

# تأثیر قسمت کاهش یافته اتصال فولادی RBS روی مقطع کامل

جواد رفیعی<sup>۱</sup>، ایمان منصوری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند

[mansouri@birjandut.ac.ir](mailto:mansouri@birjandut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۰/۲۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۸/۸]

**چکیده** - یکی از اتصالاتی که با فلسفه ضعیف‌تر کردن تیر به کار می‌رود، اتصال خمشی تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) است. ایده تضعیف بر این پایه است که قسمت‌هایی از بال تیر در ناحیه نزدیک به اتصال تیر به ستون بریده می‌شود و با تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه RBS، این ناحیه به عنوان یک فیوز شکل‌پذیر عمل می‌کند. در این مطالعه عملکرد چرخه‌ای اتصال خمشی تیر با مقطع کاهش یافته در محیط نرم‌افزار آباکوس بررسی شده است. اتصال بررسی شده یک اتصال یک‌طرفه، که محل اعمال بار انتهای تیر است می‌باشد. در این اتصال، طول تیر به اندازه نصف دهانه مورد نظر در یک سازه طراحی شده است. در مدل‌سازی این اتصال برای دو سر ستون شرایط مرزی مفصلی در نظر گرفته شده است و از حرکت خارج از صفحه تیر جلوگیری به عمل آمده است. برای بارگذاری چرخه‌ای از قرارداد بارگذاری پیشنهاد شده در آیین‌نامه AISC استفاده شده است. در تحلیل پارامتریک این اتصال تأثیر تغییر ابعاد ناحیه برش در رفتار اتصال بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که ظرفیت خمشی اتصال RBS از اتصال با مقطع کامل بیشتر است اما در اتصال با مقطع کامل مفصل پلاستیک ایجاد نمی‌شود.

**واژگان کلیدی:** اتصال فولادی، تیر با مقطع کاهش یافته، رفتار چرخه‌ای، تحلیل اجزای محدود.

## ۱- مقدمه

از زلزله نوثریج باور بر این بود که اتصال متعارف (شکل ۱) که در سازه‌های قاب خمشی فولادی استفاده می‌شد، توانایی تحمل دوران‌های بزرگ پلاستیک تا  $0.02$  رادیان و بالاتر را بدون کاهش قابل توجهی در مقاومت داشته باشد [۱]. مشاهده آسیب‌های وارد شده به ساختمان‌ها در زلزله سال ۱۹۹۴ نوثریج نشان داد که بر خلاف تصور گذشته، در بیشتر موارد شکست‌های ترد در اتصالات در مراحل اولیه

شکل (۱) اتصال خمشی جوشی قبل از سال ۱۹۹۴ [۲]

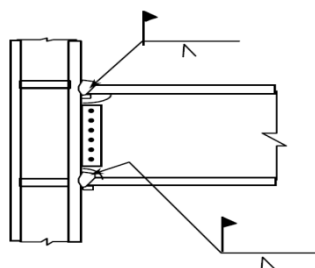


Fig. 1. Rigid welded pre-Northridge connection [2]

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 می‌باشند، طراحی می‌شوند. تغییر شکل پلاستیک مورد نظر شامل دوران‌های پلاستیک تیرها در اتصال آنها به ستون‌ها است و از نظر تئوری اتلاف انرژی زلزله وارد شده بر سازه را نتیجه می‌دهد. انتظار می‌رود که آسیب، شامل تسلیم اولیه و کمانش موضعی اعضای فولادی باشد و شکست ترد رخ ندهد. پیش‌بینی می‌شود که ساختمان‌های فولادی قاب خمشی، خاصیت شکل‌پذیری خوبی را از طریق تسلیم در اتصالات تیر به ستون نشان دهند. این تسلیم ممکن است شکل مفصل پلاستیک در تیرها (یا در ستون‌ها)، تغییر شکل پلاستیک برشی در چشمه اتصال ستون‌ها و یا ترکیبی از این سازوکار را داشته باشد. در گذشته و تا قبل

شکل (۲) هندسه اتصال تیر با مقطع کاهش یافته [۳]

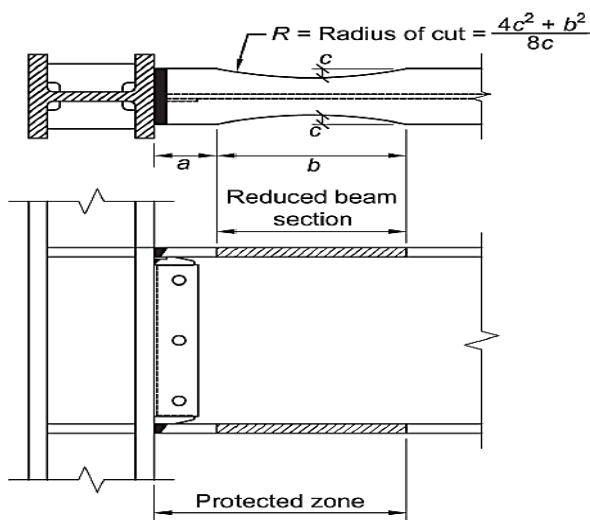


Fig. 2. RBS geometry connection [3]

این پژوهش، طراحی و جزئیات مناسب شامل مکان، مقطع و اندازه قسمت کاهش یافته تیر، ملزومات اتصال تیر به ستون، ملزومات مهاربندی جانبی تیر و ملزومات جزئیات دال را مورد بحث قرار می‌داد. اثر RBS روی سختی قاب و ملاحظات بار گرانشی هم مورد مطالعه قرار گرفت و در پایان، نتایج موجود اتصال RBS ارائه شدند. در سال ۲۰۰۰ شن و همکارانش در پژوهشی روی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی خمشی با RBS انجام دادند و مسائل طراحی برای قاب‌های RBS را مطرح کردند [۵]. تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و تاریخچه زمانی روی ۸ قاب سه طبقه و ده طبقه با ترکیبات متفاوت RBS انجام شد. عملکرد کلی و موضعی قاب‌ها بر اساس تغییر شکل پلاستیک، نسبت جابجایی نسبی فرارترجایی و مقاومت بحث شد و در نهایت پیشنهادهایی مانند نرخ کاهش بال و مکان RBS، مطرح شدند. در سال ۲۰۰۵ جین و الطویل پژوهشی روی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی با RBS تحلیل‌های بار افزون غیرخطی و گذرا را روی قاب ۴، ۸، ۱۰ طبقه با اتصالات RBS انجام دادند [۶]. هدف از این پژوهش، گسترش فهم بهتری از رفتار RBS و همچنین نقدی بر FEMA 350 بود. تحلیل‌ها نشان دادند با وجود این که اتصال RBS به طور ذاتی خیلی باعث افزایش مقاومت نمی‌شود اما دارای عملکرد لرزه‌ای خوبی در ناحیه‌های با خطر لرزه‌ای بالا است.

پلاستیک شدن و در بعضی موارد حتی زمانی که سازه در حالت ارتجاعی باقی مانده بود، اتفاق می‌افتاد.

