

مطالعه رفتار چرخه‌ای اتصال قابهای خمشی فولادی ویژه با استفاده از فیوز کمانی شکل دوبل و معکوس در بال تیر

سید مهدی زهرائی*، استاد، قطب علم مهندسی و مدیریت زیرساختهای عمرانی، دانشکده عمران، دانشگاه

تهران، تهران، ایران

ابوذر صالح، استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفرش

سیدرسول میرقادری، استادیار دانشکده عمران - دانشگاه تهران

mzahrai@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۴/۱۰/۲۰

چکیده:

بروز گسیختگی های ترد غیر قابل انتظار در اتصالات قاب خمشی ویژه طی زلزله‌های نثریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) خواص شکل پذیری و قابلیت جذب و استهلاك انرژی القایی، ناشی از زلزله را در این نوع سیستم سازه‌ای با چالش مواجه نمود، بطوریکه ایجاد شکل پذیری و توانایی مقاومت در برابر تغییر شکلهای بزرگ چرخه‌ای مورد اهمیت قرار گرفت. عوامل خرابی در این اتصالات، تنشهای بزرگ متمرکز در نواحی جوشی اتصال و آسیب پذیری اتصال در تقاضاهای شکل پذیری زیاد، مطرح گردید و استانداردهای طراحی با فرض ایجاد ناحیه مستهلک کننده انرژی، بر روی تیر و در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون همراه گردید. لذا در همین راستا، در طرح حاضر دو اتصال نوین خمشی تیر به ستون با مقطع کاهش یافته که با ایجاد برش در بال و بخشی از جان تیر و با بکارگیری قطعات کمانی شکل بعنوان بال تیر در این قسمت بدست می‌آید در دو حالت، استفاده از کمان دوبل (DAFS) و استفاده از کمان معکوس (AFS) مورد بررسی قرار می‌گیرد و با انجام چهار مدل عددی از اتصالات معرفی شده، به کمک نرم‌افزار ABAQUS6.10 پرداخته و نتایج عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج بررسی نشان می‌دهد که استفاده از قطعات کمانی شکل در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون در بال تیر، با تضعیف مقطع در این ناحیه و مستهلک نمودن انرژی زلزله، ضمن ایجاد فیوز شکل پذیر می‌تواند تا ۸٪ تغییر مکان نسبی در تیر را، بدون کاهش مقاومت خمشی در وجه اتصال، تجربه نماید. در این بین استفاده از قطعه کمانی شکل معکوس، از نقطه نظر مقاومت خمشی الاستیک و معیار سختی تیر نیز گزینه مناسبتری است بطوریکه در این خصوص با مدل‌های RBS برابری می‌نماید. بدلیل عدم مناسب بودن اتصال RBS در تیر ورقها و تیرهای بال پهن، بخاطر تشدید پارامترهای ناپایداری در این نوع اتصال، استفاده از ایده بکارگیری کمان معکوس در بال تیر ضمن برقراری شرایط پذیرش اتصال صلب بر اساس AISC2010، مقاومت در برابر کمانش جانبی-پیچشی جان و کمانش موضعی جان و بال را بهبود می‌بخشد و می‌تواند بعنوان گزینه مناسب در تیر ورقها مطرح گردد..

کلید واژگان: قاب خمشی فولادی ویژه، رفتار لرزه ای، مقطع تضعیف شده، فیوز کمانی شکل در بال تیر

