفی کردند که به وسیله‌ی این عضو انرژی مستهلک شود و تحقیقات زیادی روی این سامانه انجام دادند تا از کمانش بادبندها جلوگیری شود (Aristizabal and Ochoa, 1986).



طبق مطالعات وتر و باوکمپبه عنوان یک رابطه‌ی محافظه کارانه، برای حالتی که لنگر دو طرف مفصل یکسان است توصیه می‌شود که طول مفصل به اندازه‌ی زیر محدود شود:

که در رابطه‌ی فوق  $e$  طول تیر پیوند،  $M_{PL}$  لنگر پلاستیک تیر پیوند و  $V_{PL}$  برش پلاستیک تیر پیوند هستند. با اعمال رابطه‌ی (۱)، چرخش برشی جان مفصل می‌تواند به بیش از  $0/1$  رادیان برسد. در عمل، لنگر دو طرف یکسان نیست. بنابراین توصیه شد با توجه به نسبت سختی چرخشی انتهای پایینی به انتهای بالایی از رابطه زیر استفاده شود:

که در رابطه‌ی فوق  $e$  طول تیر پیوند،  $M_{PL}$  لنگر پلاستیک تیر پیوند،  $V_{PL}$  برش پلاستیک تیر پیوند،  $M_1$  لنگر انتهای پایینی (متصل به مهاربند) و  $M_2$  لنگر انتهای بالایی (متصل به تیر) هستند. برای جلوگیری از شکست جوش در محل اتصال انتهای بالایی مفصل به تیر، رابطه بالا می‌تواند محدودتر شود. اعمال این ضریب مبتنی بر مشاهدات پارگی جوش در مفاصل برشی افقی است. که یک انتهای آن به وجه ستون متصل است (Vetr, 1998).

انجمن مهندسين ساختمان کالیفرنیا در سال ۱۹۸۸، توصیه کرده است که چرخش برشی مفاصل به  $0/15$  رادیان محدود شود [۸]. بررسی‌ها نشان داد که در این صورت، ظرفیت استهلاک انرژی مفصل بسیار پایین می‌آید. بنابراین وتر و باوکمپ توصیه کردند که از رابطه زیر استفاده شود؛ در واقع آن‌ها طول مفصل برشی را کاهش دادند تا لنگر انتهای کاهش یابد:

این همان رابطه بالا است که لنگر انتهای  $M_1$  به نصف  $M_{PL}$  محدود شده است (Vetr, 1998).

وترو باوکمپدر سال ۱۹۹۴ طی آزمایشی، که در مرکز آزمایش سازه اروپا واقع در ایتالیا انجام می‌شد، یک ساختمان سه طبقه و سه دهانه طراحی کرد و در معرض باری معادل  $0/25g$  قرار دادند. در راستای اعمال بار از دو قاب موازی با مهاربند برون محور با پانل برشی تکی و در راستای عمود بر صفحه‌ی بارگذاری از دو قاب موازی با سامانه‌ی قاب خمشی استفاده کرد. در قاب‌های آزمایش شده V-EBF ستون‌ها در راستای ضعیف خود نصب شده‌اند تا بتوان بیشینه برش طبقه را به مفصل برشی قائم اعمال کرد. نتیجه‌ی آزمایش، رفتار مناسب و شکل‌پذیری خوب سامانه بود. با بررسی دو قاب موازی V-EBF آزمایش شده، هیچ‌گونه ناپایداری جانبی ناپایداری پیچشی مشاهده نشد (Vetr, 1998).

بر اساس مطالعات تحلیلی زهرائی و مصلحی‌تبار در سال ۲۰۰۶ که روی قاب‌های یک طبقه دارای سامانه مهاربندهای برون محور با عضو تیر پیوند قائم با طول‌های متفاوت با سخت‌کننده‌ی جان و بدون آن انجام شد و قاب‌های بادبندی شده مجهز به سیستم پانل برشی (مهاربند شورن با عضو پیوند قائم تکی) بودند، همه رفتار هیستریک حجیم، پایدار و رشد یابنده داشتند به گونه‌ای که بیش از ۹۰ درصد انرژی مستهلک شده به تغییر شکل غیرالاستیک پانل برشی مربوط شد. باید توجه داشت که دست‌یابی به بیشینه دوران غیرالاستیک، رابطه مستقیمی با نمودار بارگذاری دارد (Zahrai and Moslehi Tabar, 2006).

