

## نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

## چکیده

اتصال مقطع کاهش یافته تیر، پس از آسیب‌های وارده به سازه‌ها در زلزله نورتریج ۱۹۹۴ پیشنهاد شد. این اتصال با تشکیل مفصل پلاستیک در خارج از ناحیه اتصال تیر به ستون، خسارات ایجاد شده در چشمه اتصال را کاهش می‌دهد. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی نوع جدیدی از اتصال با مقطع کاهش یافته که در سال‌های اخیر با نام پیوندهای قابل تعویض نامگذاری شده، پرداخته‌ایم. در بین پیوندهای طراحی شده در نمونه اول آزمایشگاهی برای کاهش یافتگی از روش برش نیم‌دایره در بال تیر تعویض‌پذیر و در نمونه دوم برای کاهش مقطع از سوراخ‌های دایره‌ای در بال نمونه استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داد که تمرکز تنش بالایی در ناحیه کاهش یافته رخ می‌دهد و سایر قسمت‌های المان‌های تیر و ستون بدون تنش قابل توجهی باقی خواهند ماند که این امر موجب می‌شود تیر پیوند بعد از وقوع زلزله قابلیت تعویض را داشته باشد. نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که پیوند با کاهش یافتگی به وسیله ایجاد سوراخ در بال دارای جذب انرژی و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به پیوند با کاهش یافتگی به وسیله برش نیم‌دایره در بال تیر پیوند می‌باشد. همچنین با توجه به میزان ماکزیمم دوران ثبت شده در نمونه‌ها و با استناد به آئین‌نامه‌های موجود در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، می‌توان بیان نمود که هر دو نمونه‌ی بررسی شده جزو اتصالات مجاز در قاب خمشی ویژه می‌باشند.

**واژگان کلیدی:** اتصال RBS، بررسی آزمایشگاهی، جذب انرژی، شکل‌پذیری، پیوند تعویض‌پذیر I شکل.

## ارزیابی آزمایشگاهی اتصال مقطع کاهش یافته تیر در قاب‌های خمشی با استفاده از پیوندهای قابل تعویض

### I شکل

## امیر گل‌نواز

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران زلزله، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

## پنجم زرفام (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، [zarfam@srbiau.ac.ir](mailto:zarfam@srbiau.ac.ir)

## آرمین عظیمی‌نژاد

استادیار، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

## ۱- مقدمه

باشند، طراحی می‌شوند. تغییر شکل پلاستیک مورد نظر شامل دوران پلاستیک تیرها در اتصال آنها به ستون‌ها است و از نظر تئوری ائتلاف انرژی زلزله وارد شده بر سازه را نتیجه می‌دهد. انتظار می‌رود که آسیب، شامل تسلیم اولیه و کماتش موضعی اعضای فولادی باشد و شکست ترد رخ ندهد.

مفهوم تیر با مقطع کاهش یافته بدان معناست که مقطع تیر عمداً کاهش می‌یابد در نتیجه حد جاری آن کاهش یافته و مقطع زودتر از نقاط دیگر پلاستیک می‌شود و این کار سبب می‌شود مفصل پلاستیک در محلی تشکیل شود که مد نظر ما است. این تضعیف موضعی به صورت کاهش سطح مقطع تیر سبب افزایش شکل‌پذیری و دوران پلاستیک اتصال تیر به ستون می‌گردد، بدون آنکه سختی و مقاومت آن دچار کاهش قابل توجهی شود.

در سال‌های اخیر برای نیروهای جانبی وارد بر سازه، به‌ویژه نیروهای زلزله، سیستم‌های گوناگونی مورد مطالعه قرار گرفته است و در نهایت تعدادی از آنها توسط آئین‌نامه‌ها به رسمیت شناخته شده و ضوابط مربوط به طراحی و ساخت آنها بیان شده است. از میان آنها می‌توان به سیستم‌های سازه‌ای که شامل مهاربندی، دیوار برشی، قاب خمشی و سیستم‌های دوگانه یا ترکیبی اشاره کرد. در دسته‌بندی دیگر سیستم‌های سازه‌ای بر اساس میزان شکل‌پذیری به هنگام وقوع زلزله و میزان تغییر مکان فراتر از جایی که می‌توانند بدون کاهش قابل ملاحظه مقاومت داشته باشند، به انواع سیستم‌های معمولی، متوسط و ویژه دسته‌بندی می‌شود. ساختمان‌های فولادی قاب خمشی برای مقاومت در برابر زلزله بر اساس این فرض که قادر به تحمل تغییر شکل تسلیم یا پلاستیک، بدون کاهش مقاومت

باعث کاهش تغییر شکل خارج از صفحه گردید و دامنه کمانش را نیز کاهش داد [۳]. در مطالعه‌ای دیگر که در سال ۲۰۱۴ صورت گرفته، از اتصالات تیر به ستون جوشی و با استفاده از سوراخ کردن جان تیر برای کاهش مقطع تیر استفاده شده است. اثر کاهش جان مقطع با استفاده از شکل‌های غیر استاندارد طراحی و بر روی تیر با عمق‌ها و موقعیت‌های مختلف بررسی شده است. بهسازی رفتار سازه حاکی از آن است که این روش سوراخ کردن عضو باعث افزایش بهره‌وری سازه می‌شود. نتیجه اینکه استفاده از سوراخ‌های بزرگ در جان تیر یک روش مؤثر برای بهبود رفتار اتصالات است که باعث افزایش شکل‌پذیری، ظرفیت خمشی و ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود [۴]. در مطالعه‌ای دیگر صالح و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۵ به بررسی اتصال قاب خمشی فولادی با مقطع کاهش یافته پرداخته و با برش قسمتی از جان تیر و جایگزینی لوله‌ای در محل برش خورده که در واقع همان محل مورد انتظار تشکیل مفصل پلاستیک است ظرفیت خمشی تیر را کاهش داده‌اند. در این مقاله سه نمونه اتصال با جان لوله‌ای کاهش یافته تحت بارگذاری سیکلی مورد آزمایش قرار گرفت که مشخص شد با حذف سهم جان از مقاومت خمشی تیر می‌توان باعث ایجاد یک فیوز شکل‌پذیر دور از اتصال تیر به ستون شد. همچنین استفاده از جان لوله‌ای باعث بهبود کمانش پیچشی - جانبی تیر می‌شود و همچنین باعث افزایش ظرفیت دررفت تا ۹ درصد می‌گردد. صالح و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۶ یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی تیرهای عمیق انجام داده‌اند که حاکی از آن است که تیر با جان لوله‌ای نه تنها باعث به تشکیل فیوز دور از اتصال تیر به ستون می‌شود بلکه باعث افزایش ظرفیت دررفت طبقات تا ۶ درصد بیشتر از آنچه توسط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مطرح شده است نیز می‌شود. در یک تحقیق آزمایشگاهی دیگر رودسری و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۸ به بررسی تیر با مقطع کاهش یافته با استفاده از سخت‌کننده در ناحیه کاهش یافته پرداختند که نتایج نشان داد سخت‌کننده به‌طور قابل توجهی باعث افزایش شکل‌پذیری در اتصالات RBS در مقایسه با نمونه بدون سخت‌کننده می‌شود. در پژوهشی آزمایشگاهی که توسط دولشاهی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ انجام شده است سه آزمون

با کاهش سطح مقطع تیر در نزدیکی اتصال تیر به ستون، مقطع بحرانی از مجاورت ستون به محل مقطع کاهش یافته منتقل شده و به صورت یک فیوز شکل‌پذیر عمل می‌کند و می‌تواند به ظرفیت‌های چرخش پلاستیک بسیار بالاتر از اتصالات خمشی معمولی دست یابد. در واقع هدف اصلی استفاده از اتصالات RBS (تیر با مقطع کاهش یافته) دور نمودن محل تشکیل مفصل پلاستیک از اتصال و انتقال آن به تیر در محل مقطع کاهش یافته و برقرار نمودن اصل تیر ضعیف ستون قوی می‌باشد.

