

## Analytical Study of Geometric Effects of Bolted Web Replaceable Shear Link with Bolted Web Connection under Cyclic Loading

Nasreh Soveini<sup>1</sup>, Navid Siahpolo<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, Institute for Higher Education, ACECR, Khuzestan, Iran

2 -Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Institute for Higher Education, ACECR, Khuzestan, Iran

### ABSTRACT

Due to good ductility and stiffness, the eccentrically braced frame (EBF) has attracted the interest of seismic design regulations. Recently, the replaceable link beams (RLBs) were proposed as a new approach to solve the problems in designing the EBF system. This approach allows to easily repair or replace the damaged link beam by uncoupling the yielding element (link beam) from the main floor beam. One of the most common types of RLB is the double-channel link beam with the web-bolted connection. The identification of factors involved in the behavior of this type of link beam is less commonly found in the studies. In this paper, therefore, using the ABAQUS software, the numerical modeling was first validated to a laboratory model. Then, by changing the validated link components (including the number and thickness of plates, number and spacing of bolts, number and steel grade of link beam section), a total of 16 new numerical models were generated and evaluated under cyclic loading. The results limited to the assumptions of this paper show that in the web-connected horizontal replaceable shear link, the full shear yielding occurred, achieving the full functionality of ductile seismic fuse. In addition, the bolted, web-connected RLB demonstrates excellent seismic performance and plastic rotation capacity. Also, the smart selection of link components increases the shear strength capacity, stiffness, ductility and energy dissipation. However, the effect of increasing the size of beam cross-section is more noticeable. In addition, in order to ensure the full shear yielding behavior for RLB, it is necessary to add the upper and lower flange stiffeners near the connection.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 08 February 2020

**Revise Date:** 02 October 2020

**Accept Date:** 08 October 2020

### Keywords:

Bolted replaceable link-  
-beam

Shear yielding

Finite element model

Cyclic loading

Rotation angle of link beam

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.219126.2075>

\*Corresponding author: Navid Siahpolo

Email address: [siahpolo@acecr.ac.ir](mailto:siahpolo@acecr.ac.ir)

## مطالعه تأثیر پارامترهای هندسه تیر پیوند برشی پیچی قابل تعویض با اتصال به جان در برابر بارگذاری چرخه‌ای

نصره سوینی<sup>۱</sup>، نوید سیاه پلو<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی فخر رازی ساوه

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاددانشگاهی خوزستان

### چکیده

مهاربند برون‌محور (*EBF*) به دلیل شکل‌پذیری و سختی، مورد توجه آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای است. اخیراً به‌کارگیری تیر پیوند قابل تعویض *RLB* به‌عنوان روشی نوین در رفع اشکالات طراحی سیستم *EBF* پیشنهاد شده است. در این روش با جدا کردن المان تسلیم شونده (تیر پیوند) از تیر اصلی کف، ترمیم و تعویض تیر پیوند بعد از آسیب به‌آسانی امکان‌پذیر است. یکی از انواع رایج *RLB* تیر پیوند با مقطع دابل‌ناودانی با اتصال پیچی به جان است. مطالعه عوامل تأثیرگذار بر رفتار این نوع تیر پیوند کمتر در مطالعات دیده شده است. پس در این مقاله به کمک نرم‌افزار آباکوس ابتدا اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی نسبت به یک مدل آزمایشگاهی انجام شد. سپس با تغییر در اجزا اتصال اعتبارسنجی شده (اعم از تعداد و ضخامت ورق‌ها، تعداد و فاصله پیچ‌ها، تعداد و نوع فولاد مقطع تیر پیوند) در مجموع ۱۶ مدل عددی جدید تولید و در برابر بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی گردید. نتایج در محدوده فرضیات این مقاله نشان می‌دهد در پیوند برشی افقی تعویض‌پذیر با اتصال جان، تسلیم برشی کامل روی داده و نقش کامل «فیوز» لرزه‌ای شکل‌پذیر حاصل شد. بعلاوه *RLB* با اتصال پیچی جان عملکرد لرزه‌ای و ظرفیت دوران پلاستیک مطلوبی را داراست. همچنین با انتخاب هوشمندانه اجزا تشکیل‌دهنده تیر پیوند، ظرفیت مقاومت برشی، سختی، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. در این بین تأثیر افزایش شماره مقطع تیر محسوس‌تر است. ضمناً برای تضمین رفتار تسلیم شونده برشی کامل *RLB*، تعبیه ورق تقویتی بال فوقانی و تحتانی در مجاورت اتصال الزامی است.

کلمات کلیدی: تیر پیوند پیچی تعویض‌پذیر، تسلیم برشی، مدل المان محدود، بارگذاری چرخه‌ای، زاویه چرخش تیر پیوند.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.219126.2075">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.219126.2075</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.219126.2075	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۱۷	۱۳۹۹/۰۷/۱۷	۱۳۹۹/۰۷/۱۱	۱۳۹۸/۱۱/۱۹
				*نویسنده مسئول:		
				نوید سیاه پلو		
				siahpolo@acecr.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از قاب‌های مهاربندی شده خارج از مرکز EBF<sup>۱</sup> به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از این سیستم برای کاربردهای لرزه‌ای در دهه ۱۹۷۰ در ژاپن پیشنهاد شده است [۲، ۱]. مطالعات قبلی Kasai و Popov [۳]، Engelhardt و Popov [۴] عملکرد لرزه‌ای عالی EBF را اثبات و داده‌های بسیار ارزشمندی را ارائه نموده است. EBFها سیستم‌های مقاوم در برابر بار لرزه‌ای جانبی هستند که بخش شکل‌پذیر آن تیر پیوند نامیده می‌شود. مظلوم و صالح‌پور در سال ۱۳۹۳ مقاله‌ای با عنوان بررسی مقاومت و رفتار تیر پیوند به ستون در مهاربندهای واگرا به روش اجزای محدود را ارائه نموده است. نتایج بررسی نشان داد که بهترین حالت جهت تأمین سختی و شکل‌پذیری مطلوب، هنگامی ایجاد می‌شود که تیر پیوند در برش عمل نماید. در این حالت نقش ضخامت بال، جان و سخت‌کننده‌های تیر اهمیت زیادی پیدا می‌کند. همچنین برای رسیدن به یک عملکرد بهینه در مکانیسم گسیختگی در تیر پیوند، باید از سخت‌کننده‌هایی با ضخامت بیشتر از جان استفاده کرد [۵]. با اینکه استفاده از قدیمی‌ترین قاب‌هایی با پیوندهای عمودی (معروف به EBFهای مهاربندی شده Y برعکس) در طی این سالها پرطرفدار نیست. تأثیر تیر پیوند برشی قائم در ساختمان‌های بتنی بهسازی شده بر عملکرد اجزای سازه و ضریب رفتار توسط مظلوم و احمدی نژاد در سال ۱۳۹۶ مورد مطالعه قرار گرفتند. در این مطالعه عوامل مؤثر بر ضریب رفتار در این قاب‌ها قبل و بعد از بهسازی بررسی شدند نتایج نشان داد که این شیوه بهسازی به طور محسوسی بر روی این عوامل تأثیر می‌گذارد. با استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی ضریب رفتار مدل‌های مورد مطالعه در مهاربند واگرای Y معکوس ارائه شده است. هم‌چنین نتایج تحلیل این بود که استفاده از این سیستم باعث کاهش برش پایه و لنگر ستون‌ها می‌گردد. ولی شتاب بام و نیروی محوری ستون‌ها را افزایش می‌دهد [۶]. تیرهای مزدوج به تیرهایی اطلاق می‌شود که نقش تیر پیوند را برای پیوند دادن دیوارهای برشی مجاور ایفا می‌کنند و عملکردی مشابه با تیرهای پیوند در مهاربندهای برون محور دارند. حجازی و رئیسی (۱۳۹۳)، با گردآوری خصوصیات و پارامترهای سازه‌ای و لرزه‌ای انواع تیرهای مزدوج که شامل تیرهای مزدوج بتنی با آرماتور قطری، تیرهای مزدوج با ورق برشی جان و تیرهای مزدوج فلزی و فیوز است، رفتار این تیرها در برابر زلزله مانند چرخه هیستریزس و استهلاک انرژی مورد بررسی قرار دادند و نوع تیر مزدوج فلزی به عنوان بهینه برای محاسبه ضریب رفتار انتخاب گردید [۷].

در طراحی EBF، مقاومت، سختی و شکل‌پذیری عوامل کلیدی است که ارتباط نزدیکی با اندازه، طول و جزئیات تیر پیوند دارد. تیر پیوند کوتاه که در برش تسلیم می‌شود ( $e < 1.6M_p/V_p$ ) به دلیل مکانیسم پایدارتر اتلاف انرژی و رفتار پس از تسلیم قابل پیش‌بینی‌تری نسبت به تیر پیوند بلند، بیشتر مورد توجه طراحان قرار دارد. تیر مستقر در دهانه EBF دو وجه دارد. تیر پیوند در برابر تسلیم برشی طراحی شده و تیر خارج از پیوند؛ جهت مقاومت در برابر نیروهای ناشی از سخت‌شوندگی کرنشی ناحیه رابط طراحی می‌شود. در خلال زلزله، تغییر شکل غیرخطی مکرر و کمانش موضعی تیر پیوند به تیر کف آسیب می‌رساند. چون تغییر شکل غیرالاستیک تجمعی تحمیل شده به سازه در طی زلزله نامعلوم است، ارزیابی میزان آسیب به‌ویژه در هنگامی که علائم مشهود آن آشکار نباشد، دشوار و در نتیجه، توانایی سازه در ارائه سطحی کافی از ایمنی برای هر بارگذاری بعدی نامشخص است. پس سازه ممکن است نیاز به تعمیر یا تعویض گسترده داشته باشد که می‌تواند دشوار، منقطع و پرهزینه باشد. یکی از راهبردها در مقابله با چنین موضوعی تیر پیوند برشی تعویض‌پذیر<sup>۲</sup> (RLB) است [۸]. مزیت آن امکان جدا کردن المان تسلیم‌شونده از تیر اصلی کف، جهت بهینه‌سازی طراحی تیر پیوند و EBF است. RLB نوعی از تیر با قابلیت چرخش پلاستیک بالا و جداسازی تیر پیوند از مابقی اعضا قاب واگرا است که به هر دو حالت افقی و قائم در قاب‌های EBF استفاده می‌شود. بدیهی است پیوندهای عمودی، در مقایسه با همتای افقی خود، فرآیند ترمیم پس از زلزله آسان‌تری را دارند. مشابه تیر پیوند عادی، RLB نیز در دو حالت اتصال به تیر کف (پیوند داخلی) و اتصال به ستون<sup>۳</sup> (پیوند بیرونی) وجود دارند. با اینکه مفهوم RLB قبلاً در تعدادی از مقالات، ذکر شده است، اما اولین پژوهش توسط Stratian و Dubina در اوایل دهه ۲۰۰۰ انجام شد [۱۱، ۱۰، ۹]. در سال (۲۰۰۴)، Dubina و Stratian، در آزمایش شبه تناوبی انجام‌شده در اروپا در مورد پیوند فولادی ساخته‌شده از اتصالات W شکل با ورق‌های