اوکازاکیو انگلهارتدر سال ۲۰۰۷ روی ۳۷ نمونه، بر اساس روند بارگذاری (AISC 2002)، ظرفیت چرخش تیر پیوند برای اعضای دارای تسلیم برشی به‌طور میانگین،  $0/075$  رادیان داشتند که نشان از اثر منفی این روند دارد. نمونه‌هایی که بر اساس (AISC 2005)، بارگذاری شده بودند به‌طور متوسط چرخش  $0/11$  رادیان داشتند که همگرایی بهتری با ضوابط آیین‌نامه‌ی استفاده شده دارند و نشان می‌دهد روند اصلاح شده مناسب‌تر است (Okazaki et al., 2005).

زهرائی و ماهروزاده، تأثیر استفاده از سامانه‌ی برشی در افزایش شکل‌پذیری و استهلاک انرژی اعمال شده به سازه را به‌صورت آزمایشگاهی و با استفاده از پروفیل‌های موجود در کشور با آزمایش پنج نمونه تیر پیوند قائم بررسی کردند. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی شکل‌پذیری مناسب با متوسط نسبت میرایی  $26/7$  تا  $30/6$  بوده و ضریب رفتاری حدود  $7/15$  تا  $10/65$  به دست آمد. این قطعات تقریباً همه‌ی انرژی وارده به سازه را مستهلک کردند و مشخص شد فرض الاستیک باقی ماندن تیر، ستون و مهاربند درست است (زهرائی، ۱۳۸۸).

زهرائی و ماهروزاده در سال ۲۰۰۸ به‌منظور بررسی تأثیر استفاده از سیستم پانل برشی یا تیر پیوند قائم در مستهلک کردن انرژی اعمال شده به



سازه، دو ساختمان پنج و هشت طبقه‌ی دوبعدی با مهاربندی شورون، با کمک پانل‌های برشی مورد بهسازی لرزه‌ای قرار دادند و در بررسی‌های عددی انجام شده شاهد بهبود رفتار لرزه‌ای دو سازه بودند. متوسط تغییر مکان حداکثر بام، برش پایه حداکثر و شتاب بیشینه طبقات در ساختمان پنج طبقه به ترتیب ۲۹، ۷۰ و ۶۳ درصد و در ساختمان هشت طبقه، به ترتیب برابر ۴۳، ۲۷ و ۴۰ درصد کاهش را نشان داد (زهرائی، ۱۳۸۹).

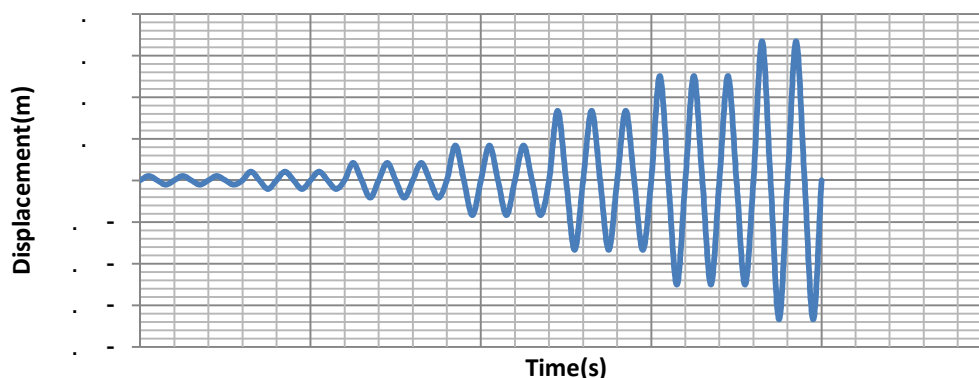
زهرائی و مصلحی تبار در سال ۲۰۱۳ تحقیقات تحلیلی با هدف بررسی موارد مؤثر بر رفتار هیسترتیک و ظرفیت اتلاف انرژی روی سامانه‌ی پانل‌های برشی موجود در قاب‌های مهاربندی شورون انجام دادند و با پنج نمونه‌ی آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی شکل‌پذیری مناسب با متوسط نسبت میرایی ۳۰ درصد بود و پانل‌های برشی به‌طور متوسط چرخش ۰/۱۵ رادیان داشتند (Zahrai, 2013).