در بیشتر موارد شکست‌ها در محل جوش‌های نفوذی کامل (CJP) بین بال پایینی تیر و بال ستون شروع می‌شد. زمانی که این شکست‌ها شروع می‌شد در طول مسیرهای متفاوتی بسته به شرایط هر اتصال پیش می‌رفت. رقابت بین پژوهشگران و مهندسان در زمینه طراحی اتصالات که حتی تا به امروز هم ادامه دارد تا آنجا که بعضی افراد پس از پیشنهاد جزئیات اتصال و آزمایش آن و اطمینان از عملکرد آن، جزئیات اتصال خود را بعنوان اختراع به ثبت رساندند و حق مالکیت آن جزئیات را در اختیار قرار گرفتند که از آن جمله می‌توان به اتصال RBS (تیر با مقطع کاهش یافته یا Reduced Beam Section)، اتصال T-stub (نیمرخ سپری)، اتصال Side Plate (ورق کناری)، اتصال Bolted Bracket Slotted Web (جان بریده شده)، اتصال Reduced Web (جان کاهش یافته) (نشیمن پیچ شده) و اتصال دیگر جزئیات اتصالات خمشی لرزه‌ای اشاره کرد. تمامی اصلاحات و جزئیاتی که برای اتصالات خمشی مطرح شد، هدفشان جابجایی بیشترین ظرفیت پلاستیک شدن و یا تقاضای شکل‌پذیری از انتهای تیر یا ناحیه اتصال و انتقال تقاضای شکل‌پذیری به ناحیه‌ای در تیر و دور از ستون است. از طرف دیگر جزئیات اتصالات خمشی لرزه‌ای ارائه شده در FEMA-350 را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی کرد: (۱) روش‌های تقویت کردن ناحیه اتصال و (۲) روش‌های ضعیف کردن تیر. اتصالاتی که با تفکر قویتر کردن ناحیه اتصال ارائه شده‌اند انواع مختلفی دارند که به عنوان نمونه می‌توان به اتصال با ورق‌های پوششی جوش شده به بال، اتصال با ورق کناری، اتصال با نشیمن پیچ شده اتصال با ماهیچه جوشی و ... اشاره کرد. اما اتصالاتی که با تفکر ضعیف‌تر کردن تیر ارائه شده و به کار می‌روند تعداد محدودتری دارند که به عنوان نمونه می‌توان به اتصال RBS یا تیر با مقطع کاهش یافته (شکل ۲)، اتصال تیر با بال آزاد، اتصال تیر با جان بریده شده و اتصال تیر با جان کاهش یافته اشاره کرد.

در سال ۱۹۹۸ کارتر و ایوانکیو پژوهشی در موسسه AISC استفاده از اتصالات با مقطع کاهش یافته تیر در قاب‌های خمشی فولادی انجام دادند [۴].

## ۲- اتصالات خمشی با مقطع کاهش یافته تیر

در یک اتصال خمشی با مقطع کاهش یافته تیر (RBS)، بخش‌هایی از بال تیر در ناحیه نزدیک اتصال تیر به ستون بریده می‌شود. در اتصال RBS 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 وجه ستون، محدود شود.

تعداد زیادی اتصال RBS تحت شرایط مختلف در موسسات سراسر جهان آزمایش شده‌اند. بررسی اطلاعات موجود در نمونه‌های RBS تاکید می‌کند که زمانی که طراحی و ساخت بر اساس آیین‌نامه " اتصالات از پیش تایید شده" انجام می‌شود، زاویه تغییر شکل نسبی بین طبقه حداقل ۰/۰۴ رادیان تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌شود. آزمایش‌ها روی اتصالات RBS نشان می‌دهند که تسلیم عموماً در مقطع کاهش یافته تیر رخ می‌دهد و امکان دارد تا مقدار محدودی به سمت وجه ستون پیش‌روی کند. مقاومت بیشینه نمونه‌ها معمولاً در زاویه تغییر شکل نسبی بین طبقه ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ رادیان به دست می‌آید. سپس مقاومت نمونه به دلیل کماتش پیچشی جانبی و 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 کماتش موضعی بال در ناحیه RBS، رخ می‌دهد.

بیشتر نمونه‌های آزمایش RBS به صورت شبه استاتیکی آزمایش شدند، با استفاده از قرارداد بارگذاری که در آن جابه‌جایی اعمالی به مرور افزایش می‌یابند. مانند قرارداد بارگذاری گفته شده در ATC-24 [۱۱] و قرارداد بارگذاری توسعه داده شده در برنامه FEMA/SAC که در فصل K آیین‌نامه لرزه‌ای AISC آمده است، دو نمونه با استفاده از یک قرارداد بارگذاری آزمایش شدند که این قرارداد بارگذاری نشان دهنده حرکت زمین نزدیک منبع بود که شامل یک ضربه بزرگ می‌شد. چندین نمونه هم به صورت دینامیکی آزمایش شدند. نمونه‌های RBS با برش شعاعی تحت تمام شرایط بارگذاری به خوبی عمل کرد. اتصالات RBS برای استفاده در سیستم‌های قاب خمشی ویژه (SMF) و قاب خمشی متوسط (IMF)، طبق

در سال ۲۰۱۰ پاچومیس و همکارانش مطالعه آزمایشگاهی را به همراه مدل‌سازی عددی بر روی دو نوع اتصال RBS با هندسه متفاوت برش شعاعی، ترتیب دادند [۷]. هدف از این پژوهش تجدید نظر در مشخصات هندسی RBS به منظور استفاده از آن در آیین‌نامه اروپا بود. در این آزمایش از تیرهای HE 240A و ستون‌های HE 300B استفاده شد که در اروپا از مقاطع متعارف است. پروتکل بارگذاری استفاده شده متفاوت از AISC بود. هم نتایج آزمایشگاهی و هم عددی تایید کردند که عملکرد چرخه‌ای اتصال خمشی تیر با مقطع کاهش یافته زمانی که مفصل پلاستیک در ناحیه RBS رخ می‌دهد، خیلی خوب است. در سال ۲۰۱۱ نقی پور و همکارانش [۸]، شکل پذیری اتصال تیر با مقطع کاهش یافته را در مهارندهای غیر هم محور بررسی کردند. فرض آنها بر این بود که با توجه به اینکه در این نوع مهارند یک طرف به ستون وصل می‌شود و شکست‌ها در این اتصال از نوع ترد است بنابراین در مطالعه شان با استفاده از آنالیز بارافزون سعی کردند که مفصل پلاستیک را از محل این اتصال دور نگه دارند. نتایج نشان داد که با تشکیل زودتر مفصل پلاستیک در ناحیه کاهش یافته، تسلیم اتصال بادی به ستون به تعویق می‌افتد. در سال ۲۰۱۴ سوفیاس و همکارانش [۹] آنالیز اجزاء محدود و آزمایشگاهی روی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته و ورق انتهایی انجام دادند. در این مطالعه از برش شعاعی برای این نوع اتصال استفاده شد و یک مدل تمام مقیاس از این اتصال در آزمایشگاه ساخته شده و نتایج حاصل از این آزمایش با آنالیز اجزاء محدود مقایسه شد. در سال ۲۰۱۴ یوان و همکارانش [۱۰] رفتار و تغییرات طراحی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته در تیرهای مرکب را بررسی کردند. در این تیرها پتانسیل شکست بال پایینی با توجه به افزایش کرنش در این محل افزایش می‌یابد. در این پژوهش ابتدا یک مدل ریاضی برای اتصال تیر با مقطع کاهش یافته در تیرهای مرکب پیشنهاد شد و همچنین با توجه به آثار دال یک ضریب افزایش هم به وجود آمد. در پایان پس انجام آنالیز اجزاء محدود مدل پیشنهادی جواب‌های قابل قبولی ارائه داد.

