

## Effect of Beam Properties on the Seismic Behavior of RBS Connections

Ramin Naseri \*

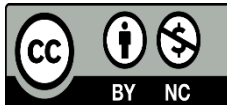
Department of Civil Engineering, Bilehsavar-e-Moghan Branch, Islamic Azad University, Bilehsavar, Iran  
raminnaseri@znu.ac.ir

### Keywords

steel connection,  
reduced beam  
section,  
finite element  
analysis,  
cyclic loading

### Abstract

The reduced beam section (RBS) moment connection is one of the prequalified connection types specified in design standards. The main concept of this connection is to weaken the beam by cutting portions of its flange near the column, so that a plastic hinge forms in this region, allowing it to act as a ductile fuse. However, at large displacements, there is a possibility of web buckling, which in turn leads to strength degradation at high rotation levels. In this study, the cyclic performance of the RBS moment connection under variations in beam cross-section and length was investigated using the ABAQUS finite element software. The analysis results showed that the rate of strength degradation at higher rotation levels is greater for beams with larger cross-sections compared to beams with smaller cross-sections. Moreover, increasing the beam length reduces the rate of strength degradation in the connection.



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

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

\* Corresponding Author

## تأثیر مشخصات تیر

## بر روی رفتار لرزه‌ای اتصال RBS

رامین ناصری\*

گروه مهندسی عمران، واحد بيله‌سوار مغان، دانشگاه آزاد اسلامی، بيله‌سوار، ایران

raminnaseri@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۰ مهر ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۱۲ خرداد ۱۴۰۳

## چکیده

اتصال خمشی تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) یکی از انواع اتصالات از پیش تأیید شده است. ایده اصلی این اتصال ضعیف کردن تیر از طریق برش قسمت‌هایی از بال تیر در ناحیه نزدیک به ستون است. به طوری که با تشکیل مفصل پلاستیک در این ناحیه، این قسمت از تیر به عنوان فیوز شکل پذیر عمل می‌کند. با این حال، احتمال وقوع کمانش جان تیر در جابه‌جایی‌های زیاد وجود دارد که این امر به نوبه خود موجب زوال مقاومت در دوران‌های بالا خواهد شد. در این مطالعه، عملکرد چرخه‌ای اتصال خمشی RBS تحت تأثیر تغییرات مقطع و طول تیر با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که افت مقاومت در دوران‌های بالا در تیرهای با مقطع بزرگ‌تر بیشتر از افت مقاومت در تیرهای با مقطع کوچک‌تر است. همچنین افزایش طول تیر باعث کاهش نرخ افت مقاومت اتصال می‌شود.

**واژگان کلیدی:** اتصال فولادی، تیر با مقطع کاهش یافته، تحلیل المان محدود، بارگذاری چرخه‌ای

## ۱- مقدمه

در بسیاری از سازه‌های فولادی، قاب‌های خمشی به‌خاطر شکل‌پذیری، قابلیت جذب انرژی بالا و ملاحظات معماری، به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کنار این ویژگی‌ها، تا قبل از زلزله نور تریچ در هفدهم ژانویه ۱۹۹۴ و زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵، باور بر این بود که اتصالات صلب ایجاد شده با جوش‌های نفوذی کامل می‌توانند تا سطوح بالایی از تغییر شکل‌های پلاستیک از خود مقاومت نشان دهند. در حالی که در طی این زلزله‌ها، بسیاری از سازه‌ها با اتصالات خمشی سنتی، رفتار مورد انتظار را از خود نشان ندادند. در واقع، مهم‌ترین الگوی خرابی سازه‌ای شکست‌های ترد در محل اتصالات تیر به ستون در قاب‌های مقاوم خمشی فولادی<sup>۱</sup> (SMRFs) بود. به منظور رفع این مشکل، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی توسط محققین در سال‌های گذشته پیشنهاد شده است. اساس این مطالعات بر پایه کاهش نیاز کرنش و شکل‌پذیری در محل اتصال تیر به ستون می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، دو راهکار توسط محققین پیشنهاد شده است:

۱- افزایش مقاومت محل اتصال با استفاده از سخت‌کننده‌ها و جوش‌های قوی‌تر

۲- کاهش مقاومت (تضعیف تیر) در فاصله‌ای دور از محل اتصال به عنوان یکی از نخستین طرح‌های تقویتی، [۱، ۲] به بررسی تقویت اتصالات خمشی سنتی با استفاده از ورق‌های پوششی پرداختند. نتایج آزمایشات نشان داد که از بین ۱۲ نمونه مورد آزمایش، ۱۰ مورد آن دوران پلاستیک بزرگی را از خود نشان داده و عملکرد مطلوبی را داشتند. بعلاوه، این طرح در مقایسه با سایر طرح‌های تقویتی جزو طرح‌های مقرون به صرفه بود. با این حال، این طرح هنوز محدودیت‌هایی داشت که بایستی در مراحل طراحی و ساخت در نظر گرفته می‌شد. تحقیق دیگری توسط محققین [۳] انجام شده است که در مورد تقویت اتصال خمشی فولادی با استفاده از ورق‌های لچکی در بال پایینی تیر می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از سخت‌کننده ماهیچه‌ای با سختی و مقاومت کافی، بدون هیچ شکستی در جوش اتصال بال تیر، تا ۰/۰۳ رادیان دوران پلاستیک را در اتصال ممکن می‌سازد. استفاده از ماهیچه‌ها و سخت‌کننده‌های عمودی و افقی برای ایجاد اتصال صلب تیر به جان ستون با پروفیل جفت IPE، روشی است که توسط محققین [۴] پیشنهاد شده است. این تحقیق که بصورت عددی و با روش المان محدود مدلسازی و ارزیابی شده است، نشان داد که می‌توان مقاومت، سختی و شکل‌پذیری قابل قبولی را از اتصال حاصل نمود.