در سال ۲۰۱۱ شن و همکاران [۱] چهار نمونه اتصال تیر با مقطع کاهش یافته با استفاده از پیوندهای تعویض‌پذیر را به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. در این مقاله از کاهش جان تیر پیوند برای کاهش مقطع استفاده شد و نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین نشان داد که پیوندهای خمشی قابل تعویض با جان کاهش یافته می‌توانند مقاومت و شکل‌پذیری مناسبی را در قاب‌های خمشی ایجاد نمایند. در مطالعه‌ای دیگر وتر و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۲ بر روی ایجاد سوراخ‌هایی بر روی بال‌های تیر به منظور کاهش مقطع عرضی تیر مطالعه کردند که در این مطالعه سعی شده تا یک اتصال جدید با استفاده از کاهش بال تیر در محل مورد انتظار تشکیل مفصل پلاستیک باعث کاهش ظرفیت خمشی تیر در آن ناحیه شود. مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که این نوع از اتصال RBS (مقطع کاهش یافته تیر) می‌تواند باعث به تأخیر انداختن کمانش پیچشی - جانبی و افزایش طول مؤثر مفصل پلاستیک نسبت به اتصال RBS معمولی شود. در یکی دیگر از پژوهش‌ها که در سال ۲۰۱۳ توسط دیلمی و همکاران [۳] صورت گرفته به محدود کردن کمانش موضعی جان تیر با استفاده از اتصال مقطع کاهش یافته پرداخته شده است که با این روش با به تأخیر انداختن کمانش تیر باعث عملکرد بهتر اتصال RBS می‌شوند. در این تحقیق که به صورت آزمایشگاهی و در مقیاس کامل صورت گرفته است نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و جزئیات پیشنهاد شده برای تقویت اتصال در ناحیه کاهش یافته ظرفیت چرخش پلاستیک را ۴۰ درصد افزایش داد و همچنین به‌طور قابل توجهی

اساس مقاله شن و همکاران [۱] انجام شده و بر اساس داده‌های به دست آمده از این صحت‌سنجی نمونه‌های پژوهش با مقیاس کامل در نرم‌افزار طراحی شده است. سپس مدل‌های آزمایشگاهی با مقیاس  $(\frac{1}{4})$  نسبت به نمونه‌های نرم‌افزاری ساخته شده و بعد از انجام آزمایش با همین مقیاس نیز در نرم‌افزار آباکوس مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲-۱- صحت‌سنجی

در این پژوهش به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و همچنین ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی نمونه‌ی آزمایشگاهی شن و همکاران [۱] مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. در نرم‌افزار از Abaqus/Standard تحت تحلیل دینامیکی استفاده شده که خصوصیات مصالح برابر فولاد ST37 می‌باشد و برای تمامی اعضا از المان‌های solid و برای مدل‌سازی جان و بال تیر و پیوند تعویض‌پذیر از المان‌های یکپارچه هشت‌گره‌ی سه‌بعدی با تابع شکل درجه یک و انتگرال‌گیری کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده و سائز مش بندی  $0/05$  متر در نظر گرفته شده است (جدول ۱). در مورد سخت‌شوندگی و رفتار غیر خطی مصالح از مدل ایزوتروپیک استفاده شده و مشخصات به نرم‌افزار معرفی شده است. همچنین از حل‌گر Explicit بر اساس رفتار غیر خطی نمونه استفاده گردیده است. در پژوهش شن چهار نمونه با مقیاس کامل ساخته و مورد آزمایش و تحلیل نرم‌افزاری قرار گرفته‌اند که در شکل (۱) نمونه‌های شن نشان داده شده است که ما نمونه‌ی MRF-2B را مورد صحت‌سنجی قرار دادیم.

جدول (۱): خصوصیات غیر خطی فولاد [۱].

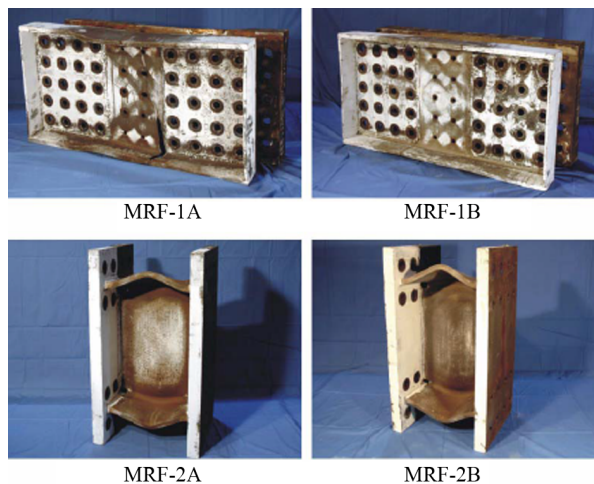
نقطه	تنش اسمی Pa	کرنش اسمی	تنش حقیقی Pa	کرنش حقیقی	کرنش پلاستیک
۱	۲۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۹۵	۲۲۶۰۰۰	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰
۲	۲۴۰۰۰۰	۰/۰۰۲۵	۲۴۶۰۰۰	۰/۰۰۲۴۷	۰/۰۲۳۵
۳	۲۸۰۰۰۰	۰/۰۰۵۰	۲۹۴۰۰۰	۰/۰۰۴۸۸	۰/۰۴۷۴
۴	۳۴۰۰۰۰	۰/۰۰۱	۳۷۴۰۰۰	۰/۰۰۹۵۳	۰/۰۹۳۵
۵	۳۸۰۰۰۰	۰/۰۰۱۵	۴۳۷۰۰۰	۰/۰۰۱۳۹۸	۰/۰۱۳۷۷
۶	۴۰۰۰۰۰	۰/۰۰۲	۴۸۰۰۰۰	۰/۰۰۱۸۲۳	۰/۰۱۸

جهت ارزیابی رفتار چرخه‌ای قاب‌های مقاوم خمشی ویژه با استفاده از پیوندهای برشی که به اصطلاح به آن قاب با مقطع جان شکافدار گفته می‌شود می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد ایده پیشنهادی یک سیستم سخت و شکل‌پذیر را از طریق حلقه‌های ثابت هیستریتیک فراهم می‌آورد که این امر گزینه مناسبی برای طراحی ساختمان‌های جدید و ارتقاء و بهسازی قاب‌های مقاوم آسیب‌دیده می‌باشد. در پژوهشی دیگر که در سال ۲۰۲۰ صورت گرفته روشی برای بازسازی قاب خمشی ارائه شده است. روش پیشنهادی در این مقاله مبتنی بر تضعیف میانه دهانه تیر است که باعث تشکیل مفصل پلاستیک در وسط تیر می‌شود. ارزیابی عددی برای نشان دادن کارایی این روش انجام شده است و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی به طور قابل توجهی ظرفیت شکل‌پذیری سیستم را در هنگام زلزله افزایش می‌دهد [۹].

هدف این تحقیق بررسی و ارزیابی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته به وسیله پیوندهای قابل تعویض به روش آزمایشگاهی است که می‌توان پیش‌بینی مناسبی از رفتارهای اتصالات مقاوم خمشی با پیوندهای قابل تعویض داشت. همچنین دستیابی به مقاومت و شکل‌پذیری مناسب در این اتصالات به هنگام وقوع زلزله از اهداف اصلی این تحقیق است. در این اتصالات هدف انتقال مفصل پلاستیک به داخل ناحیه کاهش یافته تیر و به یک فاصله معین از بر ستون است. در این تحقیق به بررسی مقاومت، سختی، کماتش موضعی و شکل‌پذیری در اتصال با مقطع کاهش یافته پرداخته شده است و همچنین در بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط دیگر محققین به اتصال RBS با پیوند تعویض‌پذیر که از کاهش بال تیر پیوند برای کاهش مقطع تیر استفاده شده باشد پرداخته نشده است و به این منظور در این پژوهش به بررسی پیوند تعویض‌پذیر با کاهش‌یافتگی در بال با اشکال مختلف به صورت آزمایشگاهی پرداخته شده است.

## ۲-۲- بررسی نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی

در این پژوهش مطالعه عددی و آزمایشگاهی روی نمونه‌های مورد بررسی انجام شده است. ابتدا صحت‌سنجی بر



شکل (۱): مدل آزمایشگاهی مقاله شن و همکاران [۱].

مدل‌ها در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل شده و همچنین در آزمایشگاه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. در نمونه شماره ۱ برای کاهش مقطع پیوند تعویض‌پذیر از برش‌هایی به صورت RBS در بال استفاده شده و در نمونه شماره ۲ کاهش یافتگی توسط ایجاد سوراخ‌هایی دایره‌ای شکل در بال پیوند محقق گردیده است.

در نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس مدل‌های نرم‌افزاری که از ابعاد تیر و ستون در مقاله شن و همکاران [۱] برای مدل‌سازی استفاده شده و همچنین محاسبات انجام گرفته در قسمت تیر پیوند، برای تیر اصلی از ورق با ضخامت ۱۰ میلی‌متر برای جان

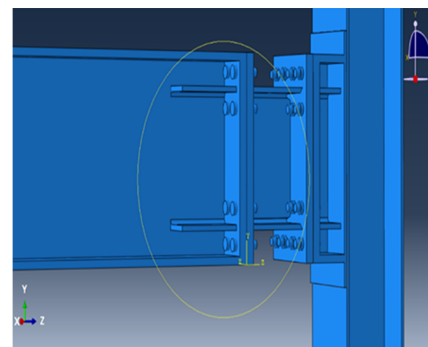
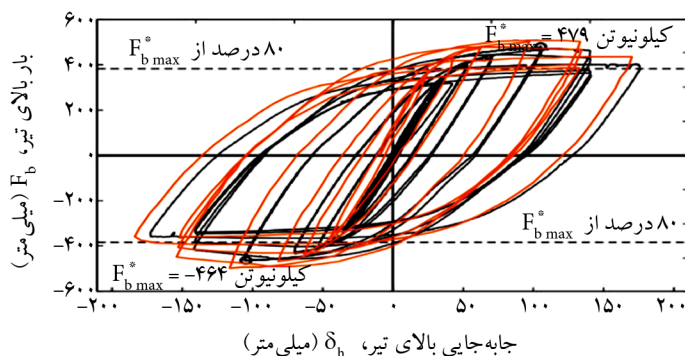
همان‌طور که در منحنی هیستریزس شکل (۲) ملاحظه می‌کنید دو نمودار هیستریزس مدل شن و همکاران [۱] و نمودار مدل صحت‌سنجی که از نرم‌افزار آباکوس استخراج شده با هم مقایسه شده است. مدل صحت‌سنجی شده با اختلافی حدود ۱۰ درصدی رسم شده است و نشان از دقیق بودن اطلاعات و خروجی‌ها و اعدادی نزدیک به نمونه‌ی شن و همکاران [۱] می‌دهد.

## ۲-۲- مشخصات نمونه‌های نرم‌افزاری و آزمایشگاهی

در جدول (۲) ابعاد پیوندهای شماره ۱ و ۲ آورده شده که این

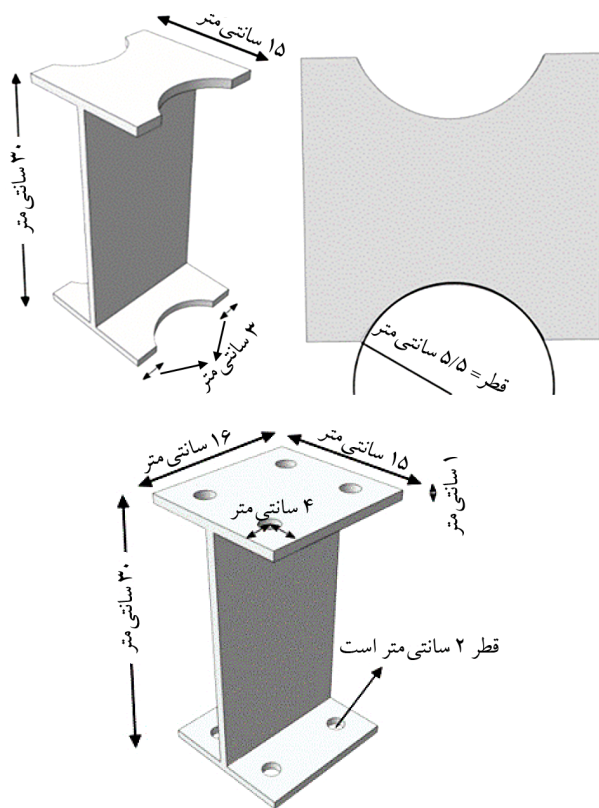
جدول (۲): مشخصات پیوندهای مدل‌سازی و ساخته شده.

شماره نمونه	عرض بال	ضخامت بال	عرض جان	ارتفاع جان	ضخامت جان
نمونه شماره ۱ (برش RBS)	۱۵۰ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	۱۵۰ میلی‌متر	۲۸۰ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر
نمونه شماره ۲ (سوراخ دایره‌ای)	۱۵۰ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	۱۵۰ میلی‌متر	۲۸۰ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر



شکل (۲): نمایی از نمونه مدل‌سازی شده جهت صحت‌سنجی و مقایسه منحنی هیستریزس پژوهش شن و همکاران [۱] با نمونه مدل‌سازی شده.



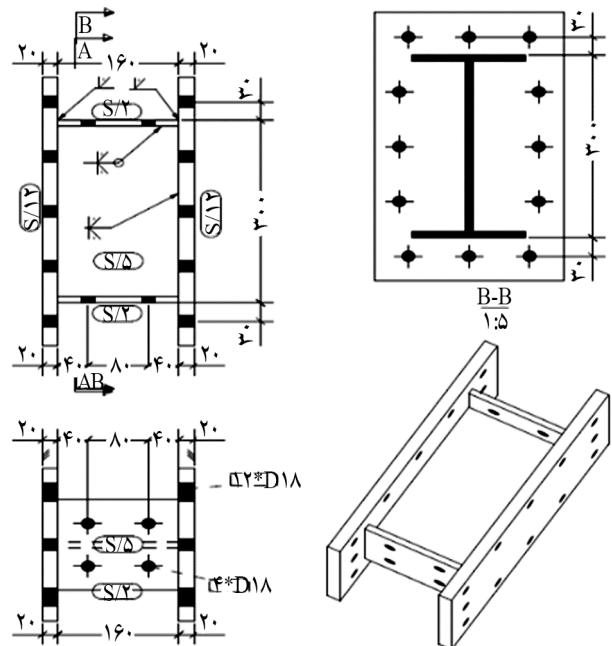


شکل (۵): جزئیات پیوندهای ساخته شده.

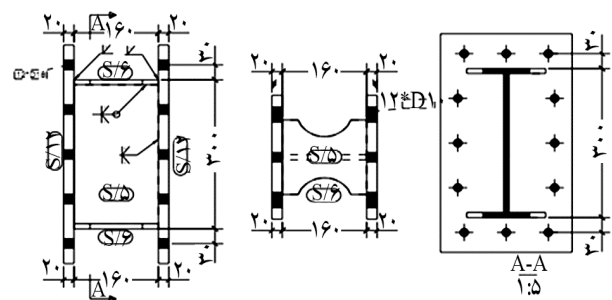
### ۳-۲- تنظیمات آزمایشگاه

نمونه‌های طراحی شده در نرم‌افزار به صورت  $(\frac{1}{4})$  مقیاس شده و سپس در آزمایشگاه مورد ساخت و آزمایش قرار گرفته است. بارگذاری نمونه‌ها به صورت چرخه‌ای، توسط تغییر مکان و بر اساس آیین‌نامه AISC 358 [۱۰] تعریف شده است. بدین ترتیب شش چرخه در هر یک از زوایای تغییر مکان نسبی طبقه برابر  $0/00375$  رادیان،  $0/005$  رادیان و  $0/0075$  رادیان، ۴ چرخه در  $0/01$  رادیان و دو چرخه در زاویه تغییر مکان نسبی  $0/015$  رادیان،  $0/02$  رادیان و  $0/03$  رادیان و زوایای بزرگ‌تر از آن تعریف شده است. ادامه بارگذاری در هر افزایش رادیان با دو چرخه بارگذاری در هر گام انجام و آزمایش تا زوال نمونه ادامه می‌یابد. قسمت پایینی ستون از طریق اتصال مفصلی که توسط دو عدد مفصل مکانیکی فراهم گردیده به کف قوی متصل می‌شود. ستون نیز به وسیله جوش نفوذی به مفصل‌های مورد نظر اتصال یافت. همچنین انتهای تیر متکی است به پایه‌های قابل تنظیم با قابلیت حرکت جانبی که برای تأمین شرایط مرزی مورد نظر فراهم شده است (شکل ۶).