<sup>1</sup> Eccentric Braced Frame

<sup>2</sup> Replicable link beam-RLB

<sup>3</sup> Link-to-column

انتهایی همتراز<sup>۴</sup> به این نتیجه رسیدند که پیوند تعویض پذیر با تناسب خوب می تواند ظرفیت بالای شکل پذیری را نشان دهد و توجه بیشتر به طراحی اتصالات مورد نیاز است [۱۰]. برای بررسی بیشتر رفتار سیستم EBF با پیوند تعویض پذیر، یک برنامه آزمون تمام مقیاس، مشهور به پروژه DUAREM [۱۲] و مشابه آن توسط Ioan و همکاران [۱۳]، در آزمایشگاه ارزیابی سازه‌ای اروپا ELSA<sup>۵</sup> از مرکز پژوهش مشترک JRC<sup>۶</sup> در ایسپرا ایتالیا انجام شده است. نتایج این پژوهش بر RLB، با قابلیت تمرکز پلاستیک مجدد در ناحیه پیوند، نویدبخش عملکرد لرزه‌ای مطلوب و تعمیر آسان پس از زلزله است. Ramsay و همکاران [۱۴] و Fussell و همکاران [۱۵] به ارزیابی کاربردهای عملی RLB پرداختند. شایان ذکر است که دستورالعمل‌های طراحی برای پیوندهای تعویض پذیر در مشخصات فنی نیوزیلند و کانادا بیان شده‌اند. نتایج مطالعه Fussell و همکاران [۱۵] نشان داد پیوندهای تعویض پذیر الزامات آیین‌نامه در خصوص دوران غیرالاستیک تیر پیوند را تأمین کرده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر توسط Clifton و Cowie [۱۶] در سال ۲۰۱۳ نشان داد روند طراحی لرزه‌ای RLB مورد استفاده در نیوزیلند به اهداف تقاضای غیرالاستیک در پیوند فعال دست یافته و باقی سیستم سازه‌ای در برابر تحریک زمین لرزه‌ای، الاستیک باقی می ماند ولی اثر نیروی محوری و وجود دال بتنی نیاز به توجه بیشتر دارد.

دو جزییات پیوند برشی تعویض پذیر دیگر اخیراً توسط Mansour و همکاران [۱۷] معرفی شده‌اند. جزییات اول اتصال پیوند با ورق انتهایی پیچ و مهره است. شایان ذکر است مطالعات عددی Mago [۱۸] در سال ۲۰۱۳، که در گزارش HERA-R4-145 خلاصه شده - اند، قابلیت اطمینان اتصال پیشنهادی را تأیید نمود. جزییات دیگر، یک اتصال شبکه پیچی است که در آن دو مقطع ناودانی پشت به پشت، که به عنوان مقطع تیر پیوند فرض شدند، به جان تیر کف (تیر خارج از پیوند) پیچ می شود. مزیت این مقطع پیشنهادی اینکه اثر زبان بار نیروی محوری و اثر دیافراگم در این اتصالات برطرف شده است. بررسی مطالعات قبل نشان می دهد تعداد پژوهش‌های مرتبط با RLB ساخته شده با دابل ناودانی پیچی (اتصال نوع دوم پیشنهادی توسط Mansour و همکاران) کافی نیستند. بعلاوه قابلیت نصب آسان، باعث شده است این اتصال به شکل گسترده تری مورد استفاده قرار گیرد. کمبود شناخت کافی از رفتار غیرخطی RLB با مقطع دابل ناودانی به ویژه اثرات تغییر هندسه اجزا اتصال بر رفتار چرخه‌ای آن و نقش بالقوه خواص مواد، ضرورت و انگیزه مقاله حاضر را تعریف می نماید. بدین منظور، پس از بررسی پژوهش‌های پیشین و صحت سنجی، مدل‌هایی با در نظر گرفتن متغیرهای مختلف شامل تغییر در شماره تیر پیوند، تعداد و ضخامت سخت کننده‌های جان، ضخامت ورق تقویت بال و جان، تغییر در فاصله و قطر پیچ‌ها و تغییر در جنس مصالح در آباکوس بروش اجزا محدود توسعه داده شده است. در مجموع ۱۶ مدل علاوه بر مدل مرجع تولید شده است. لازم به ذکر است که مدل‌های این تحقیق بر اساس مدل EPM-12 پیشنهاد شده در مطالعه [۱۷] بسط و توسعه داده شده است. بنابراین چنین به نظر می رسد که مطالعه حاضر می تواند بعنوان یک مطالعه سازمان یافته عددی در جهت بررسی تأثیر هر یک از متغیرهای کلیدی در رفتار تیر پیوند تعویض پذیر فولادی قلمداد شود، مطالعه ای که در بررسی ادبیات فنی و تاریخی تحقیقات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. مزیت این مطالعه این است که بدون نیاز به صرف هزینه های هنگفت آزمایشگاهی کلی متغیرهای اصلی بشکل عددی ارزیابی شده و پیشنهادهایی برای مهندسی طراحی ارائه شده است. لذا علاوه بر توسعه مدل اجزا محدود تیر پیوند تعویض پذیر پیچی، ارائه دیدی گسترده و رتبه بندی مهمترین عوامل تأثیر گذار بر رفتار چرخه ای این نوع اتصال از مهمترین نوآوری های مطالعه حاضر است.

## ۲- معرفی تیر پیوند تعویض پذیر برشی پیچی

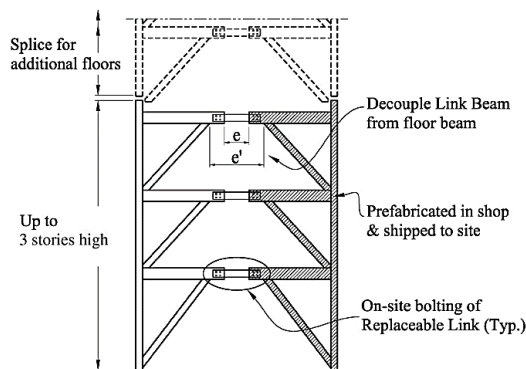
با استفاده از مفهوم تیر پیوند تعویض پذیر، طراح انعطاف پذیری زیادی در انتخاب مقطع تیر پیوند تسلیم شونده دارد به قسمی که مقاومت لازم بدون نیاز به تغییر مقطع تیر کف (تیر خارج از ناحیه پیوند)، تأمین گردد. سختی و زمان تناوب طبیعی سیستم EBF به شکل قابل توجهی توسط طول تیر پیوند کنترل می گردد. در پیوند کوتاه که برای رفتار پایدارتر در اثر تسلیم برشی ترجیح داده می شود، سختی تیر افزایش یافته و نیروهای بزرگ تری از برش کف، جذب می شود. با جدا کردن تیر پیوند تعویض پذیر از تیر کف، طول تیر پیوند دیگر با فاصله بین مهاربندهای خارج از مرکز تعیین نمی شود؛ بنابراین امکان تعبیه بازشوهای بزرگ تر در سیستم EBF وجود دارد [۱۷]. استفاده از

<sup>4</sup> End plate flush

<sup>5</sup> European Laboratory for Structural Assessment

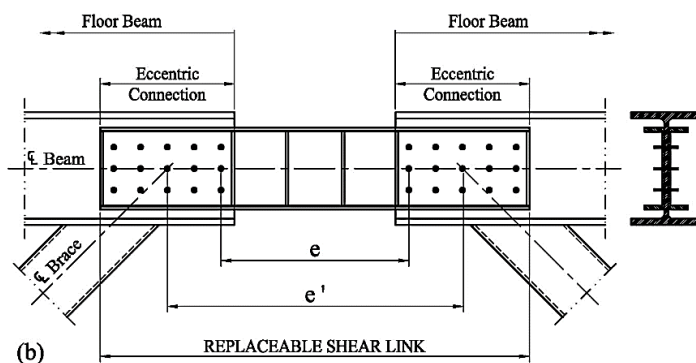
<sup>6</sup> Joint Research Centre

RLB باعث می شود جوشکاری المان های حیاتی مانند اتصالات مهاربندی در کارگاه ساخت اسکلت انجام شده و لذا کیفیت و نظارت دقیق تری بر اجرای آن وجود خواهد داشت. ضمن بهبود کیفیت ساخت از زمان نصب و مونتاژ اسکلت نیز می کاهد. به طور نمونه می توان مجموعه مهاربند، ستون ها و تیر خارج از پیوند را در کارخانه تا سه طبقه تولید و در محل به همراه RLB مونتاژ نمود (شکل ۱).



شکل ۱: قاب مفهومی رابط تعویض پذیر [۱۷].

همان گونه که در مقدمه عنوان شد بر اساس مطالعه مرجع ۱۷، تیر پیوند تعویض پذیر ساخته شده از مقاطع مرکب با جان نسبتاً نازک و بال ضخیم جهت بهینه سازی طراحی پیشنهاد شده است. این نوع تیر پیوند تعویض پذیر به صورت شماتیک در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این سیستم، تیر پیوند از دو عدد ناودانی که به صورت پشت به پشت کنار هم قرار گرفته اند تشکیل شده است. این ناودانی در محل اتصال به تیر خارج از پیوند توسط پیچ هایی به جان تیر خارج از پیوند متصل می شود. طول ناحیه اتصال به Eccentric Connection معروف است. برای تضمین وقوع تسلیم برشی تیر پیوند، لازم است از سخت کننده هایی در طول ناحیه پیوند استفاده شود. طول پیوند نیز فاصله داخل به داخل دو ستون انتهایی پیچ در نظر گرفته می شود (e). همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، در این سیستم دال کف بر ناحیه پیوند متصل نبوده و لذا اثرات نیروی محوری و اندرکنش دال-تیر پیوند حذف شده است. ضمن اینکه تعویض چنین تیری بعد از زلزله به راحتی امکان پذیر است.