ایجاد «فیوز سازه‌ای» از طریق کاهش مقاومت تیر در نزدیکی محل اتصال به ستون تأثیر کمی بر روی کاهش سختی جانبی تیر و سختی جانبی کلی دارد، ولی موجب کاهش مقدار نیروی وارده به اتصال می‌شود. به‌علاوه، کاهش ظرفیت خمشی تیر دارای مزایای زیر است:

- ✓ نیروی برشی در چشمه اتصال کاهش می‌یابد.
- ✓ تقاضای نیرو در صفحات پیوستگی ستون کاهش می‌یابد.
- ✓ قاعده تیر ضعیف - ستون قوی به‌آسانی حاصل می‌شود.

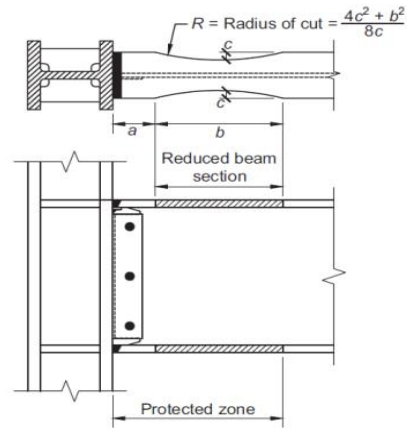
به لطف مزایای فوق، بسیاری از مطالعات بر روی تیر با مقطع کاهش یافته<sup>۲</sup> (RBS) متمرکز می‌باشند. به‌طور کلی، کاهش مقطع تیر از طریق کاهش عرض بال تیر، کاهش ارتفاع جان تیر یا ترکیبی از این دو صورت می‌گیرد. ایجاد ناحیه نرم در نزدیکی اتصال خمشی تیر به ستون از طریق تضعیف مقطع تیر، نخستین بار در سال ۱۹۹۰ [۵] ارائه شد. در این تحقیق، ایجاد منطقه شکل‌پذیر و جاذب انرژی از طریق کاهش عرض بال تیر پیشنهاد شد. اتصال RBS متعارف به عنوان یکی از اتصالات از پیش تأیید شده در آیین‌نامه AISC آورده شده است (شکل ۱). ایجاد سوراخ در بال تیر در اتصالات خمشی یکی دیگر از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین بوده است. مطالعات و آزمایشات متعددی در این زمینه صورت گرفته است که بیانگر رفتار مطلوب و عملکرد لرزه‌ای قابل قبول چنین اتصالاتی است. به عنوان مثال، نتایج حاصل از مطالعه عددی صورت گرفته [۶] بر روی سه نوع از روش‌های کاهش عرض بال تیر (برش شعاعی، سوراخ‌کاری با قطرهای یکسان و سوراخ‌کاری با قطرهای مختلف) نشان داد که از بین این روش‌ها، مقطع با بال سوراخ شده با قطرهای مختلف، شکل‌پذیرتر بوده و قابلیت جذب انرژی بالاتری را دارد. در سال‌های اخیر، در تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران [۷ و ۹]، نوع جدیدی از اتصال شکل‌پذیر معرفی و بررسی شده است. در نوع از اتصال، در ناحیه مشخصی از تیر، قسمت‌هایی از بال و جان تیر با عضو لوله‌ای جایگزین می‌شود. عضو لوله‌ای به عنوان فیوز شکل‌پذیر رفتار کرده و باعث هدایت تمرکز تنش و کرنش به این ناحیه می‌شود. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که این نوع اتصال علاوه بر داشتن رفتار پایدار در مقابل بارهای چرخه‌ای، قابلیت تعویض‌پذیری را نیز دارا می‌باشد.

<sup>2</sup> Reduced Beam Section

<sup>1</sup> Steel Moment Resistant Frames

جدول ۱- محدودیت‌های اتصالات پیش‌تأیید شده [۱۰]

محدودیت‌ها	جزئیات اتصال
$\leq 920$ mm	حداکثر ارتفاع مقطع تیر
$\leq 447$ kg/m	حداکثر وزن واحد طول تیر
$7 \leq$	نسبت طول دهانه به ارتفاع تیر (قاب‌های خمشی ویژه)
$5 \leq$	نسبت طول دهانه به ارتفاع تیر (قاب‌های خمشی متوسط)
$\leq 44$ mm	حداکثر ضخامت بال تیر



شکل ۱- اتصال خمشی RBS [۱۰]

## ۲- اتصال خمشی با مقطع کاهش یافته تیر (RBS)

در یک اتصال خمشی RBS بخش‌هایی از بال تیر در ناحیه نزدیک اتصال تیر به ستون بریده می‌شود. در این اتصال فرض بر این است که تسلیم و تشکیل مفصل در قسمت کاهش یافته مقطع در تیر رخ دهد و در نتیجه لنگر و تغییر شکل فرا ارتجاعی در وجه ستون، محدود شود. تعداد زیادی اتصال RBS تحت شرایط مختلف در مؤسسات سراسر جهان آزمایش شده‌اند. آزمایش‌ها روی اتصالات RBS نشان دادند که تسلیم عموماً در ناحیه کاهش یافته تیر رخ داده و امکان دارد تا مقدار محدودی به سمت وجه ستون نیز پیشروی کند. مقاومت پیشینه نمونه‌ها معمولاً در زاویه تغییر شکل نسبی بین طبقه ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ رادیان به دست می‌آید. سپس مقاومت نمونه به دلیل کمانش پیچشی جانبی و یا موضعی تیر کاهش می‌یابد. شکست نهایی معمولاً در زاویه تغییر شکل نسبی بین طبقه ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ رادیان، به وسیله‌ی شکست خستگی کم دامنه در کمانش موضعی بال در ناحیه RBS رخ می‌دهد.

مطابق آیین‌نامه AISC 358-22 [۱۰] محدودیت‌هایی برای اتصالات پیش‌تأیید شده وجود دارد که در جدول ۱ آورده شده است. در صورت عدم ارضای این محدودیت‌ها، عملکرد اتصال باید بوسیله مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد.