تیر اصلی و برای بال از ورق ۱۵ میلی‌متر استفاده شده است و همچنین عرض بال تیر ۲۵۰ میلی‌متر و ارتفاع جان ۲۷۰ میلی‌متر می‌باشد. در ستون‌ها از ورق به ضخامت ۲۰ میلی‌متر در بال و جان ستون استفاده شده است که عرض بال ستون ۳۰۰ میلی‌متر و عرض جان برابر ۲۶۰ میلی‌متر است. در این آزمایش از تغییر خارج از صفحه جلوگیری به عمل آمده است و طول تیر با در نظر گرفتن پیوند تعویض‌پذیر ۱۹۲۰ میلی‌متر می‌باشد و ارتفاع کل ستون به ۲۳۰۰ میلی‌متر می‌رسد. ضخامت ورق پیوند تعویض‌پذیر در هر دو نمونه برابر ۱۰ میلی‌متر است. در هر دو نمونه مورد استفاده در این آزمایش علاوه بر کاهش مقطع به وسیله برش و بازشو در بال پیوند ضخامت بال‌ها به  $\frac{2}{3}$  ضخامت بال تیر اصلی کاهش یافته است (شکل‌های ۳ تا ۵).

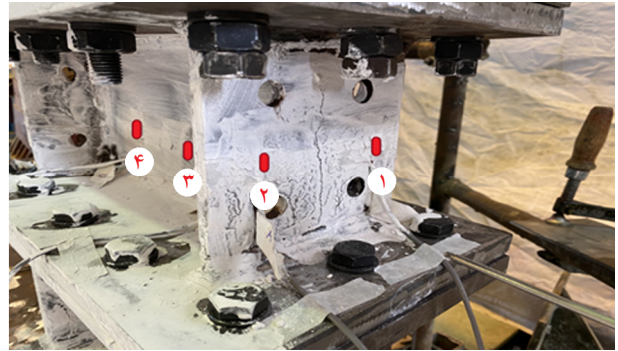
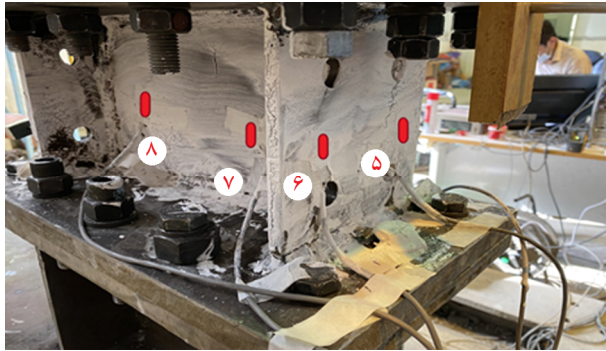


شکل (۳): مشخصات نمونه ۲ آزمایشگاهی.

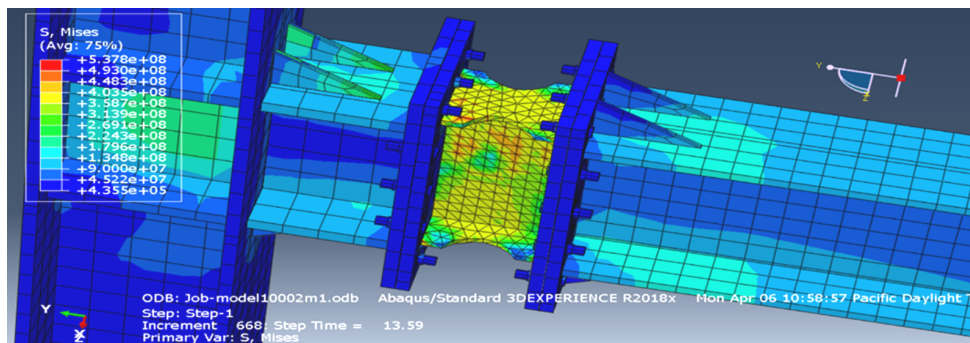


شکل (۴): مشخصات نمونه ۱ آزمایشگاهی.





شکل (۸): محل قرارگیری کرنش سنج‌ها.



شکل (۹): تصویر خروجی نرم‌افزار آباکوس در نمونه ۱.

مخرب و شکست در آن ناحیه می‌شود. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) منحنی‌های هیستریزیس نمونه اول دیده می‌شود. در این نمودارها میزان تغییر مکان مثبت در منحنی آزمایشگاهی ۵۵/۵۴ میلی‌متر و در منحنی آباکوس ۵۴/۲۵ میلی‌متر است و در ناحیه منفی در منحنی آزمایشگاهی ۵۰/۴۴ میلی‌متر و در منحنی آباکوس ۵۵/۲۸ میلی‌متر می‌باشد و رفتاری نسبتاً مشابه در ناحیه فشاری و کششی دیده می‌شود. در نمونه ۱ حداکثر مقاومت نمونه آزمایشگاهی برابر ۸۱/۵ کیلو نیوتن و حداکثر مقاومت به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برابر ۸۶/۳۲ کیلو نیوتن است. خطا به میزان ۱۲ درصد بین مدل شماره ۱ در آباکوس و مدل شماره ۱ آزمایشگاهی دیده می‌شود.

در شکل (۱۲) گسیختگی بال پیوند با برش RBS دیده می‌شود که به علت کماتش موضعی بال تیر بر اثر بار رفت و برگشتی می‌باشد و علاوه بر آن تغییر طول صفحات کناری بعد از آزمایش مشاهده گردید و همچنین ترک در ناحیه جوش پیوند تعویض پذیر بعد از جابه‌جایی ۵۲ میلی‌متر و در انتهای چرخه‌های بارگذاری در شکل نشان داده شده است.

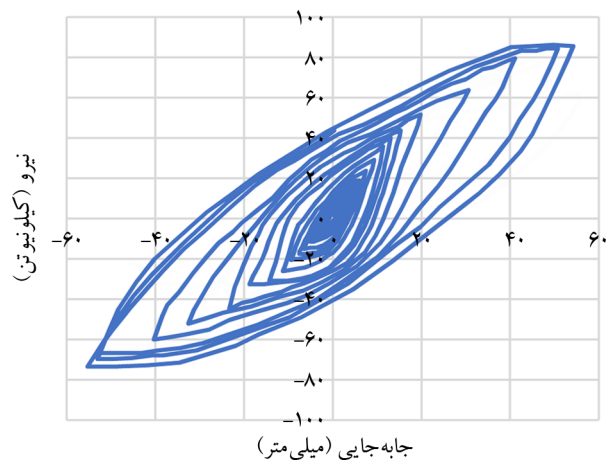
پیچ‌های مورد استفاده در این آزمایش از نوع پیچ شش گوشه کلاس ۱۲/۹ و با قطر اسمی M16 می‌باشند که همگی این پیچ‌ها به‌طور دقیق برای این پژوهش طراحی شده‌اند و طول این پیچ‌ها ۱۰ سانتی‌متر و از نوع مقاومت بالا می‌باشند. مهره و واشر مورد استفاده از نوع HB است و پیوند تعویض پذیر نیز توسط ۱۲ عدد پیچ در هر طرف به تیر اصلی اتصال پیدا کرده است.

### ۳- بررسی نتایج نرم‌افزاری و آزمایشگاهی

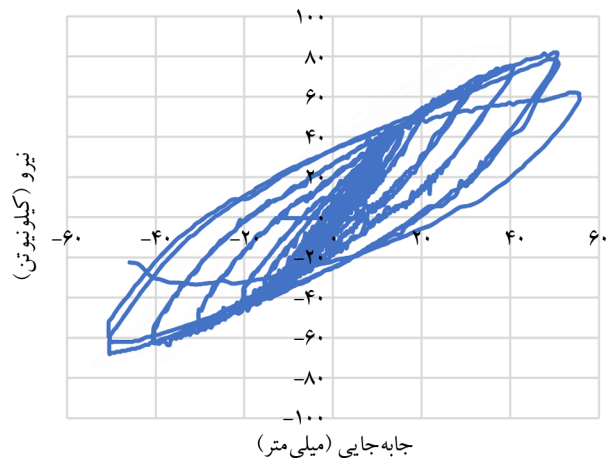
#### ۳-۱- بررسی منحنی‌های هیستریزیس نرم‌افزاری و آزمایشگاهی نمونه ۱

در شکل (۹) خروجی تنش میسر در اتصال نمونه ۱ و تمرکز تنش در قسمت پیوند طراحی شده را مشاهده می‌کنیم و می‌بینیم که بیشترین گسیختگی در بال پیوند و در نزدیکی آن ناحیه رخ داده است و دیگر قسمت‌های نمونه طراحی شده کمترین تنش‌ها را داشته است. همچنین سخت‌کننده‌های متصل به تیر به صلب ماندن اتصال تیر و ستون کمک می‌کنند و ورق پیوستگی ستون که در چپ و راست ستون قرار دارد مانع از هرگونه رفتار



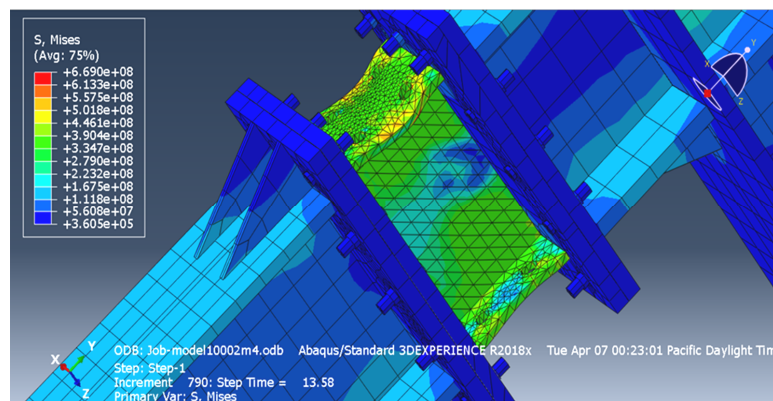


شکل (۱۰): نمودار هیستریزیس به دست آمده از نرم افزار آباکوس نمونه ۱.