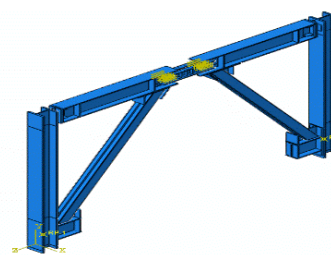
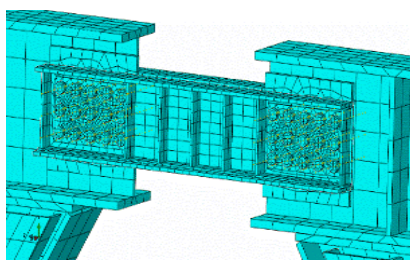
شکل ۲: تیر پیوند تعویض پذیر با اتصال جان [۱۷].

### ۳- اعتبارسنجی مدل FEM

#### ۳-۱- جزئیات مدل اعتبارسنجی

برای صحت سنجی مدل سازی عددی، نمونه EPM-12 از سری نمونه های مطالعات آزمایشگاهی Mansour و همکاران [۱۷] انتخاب شده است. مدل آزمایشگاهی ایشان بر اساس استاندارد CAN/CSA-S16-09 کانادا (CSA 2009) طراحی شده است. این اتصال در شکل ۳ نمایش داده شده است. مقطع تیر پیوند، دابل ناودانی W250×24 است. جنس مصالح مدل انتخابی CSA G40.21-W350

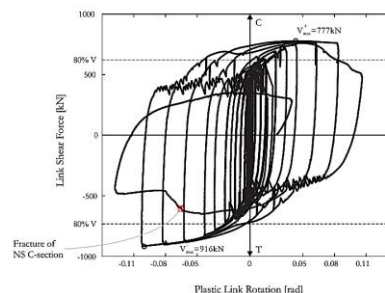
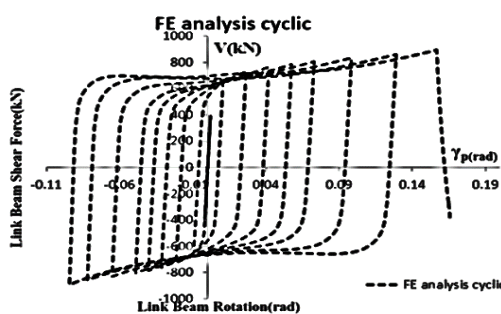




الف: مدل سرهم‌بندی شده اجزا محدود مطالعه حاضر  
 ب: جزئیات مش بندی تیر پیوند تعویض پذیر مدل عددی مطالعه حاضر  
 شکل ۵: مدل اجزا محدود توسعه یافته در مطالعه حاضر بر اساس نمونه آزمایشگاهی EPM-12 مرجع ۱۷

### ۳-۲- نتایج مدل اعتبارسنجی

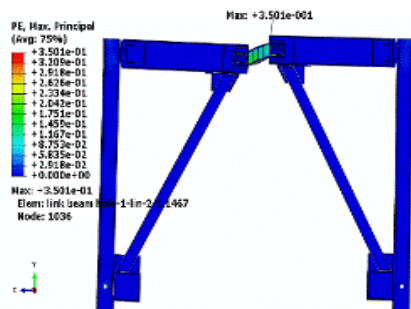
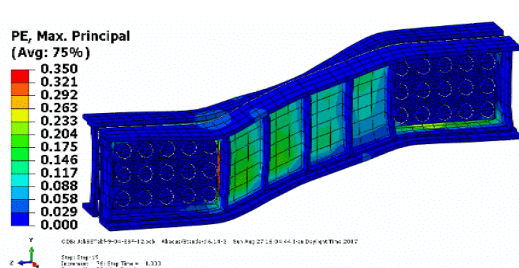
در این مقاله، صحت‌سنجی مدل عددی از طریق مطابقت نمودار چرخش پلاستیک تیر پیوند نسبت به برش پیوند با نمودار نمونه EPM-12 آزمایش شده توسط Mansour و همکاران [۱۷] انجام شده است. معیار پذیرش تسلیم نمونه آزمایشگاهی در شکل‌پذیری چرخش - غیر الاستیک تیر پیوند، رسیدن دوران تیر پیوند به عدد  $0/08$  رادیان است. نکته جالب توجه اینکه بیشینه چرخش پلاستیک نمونه آزمایشگاهی  $0/11$  رادیان به دست آمده است [۱۷]. بعلاوه مقاومت برشی نمونه آزمایشگاهی  $916$  کیلونیوتن است. پس از انجام تحلیل اجزا محدود با اعمال کلیه فرضیات مدل مرجع ۱۷، نمودار نیروی برشی - دوران تیر پیوند مدل FEM محاسبه و در شکل ۶ با نمودار مدل آزمایشگاهی مرجع ۱۷ مقایسه شده است. مقایسه کیفی و کمی این دو نمودار نشان می‌دهد که اولاً بیشینه نیروی برشی و دوران تیر پیوند به ترتیب  $892$  کیلونیوتن و  $0/156$  رادیان به دست آمده است ( $V_{max}=892$  kN و  $\gamma_p=0.156$  rad) که نسبت به مقادیر متناظر در مدل آزمایشگاهی مرجع ۱۷ اختلاف قابل قبولی دارد. ثانیاً افت چرخه هیستریزس اتصال با توجه به تحمل تغییر مکان جانبی، در محدوده قابل قبولی قرار دارد. شایان ذکر است اثر عوامل همچون لقی پیچ‌ها، وضعیت اتصالات در مدل واقعی نسبت به مدل عددی، نحوه اعمال نیروی پیش تنیدگی، عدم مدلسازی رفتار شکست در مصالح فولادی می‌تواند از مهمترین دلایل تفاوت بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی قلمداد گردد.



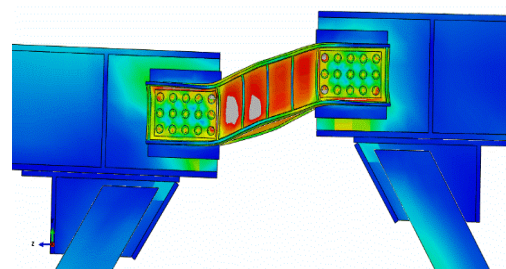
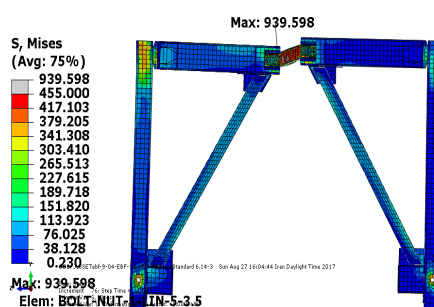
الف - نمودار چرخه‌ای آزمایشگاهی برگرفته از مرجع ۱۷  
 ب - نمودار چرخه‌ای مدل عددی توسعه یافته در مطالعه حاضر  
 شکل ۶: نمودار چرخش پلاستیک تیر پیوند نسبت به برش پیوند در مدل عددی مطالعه حاضر و نمونه آزمایشگاهی EPM-12 مرجع ۱۷.

همان‌طور که در شکل (۷-الف) مشخص است گسیختگی تیر پیوند جان در انتهای بالا و پایین تقویت‌کننده میانی جان (نزدیک‌تر به وسط دهانه رابط) در نقطه خاتمه جوش گوشه اتصال‌دهنده تقویت‌کننده به جان آغاز شد. در نهایت رشد این گسیختگی به کاهش مقاومت برشی منجر گردید. نمونه عددی صحت‌سنجی شده RLB-EPM12 همانند مدل آزمایشگاهی EPM12 مقاله مرجع [۱۷] به دلیل این نوع گسیختگی شکسته شده است. شکل (۷-ب) نشان می‌دهد که بیشینه تنش فون مایسز فراتر از مقاومت تسلیم  $350$  مگا پاسکال و مقاومت نهایی  $455$  مگا پاسکال است. تفسیر این ارقام و رنگ‌ها نشان از گسیختگی جان رابط و قسمت‌هایی جزئی از ورق تقویتی بال و ورق تقویت اتصال جان است. کمانش غیر الاستیک چشمگیر جان و گسیختگی کامل جان مشهود است. پس تیر پیوند، نقش کامل فیوز در

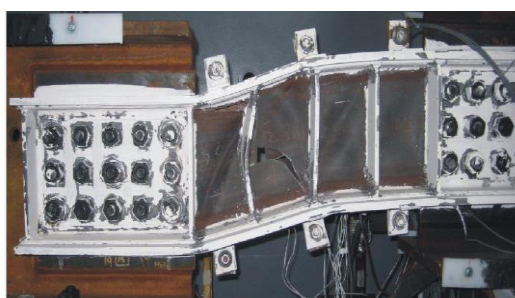
تسلیم برشی حاصل کرده است. با توجه به اینکه نقش اصلی تحمل برش در تیر پیوند برعهده جان است، شکل (۷-ج) نشان می‌دهد که تیر پیوند در حساس‌ترین منطقه دچار آسیب شد. علی‌رغم آنکه تنش در تمام قطعه تیر پیوند گسترش یافته است. اما کرنش پلاستیک یا همان تغییر شکل دائمی در جان تیر پیوند اتفاق می‌افتد. مکانیسم اتلاف انرژی در تسلیم برشی به توزیع یکنواخت کرنش پلاستیک در سطح جان تیر پیوند، نسبت داده می‌شود. قسمت‌هایی که با رنگ آبی نمایش داده می‌شود در محدوده الاستیک خطی باقی مانده است. پس از اثبات عددی نمونه آزمایشگاهی جهت توسعه و ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسه تیر پیوند برشی پیچی قابل تعویض با اتصال به جان، نقش بالقوه خواص مواد بر رفتار چرخه‌ای آن، ۱۶ مدل پیوند تعویض‌پذیر شامل تغییر در شماره تیر پیوند، تعداد سخت‌کننده‌های جان، ضخامت سخت‌کننده‌های جان، ضخامت ورق تقویت بال تیر پیوند، ضخامت ورق تقویتی اتصال جان، فاصله و قطر پیچ‌ها، تغییر پارامترهای مکانیکال (جنس مصالح)، بررسی شدند.