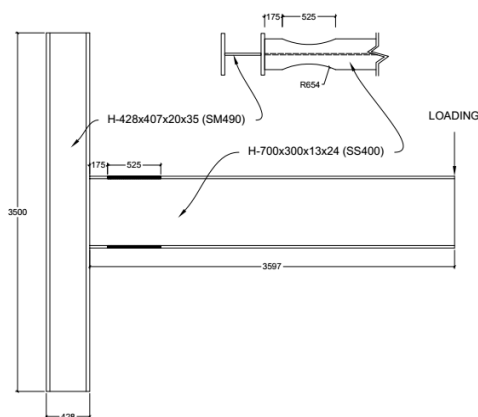
## ۳- صحت‌سنجی

به‌منظور صحت‌سنجی روند مدل‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس و همچنین استفاده از قابلیت پیش‌بینی افت مقاومت اتصالات RBS که ناشی از ایجاد مفصل پلاستیک و کمانش موضعی تیر است، از نمونه DB700-SW آزمایش شده توسط محققان [۱۱] استفاده شده است. ابعاد و مشخصات مکانیکی تیر و ستون مورد استفاده در این نمونه در جدول ۲ آورده شده است. این مقادیر بر اساس نتایج حاصل از

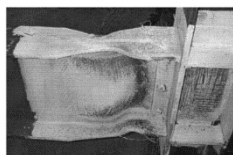
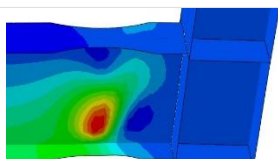
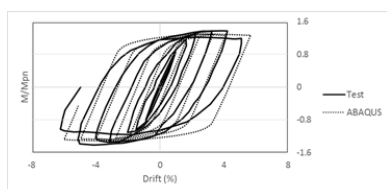
آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی فولادهای SS400 و SM490 و با در نظر گرفتن اثر سخت‌شوندگی کرنشی به‌دست‌آمده است. جزئیات و ابعاد اتصال در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- ابعاد و مشخصات مکانیکی نمونه DB700-SW [۱۱]

Member	Dimensions (mm)				Coupon (MPa)			Yield ratio (%)
	Height	Width	$t_{fb}$	$t_w$	Location	$\sigma_v$	$\sigma_u$	
Beam	700	300	24	13	Flange	304	455	67
					Web	364	480	
Column	428	407	35	20	Flange	343	512	67
					Web	358	520	



شکل ۲- نمونه DB700-SW آزمایش شده [۱۱]



شکل ۳- مقایسه مدل المان محدود و نتایج آزمایشگاهی نمونه

DB700-SW آزمایش شده [۱۱]

پاسخهای لنگر هم‌پایه شده در مقابل دوران اتصال برای نمونه مدل‌سازی شده و نمونه آزمایشگاهی در شکل ۳a ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقدار لنگر در مقطع کاهش یافته محاسبه شده و با لنگر پلاستیک مقطع کاهش یافته هم‌پایه شده است. رفتار موضعی تیر در نمونه آزمایشگاهی در شکل ۳b نشان داده شده است. همچنین، کمانش موضعی جان و بال‌های تیر در نسبت دررفت طبقه ۶٪ در شکل ۳c آورده شده است. با بررسی شکل ۳، تطابق خیلی خوبی بین نتایج تحلیلی نمونه مدل‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی ملاحظه می‌شود. به عبارت دیگر، مدل المان محدود توانسته است تسلیم جان تیر، تشکیل مفصل پلاستیک و افت مقاومت اتصال RBS ناشی از کمانش موضعی بال تیر را با دقت بالا نمایش دهد.

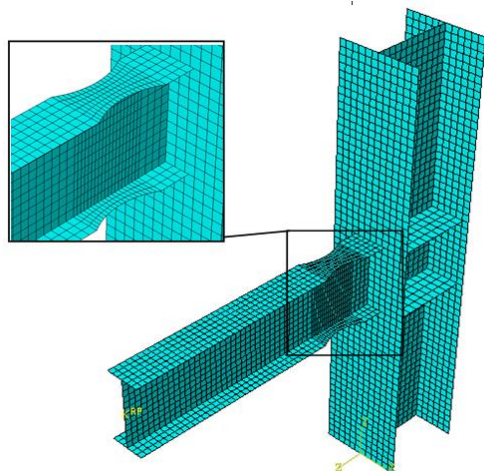
## ۴- مدل سازی

اتصال انتخاب شده به صورت یک اتصال یک طرفه خارجی است. برای مقاطع تیر و ستون به ترتیب از پروفیل های IPE و IPB استفاده شده است. به منظور بررسی اثرات تغییر اندازه مقطع تیر، یک مقطع ثابت برای ستون و شش مقطع برای تیر انتخاب شده است. به علاوه، برای ارزیابی اثرات تغییر طول تیر بر رفتار اتصال، طول تیر در نمونه های دارای کوچک ترین و بزرگ ترین مقطع تیر در دو حالت بررسی شده است که در مجموع هشت نمونه مدل سازی و مورد تحلیل قرار گرفته است. مشخصات هندسی نمونه ها در جدول ۳ آورده شده است. تمامی نمونه ها در نرم افزار تحلیل المان محدود غیرخطی، ABAQUS، بصورت سه بعدی مدل سازی شده اند. انتهای ستون ها به صورت تکیه گاه ساده در نظر گرفته شده است، بدین معنا که تمام درجات آزادی انتقالی در سطح پایینی ستون مقید شده اند. این مقیدسازی شرایط مرزی، به طور خاص جابه جایی ها را در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  و همچنین دوران ها حول محورهای  $y$  و  $z$  محدود کرده است. همچنین، در بخش بالایی ستون، جابه جایی ها در راستاهای  $x$  و  $z$  و دوران ها حول محورهای  $y$  و  $z$  محدود شده اند. این شرایط مرزی با هدف مدل سازی دقیق و واقعی تری از رفتار سازه تحت بارگذاری اعمال شده است. بارگذاری به طور کنترل شده و از طریق اعمال جابه جایی در انتهای آزاد تیر انجام شده است. این نوع بارگذاری به ویژه در شرایط چرخه ای برای بررسی رفتار سازه در مواجهه با بارهای متناوب و بررسی اثرات خستگی و تغییر شکل های دائمی در نظر گرفته شده است. به منظور کنترل پایداری تیر و کاهش تغییر شکل های ناخواسته در طول تیر، یک سیستم مهاربندی جانبی برای بال های تیر و در میانه طول آن اعمال شده است. این سیستم مهاربندی به عنوان یک عامل مقاومت در برابر حرکات جانبی عمل کرده و به استحکام سازه در برابر بارگذاری های شدید کمک می کند. برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل ها، از روش Full Newton به عنوان روش حل استفاده شده است. این روش حل به ویژه برای مسائل غیرخطی پیچیده و هنگامی که رفتار سازه در شرایط بارگذاری شدید دچار تغییرات غیرخطی می شود، بسیار مؤثر است. در این روش، از قید Tie برای اتصال تیر و صفحات پیوستگی به ستون استفاده شده است تا از نفوذ