زهرائی در سال ۲۰۱۴، یک سری تحقیق آزمایشگاهی بر روی این پانل‌های برشی همان تیر پیوند قائم انجام داد که در این تحقیق از پنج تیر با مقطع IPE (مقطع بال باریک) استفاده کرد. در تمام نمونه‌ها شکل‌پذیری بالا مشاهده شد و تقریباً تمام انرژی ورودی توسط این تیرهای پیوند مستهلک شد و همچنین نشان داده شد که تیرها، ستون‌ها و بادبندها در ناحیه‌ی الاستیک باقی می‌مانند (Zahrai, 2014).

## مدل‌سازی

در این مقاله برای مدل‌سازی، از نرم‌افزار المان محدود برای تجزیه و تحلیل استفاده شده است. برای مدل‌سازی به دلیل آنکه ضخامت ورق‌های فولادی و همچنین پروفیل‌های فولادی در مقابل دیگر ابعاد آن‌ها قابل صرف‌نظر کردن است از المان‌های صفحه‌ای استفاده شده است. همچنین برای اتصالات نیز از اتصالات جوشی استفاده شده است.

جابجایی وارده طبق ATC24 و مطابق زیر است (شکل ۱):



شکل ۱: جابجایی اعمال شده طبق ATC24

## یافته‌ها

ابتدا برای صحت‌سنجی از مدل‌سازی، یک نمونه از موارد آزمایش شده (جدول ۱ و ۲) را، مدل کرده‌ایم که نتایج به دست آمده به شرح زیر است (Zahrai, 2014).

در این نمونه‌ی آزمایش شده از پروفیل IPE160 به عنوان تیر پیوند استفاده شده است که با دو سخت‌کننده‌ی برشی در وسط جان تیر از دو سمت تقویت شده است (شکل ۳ و ۲).

جدول ۱: مشخصات هندسی قاب‌آزمایش شده و مدل شده

اعضای قاب	ستون	تیر	مهاربند	تیر پیوند
مقطع عضو	IPB120	IPB140	2UNP80	IPE160
طول عضو (cm)	۳۰۰	۴۲۰	۳۱۰	۲۰

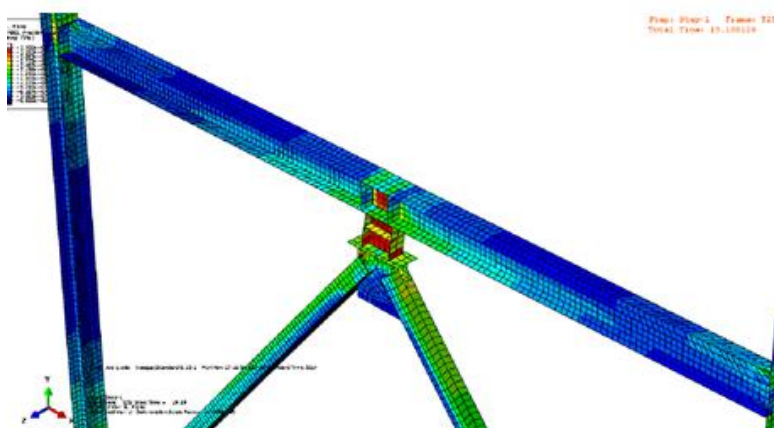
جدول ۲: مشخصات مصالح قاب آزمایش شده و مدل شده