ب- توزیع کرنش پلاستیک در مدل اعتبارسنجی مقاله.



الف- توزیع تنش فون مایسز در مدل اعتبارسنجی مقاله.



ج- کمانش و پارگی جان در نمونه EPM12 مرجع ۱۷.

شکل ۷: مقایسه نتایج مدل FEM اعتبارسنجی و مدل EPM12 مرجع ۱۷.

#### ۴- معرفی مدل‌ها

برای بررسی رفتار تیرهای پیوند، ۱۶ مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. برای رسیدن به یک طرح بهتر، جهت بهبود رفتار اتصال، پارامترهای هندسه و مکانیکال تشکیل‌دهنده تیر پیوند، تغییر داده شد. بدین منظور مدل مبنای مورد مطالعه (مدل EPM12 مرجع ۱۷) در چندین حالت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ۱۶ مدل پیوند تعویض‌پذیر شامل تغییر در شماره مقطع تیر پیوند (تیپ A 39×W310)، تعداد سخت‌کننده‌های جان (تیپ B- چهار مدل)، ضخامت سخت‌کننده‌های جان (تیپ C- سه مدل)، ضخامت ورق تقویت بال تیر پیوند (تیپ D- سه مدل)، ضخامت ورق تقویتی اتصال جان (تیپ E- یک مدل)، فاصله و قطر پیچ (تیپ F-

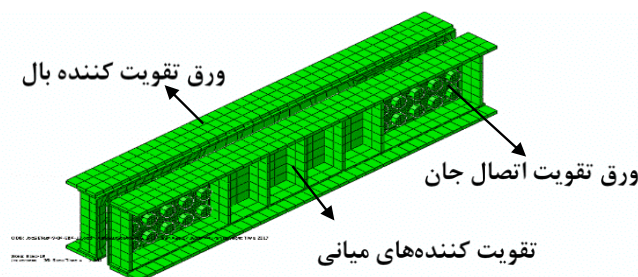


یک مدل)، تغییر جنس مصالح (تیپ G-سه مدل)، بررسی شدند. مشخصات هر نمونه شامل ویژگی‌های اصلی اتصال تیر پیوند به تیر، طول تیر پیوند، فواصل، ضخامت تقویت کننده تیر پیوند و جنس مصالح در جدول ۱ خلاصه شده است. به نظر می‌رسد بررسی متغیرهای که قبلاً ارائه شد بتواند درکی عمیق تر از تاثیر هر یک بر رفتار تیر پیوند بدنبال داشته باشد و برای مهندسی طراح این امکان را فراهم کند که در هنگام طراحی با متغیرهایی کارکنند که بیشترین تاثیر را بر بهبود رفتار تیر پیوند خواهد داشت.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های مورد مطالعه.

گروه	نام‌گذاری اختصاری نمونه	مقطع تیر پیوند	طول تیر پیوند (mm)	نوع پیچ	ضخامت ورق		تقویت	
					تقویت کننده بال (mm)	تقویت کننده میانی تعداد و فاصله	ضخامت ورق تقویت کننده جان (mm)	ضخامت ورق تقویت کننده جان (mm)
Base Model	RLB-EPM12	Cut W250 × 24	680	12.5	12	5@150mm	10	6.35
A	RLB-EBF2	Cut W310 × 39	680	12.5	12	4@200 mm	10	6.35
B1	RLB-WSN 2	Cut W250 × 24	680	12.5	12	2@580 mm	10	6.35
B2	RLB-WSN 3	Cut W250 × 24	680	12.5	12	3@258 mm	10	6.35
B3	RLB-WSN 4	Cut W250 × 24	680	12.5	12	4@200 mm	10	6.35
B4	RLB-WSN 7	Cut W250 × 24	680	12.5	12	7@99 mm	10	6.35
C1	RLB-WST 5mm	Cut W250 × 24	680	12.5	12	5@150 mm	5	6.35
C2	RLB-WST 9mm	Cut W250 × 24	680	12.5	12	5@150 mm	9	6.35
C3	RLB-WST 12mm	Cut W250 × 24	680	12.5	12	5@150 mm	12	6.35
D1	RLB-FRPT5mm	Cut W250 × 24	680	12.5	5	5@150 mm	10	6.35
D2	RLB-FRPT10mm	Cut W250 × 24	680	12.5	10	5@150 mm	10	6.35
D3	RLB-FRPT20mm	Cut W250 × 24	680	12.5	20	5@150 mm	10	6.35
E	RLB-WRPT 9mm	Cut W250 × 24	680	12.5	12	5@150 mm	10	9
F	RLB-SN 19mm	Cut W250 × 24	680	19	12	5@150 mm	10	6.35
G1	RLB-MP1	Grade Q235	680	Grade 4.60	12	5@150 mm	10	6.35
G2	RLB-MP2	Grade Q235	680	A490	12	5@150 mm	10	6.35
G3	RLB-MP3	A992 Grade 50	680	Grade 4.60	12	5@150 mm	10	6.35

مدل شماره یک (Base Model)، به‌عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شده که از مقاله Mansour و همکاران [۱۷]، جهت بهینه‌سازی سطح برش، مقاطع دابل ناودانی با جان نسبتاً نازک، متناظر با بال نازک انتخاب شده‌اند. در مدل شماره دو، شماره پروفیل ناودانی، بزرگ‌تر انتخاب شده است. جزئیات این نمونه مطابق یکی دیگر از سری نمونه‌های مطالعات آزمایشگاهی مقاله مرجع [۱۷] است. با توجه به نتایج به دست آمده در تحلیل نمونه‌های B2 و B1 (تأثیر تعداد سخت‌کننده جان)، C2 و C1 (تأثیر ضخامت سخت‌کننده جان) و D2، D1 (تأثیر ضخامت ورق تقویت بال)، اصلاحاتی به ترتیب در نمونه‌های C3، B3، B4 و D3 انجام گرفت. در نمونه‌های E و F به ترتیب تأثیر استفاده از ورق تقویت جان ضخیم‌تر و شماره پیچ بزرگ‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. خصوصیات هندسی پیچ‌ها و ضوابط پیش-تنیدگی آن‌ها بر اساس مقاله [۱۷]، است. در همه مدل‌ها شرایط مرزی و تکیه‌گاهی به همان صورت است که در شکل ۳ نشان داده شده است. ابعاد دابل ناودانی مقاله مرجع [۱۷]، طبق جدول ۲ است. جهت بررسی تأثیر جنس مصالح اتصال بر جلوگیری از شکست زود هنگام، مقادیر تیپ G در جدول ۳ معرفی شده است. در مدل G1 تنش تسلیم و نهایی مصالح تیر پیوند به همراه پیچ‌ها کمتر از مدل اصلی در نظر گرفته شده است. در مدل G2 تنش تسلیم و نهایی مصالح تیر کمتر از نمونه مرجع و مشخصات مصالح پیچ دقیقاً مشابه پیچ‌های مدل اصلی است. در مدل G3 تنش تسلیم و نهایی مصالح تیر دقیقاً شبیه مصالح تیر پیوند مدل مرجع و مشخصات مصالح پیچ کوچک‌تر از مقاومت مصالح پیچ‌های مدل اصلی است. شکل ۸ نمایی نزدیک تر از مدل اجزا محدود تیر پیوند قابل تعویض را در محیط آباکوس نمایش می‌دهد. در این شکل علاوه بر نمایش آرایش و نحوه قرار گیری دابل ناودانی و پیچ‌ها، موقعیت قرار گیری ورق‌های تقویتی بال و جان و سخت کننده های میانی هم نمایش داده شده اند.



شکل ۸: نمای شماتیک RLB مورد استفاده در توسعه مدل های FEM این مقاله.

جدول ۲: ابعاد پروفیل ناودانی مرجع [۱۷]

مقطع پروفیل ناودانی	ارتفاع جان	عرض بال	ضخامت جان	ضخامت بال	تنش تسلیم	مقاومت برشی اسمی
مدل مرجع	mm	mm	mm	mm	Mpa	kN
Cut W250 x 24	253	75	5	6.5	350	487.30
Cut W310 x 39	310	85.4	5.8	7.3	350	692.23

جدول ۳: جنس مصالح نمونه های تیپ G

نمونه		RLB-MP1	RLB-MP2	RLB-MP3
تنش مصالح	$\sigma_y$	235	235	350
(مگا پاسکال)	$\sigma_u$	420	420	455
تنش پیچ	$\sigma_y$	360	900	360
(Mpa)	$\sigma_u$	530	1000	530