و برخورد میان اعضا جلوگیری شود و اعضای مختلف مدل به طور مؤثر به یکدیگر متصل شوند. برای مش بندی مدل، از المان پوسته ای چهارگره ای با انتگرال گیری کاهش یافته (S4R) استفاده شده است. این نوع المان ها به ویژه برای تحلیل های غیرخطی و شبیه سازی جابه جایی های بزرگ، کرنش های بزرگ یکدیگر متصل شوند. برای مش بندی مدل، از المان پوسته ای چهارگره ای با انتگرال گیری کاهش یافته (S4R) استفاده شده است. این نوع المان ها به ویژه برای تحلیل های غیرخطی و شبیه سازی جابه جایی های بزرگ، کرنش های بزرگ و رفتار پلاستیک مصالح مناسب هستند. از مزایای این المان ها می توان به نیاز کمتر به حافظه و زمان پردازش در مقایسه با المان های حجمی اشاره کرد. علاوه بر این، این المان ها قابلیت مدل سازی دقیق کمانش موضعی جان و بال ها را دارند که در تحلیل های رفتار پلاستیک و کاهش مقاومت سازه بسیار مهم است. برای افزایش دقت تحلیل و ثبت دقیق تر تغییر شکل های موضعی در ناحیه اتصال، از مش بندی ریزتر در ناحیه کاهش یافته و منطقه چشمه اتصال استفاده شده است. این نواحی به طور خاص حساس و بحرانی هستند، زیرا تغییرات کوچک در این نواحی می تواند تأثیرات قابل توجهی بر روی عملکرد کلی سازه داشته باشد. از آنجایی که استفاده از ناحیه کاهش یافته باعث کاهش نیاز کرنشی در محل اتصال تیر به ستون می شود، از مدلسازی جوش های اتصال صرف نظر شده است. تحلیل استاتیکی همراه با اعمال خواص غیرخطی مصالح و هندسی مورد استفاده قرار گرفته است. برای مدل سازی رفتار غیرخطی مصالح، از مدل سخت شونده گی ترکیبی استفاده شده است. با استناد به نتایج تحقیق ارائه شده توسط محققین [۱۲]، برای خواص تنش تسلیم ( $F_y$ )، تنش نهایی ( $F_u$ ) و کرنش پلاستیک به ترتیب مقادیر  $310 \text{ MPa}$ ،  $430 \text{ MPa}$  و  $0.2$  در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون به ترتیب برابر  $209 \text{ GPa}$  و  $0.3$  فرض شده است. لازم به ذکر است که برای اعمال خواص مکانیکی مصالح، از منحنی رفتار دوخطی استفاده شده است.

جدول ۳- مشخصات هندسی نمونه ها

Models	Beam section	Column section	$a^*$ (mm)	$b^*$ (mm)	$c^*$ (mm)	Beam length (mm)	Column height (mm)
SP1	IPE 160	IPB 300	53	120	16	1000	1500
SP2	IPE 180	IPB 300	60	135	18	1000	1500
SP3	IPE 200	IPB 300	65	150	20	1000	1500
SP4	IPE 240	IPB 300	78	180	24	1000	1500
SP5	IPE 270	IPB 300	88	200	27	1000	1500
SP6	IPE 300	IPB 300	98	225	30	1000	1500
LP1	IPE 160	IPB 300	53	120	16	2000	1500
LP2	IPE 300	IPB 300	98	225	30	2000	1500



شکل ۵- جزئیات مش‌بندی مدل‌های مورد مطالعه

\* پارامترهای a، b و c در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. مقادیر این پارامترها از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$a = (0.5 \text{ to } 0.75) b_f$$

$$b = (0.65 \text{ to } 0.85) d_b$$

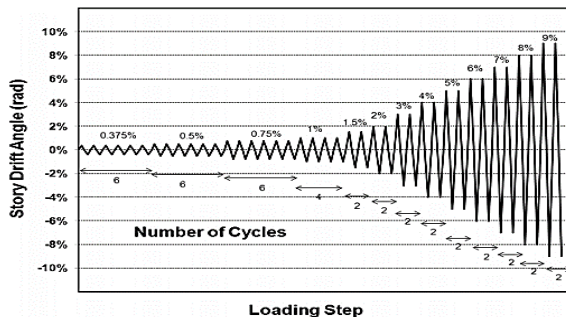
$$c \leq 0.25 b_f$$

## ۵- بارگذاری

مطابق آئین‌نامه AISC 341-22 [۱۳]، آزمایشات چرخه‌ای تأیید کننده اتصالات خمشی تیر به ستون در قاب‌های خمشی، می‌بایست از طریق کنترل زاویه دررفت طبقات ( $\theta$ ) که با تعداد و دامنه‌های مشخصی به نمونه‌ها وارد می‌شوند، صورت گیرد. بنابراین، با ضرب مقادیر زوایای دررفت در طول تیر، جابجایی‌های معادل انتهای آزاد تیر بدست می‌آید. بر این اساس، به منظور اعمال این زوایا، بارگذاری جابجایی - کنترل با دامنه‌های مشخص و بصورت افزایشی در انتهای آزاد تیر وارد و رفتار اتصال تحت این جابجایی‌ها بررسی شده است. تعداد و مقادیر زوایای مورد استفاده در ادامه آورده شده است. همچنین پروتکل بارگذاری ارائه شده در آئین‌نامه AISC 341-22 [۱۳] و کمیته مشترک SAC [۱۴] بصورت نموداری در شکل ۴ نشان داده شده است. بارگذاری مدل‌های مورد مطالعه تا رسیدن به مقدار ۰/۰۷ دررفت طبقات ادامه یافته است. برای تحلیل و ارزیابی مدل‌ها از حلگر استاندارد نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. در شکل ۵ جزئیات مش‌بندی مدل‌های مورد مطالعه نمایش داده شده است.