بررسی شده و برای درستی آزمایی از این آزمایش استفاده شده است. در این آزمایش از پروتکل بارگذاری شکل (۳) استفاده شده بود که برای به دست آوردن مقدار  $\delta_y$  ابتدا بارگذاری یک‌سویه روی اتصال اعمال شده بود. برای ستون از مقطع HE 300B و برای تیر از مقطع HE 180A استفاده شده بود. ویژگی مصالح استفاده شده در این آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. ابعاد و جزئیات اتصال در شکل (۴) و اندازه برش قسمت کاهش یافته در جدول (۲) قابل مشاهده است.

شکل (۴) منحنی لنگر-دوران نمونه آزمایشگاهی

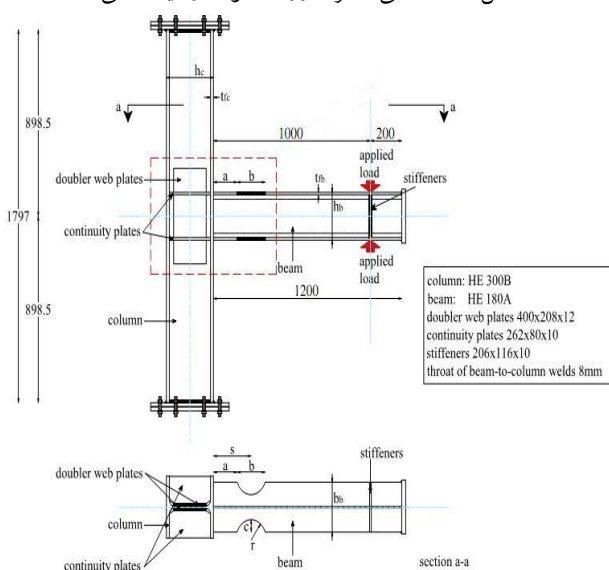


Fig. 4. Dimensions and details of connection

جدول (۱) ویژگی مصالح

Section	Ultimate stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Connection component	No.
HE 180A	430	310	Beam	۱
HE 300B	430	310	Column	۲

Table 1. Material properties

همچنین پژوهشگران در کنار این آزمایش، تحلیل عددی با نرم افزار اجزاء محدود انجام داده بودند. به دلیل متقارن بودن شرایط اتصال، در تحلیل عددی فقط نصف اتصال در نرم افزار مدل شده بود. در اینجا نتایج این تحلیل هم آورده شده است. برای شبکه‌بندی این اتصال، در ناحیه بین ورق‌های پیوستگی از

محدودیت‌های آیین‌نامه "اتصالات از پیش تایید شده"، به کار می‌روند. در سال ۲۰۱۱ سوفیانوپولوس و در [۱۲] پارامترهای موثر بر رفتار لرزه ای اتصال RBS را بررسی کردند. هان و ونگ [۱۳] در مطالعات خود تحلیل پایداری ستون را در اتصال RBS بررسی نمودند. قاسمیه و کیانی [۱۴] در سال ۲۰۱۳ به بررسی تاثیر انعطاف پذیری اتصال RBS در عملکرد لرزه‌ای آن پرداختند. در سال ۲۰۱۴ هوآهنگ و همکارانش [۱۵] رفتار اتصال RBS را برای تیرهای مرکب مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۱۵ رهاورد و همکارانش [۱۶] با استفاده از تحلیل اجزای محدود و ارائه برش خاصی از RBS نشان دادند. حفره‌های ایجاد شده باعث شکل پذیری بیشتر اتصال می شود. اووه و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۱۵ رفتار اتصال RBS را برای ستون‌های از نوع درختی بررسی کردند که نتایج حاکی از شکل پذیر بودن این اتصال است. موریسون و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از یک تکنیک جدید حرارتی (گرم و سرد کردن) و انجام آزمایش، کارایی آن را در اتصال RBS نشان دادند.

شکل (۳) پروتکل بارگذاری [۶]

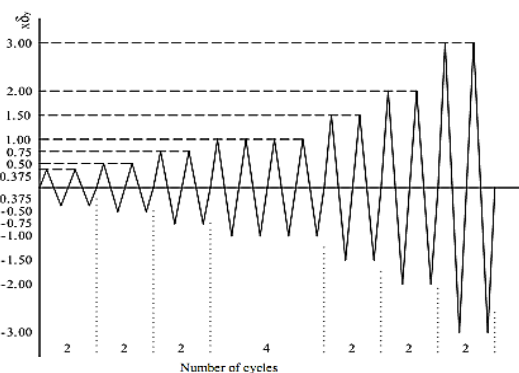


Fig. 3. Loading protocol [6]

### ۳- درستی آزمایی مدل سازی

به منظور ایجاد اطمینان از نتایج به دست آمده از آنالیز اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS، در ابتدا باید با استفاده از اطلاعات موجود از فعالیت‌های آزمایشگاهی، درستی آزمایی انجام شود. در این مطالعه آزمایش انجام شده روی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته به وسیله‌ی پاچومیس و همکارانش [۱۰] [۶]

شکل (۶) نمودار لنگر-دوران نمونه عددی

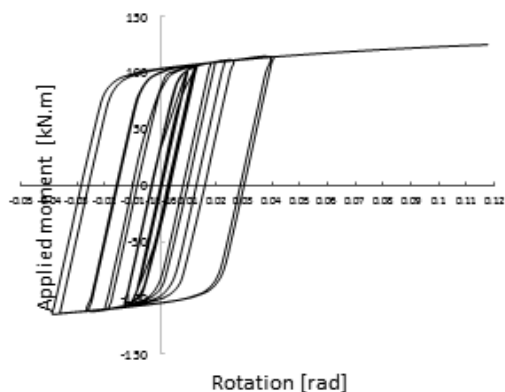


Fig. 6. Moment-rotation diagram for numerical model

شکل (۷) وضعیت دو نمونه آزمایشگاهی و عددی بعد از بارگذاری

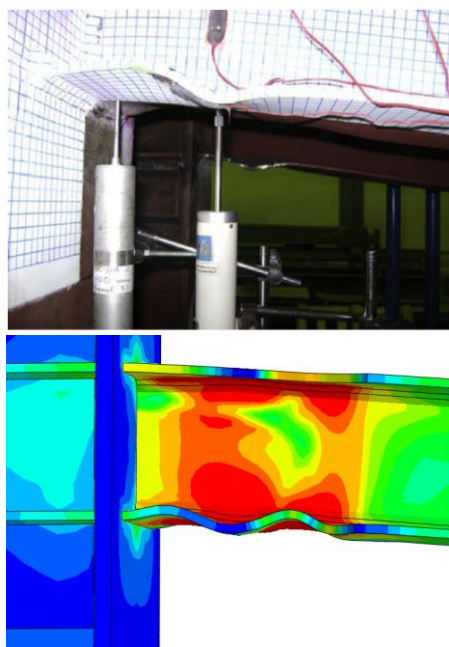


Fig. 7. Status of experimental and numerical specimens after loading

جدول (۳) مقایسه نتایج دو نمونه آزمایشگاهی و عددی

Error (%)	Numerical model	Experimental model	Evaluated case
5.3	115	121.5	Moment at column face (kN.m)
-8.6	9757	8980	Dissipated energy (N.m)
6.6	12.22	13.09	Initial stiffness ( $10^6$ N/m)

Table 3. Comparison results of numerical and experimental specimens

ابعاد کوچکتر شبکه استفاده شد و در ناحیه کاهش یافته، برای شبکه‌بندی از کوچکترین ابعاد استفاده شده بود.