## ۵- بحث و بررسی

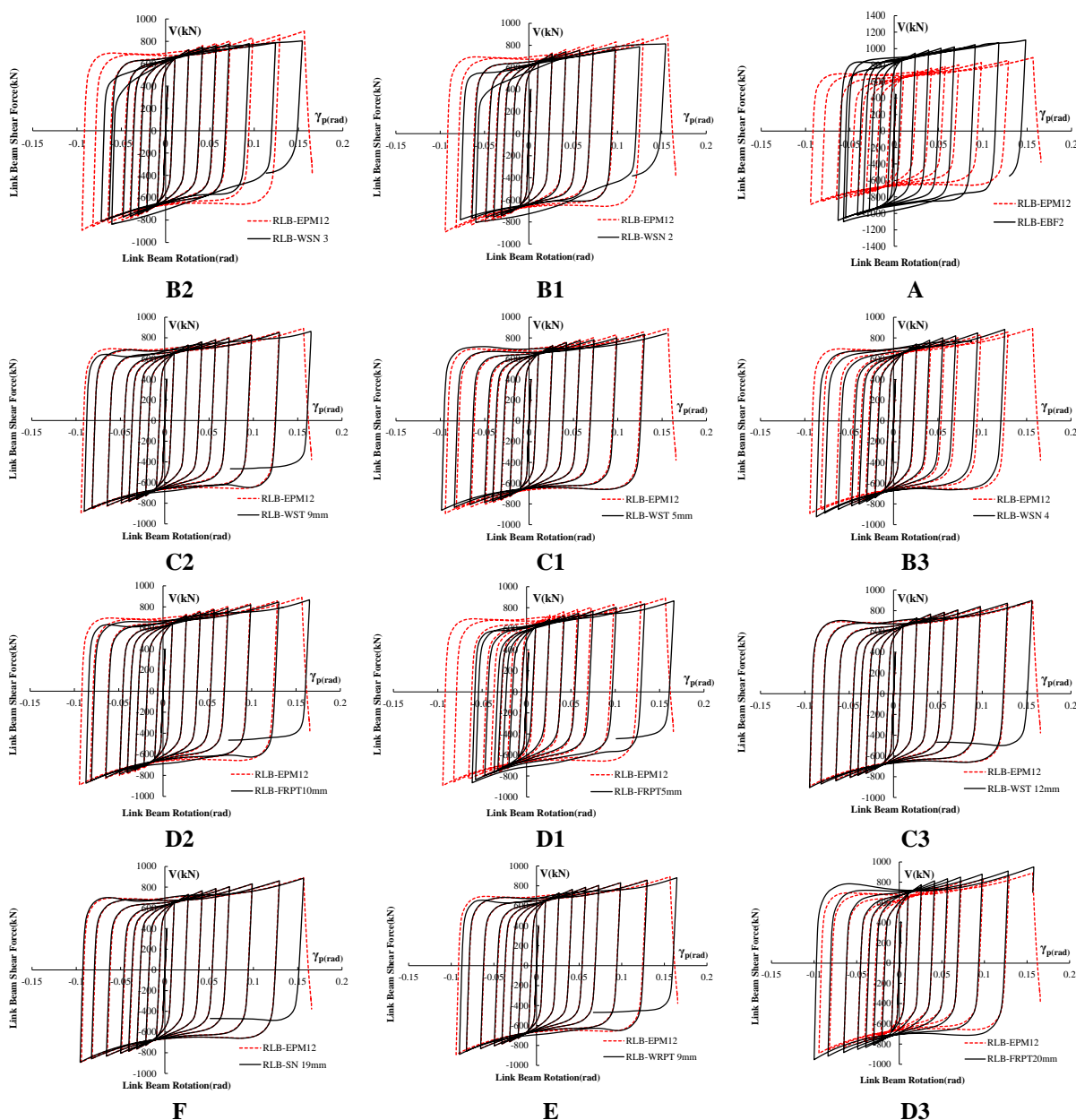
در این مقاله، نتایج تحلیل همه مدل هایی که در بخش قبلی توضیح داده شد، تحت بارگذاری چرخه ای مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. جهت بهبود و افزایش عملکرد چرخه ای مدل صحت سنجی شده RLB-EPM12 در حوزه مقاومت، سختی، شکل پذیری و استهلاک انرژی، نمودار هیستریزس نیروی برشی - چرخش پلاستیک تیر پیوند و تغییر شکل و توزیع تنش و کرنش پلاستیک و نمودارهای میله ای اتلاف انرژی برای همه مدل ها مورد مطالعه قرار گرفت.

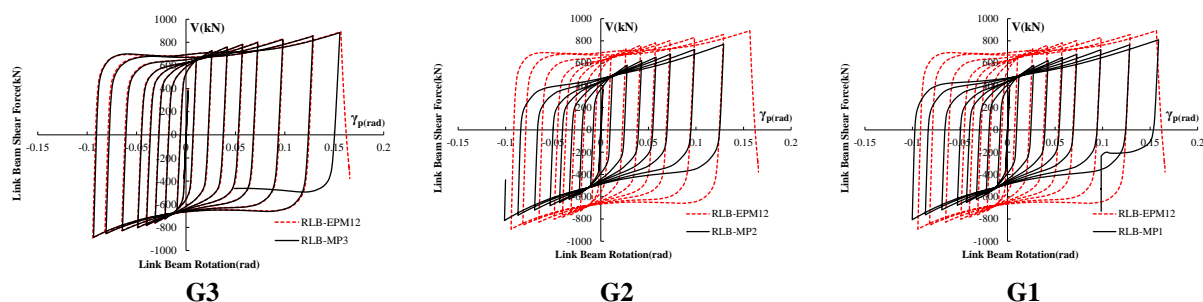
### ۵-۱- نمودار نیروی برشی - دوران در تیر پیوند

تغییرات نیروی برشی - دوران تیر پیوند برای کلیه مدل ها در شکل ۹ نمایش داده شده است. شایان ذکر است در نمودارهای شکل ۹، همواره نمودار خط چین به نتیجه مدل مبنا (EPM12) معروف به Base Model اختصاص دارد. مشهودترین نتیجه کیفی قابل استنباط، عدم انطباق و اختلاف مقادیر عددی ظرفیت دوران و بیشینه نیروی برشی تیر پیوند با توجه به نمودار چرخه ای شکل A و G1 و G2 است. مقایسه نمودار چرخه ای این مدل ها با نمونه صحت سنجی RLB-EPM12 نشان می دهد که نمونه A (افزایش شماره تیر پیوند) شکل پذیری را کاهش و مقاومت برشی تیر پیوند به شکل چشمگیری افزایش یافته است. این موضوع برای نمونه آزمایشگاهی EBF2 مرجع [۱۷] نیز ثابت شده است. همچنین تأثیر کاهش عیار فولاد تیر پیوند و پیچ های اتصال در مدل G1 و کاهش عیار فولاد تیر پیوند در مدل G2، باعث کاهش قابل توجه مقاومت برشی و افزایش جزئی شکل پذیری گردید.

مقایسه و مطالعه نتایج توزیع تنش و کرنش نشان می دهد که عیار فولاد تیر پیوند تأثیر مهمی بر پیشگیری از شکست زودهنگام اتصال، دارد. مطالعه و بررسی چرخه های سمت چپ مدل های B1 و B2 و D1 نشان می دهد بیشینه دوران پلاستیک تیر پیوند (در ناحیه سمت چپ نمودار هیستریزس)، کمتر از ۰/۰۸ رادیان به دست آمده، در نتیجه این مدل ها (افزایش فاصله سخت کننده ها و یا کاهش ضخامت ورق تقویت کننده بال)، برای توسعه رفتار برشی کامل (تسلیم برشی) توصیه نمی شوند. مدل F (تغییر در قطر پیچ) کاملاً با مدل مرجع (EPM12) منطبق است به این معنی که افزایش قطر پیچ تأثیری بر ظرفیت برشی تیر پیوند نخواهد داشت. به منظور ارزیابی کمی

تأثیر هر یک از عوامل، خلاصه نتایج تحلیل عددی نمودار چرخه‌ای مدل‌ها در جدول (۴) آمده است. در این جدول درصد تغییرات دوران تیر پیوند و ظرفیت برشی نهایی تیر نسبت به مدل مبنا (EPM12) محاسبه و ارائه شده است. مقادیر مثبت به معنی افزایش و تأثیر مثبت متغیر مورد نظر و مقادیر منفی به معنی تأثیر معکوس پارامتر مورد نظر بر خروجی‌های کلیدی تیر پیوند است. بطور نمونه افزایش مقطع تیر پیوند حدود ۲۴٪ ظرفیت برشی نهایی تیر پیوند را افزایش داده و از طرفی ۵٪ دوران نهایی تیر را کاهش می‌دهد. همچنین کاهش همزمان عیار فولاد تیر پیوند و پیچها و یا تیر پیوند به تنهایی بطور متوسط ۱۶٪ از ظرفیت مقاومت برشی تیر پیوند کاسته اما تأثیر محسوسی بر ظرفیت چرخش دوران تیر پیوند ندارد.





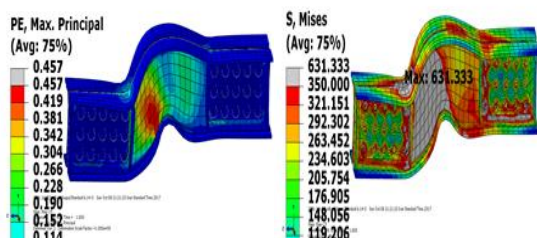
شکل ۹: چرخش پلاستیک تیر پیوند نسبت به برش همه مدل‌های تیپ: A؛ B؛ C؛ D؛ E؛ F؛ G.

جدول ۴: نتایج عددی مدل‌های مورد مطالعه.

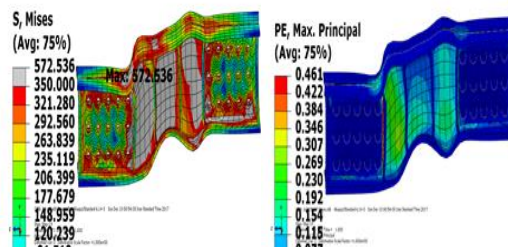
تیپ	نمونه	دوران تیر پیوند (rad) $\gamma_p$	تغییر مکان قاب (درصد) $\theta_p$	درصد اختلاف دوران تیر پیوند	برش تیر پیوند (kN)		درصد اختلاف برش تیر پیوند
					Vmax	Vmax/Vn	
Basic Model	RLB-EPM12	0.156	1.41		892.4	1.83	
A	RLB-EBF2	0.148	1.34	-5	1103.8	1.59	+24
B1	RLB-WSN 2	0.154	1.39	-1.5	813.5	1.67	-9
B2	RLB-WSN 3	0.154	1.39	-1.5	836	1.71	-6
B3	RLB-WSN 4	0.155	1.4	-1	924.5	1.89	+3
B4	RLB-WSN 7	.158	1.43	-1.5	925	1.89	+4
C1	RLB-WST 5mm	0.156	1.41	0	843.3	1.73	-4.5
C2	RLB-WST 9mm	0.165	1.49	+6	877.6	1.8	-2
C3	RLB-WST 12mm	0.156	1.41	0	905.5	1.86	+1.5
D1	RLB-FRPT5mm	0.166	1.5	+7	865.5	1.77	-3
D2	RLB-FRPT10mm	0.165	1.5	+6	874.7	1.79	-2
D3	RLB-FRPT20mm	0.158	.43	+1.5	954.8	1.96	+7
E	RLB-WRPT 9mm	0.164	1.48	+5	890.1	1.28	0
F	RLB-SN19mm	0.156	1.41	0	892.6	1.83	0
G1	RLB-MP1	0.157	1.42	+1	752.2	1.45	-15.70
G2	RLB-MP2	0.157	1.42	+1	752	1.45	-15.70
G3	RLB-MP3	0.155	1.4	-1	886.2	1.81	-1