- (a) 6 cycles at  $\theta = 0.00375 \text{ rad}$
- (b) 6 cycles at  $\theta = 0.005 \text{ rad}$
- (c) 6 cycles at  $\theta = 0.0075 \text{ rad}$
- (d) 4 cycles at  $\theta = 0.01 \text{ rad}$
- (e) 2 cycles at  $\theta = 0.015 \text{ rad}$
- (f) 2 cycles at  $\theta = 0.02 \text{ rad}$
- (g) 2 cycles at  $\theta = 0.03 \text{ rad}$
- (h) 2 cycles at  $\theta = 0.04 \text{ rad}$

گام‌ها و مراحل بارگذاری را می‌توان با افزایش ۰/۰۱ رادیان نسبت به مرحله قبلی و به تعداد دوچرخه در هر مرحله ادامه داد.



شکل ۴- پروتکل بارگذاری ارائه شده در آئین‌نامه AISC 341-22 [۱۳] و SAC [۱۴]

## ۶- تحلیل المان محدود

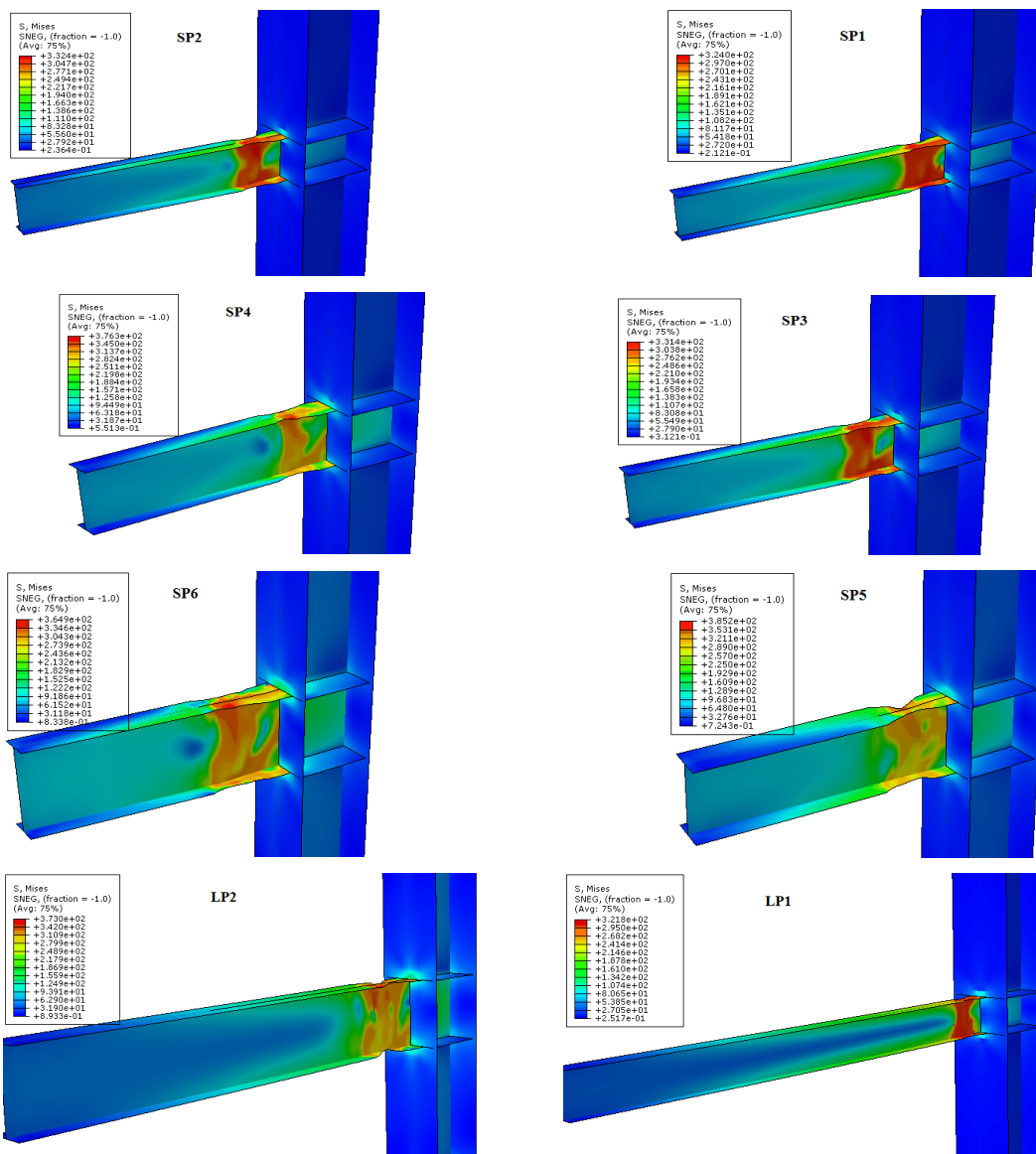
مطابق آئین‌نامه لرزه‌ای AISC (2022) [۱۳]، اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی ویژه باید توانایی رسیدن به زاویه دررفت نسبی طبقه به مقدار حداقل ۰/۰۴ رادیان را داشته باشند. برای رسیدن به این هدف، دو شرط زیر می‌بایست ارضا شوند:

۱- تحت بارگذاری لرزه‌ای، همزمان با تسلیم کامل در ناحیه کاهش یافته تیر، مولفه‌های اتصال در مجاورت ستون در حالت الاستیک باقی بماند.

۲- افت مقاومت در اتصال باید کمتر از ۲۰ درصد باشد.

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار نمونه‌ها در دوران‌های بالا، اعمال بارگذاری تا زاویه دررفت نسبی ۰/۰۷ ادامه یافته است. توزیع تنش فون میسز<sup>۱</sup> برای زاویه دررفت نسبی ۰/۰۷ در شکل ۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که تمرکز تنش در بدنه تیر و در ناحیه کاهش یافته رخ داده است؛ بنابراین، در اثر بارهای چرخه‌ای، علاوه بر الاستیک ماندن المان‌های موجود در چشمه اتصال، احتمال رخداد ترک‌ها و شکست‌های ترد در محل جوش تیر به ستون نیز کاهش می‌یابد.