جدول (۲) اندازه برش قسمت کاهش یافته، ابعاد به میلیمتر

Specimen	a			b		c	
	$d_b$	$b_f$	% $b_f$	% $d_b$	% $b_f$	% $b_f$	% $b_f$
RBS	171	180	80	75	144	40	36
				128.125			

Table 2. Measure of cut in reduced section, dimensions in mm

در شکل (۵) نمودار لنگر- دوران در فاصله ۷۵ سانتی‌متری از بر ستون برای نمونه آزمایشگاهی اتصال RBS و در شکل (۶) برای نمونه عددی آورده شده است. مقایسه جزئی‌تر این دو نمونه اتصال در جدول (۳) قابل مشاهده است. همان‌گونه که از اعداد داخل مشاهده می‌شود مقدار لنگر در بر ستون برای نمونه آزمایشگاهی ۱۲۱/۵ kN.m و برای نمونه عددی ۱۱۵ kN.m است که مقدار خطای به دست آمده ۵/۳٪ است، همچنین مقدار خطا برای انرژی اتلاف شده و سختی اولیه در دو نمونه به ترتیب ۸/۶٪ و ۶/۶٪ است. وضعیت اتصال بعد از اعمال بارگذاری در دو نمونه آزمایشگاهی و عددی در شکل (۷) دیده می‌شود. همان‌گونه که از شکل (۷) پیداست مشابهت و همبستگی خوبی بین دو نمونه وجود دارد.

شکل (۵) منحنی لنگر - دوران - نمونه آزمایشگاهی

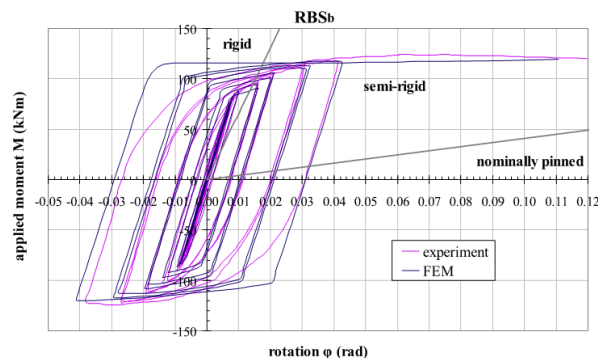


Fig. 5. Moment-rotation diagram in experimental specimen



## ۴- مدل سازی

در این مطالعه، اتصال جدیدی که به صورت اتصال تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) طراحی شد، بررسی شده است. برای انجام این پژوهش ابتدا سازه‌ای فولادی طراحی شده است. سپس برای طراحی اتصال مورد نظر یکی از اتصالات این سازه انتخاب شده و خروجی‌های طراحی استفاده شده است. پس از طراحی دستی این اتصال، مدل اجزاء محدود آن در نرم افزار ABAQUS ایجاد شده و رفتار آن با استفاده از قرارداد بارگذاری چرخه‌ای بررسی شده است. همچنین مطالعه پارامتریک هم با تغییرات ابعاد ناحیه کاهش یافته مانند فاصله برش از بر ستون (a)، طول ناحیه کاهش یافته (b) و همچنین عمق برش (c) انجام شده است. اتصال انتخاب شده به صورت یک اتصال یک طرفه است که ارتفاع ستون آن ۳/۵ متر (فاصله دو نقطه عطف تغییر شکل ستون طبقه بالا و پایین) و طول تیر آن ۲ متر (نصف طول دهانه) است. برای تیر و ستون از فولاد A572 Gr 50 استفاده شد. تمامی سطوح تماس قطعات برای جلوگیری از تداخل آنها با یکدیگر به صورت جداگانه تعریف شده است. نمایی از اتصال مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS در شکل (۸) مشاهده می‌شود.

شکل (۸) اتصال مدل‌سازی شده در محیط ABAQUS

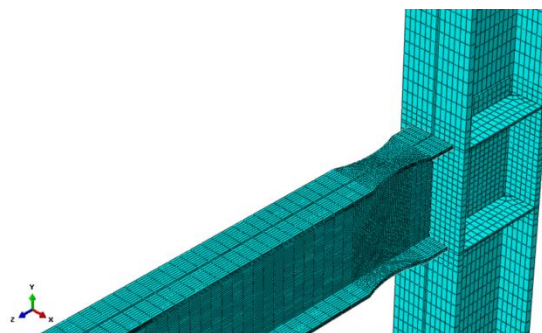


Fig. 8. Connection modeled in ABAQUS

پس از تحلیل نمونه اولیه طراحی شده، مفصل پلاستیک در ناحیه کاهش یافته تشکیل شد. تسلیم اولیه به صورت کمناش بال‌های تیر در مقطع کاهش یافته مشاهده شد، سپس جان تیر در مقطع کاهش یافته دچار کمناش شد. به طور کلی به دلیل عملکرد فیوز مانند ناحیه RBS، تقاضا در ناحیه اتصال کاهش می‌یابد. در شکل (۹) تغییرات تنش فون میسز در اتصال بعد از

بارگذاری و در شکل (۱۰) نمایی شماتیک از اتصال دیده می‌شود. همچنین در شکل‌های (۱۱ تا ۱۳) نمودار نیرو-جاب‌جایی، نمودار لنگر-دوران در خط میانی ستون و نمودار لنگر-دوران پلاستیک آورده شده است.