۱- مقدمه

تجربیات صورت گرفته طی زلزله‌های تاثیرگذاری مانند زلزله نرثریج و کوبه باعث شد که بحث رفتار لرزه ای سازه های فولادی در سالهای اخیر مورد چالش جدی در سطح بین المللی قرار گیرد. روشها و ایده‌های متفاوتی برای کاهش تقاضا در محل اتصال تیر به ستون ارائه گردید که یک راهبرد اساسی آن تضعیف عمدی مقطع تیر متصل به ستون می باشد که با این روش، مفصل پلاستیک در مقطع تضعیف شده تشکیل و این کاهش موضعی باعث می‌گردد که تقاضای وارده بر روی اجزاء اتصال شامل ناحیه چشمه اتصال، ورقهای پیوستگی و همچنین جوشهای اتصال تیر به ستون کاهش یافته و در پی آن احتمال آسیب پذیری اجزاء اتصال و جوشهای نفوذی نیز کاهش پیدا کند. مطالعات صورت گرفته در خصوص تضعیف عمدی مقطع تیر را می‌توان به صورت زیر دسته بندی نمود:

الف- اتصالات RBS: ایده اتصال RBS یا به اصطلاح اتصال استخوان سگ^۱، توسط یک شرکت اروپایی بنام آربد^۲ در سال ۱۹۹۲ در آمریکا به ثبت رسید. کمیته SAC نتایج مربوط به ۴۵ آزمایش بر روی اتصال RBS را که بعد از زلزله نرثریج بین سالهای ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸ انجام شده و به خوبی مستندسازی شده بودند را ارائه کرده است [۱]. چن^۳ و چائو^۴ در سال ۲۰۰۱ نشان دادند که نسبت ظرفیت لنگر مثبت به لنگر منفی در اثر حضور دال می‌تواند به ۱/۱۸ برسد و در اثر عمل مرکب کرنشهای بیشتری به بال تحتانی وارد می‌گردد [۲]. جونز^۵ در سال ۲۰۰۲ با انجام ۸ تست آزمایشگاهی، نشان داد که وجود دال بتنی و افزایش کرنشهای بال تحتانی تیر با مقطع کاهش یافته، موجب افزایش حساسیت بال تحتانی به کمانش جانبی و سایر مودهای زوال حساس به کرنش می‌گردد [۳]. جی شن^۶ و همکاران در سال ۲۰۰۲، در تحقیقی با رویکرد عددی و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به بررسی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته به ستون عمیق پرداخته و اثرات وجود دال و تیرهای عرضی را بعنوان مهار جانبی بررسی نمودند [۴]. رودر^۷ در سال ۲۰۰۲، بیان نمود که گسترش تغییر شکل برشی ناحیه چشمه اتصال در اتصال RBS هم می‌تواند موجب افزایش تقاضای شکل پذیری بر روی جوش اتصال بال ستون و سوراخ دسترسی جوش گردد [۵]. رایکلز در سال ۲۰۰۴، نشان داد که چشمه اتصال قوی موجب افزایش پیشش ستون، افزایش تقاضای مهارهای جانبی تیر و کاهش ظرفیت و افت در رفتار چرخهای اتصال می‌گردد و چشمه اتصال ضعیف نیز احتمال شکست ها در بالستون، جوشها و سوراخ دسترسی را افزایش می‌دهد که در این وضعیت استفاده از چشمه اتصال متعادل در خصوص این اتصال پیشنهاد شده است [۶]. لی^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۵ با انجام ۸ آزمایش تمام مقیاس، نشان دادند که چشمه اتصال قوی موجب می‌گردد که کل اتلاف انرژی در ناحیه کاهش یافته انجام گردد و