شکل (۱۱): نمودار هیستریزیس به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی نمونه ۱.

شکل (۱۲): تغییر شکل در وسط بال نمونه ۱ آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه ای.



شکل (۱۳): تصویر خروجی نرم افزار آباکوس در نمونه ۲.

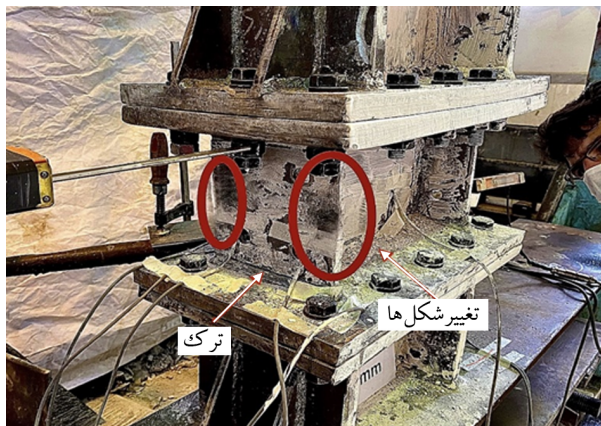
اتصال توزیع تنش به صورت یکنواخت در قسمت پیوند تعویض پذیر صورت گرفته است.

در شکل های (۱۴) و (۱۵) منحنی هیستریزیس نمونه دوم در نرم افزار آباکوس و آزمایشگاه دیده می شود. در این نمودارها

۲-۳- بررسی منحنی های هیستریزیس نرم افزاری و آزمایشگاهی نمونه ۲

شکل (۱۳) خروجی تنش میسر در اتصال نمونه ۲ و تمرکز تنشی که در قسمت پیوند رخ داده است را نشان می دهد. در این

نیروی وارده توسط جک هیدرولیکی را در انتهای آزمایش مشاهده می‌کنیم. همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود تشکیل مفصل پلاستیک و تغییر شکل در نمونه دوم در ناحیه پیوند I شکل صورت گرفته است. بدین ترتیب ابتدا شاهد تغییر شکل در ناحیه پیوند بودیم که ابتدا لبه‌های بال تیر تعویض‌پذیر دچار تغییر شکل و گسیختگی می‌گردد و در انتهای آزمایش می‌بینیم که ترک‌هایی در ناحیه جوش تیر تعویض‌پذیر ایجاد می‌گردد که از آن مرحله زوال نمونه آغاز می‌گردد و سختی و مقاومت تیر کاهش می‌یابد. همچنین در آزمایش‌ها شاهد تغییر طول نسبی در قسمت پیوند مورد نظر بودیم.



شکل (۱۶): تغییر شکل و ترک در بال نمونه ۲ بعد از بارگذاری.

### ۳-۳- نمودارهای پوش و لنگر- دوران نمونه‌ها

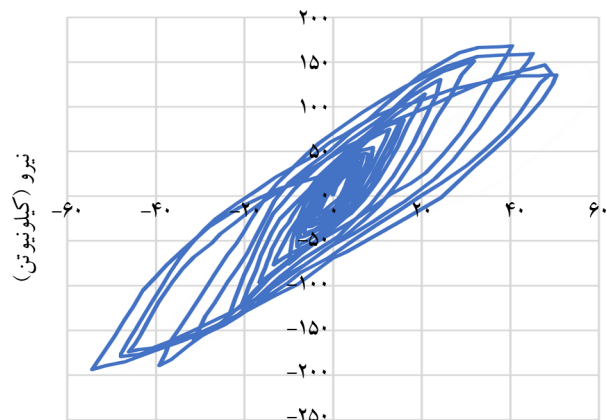
#### ۱-۳-۳ پوش نمودارهای هیستریزس

در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نمودارهای پوش منحنی هیستریزس نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های ۱ و ۲ و همچنین نمودارهای دو خطی حاصل از آنها آورده شده است. با توجه به منحنی پوش و نمودار دو خطی حاصل از آن می‌توان مقادیر سختی (شیب اولیه نمودار) و شکل‌پذیری (نسبت جابه‌جایی نهایی به جابه‌جایی در نقطه تسلیم) را محاسبه نمود.

#### ۲-۳-۳ نمودار جذب انرژی نمونه‌های آزمایشگاهی

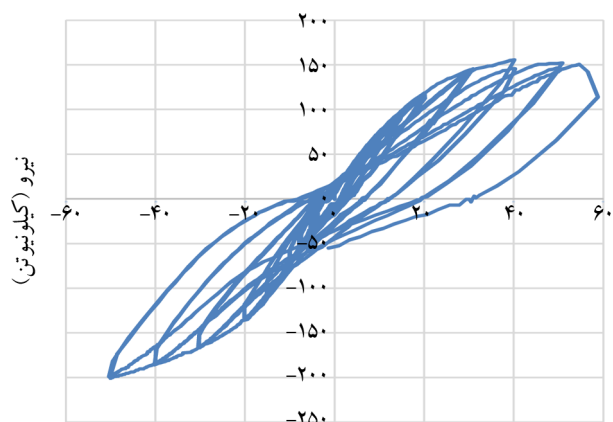
در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) مشاهده می‌شود که میزان جذب انرژی نمونه آزمایشگاهی ۲ از نمونه آزمایشگاهی ۱ بیشتر است.

میزان تغییر مکان مثبت در منحنی آزمایشگاهی ۵۸/۸ میلی‌متر و در نمونه آباکوس ۵۰/۴۳ میلی‌متر است و در جهت منفی در منحنی آزمایشگاهی ۴۹/۷۶ میلی‌متر و در نمونه آباکوس ۵۴ میلی‌متر حاصل شده است. اعمال بارگذاری و جابه‌جایی تا جاری شدن در نهایت شکست کامل نمونه‌ها ادامه پیدا کرده است.



جابه‌جایی (میلی‌متر)

شکل (۱۴): نمودار هیستریزس به‌دست آمده از نرم‌افزار آباکوس نمونه ۲.



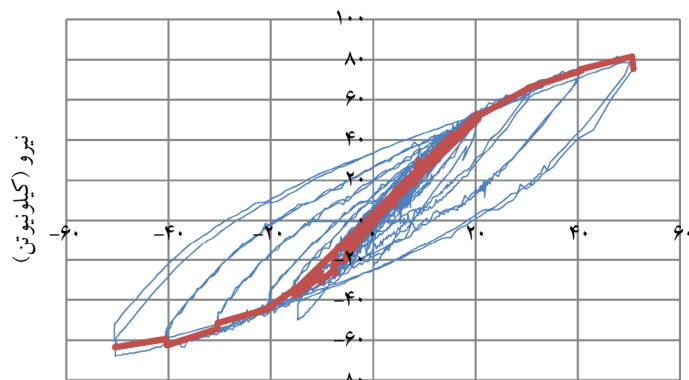
جابه‌جایی (میلی‌متر)

شکل (۱۵): نمودار هیستریزس به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی نمونه ۲.