شکل (۹) نمایی از اتصال بعد از بارگذاری

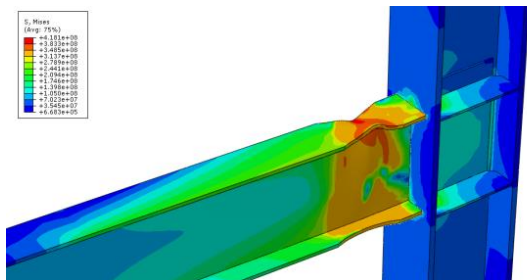


Fig. 9. The connection configuration after loading

شکل (۱۰) نمایی شماتیک از اتصال

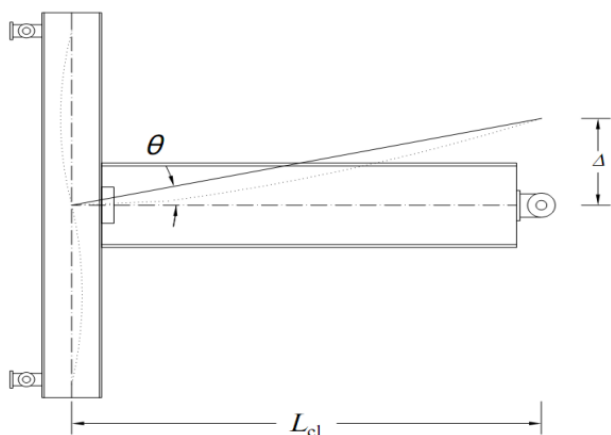


Fig. 10. Schematics of connection

دوران تیر از روش تقسیم جابه‌جایی نوک تیر  $\Delta$  بر فاصله محل اعمال بار تا وسط ستون  $L_{cl}$  به دست آمده است. همچنین لنگر هم از ضرب این فاصله در عکس‌العمل نیرویی محل اعمال بار محاسبه می‌شود.

برای به دست آوردن دوران پلاستیک هم اندازه دوران الاستیک از مقدار دوران کل کاسته شده است، در رابطه (۱) چگونگی محاسبه دوران پلاستیک آورده شده است.

$$\theta_p = \frac{\Delta - P/k_i}{L_{cl}} \quad (1)$$

در این رابطه  $\theta_p$  دوران پلاستیک،  $\Delta$  مقدار جابه‌جایی نوک تیر،  $P$  مقدار نیرو در حد نهایی الاستیک،  $k_i$  سختی اولیه و  $L_{cl}$  فاصله نوک تیر تا وسط ستون است.

برای تایید یک اتصال در آیین‌نامه AISC [۶] از نمودار چرخه‌های لنگر یکسان‌سازی شده، استفاده می‌شود. در این نمودار محور عمودی میزان لنگر در بر ستون تقسیم بر لنگر پلاستیک، و محور افقی، میزان دوران است. طبق آیین‌نامه AISC، اگر میزان نسبت گفته شده در دوران  $0.04$  رادیان بیشتر از  $0.8$  باشد، اتصال مورد آزمایش دارای عملکرد قابل قبولی است. البته در این نوع اتصال خاص به دلیل وجود ناحیه کاهش یافته و ایجاد مفصل پلاستیک در این ناحیه، میزان لنگر در بر ستون نسبت به اتصالی بدون ناحیه کاهش یافته کمتر است و در نتیجه مورد گفته شده لزوماً وجه تمایز خوبی برای تایید عملکرد این نوع اتصال نیست. نمودار گفته شده در شکل (۱۴) آمده است. میزان نسبت لنگر در بر ستون به لنگر پلاستیک در دوران  $0.04$  رادیان،  $0.76$  است پس بر اساس این ضابطه آیین‌نامه AISC عملکرد اتصال قابل قبول نیست.

شکل (۱۴) نمودار یکسان سازی شده لنگر- دوران در بر ستون

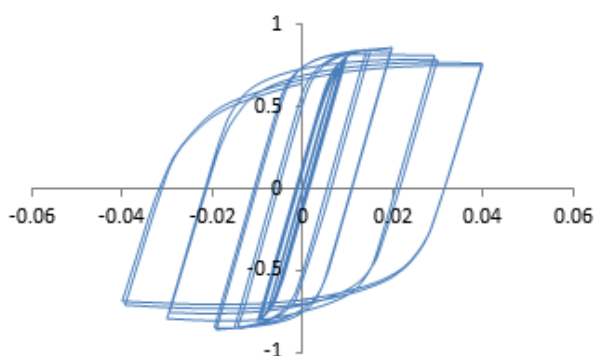


Fig. 14. Matched moment-rotation at the column face

## ۵- مقایسه اتصال RBS با اتصال تیر با مقطع کامل

### کامل

در این بخش اتصال RBS با اتصال تیر با مقطع کامل مقایسه می‌شود. در شکل‌های (۱۵ تا ۱۷) نمودارهای نیرو-جابجایی، لنگر- دوران در وسط ستون و لنگر- دوران پلاستیک اتصال تیر با مقطع کامل آورده شده‌اند. همچنین در شکل (۱۸) وضعیت اتصال بعد از بارگذاری قابل مشاهده می‌باشد. طیف رنگی مربوطه برای توزیع تنش فون میسر می‌باشد.

شکل (۱۱) نمودار چرخه‌های نیرو- جابجایی

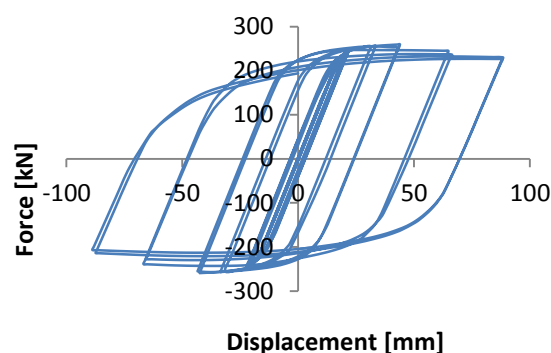


Fig. 11. Hysteresis curve of force-displacement

شکل (۱۲) نمودار چرخه‌های لنگر- دوران

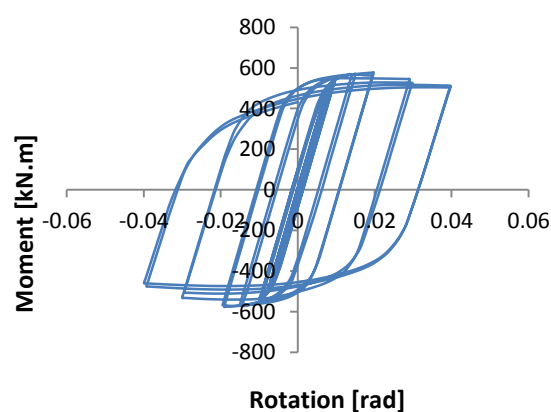


Fig. 12. Hysteresis curve of moment-rotation

مقدار انرژی تلف شده در اتصال RBS که از نمودار نیرو- جابجایی (سطح زیر نمودار) محاسبه می‌شود، برابر  $61632/4$  نیوتن متر است. مقدار لنگر در دوران  $0.04$  رادیان برای اتصال  $512$  kN.m و مقدار لنگر بیشینه  $575$  kN.m است. سختی اولیه اتصال هم  $106 \times 12/88$  N/m محاسبه شده است.

شکل (۱۳) نمودار چرخه‌های لنگر- دوران پلاستیک

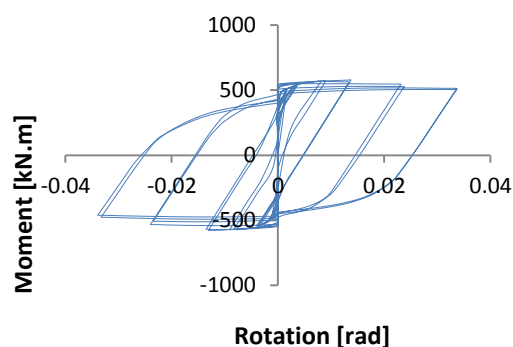


Fig. 13. Hysteresis curve of plastic moment-rotation

در جدول (۴) مقدار لنگر بیشینه، لنگر در دوران ۰/۰۴ رادیان، انرژی تلف شده و سختی اولیه برای هر دو نوع اتصال ارائه شده است. همچنین در شکل (۱۹)، backbone نمودارهای چرخه‌های لنگر- دوران برای اتصالات RBS و اتصال تیر با مقطع کامل آورده شده‌اند.