بنابراین، این ناحیه دچار کمانش‌های موضعی و کمانش جانبی پیششی قابل ملاحظه‌ای می‌شود که منجر به پیشش ستون خواهد شد و اتصال را از تامین شکل پذیری مورد نیاز باز می‌دارد. در اتصالات دارای چشمه اتصال ضعیف، رفتار چرخه‌ای بسیار پایداری مشاهده می‌شود، اما نمونه در تغییر شکل‌های زیاد دچار شکست می‌گردد و تغییر شکل‌های ناحیه چشمه اتصال موجب خمش برون صفحه‌ای بالهای ستون، در چهار گوشه ناحیه چشمه اتصال می‌گردد [۷]. ژنگ^۹ و رایکلز^{۱۰} در سال ۲۰۰۶، در تحقیقی آزمایشگاهی بر روی ۶ نمونه تمام مقیاس صلیبی، ابعاد مختلف رفتاری اتصال شامل نوع اتصال تیر به ستون، مقطع ستون، اثر دال کف، مقاومت ناحیه چشمه اتصال و لاغری جان را مورد بررسی قرار داده‌اند [۸]. مصلحی تبار و دیلمی، نیز به نتایج مشابهی با تحقیقات لی و همکاران دست یافتند [۱۰]. هان^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۰۹، روش طراحی جدیدی براساس لحاظ نمودن اثر پیچها و برش سهم بالهای تیر در مقاومت خمشی، برای محاسبه دقیق مقاومت خمشی در وجه ستون و اطمینان از تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه کاهش یافته ارائه کرده‌اند [۱۱]. پاچومیس^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۱۰، رفتار چرخه‌ای اتصالات خمشی فولادی از نوع RBS بر روی پروفیل‌های استاندارد اروپا را بصورت آزمایش و شبیه سازی با اجزا محدود، مورد بررسی قرار دادند [۱۲].

ب- اتصال با کاهش مقطع در جان تیر: در نشریه FEMA350 نوع جدیدی از اتصال کاهش یافته مطرح شده است که در آن کاهش تقاضای وجه ستون از طریق ایجاد سوراخهای دایره‌ای بزرگی در جان تیر و در نزدیکی اتصال فراهم می‌گردد. سائیز سوراخ به اندازه‌ای است که جاری‌شدگی جان در طول دهانه اتفاق می‌افتد و ناحیه اتصال در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند [۱۳]. پراسادا راتو^{۱۴} و ساتیش کومار^{۱۴} به بررسی یک اتصال با جان برش خورده با عنوان Rectangular Hollow Sections (RHS) پرداخته‌اند. در این بررسی از اتصال تیر ناودانی به ستون ناودانی استفاده شده است. اتصال با دو نبشی اتصال در بالا و پایین تیر همراه است که اتصال نبشی به بال تیر با چند پیچ و به بال ستون با جوش انجام می‌پذیرد. در مقطع جان تیر نیز سوراخ مستطیلی ایجاد شده که عنوان اتصال نیز از اینجا گرفته شده است. ضخامت و عرض نبشی اتصال از پارامترهای اصلی تاثیر گذار طراحی شناخته شدند و نسبت عرض به ضخامت در جان ستون، بعنوان عامل کنترل‌کننده در سختی اولیه تعیین گردید. عوامل لقی در برش و شدت تنش نیز، تاثیر عمیقی بر مقدار ظرفیت خمشی نهایی دارد. نتایج نشان داد که میزان شکل پذیری با افزایش نسبت عرض نبشی اتصال، به عمق تیر افزایش می‌یابد [۱۴].

استفاده از قطعات کمانی شکل دابل و معکوس در بال تیر، به کمک نسخه ABAQUS6.10 پرداخته می‌گردد و ضمن بررسی نتایج، جهت صحت سنجی، به مقایسه با نتایج کارهای مشابه عددی و آزمایشگاهی دیگران پرداخته و مزایا و محدودیتهای این ایده‌های پیشنهادی، در مقایسه با سایر روش‌ها مورد بررسی و ارزیابی کمی و کیفی قرار می‌گیرد.