<sup>1</sup> Von Mises stress distribution



شکل ۵ - توزیع تنش فون میسز در زاویه دررفت ۰/۰۷

طبیعتاً، هرچه مقدار شاخص PEEQ بیشتر باشد، نیاز کرنش پلاستیک نیز بالاتر خواهد بود؛ بنابراین، به منظور بررسی نیاز کرنش پلاستیک این اتصال، مقادیر این شاخص در محدوده مقطع کاهش یافته و بر ستون بررسی می‌شود. در شکل ۶ توزیع شاخص PEEQ در زاویه دررفت طبقه ۰/۰۷ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود تمرکز کرنش پلاستیک در تیر و در ناحیه کاهش یافته اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر، مفصل پلاستیک از محل اتصال به سمت تیر انتقال یافته است.

یکی از پارامترهای مؤثر برای قضاوت درباره رفتار غیرارتجاعی قطعات و اعضای مختلف، شاخص کرنش معادل پلاستیک<sup>۱</sup> (PEEQ) است. این شاخص به صورت نسبت کرنش معادل پلاستیک به کرنش تسلیم تعریف می‌شود و بیانگر میزان نیاز کرنش موضعی است. این شاخص از رابطه زیر به دست می‌آید:

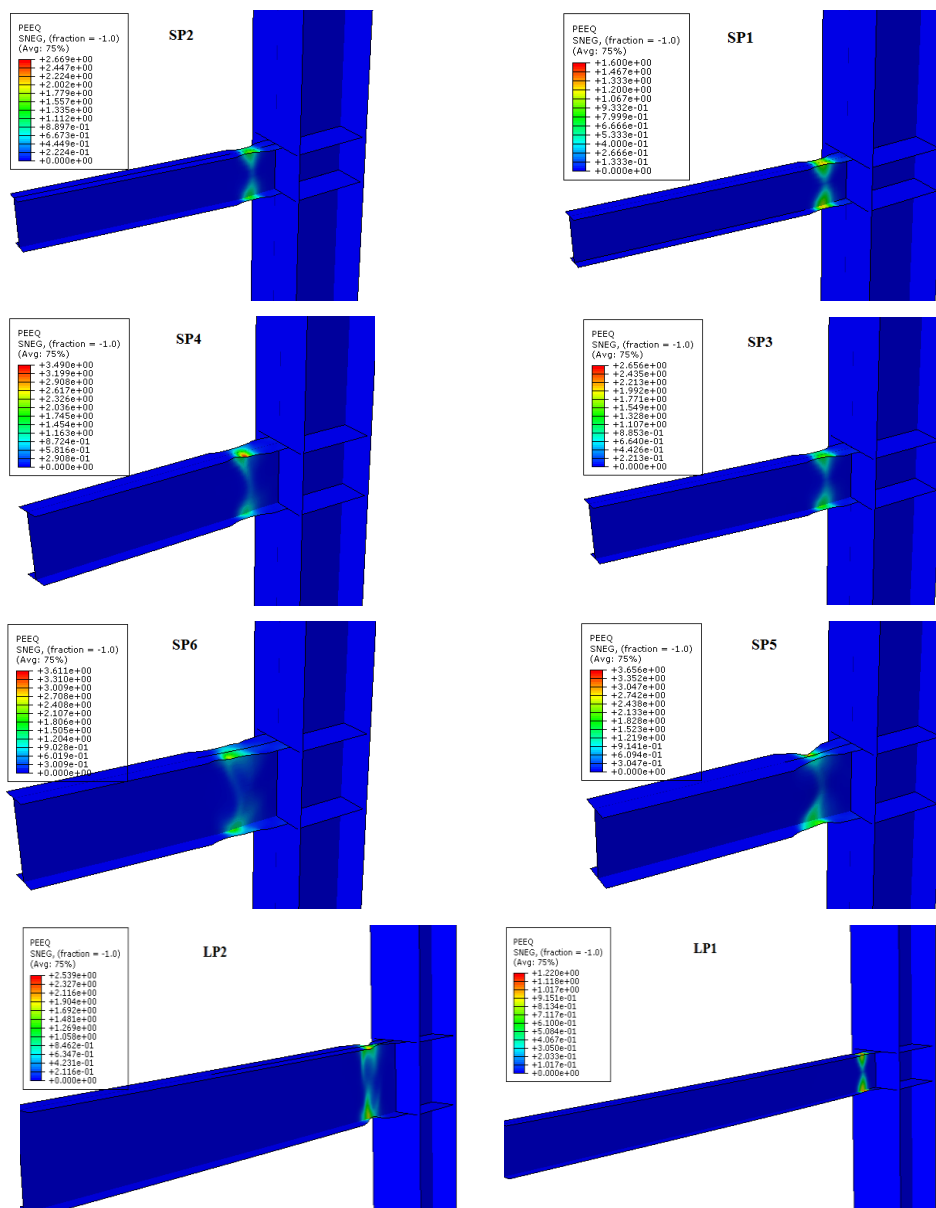
$$\text{PEEQ Index} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}}}{\epsilon_y} \quad (1)$$

در این رابطه:

$\epsilon_{ij}$  = مؤلفه‌های کرنش پلاستیک در جهات  $i$  و  $j$  هستند.