اعضای		
تیر پیوند	۲۸۰۰	
سایر اعضا	۲۴۰۰	۳۷۰۰

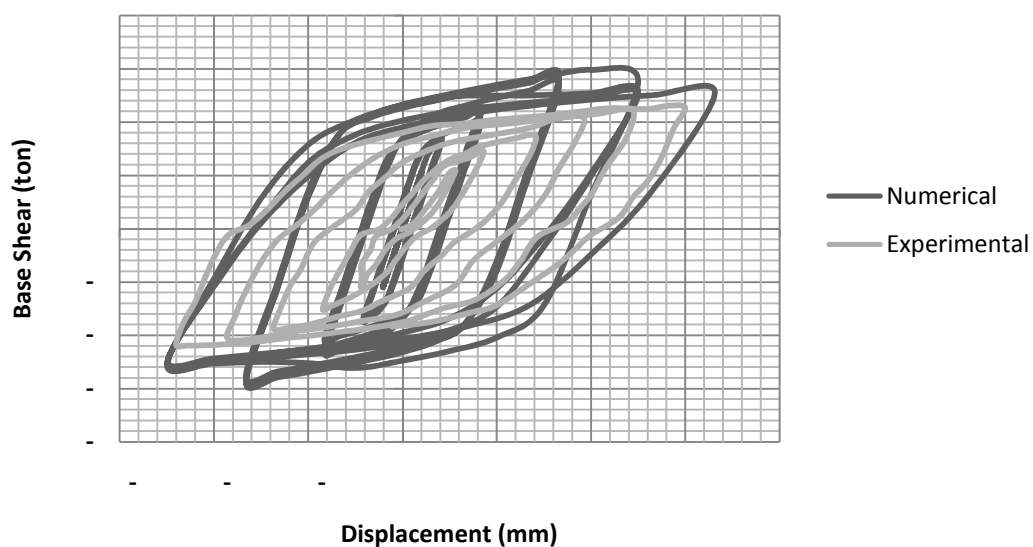




شکل ۲. نمونه‌ی آزمایش شده



شکل ۳. نمونه‌ی مدل‌سازی شده

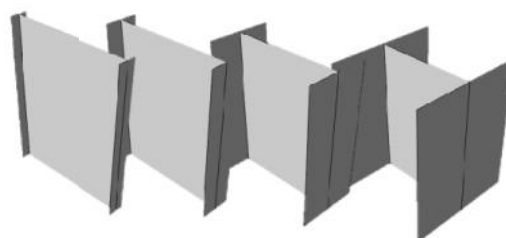


شکل ۴. مقایسه نمودارهای هیستریزیس نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی

همان‌طور دیده می‌شود (شکل ۴)، دو نمودار تقریباً رفتار یکسانی دارند، البته با توجه به شکل ۴ سامانه‌ی مدل‌سازی کمی سخت‌تر است و علت آن صرف‌نظر کردن از خرابی و ترک‌های ناچیز به وجود آمده در جوش‌ها است که در مدل‌سازی از آن صرف‌نظر شده است.

## معرفی نمونه‌ها

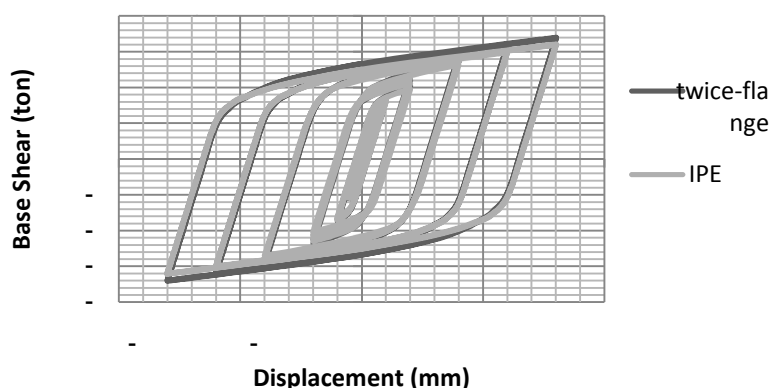
همان‌طور که گفته شد در سعی داریم با بررسی‌های عددی نقش بال تیر پیوند قائم را در عملکرد لرزه‌ای آن را مورد ارزیابی قرار دهیم، از این‌رو پهنای بال تیر پیوند قائم را تغییر می‌دهیم (شکل ۵) و نتایج را مقایسه می‌کنیم.