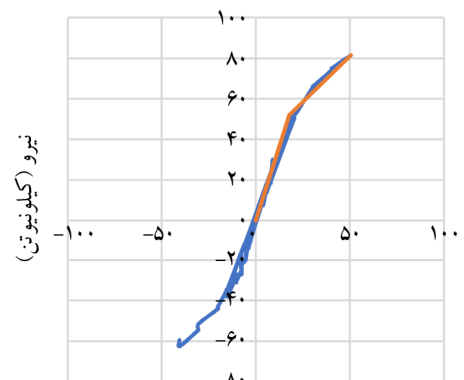
در نمونه ۲ حداکثر مقاومت نمونه آزمایشگاهی برابر ۱۵۵/۵ کیلونیوتن و حداکثر مقاومت به‌دست آمده از تحلیل اجزای محدود برابر ۱۸۶/۰۵ کیلونیوتن می‌باشد. خطای ۱۵ درصدی بین مدل شماره ۲ در آباکوس و مدل شماره ۲ آزمایشگاهی دیده می‌شود و یکی از دلایل این اختلاف ممکن است برخی نوسان‌ها در دستگاه‌های آزمایشگاه باشد.

در شکل (۱۶) تغییر شکل و همچنین ترک‌های حاصل از



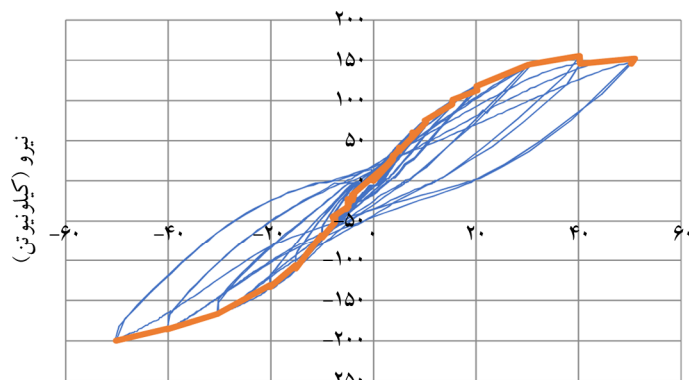


جابہ جایی (میلی متر)  
(ب) پوش مدل ۱ آزمایشگاهی

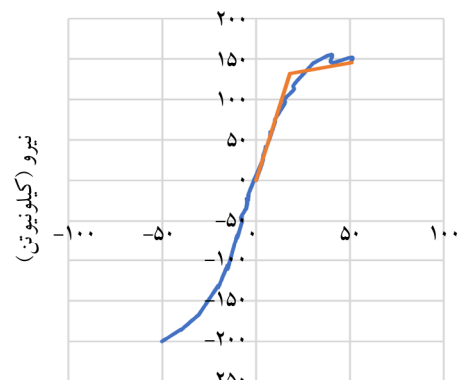


جابہ جایی (میلی متر)  
(الف) نمودار دوخطی مدل ۱ آزمایشگاهی

شکل (۱۷): پوش منحنی هیستریزس و نمودار دو خطی نمونه ۱ آزمایشگاهی.

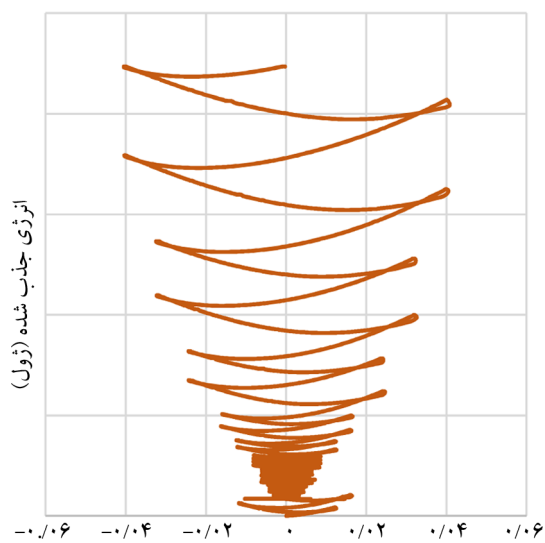


جابہ جایی (میلی متر)  
(ب) پوش مدل ۲ آزمایشگاهی



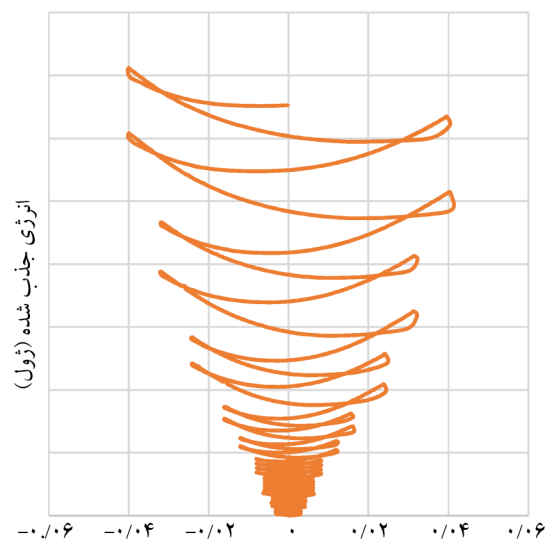
جابہ جایی (میلی متر)  
(الف) نمودار دوخطی مدل ۲ آزمایشگاهی

شکل (۱۸): پوش منحنی هیستریزس و نمودار دو خطی نمونه ۲ آزمایشگاهی.



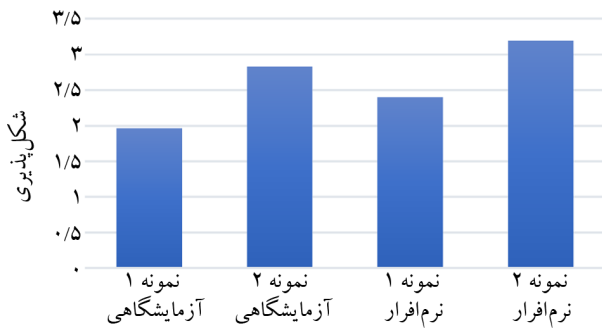
چرخش پلاستیک (رادیان)

شکل (۲۰): نمودار انرژی جذب شده نمونه آزمایشگاهی ۱.

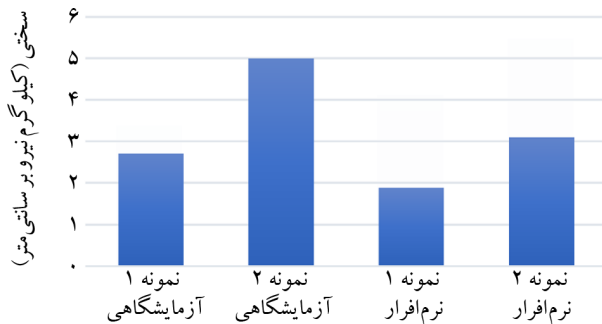


چرخش پلاستیک (رادیان)

شکل (۱۹): نمودار انرژی جذب شده نمونه آزمایشگاهی ۲.



شکل (۲۲): مقایسه شکل پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری.

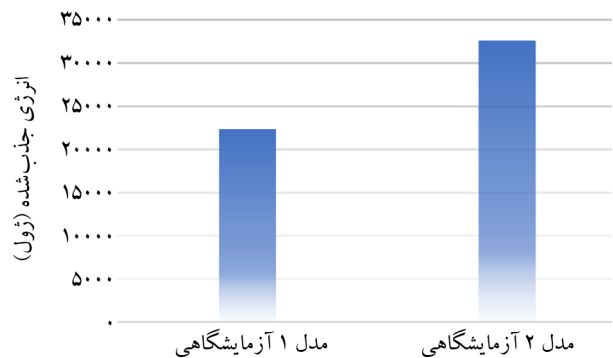


شکل (۲۳): مقایسه سختی نمونه‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری.

### ۳-۳-۴- نمودارهای لنگر- دوران نمونه‌های آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل (۲۴) مشاهده می‌شود به دلیل آنکه میزان ماکزیمم دوران ثبت شده در نمونه آزمایشگاهی ۱ به  $0.04$  رادیان رسیده پس با توجه به آیین‌نامه AISC 358 [۱۰]، این اتصال قابلیت استفاده در قاب خمشی ویژه را دارد و جزو اتصالات مجاز در قاب ویژه است، همچنین با توجه به اینکه میزان ماکزیمم دوران ثبت شده در نمونه آزمایشگاهی ۲ نیز از  $0.04$  رادیان گذشته پس با استناد به آیین‌نامه، این اتصال نیز قابلیت استفاده در قاب خمشی ویژه را دارد. همچنین در آیین‌نامه AISC 358 [۱۰] آمده است که در دریافت ۴ درصد، نمونه آزمایشگاهی باید به ۸۰ درصد لنگر پلاستیک خود برسد که در محاسبات انجام شده لنگر پلاستیک برای نمونه ۱ برابر  $111/4$  کیلو نیوتن بر متر محاسبه شده است که در نمونه ۱ به لنگر  $90/2$  کیلو نیوتن بر متر دست یافتیم که این بدان معناست که نمونه ۱ در دریافت ۴ درصد به بیش از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک رسیده و همچنین در نمونه ۲ نیز لنگر پلاستیک  $193/7$  کیلو نیوتن بر متر محاسبه شده است که نمونه ۲ در دریافت ۴ درصد به لنگر  $171/4$  کیلو نیوتن بر متر رسیده است.