<sup>1</sup> Equivalent Plastic Strain

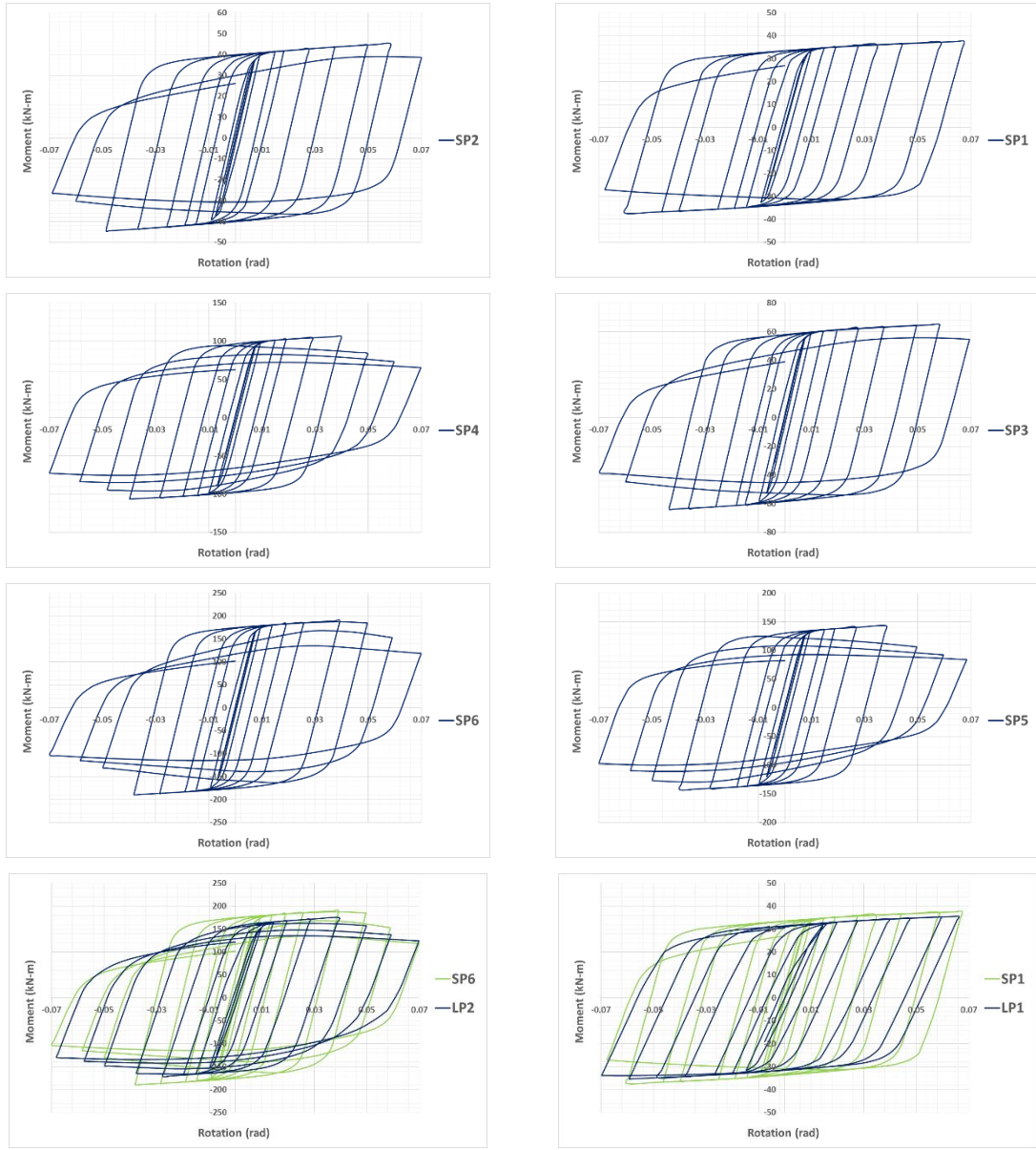




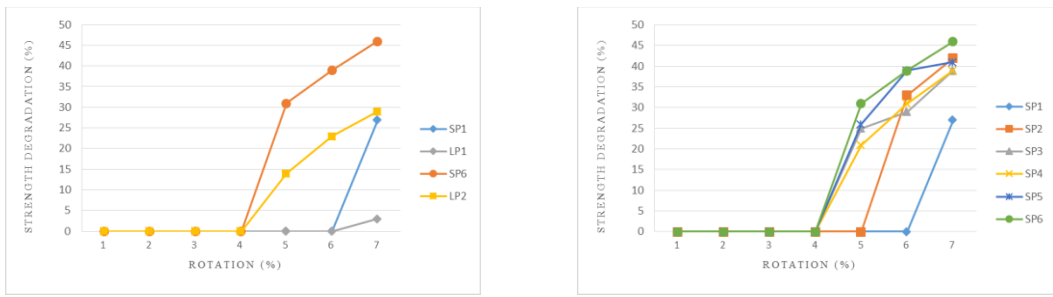
شکل ۶- شاخص PEEQ در زاویه دریفت ۰/۰۷

مقدار افت مقاومت در زاویه دریفت طبقه ۰/۰۷ در نمونه‌های LP1 و LP2 به ترتیب حدود ۷۹٪ و ۳۷٪ کمتر از مقدار افت مقاومت در نمونه‌های SP1 و SP6 می‌باشد. مقادیر کاهش مقاومت اتصال در شکل ۸ نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها زمان وقوع افت مقاومت از زاویه دوران ۵٪ شروع شده است، لذا مقایسه‌ای بین میزان افت مقاومت نمونه‌های با طول تیر یکسان در دوران‌های بالا بصورت نموداری در شکل ۹ آورده شده است.

به‌منظور بررسی قابلیت جذب و استهلاک انرژی و رفتار غیرارتجاعی اتصالات، منحنی لنگر - دوران نمونه‌ها مطابق شکل ۷ ارائه شده است. مقدار دوران اتصال از تقسیم مقدار جابجایی انتهایی تیر به طول تیر بدست می‌آید. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش سازه مقطع تیر مقدار مقاومت اتصال در دوران‌های بالا دچار کاهش و افت بیشتر می‌شود. دلیل اصلی این اتفاق کماتنس موضعی و جانبی بال و جان تیر می‌باشد. بطوری که در نمونه‌های SP1 و SP6 مقدار افت مقاومت در زاویه دریفت ۰/۰۵ به ترتیب صفر و ۳۱٪ و در زاویه دریفت ۰/۰۷ به ترتیب ۲۷٪ و ۴۶٪ می‌باشد. از طرف دیگر، افزایش طول تیر علیرغم کاهش حداکثر مقاومت خمشی اتصال، باعث کاهش نرخ افت مقاومت اتصال می‌شود. بطوری که