شکل ۵: تیرهای پیوند با پهنای بال متفاوت

## نمونه ۱ و ۲

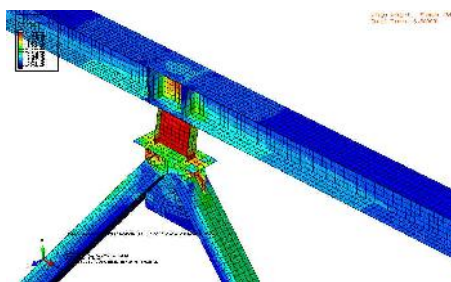
در ابتدا، این مقاله نشان می‌دهد که اگر عرض بال IPE160 بزرگ‌تر شود چه تأثیری روی عملکرد لرزه‌ای آن دارد بنابراین در این مدل از تیر پیوند قائمی استفاده شده است که مشابه پروفیل IPE160 است با این تفاوت که عرض بال آن دو برابر شده است و نتایج نشان می‌دهد که تقریباً این مدل با بال پهن‌تر اتلاف انرژی مشابه IPE160 خواهد داشت با این تفاوت که سازه کمی سخت‌تر شده است که می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد (شکل ۶).



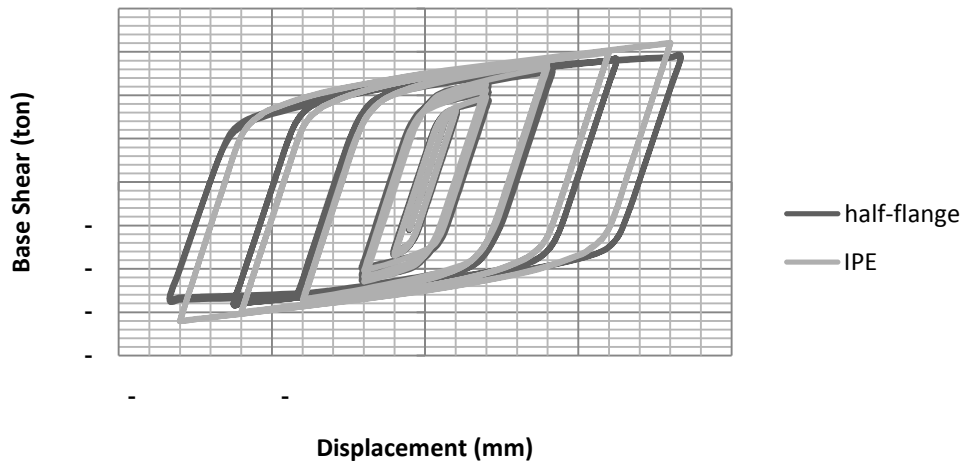
شکل ۶: مقایسه‌ی نمودار هیستریزس IPE160 با نمونه‌ای که پهنای بال آن دو برابر شده

## نمونه ۳

در قسمت دیگر این مقاله سعی شده است اثر کاهش طول بال بررسی شود بنابراین در این مدل از تیر پیوند قائمی استفاده شده است که مشابه پروفیل IPE160 است با این تفاوت که عرض بال آن نصف شده است و نتایج نشان می‌دهد که سختی سیستم کاهش ناچیزی یافته است و این کاهش در تغییر مکان‌های بالا خودش را نشان می‌دهد و ولی همچنان چرخه‌های هیستریزس پایدار و با سطح اتلاف انرژی مناسب شکل گرفته است (شکل ۷).