در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) مشاهده می‌شود میزان کل انرژی جذب شده در نمونه ۱ برابر  $22344$  ژول و در نمونه ۲ برابر  $35471$  ژول است که علت این اختلاف با توجه به نمودار هیستریزس نیرو- جابه‌جایی، وارد شدن زودتر اتصال نمونه ۱ به ناحیه غیر خطی و نشان دادن رفتار پلاستیک از خود در طول بارگذاری صورت گرفته می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود نمونه ۲ حدود  $27/3$  درصد انرژی بیشتری نسبت به نمونه ۱ جذب کرده است که به این علت است که سطح زیر نمودار هیستریزس نمونه ۲ بیشتر بوده در نتیجه استهلاک انرژی و به طبع آن جذب انرژی نمونه بیشتر از نمونه ۱ می‌باشد. مقایسه انرژی جذب شده توسط مدل‌های ۱ و ۲ در بررسی آزمایشگاهی در شکل (۲۱) آمده و نشان می‌دهد انرژی جذب شده توسط نمونه دوم بیشتر از نمونه اول است به طوری که اختلاف انرژی جذب شده بین نمونه ۱ و ۲ برابر  $10281$  ژول می‌باشد.



شکل (۲۱): مقایسه انرژی جذب شده توسط مدل‌های ۱ و ۲ در بررسی آزمایشگاهی.

### ۳-۳-۳- نمودارهای سختی و شکل پذیری

در شکل (۲۲) دیده می‌شود که شکل‌پذیری در نمونه ۲ آزمایشگاهی برابر  $2/82$  است و این عدد در نمونه نرم‌افزاری به  $3/19$  می‌رسد که می‌توان گفت شکل‌پذیری در نمونه‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری دارای اختلاف کمی هستند و نمونه‌ها به خوبی در نرم‌افزار طراحی و تحلیل شده‌اند و همچنین شکل‌پذیری نمونه ۲ بیشتر از نمونه ۱ می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (۲۳) می‌توان بیان نمود که در بین نمونه‌ها نمونه ۲ آزمایشگاهی با سختی ۵ کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر دارای بیشترین سختی در بین نمونه‌ها می‌باشد.

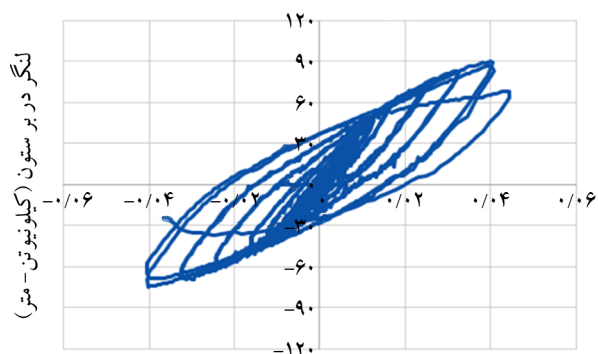
است و در نمونه ۲ در نقاط ۲، ۵، ۷ و ۸ کرنش در کرنش سنج‌های قرار داده شده از ۰/۰۰۲ بیشتر شده پس تسلیم رخ داده است. در نمونه شماره ۱ نقاط ۱، ۵ و ۷ مابین سیکل‌های ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ دچار تسلیم شده‌اند که نشان می‌دهد تغییر شکل‌های اصلی در این سیکل‌ها رخ داده است و در نمونه شماره ۲ در نقاطی که کرنش سنج‌های ۱، ۲، ۴ و ۸ قرار داده شده و در سیکل‌های ۳۰۰۰ تا ۳۴۰۰ به کرنش تسلیم رسیده‌ایم و تغییر شکل‌ها و گسیختگی‌های اصلی در این بازه رخ داده است.

جدول (۳): مقادیر کرنش ماکزیمم و سیکل تسلیم در نقاط قرارگیری کرنش سنج‌ها.

کد کرنش سنج	نام نمونه	سیکل تسلیم	کرنش ماکزیمم (+)	کرنش ماکزیمم (-)
۱	نمونه ۱	۳۵۵۰	۰/۰۰۵۱	-۰/۰۰۱۸
	نمونه ۲	۳۰۲۴	۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۲۸
۲	نمونه ۱	۲۱۰۰	۰/۰۰۳۹	-۰/۰۰۰۶
	نمونه ۲	۳۲۹۶	۰/۰۰۲۲	-۰/۰۰۱۷
۳	نمونه ۱	۵۰۵۸	۰/۰۰۲۱	-۰/۰۰۱۵
	نمونه ۲	---	۰/۰۰۱۷	-۰/۰۰۱۲
۴	نمونه ۱	۲۱۵۲	۰/۰۰۷۴	-۰/۰۱۰۸
	نمونه ۲	۳۰۷۴	۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۱۴
۵	نمونه ۱	۳۰۱۴	۰/۰۰۲۹	-۰/۰۰۳۰
	نمونه ۲	۹۴۷	۰/۰۰۲۱	-۰/۰۰۲۹
۶	نمونه ۱	۲۹۱۰	۰/۰۰۹۰	-۰/۰۰۲۹
	نمونه ۲	---	۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۱۸
۷	نمونه ۱	۳۳۷۴	۰/۰۰۸۰	-۰/۰۰۲۱
	نمونه ۲	۲۴۱۶	۰/۰۰۲۴	-۰/۰۰۴۲
۸	نمونه ۱	---	---	---
	نمونه ۲	۳۳۴۷	۰/۰۰۲۹	-۰/۰۰۴۷

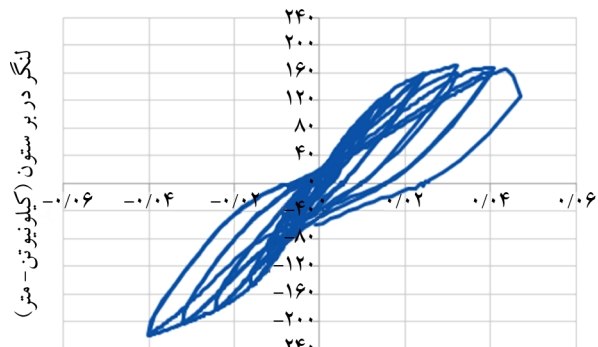
#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه عددی و آزمایشگاهی اتصال RBS با استفاده از پیوندهای قابل تعویض I شکل در محل تشکیل مفصل پلاستیک پرداخته شده و بر این اساس نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی مورد آزمایش و تحلیل قرار گرفتند که نتایج در ادامه آمده است:



چرخش پلاستیک (رادبان)

(الف) نمونه ۱ آزمایشگاهی



چرخش پلاستیک (رادبان)

(ب) نمونه ۲ آزمایشگاهی

شکل (۲۴): نمودارهای لنگر- دوران به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی نمونه ۱ و ۲.

در نمونه ۲ آزمایشگاهی که دارای بال سوراخ‌دار است شاهد افزایش سختی نمونه بودیم که این امر موجب کماتش ورق بال تیر تعویض پذیر و در نتیجه ایجاد پدیده پینچینگ در نمودارهای هیستریزس و همچنین نمودارهای لنگر- دوران این نمونه گردید. در جدول (۳) مقادیر کرنش ماکزیمم در نقاط قرارگیری کرنش سنج‌ها و سیکل تسلیم آورده شده است که تعداد کرنش سنج‌های نمونه ۱ برابر ۷ عدد و نمونه ۲ دارای ۸ عدد بود. در نمودار پایین وقتی مقدار کرنش از ۰/۰۰۲ بیشتر شده است تسلیم در محل قرارگیری کرنش سنج رخ داده است. سیکل تسلیم در جدول (۳) نشان‌دهنده‌ی مرحله‌ای می‌باشد که در آن کرنش سنج به حد نهایی خود رسیده و تسلیم شده است.