با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول (۴) و بررسی مقدار تنش در هر دو اتصال مشاهده می‌شود که در اتصال با مقطع کامل، جذب انرژی بدون کنترل موضعی انجام می‌شود و تقاضای وارد شده مستقیماً به ناحیه اتصال و بعد از آن به ستون منتقل می‌شود اما در اتصال با مقطع کاهش یافته، ناحیه کاهش یافته مانند یک فیوز عمل کرده و مانع از رسیدن تقاضای بیش از حد به ناحیه اتصال و ستون می‌شود که همین امر مانع از خرابی ستون شده و ایجاد مفصل پلاستیک را به داخل تیر منتقل می‌کند.

مقدار لنگر در دوران ۰/۰۴ رادیان برای اتصال RBS و برای اتصال تیر با مقطع کامل به ترتیب، ۵۱۲، ۶۰۱ است که اتصال RBS نسبت به اتصال با مقطع کامل، ۵/۱۴٪ افت از خود نشان می‌دهد. همچنین تا دوران ۰/۰۴ رادیان اتصال تیر با مقطع کامل مقدار افتی از خود نشان نمی‌دهد.

جدول (۴) مقایسه اتصالات RBS و تیر با مقطع کامل

اتصال	$M_{max}$ (kN.m)	$M_{0.04rad}$ (kN.m)	Energy dissipation (N.m)	$10^6$ $N/m$ $K_i$
RBS connection	575	512	61632.4	12.88
Intact section	601	601	63812	12.11

Table 4. Comparison of RBS and intact section

شکل (۱۹) نمودارهای چرخه‌های لنگر- دوران برای اتصالات RBS و تیر با مقطع کامل

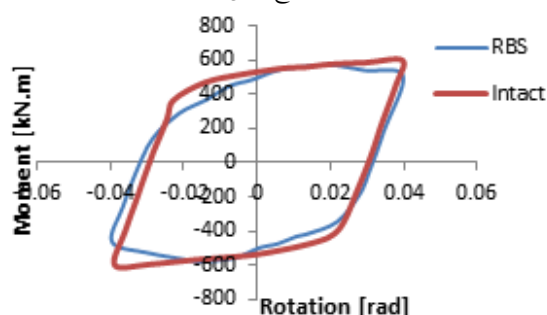


Fig. 19. Moment-rotation curves for RBS and intact section

شکل (۱۵) نمودار چرخه‌های نیرو- جابجایی

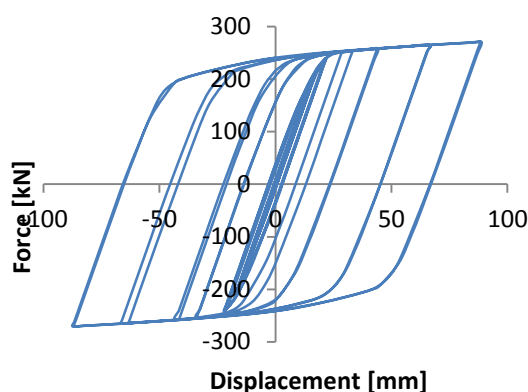


Fig. 15. Hysteresis curve of force-displacement

شکل (۱۶) نمودار چرخه‌های لنگر- دوران

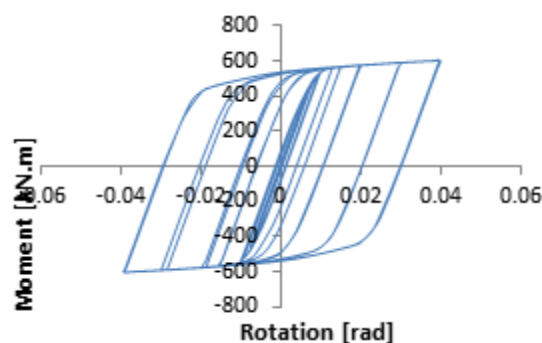


Fig. 16. Hysteresis curve of moment-rotation

شکل (۱۷) نمودار چرخه‌های لنگر- دوران پلاستیک



Fig. 17. Hysteresis curve of plastic moment-rotation

شکل (۱۸) نمایی از اتصال بعد از بارگذاری

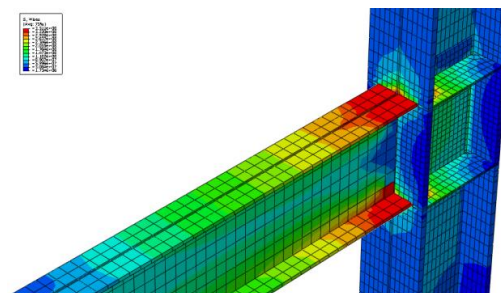


Fig. 18. A view of the connection after loading



این امر اگر چه اندک اما باعث بهبود عملکرد اتصال می‌شود.

### ۶-۲- تغییر طول برش ناحیه کاهش یافته (b)

در این بخش برای بررسی رفتار اتصال تیر با مقطع کاهش یافته، طول ناحیه کاهش یافته در بازه مجاز این تیر تغییر داده شده و نتایج به صورت backbone نمودارهای لنگر- دوران این مدل‌ها ارائه شده است (شکل ۲۱).

شکل (۲۱) مقایسه backbone نمودارهای لنگر- دوران برای طول‌های

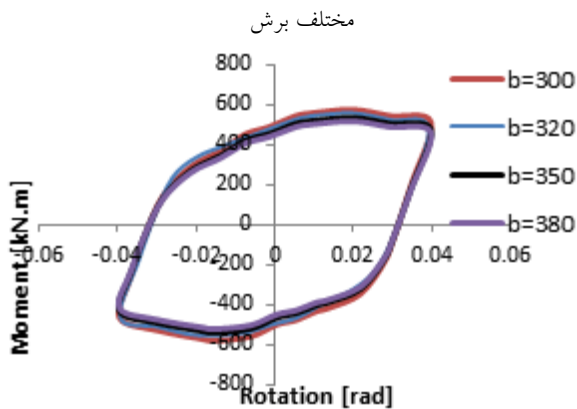


Fig. 21. Comparison of moment-rotation backbone curves for different lengths cut

همان‌گونه که در شکل (۲۱) مشاهده می‌شود به مرور با افزایش طول ناحیه کاهش یافته، مقدار مقاومت اتصال کاهش می‌یابد. این طول در حقیقت طول مفصل پلاستیک است که با افزایش آن اتصال به مرور ضعیف‌تر می‌شود. در جدول (۶) مقدار لنگر در دوران ۰/۰۴ رادیان برای طول‌های مختلف کاهش بال تیر آورده شده است.