## ۵-۲- نمایش گرافیکی تغییر شکل و توزیع تنش و کرنش پلاستیک

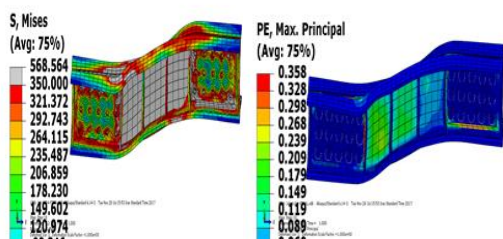
معیار مهم در تحلیل اتصالات مود گسیختگی آن است. این مهم با نمایش کانتور کرنش‌های پلاستیک می‌توان دریافت. از طرفی رنگ و ارقام کانتورهای تنش بیانگر ظرفیت نهایی تیر پیوند در تشکیل مفاصل پلاستیک است. لازم به ذکر است تنش فون مایسز فراتر از مقاومت تسلیم ۳۵۰ مگا پاسکال و مقاومت نهایی ۴۵۵ مگا پاسکال، به ترتیب نماینده تسلیم و یا گسیختگی فولاد است. بدین ترتیب توزیع تنش فون مایسز به همراه توزیع کرنش پلاستیک کلیه مدل‌ها در نقطه نهایی تحلیل در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در هر یک از مدل‌ها دو شکل نمایش داده شده است. شکل سمت راست توزیع تنش فون مایسز و شکل سمت چپ توزیع کرنش پلاستیک مدل است. رفتار غیر ارتجاعی تیر پیوند به رنگ سبز (کرنش نهایی ۰/۱۵) و قسمت‌های که با رنگ آبی نمایش داده می‌شود در محدوده الاستیک خطی باقی‌مانده است. با توجه به تعریف سخت‌شوندگی سینماتیک در شبیه‌سازی اجزای محدود به کمک آباکوس، سطح تسلیم در فضای تنش جابجا می‌شود و تغییر اندازه نمی‌دهد در واقع تحت سخت‌شوندگی سینماتیک با جابه‌جایی سطح تسلیم در فضای تنش - کرنش روبرو هستیم. با توجه به این شکل‌ها میزان تنش افزایش می‌یابد تا جسم به تنش تسلیم خود  $\sigma_y$  برسد. با ادامه بارگذاری، تیر پیوند دچار تغییر شکل پلاستیک شده و سطح تسلیم جابجا می‌شود. عدم توزیع یکنواخت کرنش در جان تیر پیوند و انباشت کرنش پلاستیک در طول بارگذاری در یک محل، یکی از دلایل وقوع خستگی است در طول این ناحیه تیر پیوند نمی‌تواند مقاومت زیادی در برابر تنش اعمال شده نشان دهد و کرنش در نمونه مورد نظر به شدت افزایش می‌یابد و تغییر شکل با شکست رابط به پایان می‌رسد.



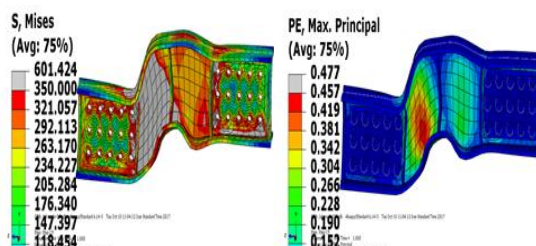
B1



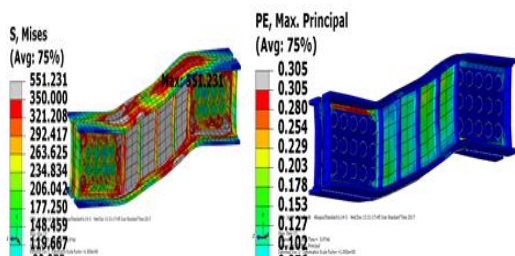
A



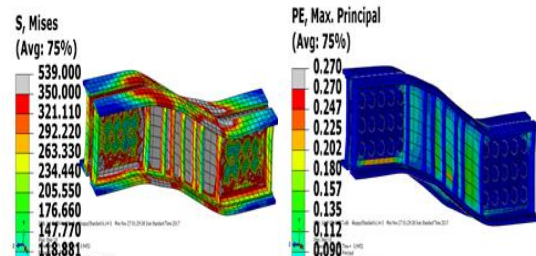
B3



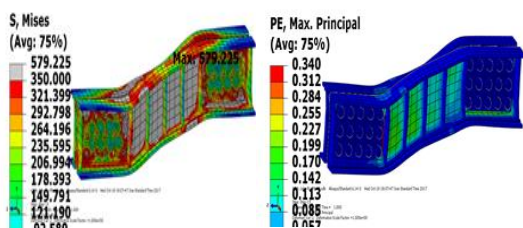
B2



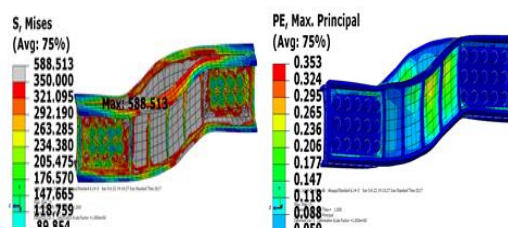
C1



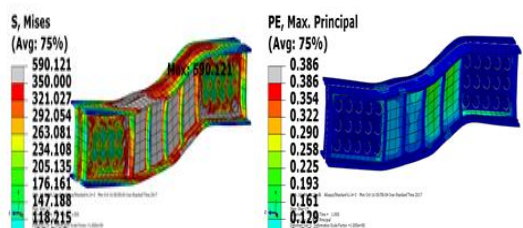
B4



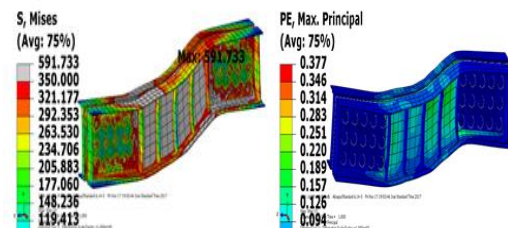
C3



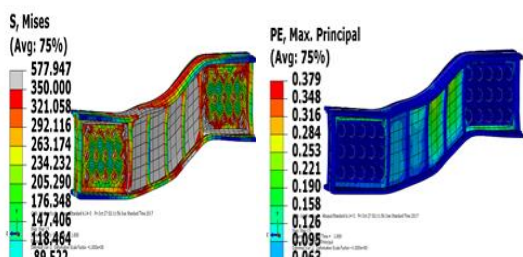
C2



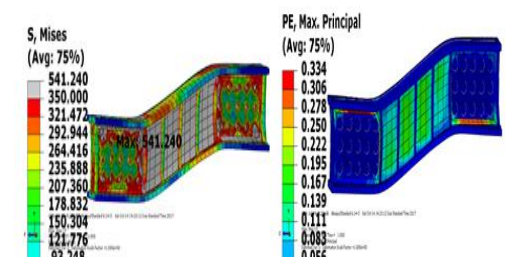
D2



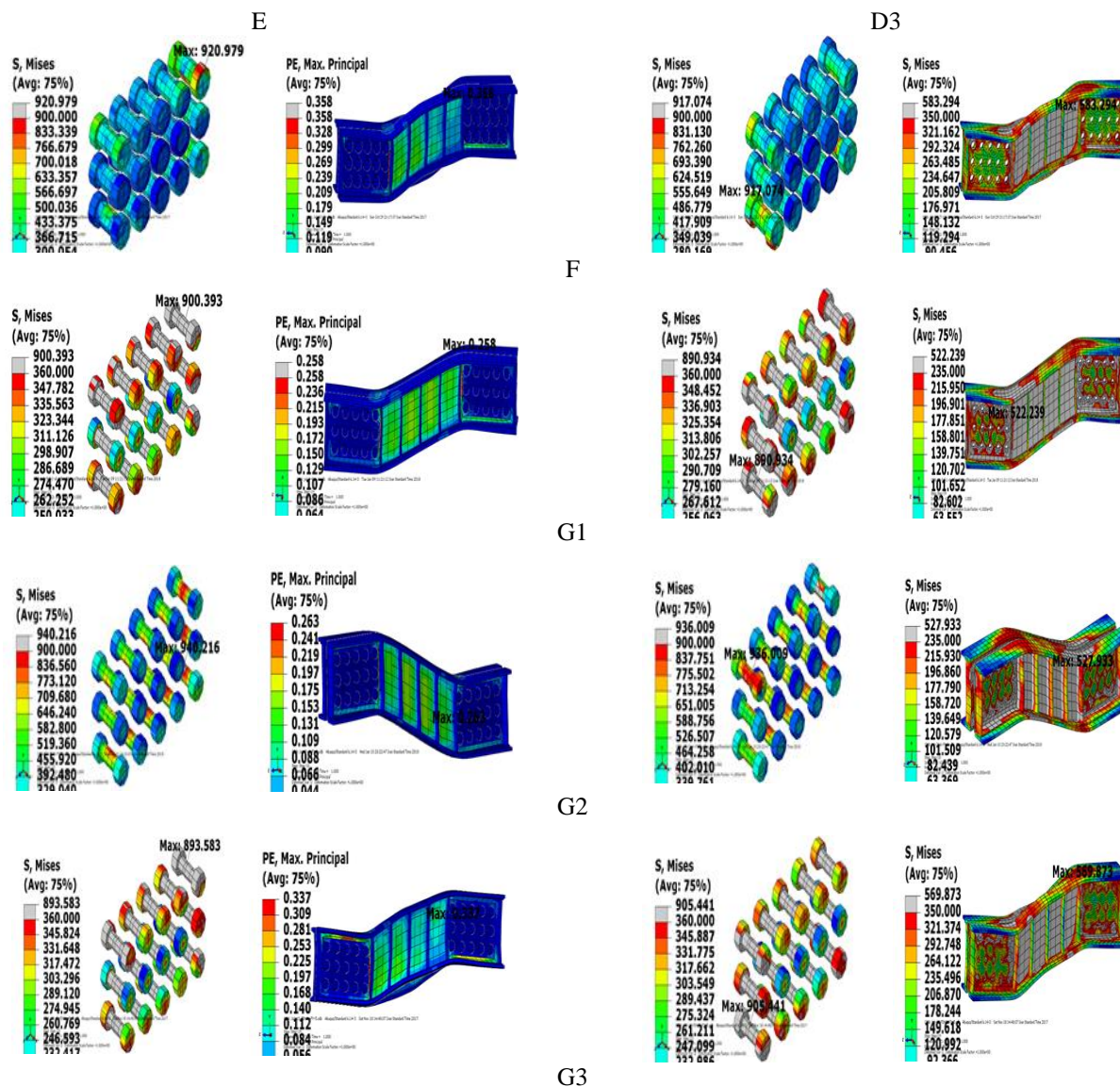
D1



D2



D1



شکل ۱۰: نمایش گرافیکی تغییر شکل و توزیع تنش ون مایسز بر معیار تسلیم (سمت راست) و کرنش پلاستیک (سمت چپ) همه