با توجه به مقدار ماکزیمم کرنش همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه ۱ در تمام نقاطی که کرنش سنج‌ها قرار داده شده مقدار کرنش از ۰/۰۰۲ بیشتر شده است و تسلیم رخ داده

۰/۰۴ رادیان رسیده پس با استناد به آئین‌نامه AISC 358، اتصالات بررسی شده قابلیت استفاده در قاب خمشی ویژه را دارند و جزو اتصالات مجاز در قاب ویژه به حساب می‌آیند.

### مراجع

- Shen, Y., Christopoulos, C., Mansour, N., and Tremblay, R. (2011) Seismic design and performance of steel moment-resisting frames with nonlinear replaceable links. *Journal of Structural Engineering*, **137**(10), 1107-1117.
- Vetr, M.G.H., Miri, M., and Haddad, A. (2012) seismic behavior of a new reduced beam section connection by drilled holes arrangement (RBS\_DHA) on the beam flanges through experimental studies. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*.
- Deylami, A. and Moslehi Tabar, A. (2013) Promotion of cyclic behavior of reduced beam section connections restraining beam web to local buckling. *Thin-Walled Structures*, **73**, 112-120.
- Tsavdaridis, K.D., Faghih, F., and Nikitas, N. (2014) Seismic evaluation of reduced web section (RWS) moment connections. *Proceedings of the Hellenic National Conference of Steel Structures. 8<sup>th</sup> Hellenic National Conference of Steel Structures*, 2-4 October 2014.
- Saleh, A., Zahrai, S.M., and Mirghaderi, S.R. (2015) Experimental study on innovative tubular web RBS connections in steel MRFs with typical shallow beams. *Structural Engineering and Mechanics*, **57**(5), 785-808.
- Saleh, A., Mirghaderi, S.R., and Zahrai, S.M. (2016) Cyclic testing of tubular web RBS connections in deep beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **117**, 214-226.
- Roudsari, M.T., Jamshidi K.H., and Moradi, S.H. (2018) Experimental and numerical assessment of reduced IPE beam sections connections with box-stiffener. *International Journal of Steel Structures*, **18**(1), 255-263.
- Dolatshahi, K.M., Gharavi, A., and Mirghaderi, S.R. (2018) Experimental investigation of slitted web steel moment resisting frame. *Journal of Constructional Steel Research*, **145**, 438-448.

با توجه به نمودارهای هیستریزیس به دست آمده از تست آزمایشگاهی و همچنین نمودارهای پوش و نمودارهای حاصل از آن می‌توان نتیجه گرفت که نمونه ۲ که دارای کاهش یافتگی به وسیله ایجاد سوراخ در بال پیوند بود دارای عملکرد مطلوب تری در شکل پذیری و مستهلک کردن انرژی نسبت به نمونه ۱ که دارای کاهش یافتگی به وسیله برش RBS بود می‌باشد.

میزان کل انرژی جذب شده در نمونه ۱ برابر ۲۲۳۴۴ ژول و در نمونه ۲ برابر ۳۵۴۷۱ ژول می‌باشد که علت این اختلاف با توجه به نمودار هیستریزیس نیرو-جابجایی، وارد شدن زودتر اتصال نمونه ۱ به ناحیه غیر خطی و نشان دادن رفتار پلاستیک از خود در طول بارگذاری صورت گرفته می‌باشد.

در نمودار سختی نمونه ۲ آزمایشگاهی که دارای بال سوراخ‌دار بود شاهد افزایش سختی نمونه بودیم که این امر موجب کماتش ورق بال تیر تعویض پذیر و در نتیجه ایجاد پدیده پینچینگ در نمودارهای هیستریزیس گردید.

طبق نمودارهای به دست آمده از کرنش سنج‌ها می‌توان نتیجه گرفت که نمونه ۲ در مقایسه با نمونه ۱ در قسمت جان تیر دارای کرنش‌های کمتری می‌باشد که این کرنش‌ها در نمونه ۲ حدود ۰/۰۴۷ است در حالی که در نمونه ۱ برابر ۰/۰۸۰ می‌باشد.

در پیوند با برش RBS حداکثر مقاومت برابر با ۸۱/۵ کیلونیوتن بود که این عدد در پیوند با بال سوراخ‌دار برابر با ۱۵۵/۵ کیلو نیوتن بود که نشان می‌دهد پیوند تعویض پذیر ۲ دارای مقاومت بسیار بالاتری نسبت به پیوند تعویض پذیر ۱ می‌باشد.

همچنین با توجه به اینکه سطح زیر نمودار هیستریزیس میزان نیروی مستهلک شده تحت رفتار غیر خطی یا پلاستیک را نشان می‌دهد می‌توان گفت هر چه نمودارها پایدارتر و مقارن‌تر باشند و مقاومت و سختی ثابت‌تر باشد در نتیجه سطح زیر نمودار بزرگ‌تر و نمونه بهتر عمل کرده و شکل پذیری خوبی را دارد که بر این اساس می‌توان گفت نمونه با پیوند سوراخ‌دار دارای عملکرد مناسب تری نسبت به پیوند با برش RBS می‌باشد.

ماکزیم دوران ثبت شده در نمونه ۱ و ۲ آزمایشگاهی به

9. Mahmoudi, F. and Tehrani, P. (2020) A technique for seismic rehabilitation of damaged steel moment resisting frames. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8-4, 106-117.
10. AISC (2016) *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. AISC/ANSI 358-16, American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, IL.



## Experimental Assessment of Reduced Beam Section Connection in Moment Frames using I-Shaped Replaceable Links

Amir Golnavaz<sup>1</sup>, Panam Zarfam<sup>2\*</sup> and Armin Aziminezhad<sup>3</sup>

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: zarfam@srbiau.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

In 1994, Northridge, California, an earthquake created brittle fractures and cracks near the beam-to-column connection welds in more than 170 steel MRF buildings. In many cases, these fractures and cracks were observed in the beam without any signs of plastic deformation. Since connections are one of the most important components of a building frame, a good understanding of the structural behavior of connections and sufficient knowledge of how it is transmitted is a prerequisite for designing a safe connection. Steel moment frame structures to resist the earthquakes are designed based on the assumption that they can resist yield or plastic deformation without reducing strength. The plastic deformation involves the plastic rotations of the beams at their connection to the columns and theoretically resulting in the loss of seismic energy applied to the structure. All the modifications proposed in recent years for the moment connections are aimed at shifting the maximum plastic capacity or ductility demand from the end of the beam or connection zone and transferring the ductility demand to an area within the beam and away from the column. On the other hand, the details of seismic moment connections provided in FEMA351 can be classified into two groups: a- Connection zone strengthening methods; b- Reduced beam methods. There are different types of the connections presented with the idea of strengthening the connection zone; for example, we can refer to the connection with welded cover plates to the flange, the connection with the side plate, the connection with the screwed seat, the connection with the welding muscle, etc. However, the connections provided and used with the idea of reducing the beam are more limited, such as RBS or reduced section beam connection, free-flange beam connection, sheared beam-to-web connection, and reduced beam-to-web connection. RBS connections form a plastic hinge outside the connections site and reduce force and moment at the connection, and is one of the pre-confirmed rigid connections after the 1994 Northridge earthquake. One method of building RBS connections is to use a connection of beam with a reduced section by replaceable links. The use of these replaceable links is one of the methods to increase the ductility and transfer the plastic hinge into the reduced area of the beam. In these connections, the goal is to displace the plastic hinge into the reduced area of the beam at a certain distance from the column, so in these connections, moving the plastic hinge away from the column reduces the concentration of strain in the welded zone. As a result, it reduces the weld cracking rate and thus reduces brittle failure in the connections.

Connection of the reduced beam section was proposed after damage to structures in the 1994 Northridge earthquake. This connection reduces the damage caused to the panel zone by forming a plastic hinge outside the beam-to-column connection area. In this research, we investigate in a laboratory a new type of beam section connection, which in recent years has been named as replaceable links. Among the links designed in the first laboratory sample, the semicircular cutting method on the flange of the replaceable beam was used to reduce the finding, and in the second sample, circular holes in the flange of the sample were used to reduce the beam section. Studies have shown that high stress concentration occurs in the reduced area and other parts of the beam and column elements will remain without significant stress, which makes the beam replaceable after an earthquake. Analytical results show that the link with reduction by creating a hole in the flange has more energy absorption and ductility than the link with reduction by cutting a semicircle in the flange of the link beam. Also, according to the maximum

amount of time recorded in the samples and referring to the existing regulations in the design of structures, it can be stated that both samples are among the allowable connections in a special moment frame.

**Keywords:** RBS Connection, Experimental Study, Energy Absorption, Ductility, Replaceable Link I-Shaped