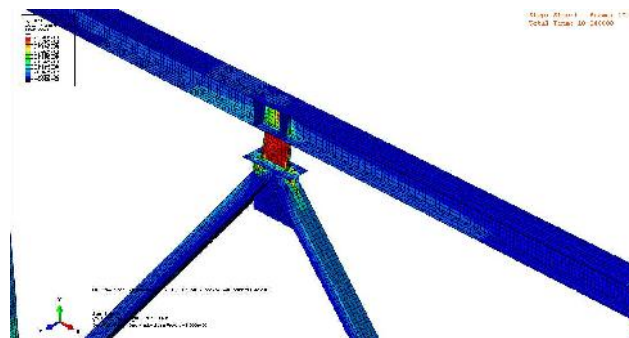
شکل ۷: نتایج مدل‌سازی نمونه‌ی ۳



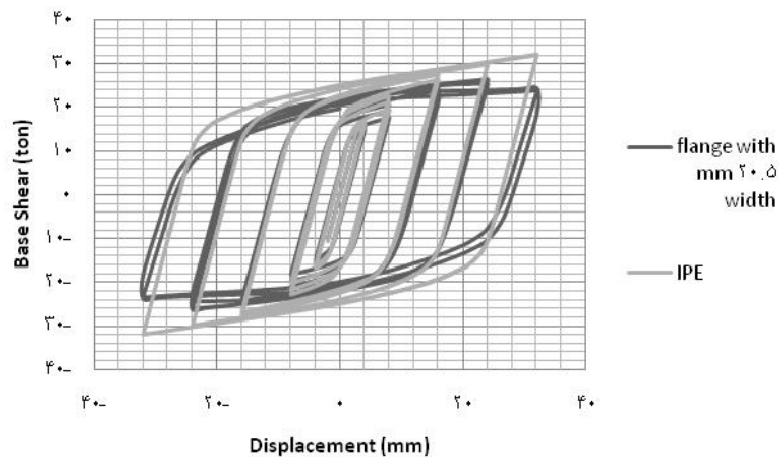
شکل ۸: مقایسه‌ی نمودار هیستریزیس IPE160 با نمونه‌ای که پهنای بال آن نصف شده

## نمونه ۴

در مدل بعدی از تیر پیوند قائمی استفاده شده است که مشابه پروفیل IPE160 است با این تفاوت که عرض بال آن یک‌چهارم شده است و نتایج نشان می‌دهد که سختی سیستم نسبت به حالت قبل، کاهش بیشتری یافته است و البته این کاهش تنها در تغییر مکان‌های بالا (حدود ۱۶ میلی‌متر به بالا) قابل مشاهده است و در همین نواحی شاهد کمانش‌های موضعی البته ناچیز در سیستم هستیم که این نشان از این دارد که تا زمانی که کمانش موضعی رخ نداده است بال تیر پیوند نقشی در عملکرد لرزه‌ای ندارد و ولی حتی تا تغییر مکان حدود ۳ سانتی‌متر هم ناپایداری کلی در سیستم مشاهده نشده است و میراگر نقش اتلاف انرژی انجام می‌دهد.



شکل ۹: نتایج مدل‌سازی نمونه‌ی ۴



شکل ۱۰: مقایسه‌ی نمودار هیستریزیس IPE160 با نمونه‌ای که پهنای بال آن یک‌چهارم برابر شده

## نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که با کاهش طول بال حتی به اندازه یک چهارم مقطع بال باریک IPE160 نیز تیرهای پیوند عمده ی انرژی را اتلاف می کنند به نحوی که شاهد نمودارهای هیستریز چاق و پایدار هستیم و عمده ی این اتلاف انرژی توسط میراگر صورت می گیرد و سایر اجزای اصلی سازه الاستیک باقی می ماند.