جدول (۶) مقایسه اتصالات با طول مختلف برش

b=380 mm	b=350 mm	b=320 mm	b=300 mm	Connection
450	459	471	512	Moment at 0.04 radian

Table 6. Comparison of connections with different lengths cut

### ۶-۳- تغییر عمق برش ناحیه کاهش یافته (c)

در این بخش برای بررسی رفتار اتصال تیر با مقطع کاهش یافته عمق ناحیه کاهش یافته در بازه مجاز برای این تیر تغییر داده شده است. پس از ایجاد مدل‌ها و بارگذاری نتایج به صورت

## ۶- مطالعات پارامتریک

پس از مطالعات انجام شده در مسیر انجام این پژوهش و به دست آوردن نتایج اولیه نمونه طراحی شده، نیاز به انجام تحلیل‌های عددی پارامتریک است. در این بخش انواع مختلف متغیرها، بررسی شده و نتایج آنها ارائه شده است.

### ۶-۱- تغییر محل شروع برش ناحیه کاهش یافته (a)

در این بخش برای به دست آوردن دید کلی از رفتار اتصال تیر با مقطع کاهش یافته محل شروع برش ناحیه کاهش یافته از بر ستون در بازه مجاز این تیر تغییر داده شده و نتایج به صورت backbone نمودارهای لنگر- دوران این مدل‌ها ارائه شده است. این نمودارها در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود. در جدول (۵) مقدار لنگر در دوران ۰/۰۴ رادیان برای طول‌های مختلف شروع برش بال تیر آورده شده است.

شکل (۲۰) مقایسه backbone نمودارهای لنگر- دوران برای فواصل

مختلف برش از بر ستون

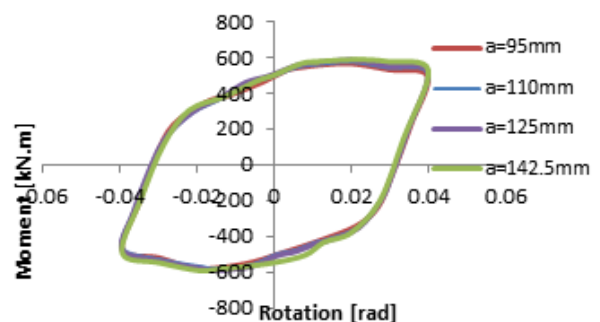


Fig. 20. Comparison of moment-rotation backbone curves for different cutting intervals of column face

جدول (۵) مقایسه اتصالات با تغییر محل شروع برش

a=142.5 mm	a=125 mm	a=110 mm	a=95 mm	Connection
528	520	512	496	Moment at 0.04 radian

Table 5. Comparison of connections by changing the starting cutting

همان‌گونه که در شکل (۲۰) و جدول (۶) مشاهده می‌شود با افزایش طول شروع ناحیه کاهش یافته (a) مقدار مقاومت اتصال افزایش می‌یابد. با افزایش طول این قسمت در حقیقت ایجاد مفصل پلاستیک را به سمت داخل تیر منتقل می‌کنیم که

جابه‌جایی، لنگر- دوران و بقیه نمودارهای لازم برای تایید رفتار اتصال آورده شد. برای بررسی تاثیر هر یک از عوامل دوران، نمودار لنگر- دوران آن عامل و سهم آن در دوران کلی آورده شد. بعد از این مرحله مطالعه پارامتریک و تاثیر تغییرات در قسمت‌های مختلف اتصال بررسی و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شد.

• مشاهده شد که در این نوع اتصال مفصل پلاستیک در ناحیه کاهش یافته و به صورت کمانش در بال و جان تیر به وجود می‌آید. به طور کلی به دلیل عملکرد فیوز مانند ناحیه RBS، تقاضا در ناحیه اتصال کاهش می‌یابد.

• در یک اتصال عوامل متعددی سبب ایجاد دوران در اتصال می‌شوند. یکی از این عوامل، دوران ناشی از تغییر شکل برشی چشمه اتصال، دوران ناحیه کاهش یافته بال تیر از عوامل دیگر می‌باشد. مشاهده شد که دوران قسمت بعد از ناحیه کاهش یافته بخش اصلی دوران کل را شامل می‌شود و هریک از عوامل دیگر نسبتاً نقش کمتری در دوران کل اتصال دارند.

• رفتار اتصال RBS با رفتار اتصال با مقطع کامل بال مقایسه شد و مشخص شد که میزان اتلاف انرژی و لنگر آن نسبت به این اتصال کاهش دارد. در این مقایسه با بررسی مقدار تنش در هر دو اتصال مشاهده می‌شود که در اتصال با مقطع کامل، جذب انرژی بدون کنترل موضعی انجام می‌شود و تقاضای وارد شده مستقیماً به ناحیه اتصال و متعاقباً به ستون منتقل می‌شود اما در اتصال با مقطع کاهش یافته، ناحیه کاهش یافته همانند یک فیوز عمل کرده و مانع از رسیدن تقاضای بیش از حد به ناحیه اتصال و ستون می‌شود که همین امر مانع از خرابی ستون شده و ایجاد مفصل پلاستیک را به داخل تیر منتقل می‌کند.

• با تغییر اندازه محل شروع برش ناحیه کاهش یافته از بر ستون در بازه مجاز این تیر و ایجاد مدل‌های جدید مشاهده شد که با افزایش طول شروع ناحیه کاهش یافته (a) مقدار مقاومت اتصال افزایش می‌یابد. با افزایش طول این قسمت در حقیقت ایجاد مفصل پلاستیک را به سمت داخل تیر منتقل می‌کنیم که این امر اگر چه اندک اما باعث بهبود عملکرد اتصال می‌شود.

• با تغییر طول ناحیه کاهش یافته در بازه مجاز این تیر (b) مشاهده شد که به مرور با افزایش طول ناحیه کاهش یافته مقدار

backbone نمودارهای لنگر- دوران این مدل‌ها ارائه شده است. شکل (۲۲).

شکل (۲۲) مقایسه backbone نمودارهای لنگر- دوران برای عمق‌های

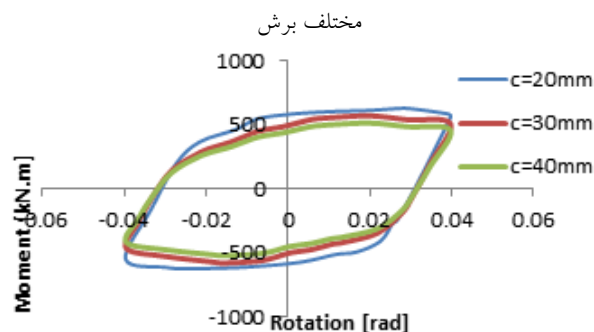


Fig. 22. Comparison of moment-rotation backbone curves for different cutting depth

همان‌گونه که در شکل (۲۲) ارائه شده است با افزایش عمق ناحیه کاهش یافته مقدار مقاومت اتصال کاهش می‌یابد. با کاهش این عمق در حقیقت بخش کمتری از بال تیر باقی می‌ماند و بنابراین بخشی از تیر که باید در مقابل خمش مقاومت کند، کوچکتر می‌شود. در جدول (۷) مقدار لنگر در دوران ۰/۰۴ رادیان برای عمق‌های مختلف کاهش بال تیر آورده شده است.