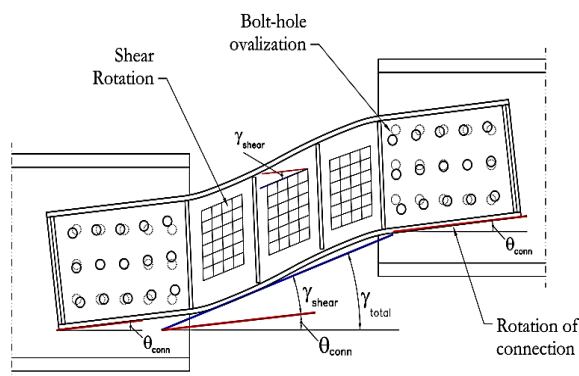
مدل‌های تیپ: A :B :C :D :E :F :G

بررسی و مطالعه شکل ۱۰ نشان می‌دهد برای همه مدل‌ها به جز B1 و B2 (کاهش تعداد سخت کننده های جان) گسیختگی کامل جان تیر پیوند روی داده است. نتایج بررسی مدل‌های مورد مطالعه به انتخاب طرحی با کمترین بیشینه کرنش پلاستیک و توزیع یکنواخت کرنش در سطح بزرگتری از جان تیر پیوند نسبت به مدل RLB-EPM12 است. مدل‌های B3, B4, C1, C3 و D3 به دلیل کمترین بیشینه کرنش پلاستیک و توزیع یکنواخت آن در کل سطح جان، نسبت به مدل صحت‌سنجی RLB-EPM12، بهترین عملکرد چرخه‌ای را به دنبال داشته‌اند. مدل G1 و G2 به دلیل کاهش عیار فولاد، نسبت به اعضای پیرامونی قاب، توزیع یکنواخت کرنش در سطح بزرگتری از جان تیر پیوند را نسبت به مدل مورد مقایسه را نشان می‌دهد. همچنین گسیختگی کامل پیچ‌های اتصال نمونه G1 و G3 به دلیل کاهش عیار فولاد پیچ، مشاهده گردید. به دلیل تفاوت جزئی توزیع تنش فون مایسز در پیچ‌های اتصال نمونه‌های بررسی شده با مدل صحت‌سنجی نمایش داده شده در بخش ۳، شکل گرافیکی آن‌ها نمایش داده نشد. نتایج بیانگر آن است که نمونه‌های با پارامتر متغیر بزرگتر نسبت به مدل صحت‌سنجی، با افزایش ظرفیت نهایی عناصر تشکیل‌دهنده تیر پیوند همراه هستند. با توجه به اینکه نقش اصلی تحمل برش در تیر پیوند برعهده جان است، طرح این مدل‌ها، الگوی گسیختگی را تغییر نداده و تیر پیوند در حساس‌ترین منطقه دچار آسیب گردید.

## ۶- تأثیر ضخامت ورق تقویت اتصال جان در میزان سهم اتصال جان در چرخش کل تیر پیوند

مجموع زاویه دوران تیر پیوند نسبت تغییر مکان یک انتها تیر نسبت به انتهای دیگر تقسیم بر طول تیر پیوند تعریف می شود. در سیستم مهاربند EBF سنتی این زاویه دوران بر اثر تغییر شکل برشی در محدوده تیر پیوند ( $\gamma_{shear}$ ) به همراه اندکی تغییر شکل خمشی  $\theta_{flexure}$  روی می دهد. در تیر پیوند تعویض پذیر با اتصال پیچی مطابق شکل ۱۱، علاوه بر موارد فوق الذکر، میزان دوران در اتصال جان  $\theta_{conn}$  نیز در مجموع دوران کل تیر پیوند سهم می گذارد (شکل ۱۱ را ببینید). به عبارتی دوران کل تیر پیوند برابر است با [۱۷]:

$$\gamma = \gamma_{shear} + \theta_{flexure} + \theta_{conn} \quad (2)$$



شکل ۱۱: نمایش اجزا تشکیل دهنده دوران کل تیر پیوند تعویض پذیر با اتصال پیچی.

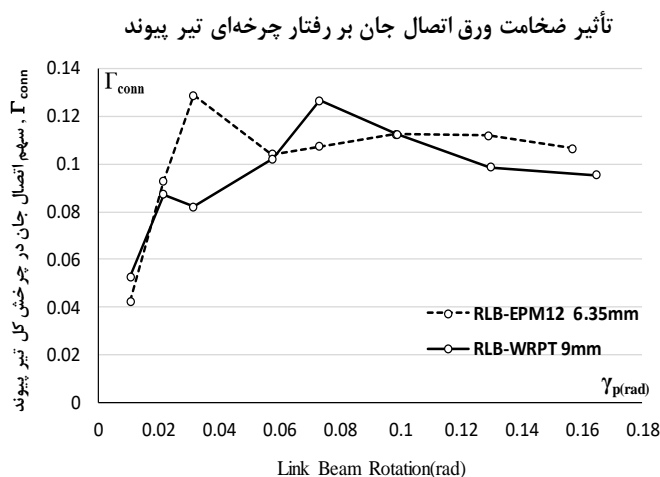
مقدار دوران ناشی از تغییر شکل خمشی برابر است با [۱۷]:

$$\theta_{flexure} = \frac{V_{link} \times e^2}{12EI} \quad (3)$$

لازم به ذکر است برای سیکل های بارگذاری بیشتر از ۰/۰۴ رادیان مقدار  $\theta_{flexure}$  آن قدر ناچیز است که می توان از آن صرفه نظر نمود. بنابراین در دوران تیر پیوند صرفاً دو عامل دوران ناشی از تغییر شکل برشی و دوران در اتصال جان سهم دارند. میزان مشارکت دوران جان از کل دوران در هر سیکل می تواند بر میزان تأثیرپذیری ورق تقویتی اتصال جان بر دو فاکتور سختی و شکل پذیری تأثیرگذار باشد؛ بنابراین سهم اتصال جان در چرخش کل تیر پیوند  $\Gamma_{conn}$  به صورت زیر محاسبه گردید [۱۷]:

$$\Gamma_{conn} = 1 - \frac{\gamma_{shear, cycle}}{\gamma_{cycle}} \quad (4)$$

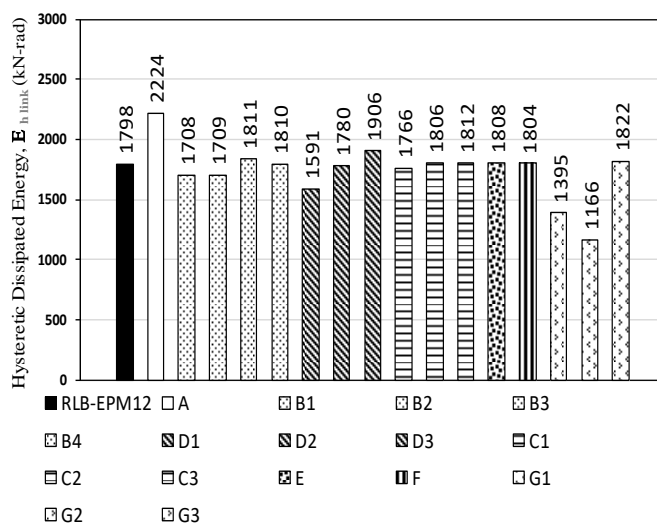
در رابطه فوق،  $\gamma_{cycle}$  چرخش کل RLB در یک چرخه و  $\gamma_{shear, cycle}$  چرخش پانل در اثر برش در یک چرخه است. بجهت بررسی تغییرات  $\Gamma_{conn}$  در برابر دوران تیر پیوند نتایج برای مقادیر مختلف دوران تیر پیوند در شکل ۱۲ برای مدل RLB-WRPT9mm به همراه مدل EPM12 نمایش داده شده است. لازم به یادآوری است که مدل RLB-WRPT9mm همان مدل E است که ضخامت ورق تقویت جان آن ۹ میلی متر در مقایسه با ورق تقویت جان ۶/۳۵ میلی متر در نمونه EPM12 است. مطالعه شکل ۱۲ نشان می دهد که در اکثر مقادیر زاویه دوران تیر پیوند، افزایش ضخامت ورق تقویتی جان از سهم جان از چرخش کل تیر پیوند کاسته است. در نقطه توقف نهایی (پایان بارگذاری)  $\Gamma_{conn}$  نمونه E نسبت به EPM12 ۱۱ درصد کاهش را نشان می دهد؛ بنابراین می توان این گونه نتیجه گرفت که در طراحی RLB، طراح دو رویکرد را می تواند انتخاب نماید که به ترتیب عبارتند از (۱) انتخاب اتصال انعطاف پذیرتر با ورق تقویت جان نازک تر و در نتیجه دستیابی به چرخش بزرگ تر تیر پیوند (۲) انتخاب اتصال با سختی بیشتر و حداکثر چرخش کمتر تیر پیوند.