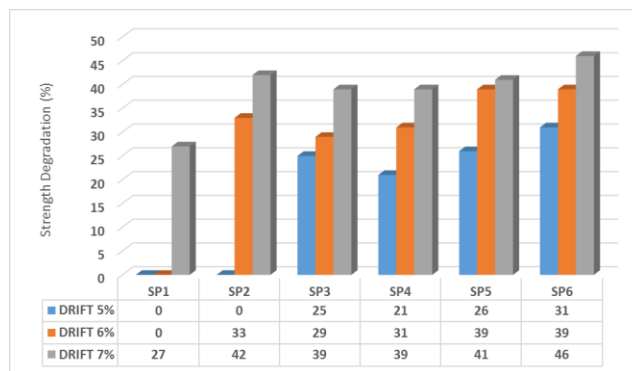


شکل ۷- نمودار چرخه‌های لنگر- دوران



شکل ۸- مقادیر افت مقاومت در زوایای دریفت مختلف





شکل ۹ - مقایسه افت مقاومت در درون‌های بالاتر

[https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/archives/1999/11/1999v11\\_design.pdf](https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/archives/1999/11/1999v11_design.pdf)

[2] Engelhardt MD, Winneberger T, Zekany AJ, Potyraj TJ. The dogbone connection: Part II. *Mod Steel Constr.* 1996;36(8):46-55.

[https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/archives/1996/08/1996v08\\_dogbone\\_2.pdf](https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/archives/1996/08/1996v08_dogbone_2.pdf)

[3] Yu QSK, Uang CM, Gross J. Seismic rehabilitation design of steel moment connection with welded haunch. *J Struct Eng.* 2000;126(1):69-78.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:1\(69\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:1(69))

[4] Haji Rajabi MJ, Karimi MS, Kafi MA. A new model for beam rigid connection to double I-shaped column's web. *J Constr Steel Res.* 2016;127:204-20.

<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.013>

[5] Plumier A. New idea for safe structures in seismic zones. In: *IABSE Symposium - Mixed Structures Including New Materials*; 1990. Zürich (Switzerland): International Association for Bridge and Structural Engineering.

<https://www.iabse.org>

[6] Rahnavard R, Hassanipour A, Siahpolo N. Analytical study on new types of reduced beam section moment connections affecting cyclic behavior. *Case Stud Struct Eng.* 2015; 3:33-51.

<https://doi.org/10.1016/j.csse.2015.02.002>

#### ۷- نتیجه گیری

در این مطالعه رفتار لرزه‌ای اتصال RBS به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بدین منظور شش نمونه اتصال خمشی RBS با اندازه مقطع تیر و دو نمونه با طول تیر متفاوت مدل‌سازی و تحلیل شد. در حالت کلی نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- استفاده از اتصال RBS در اتصالات خمشی تیر به ستون باعث تمرکز تنش و کرنش پلاستیک در ناحیه کاهش یافته شده و منجر به افزایش قابلیت رفتار شکل‌پذیر و غیرارتجاعی اتصال می‌شود.  
۲- با افزایش اندازه مقطع تیر (و به تبع آن ارتفاع تیر) رفتار تیر در دوران‌های بالا بخاطر کماتش جانبی و موضعی بال و جان تیر دچار اختلال شده و در نهایت باعث افت مقاومت نهایی اتصال می‌شود. بطوری که در نمونه‌های SP1 و SP6 مقدار افت مقاومت در زاویه دررفت ۰/۰۵ به ترتیب صفر و ۳۱٪ و در زاویه دررفت ۰/۰۷ به ترتیب ۲۷٪ و ۴۶٪ می‌باشد.

افزایش طول تیر علی‌رغم کاهش حداکثر مقاومت خمشی اتصال، باعث کاهش نرخ افت مقاومت اتصال می‌شود. به طوری که مقدار افت مقاومت در زاویه دررفت طبقه ۰/۰۷ در نمونه‌های LP1 و LP2 (دو برابر طول تیر اولیه) به ترتیب حدود ۷۹٪ و ۳۷٪ کمتر از مقدار افت مقاومت در نمونه‌های SP1 و SP6 می‌باشد.

#### ۸- مراجع

[1] Engelhardt MD. Design of reduced beam section moment connections. In: *Proceedings of the 1999 North American Steel Construction Conference*; 1999. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction.

seismic design criteria for new steel moment-frame buildings. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency; 2000. Report No.: FEMA-350. [https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema\\_fema-350.pdf](https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_fema-350.pdf)

[7] Ashtari P, Naseri R. Introduce an innovative connection with tubular flange section. In: Proceedings of the 8th International Conference on Seismology & Earthquake Engineering; 2019 May; Tehran, Iran. Tehran (Iran): International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES). <https://www.iiees.ac.ir/en/>

[۸] اشتری پ، ناصری ر. بررسی امکان استفاده از پروفیل‌های تسلیم شونده در اتصالات خمشی. در: مجموعه مقالات سیزدهمین کنگره ملی مهندسی عمران؛ ۱۴۰۱ اردیبهشت؛ اصفهان، ایران. اصفهان (ایران): دانشگاه صنعتی اصفهان <https://civilcongress.ir/>

[۹] اشتری پ، ناصری ر. ارزیابی رفتار لرزه‌ای اتصال تیر با بال لوله‌ای در قاب‌های خمشی فولادی. در: مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی سازه؛ ۱۴۰۱ آبان؛ تهران، ایران. تهران (ایران): دانشگاه صنعتی امیرکبی <https://www.aut.ac.ir>

[10] ANSI/AISC 358-22. Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction; 2022. <https://www.aisc.org/aisc358>

[11] Lee CH, Jeon SW, Kim JH, Uang CM. Effects of panel zone strength and beam web connection method on seismic performance of reduced beam section steel moment connections. J Struct Eng. 2005;131(12):1854-65. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:12\(1854\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:12(1854))

[12] Pachoumis D, Galoussis EG, Kalfas CN, Efthimiou IZ. Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections—experimental analysis and finite element model simulation. Eng Struct. 2010;32(9):2683-92. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.04.007>

[13] ANSI/AISC 341-22. Seismic provisions for structural steel buildings. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction; 2022. <https://www.aisc.org/aisc341>

[14] SAC Joint Venture; FEMA. Recommended