جدول (۷) مقایسه اتصالات با عمق مختلف برش

c=40 mm	c=30 mm	c=20 mm	Connection
460	512	587	Moment at 0.04 radian

Table 7. Comparison of connections with different cutting depth

## ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک اتصال جدید به نام اتصال تیر با مقطع کاهش یافته طراحی شده و سپس رفتار آن تحت بارگذاری چرخه‌ای در محیط نرم‌افزار ABAQUS بررسی شده است. ابتدا درستی آزمایشی مدل آزمایشگاهی برای حصول اطمینان از نتایج عددی به دست آمده در این پژوهش انجام شده است. بعد از طراحی دستی اتصال نمونه تحت بارگذاری‌های مربوطه تحلیل حساسیت روی شبکه‌بندی مدل انجام شده است. سپس برای بررسی رفتار اتصال نمودارهای چرخه‌ای نیرو-

analysis and FEM simulation. *Journal of Engineering Structures*, 31(1), 216-223.

[8] Naghipour M., Javadi N. & Naghipour A. 2011 Investigation of RBS connection ductility in eccentrically braced frame. *Procedia Engineering*, 14, 743-752.

[9] Sofias C. E., Kalfas C. N. & Pachoumis D. T. 2014 Experimental and FEM analysis of reduced beam section moment endplate connections under cyclic loading. *Engineering Structures*, 59, 320-329.

[10] Huang Y., Yi W., Zhang R., Xu M. 2014 Behavior and design modification of RBS moment connections with composite beams. *Engineering Structures*, 59, 39-48.

[11] Applied Technology Council 1992 Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures, Redwood City, CA.

[12] Sophianopoulos D. S. & Deri A. E. 2011 Parameters affecting response and design of steel moment frame reduced beam section connections: An overview. *International Journal of Steel Structures*, 11(2), 133-144.

[13] Han M.-L. & Wang Y. 2012 Elastic stability analysis of column in steel frames with reduced beam section connections. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 29, 255-261.

[14] Ghassemieh M. & Kiani J. 2013 Seismic evaluation of reduced beam section frames considering connection flexibility. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(16), 1248-1269.

[15] Rahnavard R., Hassanipour, A. & Siahpolo N. 2015 Analytical study on new types of reduced beam section moment connections affecting cyclic behavior. *Case Studies in Structural Engineering*, 3, 33-51.

[16] Oh K., Lee K., Chen L., Hong S.-B. & Yang, Y. 2015 Seismic performance evaluation of weak axis column-tree moment connections with reduced beam section. *Journal of Constructional Steel Research*, 105, 28-38.

[17] Morrison M., Schweizer D. & Hassan T. 2015 An innovative seismic performance enhancement technique for steel building moment resisting connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 109, 34-46.

مقاومت اتصال کاهش می‌یابد. این طول در حقیقت طول مفصل پلاستیک است که با افزایش آن، اتصال به مرور ضعیف‌تر می‌شود.

برای بررسی رفتار اتصال تیر با مقطع کاهش یافته عمق ناحیه کاهش یافته در بازه مجاز برای این تیر تغییر داده شد. پس از انجام بارگذاری و تحلیل مدل‌ها مشاهده شد که با افزایش عمق ناحیه کاهش یافته مقدار مقاومت اتصال کاهش می‌یابد. با کاهش این عمق در حقیقت بخش کمتری از بال تیر باقی می‌ماند و بنابراین بخشی از تیر که باید در مقابل خمش مقاومت کند، کوچکتر می‌شود.

## References

## ۸- مراجع

[1] FEMA-267, 1995 *Interim Guidelines, Inspection, Evaluation, Repair, Upgrade and Design of Welded Moment Resisting Steel Structures*, SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

[2] FEMA-350, 2000 *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

[3] American Institute of Steel Construction, Inc. (AISC) 2010 *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, ANSI/AISC 358-10, AISC, Chicago, IL.

[4] Carter C. & Iwankiw N. 1998 Improved ductility in seismic steel moment frames with dogbone connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 46, 448-461.

[5] Shen J., Kitjasateanphun T. & Srivanich W. 2000 Seismic performance of steel moment frames with reduced beam sections. *Journal of Engineering Structures*, 22(8), 968-983.

[6] El-Tawil S. & Deierlein G. 2001 Nonlinear analyses of mixed steel-concrete moment frames, I: beam-column element formulation. *Journal of Structural Engineering*, 127(6), 545-557.

[7] Pachoumis D. T., Galoussis E. G., Kalfas C. N. & Christitas, A. D. 2009 Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: Experimental

## Effect of Reduced Section of RBS Connection on Intact Section

J. Rafiei<sup>1</sup>, I. Mansouri<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. Student, Structural Engineering, Islamic Azad University-Roodehen Branch

2- Assist. Prof., Faculty of Civil Eng., Birjand University of Technology

[mansouri@birjandut.ac.ir](mailto:mansouri@birjandut.ac.ir)

### Abstract:

Structural design for huge seismic events must explicitly consider the influences of response after the elastic range. The special moment frame (SMF) steel structures are designed such that the frame beam-column joints are able to absorb substantial energy through large rotational deformation. In this way, a major contribution occurs in the displacement ductility capacity of the system. One of the connections which is designed based on the concept of weakening the beam is the Reduced Beam Section (RBS) connection. The beam is weakened near its end, by trimming some parts of the flanges near the column face. In this way, the formation of the plastic hinge forcefully occurs in this region, because the RBS area acts as a fuse. Recent experimental results on RBS steel moment connections revealed that these connections tend to perform poorly by the early brittle fracture of the beam flange at the weld access hole. The measured strain data imply that the higher probability of base metal fracture in bolted web joints is -partly- related to the increased demand on the beam flanges. This demand is created due to the slippage of web bolt and the actual load transfer mechanism which is different from the one expected in connection design. Improvement methods include: using a better welding material and controlled welding process, using haunches at the beam-column interface (primarily intended for retrofitting of damaged frames), using cover plates on the beam flanges at the beam-column interface, and using a reduced beam section (RBS) at a prescribed distance from the column face. The RBS appears to be the most economic method and is already being used by structural engineers for welded SMRF structures in seismic zones. In this study, cyclic performance of RBS connection is studied in the numerical environment of ABAQUS. The investigated connection is a half-scale single-sided beam-to-column assembly. The cyclic load is applied at the tip of the beam. Pinned boundary condition is applied at the top and bottom of the column and is restricted out of plane displacement of the beam. The loading protocol proposed by AISC is used for cyclic loading. In parametric study of this connection, the effects of changing dimensions of the reduced area are investigated. Although the model gives reasonable predictions for the material deformation in the RBS, the designer must consider the material limit states, as this model does not predict local buckling or fracture in the RBS. Results reveal that the moment capacity of RBS connection is less than the moment capacity of a corresponding intact section connection. However, no plastic hinge is formed in intact section connection.

**Keywords:** Steel Connection, Reduced Beam Section, Cyclic Behavior, Finite element analysis.