شکل ۱۲: مقایسه نمودار  $\Gamma_{conn}$  -  $\gamma_p$  نمونه: RLB-EPM12; RLB-WRPT9mm

## ۷- اتلاف انرژی در تیر پیوند برشی

در طراحی سیستم‌های باربر لرزه‌ای مقاوم در برابر زلزله یکی از پارامترهای کلیدی میرایی است. برای محاسبه میرایی معمولاً از انرژی تلف‌شده چرخه‌ای استفاده می‌شود. بدین منظور در این قسمت از مقاله میزان انرژی تلف‌شده  $E_{h,Link}$  در تیر پیوند با تسلیم برشی برای کلیه مدل‌های مقاله در یک چرخه محاسبه شده و در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. برای محاسبه  $E_{h,Link}$  کافی است سطح زیر نمودار نیروی برشی تیر پیوند در برابر دوران تیر پیوند محاسبه شود. مطالعه شکل ۱۳ نشان می‌دهد بیش‌ترین جذب انرژی توسط نمونه A و کم‌ترین انرژی تلف‌شده برای مدل G2 به دست آمده است؛ بنابراین تأثیر مثبت افزایش شماره پروفیل به کاررفته در تیر پیوند، سهم سایر اعضای سازه‌ای سیستم قاب از اتلاف انرژی را به حداقل می‌رساند و بدین ترتیب بخش عمده‌ای از انرژی توسط پیوند برشی تلف خواهد شد. در مقابل تغییر در سایر پارامترهای هندسه RLB با اتصال پیچی جان تأثیر قابل توجهی بر افزایش یا کاهش انرژی تلف‌شده ندارد. مدل G2 از این قاعده مستثنا است. دلیل آن استفاده از فولاد با مقاومت بالا در پیچ‌های اتصال جان است. این موضوع باعث می‌شود امکان دوران پلاستیک تیر پیوند و مشارکت جان در کل این دوران کاهش یافته و به تبع آن، سهم انرژی تلف‌شده در RLB کاهش یابد.



شکل ۱۳: مقایسه عددی ماکزیمم جذب انرژی توسط چرخه‌های هیستریزیس تیر پیوند.



## ۸- نتیجه گیری

در این مطالعه استفاده از تیر پیوند تعویض پذیر پیچی با رفتار تسلیم شونده برشی (RLB) مورد بررسی قرار گرفت. مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس انجام گرفت. صحت سنجی مدل سازی با مدل EPM12 برگرفته از مطالعه آزمایشگاهی مرجع [۱۷] انجام گرفت. با توجه به صحت سنجی صورت گرفته، مشخص شد که مدل سازی اتصال پیچی برشی تعویض پذیر، با استفاده از روش عددی، قادر است به خوبی رفتار چرخه ای این اتصال را نشان دهد. جهت ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسه تیر پیوند برشی پیچی قابل تعویض با اتصال به جان بر رفتار چرخه ای آن ۱۶ مدل پیوند تعویض پذیر: شامل حالات مختلف تغییر در ضخامت ورق تقویت بال تیر پیوند، شماره پروفیل تیر پیوند، تعداد سخت کننده های جان، ضخامت سخت کننده های جان، فاصله و قطر پیچ و ضخامت ورق تقویتی اتصال جان، تغییر پارامترهای مکانیکال (جنس مصالح)، بررسی شدند. لازم به ذکر است که در واقع پارامترهای هندسی مدل EPM12 به عنوان متغیرهای این تحقیق انتخاب شده اند. تجزیه و تحلیل عددی مدل ها در قالب نمودار و جدول و همچنین نتایج گرافیکی ارائه شد. در محدوده مدل های تولید شده در این مقاله و البته فرض های انتخاب شده اهم نتایج بشرح زیر دسته بندی می شوند:

- ۱) افزایش شماره پروفیل گرچه مقاومت برشی و اتلاف انرژی تیر پیوند را افزایش می دهد اما قابلیت شکل پذیری آن (دوران فرا ارتجاعی قابل توجه تیر پیوند) را کم می کند.
  - ۲) نقش تعداد سخت کننده های جان تیر پیوند و ضخامت ورق تقویتی بال تیر پیوند بر ایجاد رفتار تسلیم برشی بسیار قابل توجه است. ورق تقویت بالا و پایین بال باید تعبیه شود تا رفتار غالب تسلیم برشی تضمین گردد. طرح مدل های با ۲ و ۳ سخت کننده جان و نمونه با ۵ میلی متر ضخامت ورق تقویت بال تیر پیوند، نه تنها رفتار چرخه ای اتصال را بهبود نداد بلکه عدم دستیابی به رفتار برشی مورد قبول را به دنبال داشت.
  - ۳) تأثیر سایر عوامل مورد مطالعه بر افزایش رفتار فر ارتجاعی تیر پیوند در قیاس با مدل EPM12 کمتر بوده، لذا طراحی این مدل ها جهت بهبود رفتار لرزه ای توصیه نمی شود.
  - ۴) نتایج نمونه های با بیشینه پارامتر متغیر نسبت به مدل EPM12، رفتار شکل پذیر و تسلیم پایدار و تکرارپذیری را به دلیل افزایش مقاومت برشی، ظرفیت دوران و توزیع یکنواخت کرنش پلاستیک در سطح بزرگ تری از جان تیر پیوند و افزایش جذب انرژی، نشان دادند.
  - ۵) افزایش ضخامت ورق تقویت اتصال جان تأثیری بر مقاومت برشی تیر پیوند نداشت. ورق تقویت جان که در سراسر اتصال جوش شده است بایستی جهت کنترل تنش لهیدگی پیچ استفاده شود. ظرفیت چرخش غیر الاستیک مازاد زمانی حاصل می شود که امکان وقوع تغییر شکل لهیدگی پیچ داشته باشد. این خاصیت با ورق تقویت اتصال جان نازک تر فراهم می شود.
  - ۶) کاهش عیار فولاد تیر پیوند منجر به کاهش چشمگیر مقاومت برشی تیر پیوند و افزایش جزئی شکل پذیری (بیشینه دوران غیرخطی تیر پیوند) شد. عیار فولاد تیر پیوند تأثیر حائز اهمیتی بر جلوگیری از شکست زود هنگام تیر پیوند، دارد و نقش عیار پیچ های اتصال در گسیختگی پیچ ها، قابل ملاحظه بود. علاوه بر این تأثیر جزئی بر مقاومت برشی و شکل پذیری تیر پیوند داشت.
- در نتیجه گیری کلی باید اذعان داشت که تنها نمونه های با بیشینه پارامتر (تعداد و ضخامت) تقویت کننده جان و بال (ضخامت) دابل ناودانی، بهبود و افزایش عملکرد لرزه ای تیر پیوند تعویض پذیر برشی در حوزه مقاومت، سختی، شکل پذیری و استهلاک انرژی را نشان دادند. بررسی نتایج سایر مدل ها، منجر به کاهش و یا عدم تأثیر در بازدهی تیر پیوند برشی گردید. در انتهای یادآور می شود برای استحصال درکی عمیق تر از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار خطی-غیرخطی تیر پیوند تعویض پذیر لازم است مطالعات عددی دیگر در دستور کار قرار گیرد. بطور نمونه پیشنهاد می شود اثر طول ناحیه پیوند (e) بعنوان یک فاکتور مهم برای تکمیل مطالعات آینده مد نظر قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Fujimoto M, Aoyagi T, Ukai K, Wada A, Saito K., (1972) , Structural characteristics of eccentric k-braced frames, *Trans., Architectural Institute of Japan*, (195) , 39-49.
- [2] Tanabashi R, Naneta K, Ishida T., (1974) , On the rigidity and ductility of steel bracing assemblage, Proc., *5th World Conference of Earthquake Engineering*, IAEE, Rome, Italy.,1, 834-840.
- [3] Kasai K, Popov EP., (1986) , Cyclic web buckling control for shear link beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 12(2), 362-382.
- [4] Popov EP, Engelhardt MD., (1988), Seismic eccentrically braced frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 10, 321-354.
- [5] Mazloom, M., Salehpour, A.S. (2014), Assessment of Resistance and Behavior of Link Beam in Eccentric Braced Frames by Finite Element Method, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44.2(75), 47-55 (In Persian).
- [6] Mazloom, M., Ahmadinejad, S.A. (2017), Effect of Vertical Shear Link on the Operation of Elements and Response Modification Factor of Rehabilitated Concrete Structures, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 47.4(89), 86-96 (In Persian).
- [6] Hejazi, M., Reisi, A. (2014), Determination of Reduction Factor for Reinforced Concrete Structures with Coupling Core Wall and Coupling Beams and Comparing with Reinforced Structures with Shear Wall, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44.1(74), 67-80 (In Persian).
- [8] Mansour, N., Shen, Y., Christopoulos, C., Tremblay, R. (2008), Experimental Evaluation of Nonlinear Replaceable Links in Eccentrically Braced Frames and Moment Resisting Frames. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12–17.
- [9] Stratan A, Dubina D, Dinu F., (2003), Control of global performance of seismic resistant EBF with removable link, Proc., *4th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2003)*, Naples, Italy, 175–180.
- [10] Stratan A, Dubina D., (2004), Bolted links for eccentrically braced steel frames, *Proceedings of the 5th AISC/ECCS International Workshop: Connections in Steel Structures V. Behavior, Strength and Design*, Delft, Netherlands, 223–332.
- [11] Dubina D, Stratan A, Dinu F., (2008), Dual high-strength steel eccentrically braced frames with removable links, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37(15), 1703–1720.
- [12] Sabau GA, Poljansek M, Taucer F, Pegon P, Molina, FJ, Tirelli D, Viacoz B, Stratan A, Ioan Chesoan A, Dubina D., (2014), *Seismic engineering research infrastructures for European synergies: full-scale experimental validation of a dual eccentrically braced frame with removable links (DUAREM)*, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Publications Office of the European Union, Luxembourg, Report.
- [13] Ioan A, Stratan A, Dubina D, Poljansek M, Molina FJ, Taucer F, Pegon P, Sabau G., (2016), Experimental validation of re-centring capability of eccentrically braced frames with removable links, *Engineering Structures*, 113, 335–346.
- [14] Ramsay JJ, Fussell A, Wilkinson RG., (2013), Design of replaceable-link eccentric braced frames in post-earthquake Christchurch, *Proceedings of the Steel Innovations Conference*, Christchurch, New Zealand.
- [15] Fussell AJ, Cowie KA, Clifton GC, Mago N., (2014), Development and research of eccentrically braced frames with replaceable active links, *Proceedings of the 2014 NZSEE Conference*, Auckland, New Zealand.
- [16] Clifton GC, Cowie KA., (2013), *Seismic Design of Eccentrically Braced Frames*, HERA Publication P4001: New Zealand Heavy Engineering Research Association, Manukau.
- [17] Mansour N, Christopoulos C, Tremblay R., (2011), Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames, *J. Struct. Eng.* ASCE, 137 (10), 1141–1152.
- [18] Mago N., (2013), *Finite element analysis of eccentrically braced frames with replaceable link*, Heavy Engineering Research Association, Manukau, New Zealand, HERA Report R4-145.