نکته ای باید به آن توجه کرد این است با کاهش طول بال سختی سیستم کاهش می یابد و این کاهش سختی تنها در تغییر مکان های بالا خودش را نشان می دهد و در چرخه های با تغییر مکان حدود ۱۵ میلی متر الی ۱۶ میلی متر شاهد این قضیه هستیم و قبل از این تغییر مکان ها، این پهنای بیشتر بال موجب تأثیری بروی عملکرد لرزه ای سیستم ندارد و بعد از آن محدود نیز با وجود کاهش سختی، میراگر همچنان وظیفه خود را که اتلاف انرژی استبه خوبی ایفا می کند. علت این امر به پایداری و بار بحرانی برمی گردد، در واقع بال تیر پیوند نقش قید برای سیستم و کمانش میراگر ایفا می کند منتها این کاهش این مقدار از طول این قید در کمانش کلی سیستم تقریباً بی تأثیر است چراکه اساساً میراگر برشی عمل می کند و بال در خمش اهمیت پیدا می کند.

مزیت می توان در این فرایند به آن اشاره کرد این است میراگرهای تسلیمی مانند فیوز عمل می کنند و پس از تسلیم شدن سطح نیرویی در کل سیستم با وجود افزایش انرژی ثابت می ماند ولی اینجا با کاهش طول بال و کمانش های موضعی اندکی سختی سیستم کاهش یافته و سطح نیرویی در میراگر و به دنبال آن در کل سیستم کاهش می یابد.

## مراجع

زهرانیس م (۱۳۸۸) رفتار تیر پیوند قائم برشی در ساختمان های فولادی، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران

زهرانیس م و ماهرزاده ی (۱۳۸۹) بررسی آزمایشگاهی کاربرد تیر پیوند قائم در بهبود عملکرد لرزه ای ساختمان های فولادی، نشریه عمران و نقشه برداری، دانشکده فنی، سال ۴۴ شماره ی ۳، مهر ۱۳۸۹؛ صفحات ۳۷۹ تا ۳۹۳

ماهرزاده ی و زهرایی سم (۱۳۸۹) بررسی عددی تأثیر پانل برشی در کاهش پاسخ لرزه ای ساختمان های فولادی، امیرکبیر مهندسی عمران و محیط زیست (امیرکبیر)، پاییز ۱۳۸۹؛ ۴۲(۲): ۱۰۳-۱۱۳

وتر مق و اوکمپ ج (۱۳۸۷) رفتار لرزه ای، طرح و تحلیل قاب های مهاربندی شده ی غیرهم محور با مفاصل برشی قائم، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال دوم، شماره ی دوم، تابستان ۷۸

Aristizabal –OchoaD(1986) Disposable knee bracing improvement in seismic design of steel frames. *J. Struct. Engng. ASCE*, 112 (7)

VetrTamijaniMG(1998) Seismic Behavior, Analysis and Design of Eccentrically braced frames with vertical Shear Link, MSC, Darmstadt

Okazaki Arce G, Ryu HC and Engelhardt MD(2005) Experimental study of local buckling, over strength and fracture of links in Eccentrically Braced Frames. *J. struct. Eng.*, 131(10), 1526-1535

Recommended lateral force Requirements and Tentative commentary(1988) Seismology committee, *Structural Engineers Association of California*

Roeder CW and Popov EP (1978) Eccentrically braced steel frames for earthquakes. *J. Struct. Div ASCE*, 104 (ST7), 391-411.

Zahrai SM (2014) Cyclic Testing of Chevron Braced Steel Frames with IPE shear panels. *Engineering Structures, Steel and Composite Structures, An International Journal*, Accepted for publication

Zahrai SM and MoslehiTabarA(2013) Analytical study on cyclic behavior of chevron braced frames with shear panel system considering post-yield deformation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(7), 633-643

Zahrai SM and MoslehiTabar A (2006) Cyclic Behavior of steel Braced frames using shear panel system. *Asian Journal of civil Engineering*, 7(1), pp. 13-26