۲- معرفی مدل‌های عددی

۲-۱- معرفی ریز سازه انتخابی

با توجه به اینکه، استفاده از قطعات کمانی شکل در بال تیر و کاهش ارتفاع جان، از ادبیات تحقیق کم برخوردار است و از آنجا که، اتصال با روش کاهش مقطع در بال تیر (RBS) و کارایی آن در ابعاد مختلفی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است، در اینجا زیر سازه مورد استفاده در تحقیق عددی و آزمایشگاهی پاچومیسو همکاران در سال ۲۰۱۰، که بررسی رفتار چرخه‌های اتصالات خمشی فولادی RBS بر پروفیل‌های اروپایی بصورت آزمایش و شبیه‌سازی با اجزا محدود در برنامه ABAQUS پرداخته‌اند [۱۲]، انتخاب گردیده است. شکل ۱ و جداول ۱ و ۲، هندسه مدل مورد مطالعه پاچومیسو و همکاران را نشان می‌دهد. در این زیر سازه، وسط ستون تا وسط ستون بالایی، بعنوان المان قائم و نیمی از تیر بعنوان المان افقی انتخاب گردیده است. در اینجا ابعاد هندسی انتخابی برای مدل تحلیلی، به دلیل برقراری شرایط مشابه، دارای مقیاس کامل نسبت به ابعاد هندسی استاندارد زیر سازه نشان داده شده در شکل ۱ است.

۲-۲- هندسه مدل و معرفی المان تحلیلی

تحلیل اتصالات با بکارگیری مدل سه بعدی اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS6.10 انجام می‌گردد. مطابق مدل پاچومیسو، تیر از مقطع HE180A به طول ۱۲۰ سانتیمتر که در فاصله یک متری آن از محل اتصال به ستون، بار چرخه‌ای اعمال می‌گردد تشکیل شده است. جهت تقویت در برابر بار متمرکز نیز، از دو ورق سخت کننده، ۱۰*۱۱۶*۲۰۶ میلی‌متر در دو طرف جان تیر در محل اعمال بار چرخه‌ای استفاده می‌گردد. همچنین در انتهای تیر بدلیل ایجاد شرایط پیوستگی، از صفحه انتهایی به ضخامت ۲ سانتیمتر استفاده گردیده است. ستون نیز از مقطع HE300B به طول ۱۷۹/۷ سانتیمتر که دارای دو صفحه جان مضاعف ۱۲*۲۰۸*۴۰۰ میلی‌متر و چهار ورق پیوستگی ۱۰*۸۰*۲۶۲ میلی‌متر است. اتصال در دو سر ستون، بصورت مفصلی است. در مطالعه پاچومیسو، تیر مورد تحقیق بصورت RBS بوده که در اینجا با همان مشخصات ابعادی، با برش بر روی بال و قطعی از جان از قطعات کمانی شکل در دو حالت و چهار مدل به شرح زیر، استفاده شده است:

aSeán Wilkinson- 3Na Yang- 2Qingshan Yang-1

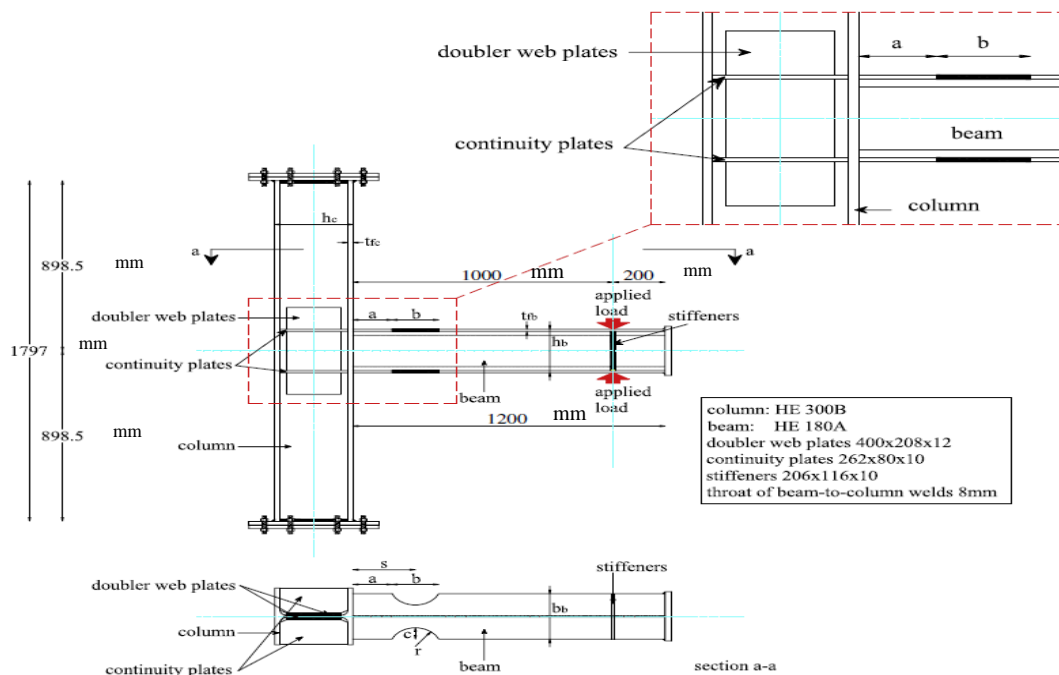
گینگشان یانگ^۱ و نایانگ^۲، طرح ایجاد حفره دایره‌ای شکل در مقطع جان را مورد بررسی قرار دادند و ضمن بررسی مدل عددی یک تیر ورق با فواصل مختلف بارگذاری ۲، ۳، ۴ و ۵ متری و با شعاع سوراخ دایره‌ای متفاوت، به بررسی آزمایشگاهی یک مدل دو طبقه با مقیاس کامل نیز پرداختند [۱۵].

ج- اتصالات با جان آکاردئونی: میر قادری، ترابیان و ایمان پور در مطالعه‌ای، اتصال خمشی تیر با مقطع کاهش یافته توسط جان موج دار با رویکرد آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه از ساده‌ترین شکل ممکن برای ورق موج‌دار استفاده شده است و دو ورق L شکل بصورت متقارن نسبت به صفحه جان به عنوان ورق موج دار در نظر گرفته شده است که به جای جان حذف شده در اتصال اجرا می‌گردند. این اتصال به دلیل مقاومت برون صفحه‌ای ورقهای موج‌دار که به مراتب از مقاومت برون صفحه‌ای جان صاف بیشتر است، در ناحیه مفصل پلاستیک موجب بهبود شرایط پایداری جان و همچنین پایداری مفصل پلاستیک می‌گردد. مقطع ایجاد شده Accordion Web (RBS(AW-RBS) نامگذاری و از دو نمونه جهت تست آزمایشگاهی استفاده گردیده است. نتایج هر دو تست بدون مشاهده کاهش مقاومت تا تغییر مکان نسبی ۸٪ ستون همراه بوده است [۱۶].

د- کاهش در ارتفاع جان تیر: سین ویلکیسون^۳ و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی یک دیتیل جدید که با کاهش ارتفاع جان در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون بدست آمده است، پرداخته‌اند. با توجه به اینکه، کاهش در ارتفاع تیر، اثر سریعی بر کاهش مدول پلاستیک دارد، با کاهش اندکی در ارتفاع، مقطع ضعیفی در تیر تشکیل می‌شود. همچنین نتایج آزمایشگاهی ظرفیت چرخش پلاستیک بیش از ۵٪ را تأیید نمود [۱۷].

مقایسه روش طراحی و ساخت سازه‌های فولادی در ایران، با استانداردهای معتبر و بررسی جزئیات ارائه شده در آئین نامه‌های داخلی نشان‌دهنده نیاز جدی به بازنگری و ارائه اتصالات مناسب و تأیید این اتصالات است. لذا مواردی چون، افزایش مطالعات در زمینه رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی در کشور، تأیید اتصالات قابل کاربرد در کشور، ارائه دستورالعمل‌های مناسب جهت طراحی و جزئیات بندی اعضاء و اتصالات، در سازه‌های فولادی براساس مطالعات و آزمایشهای تأیید و همچنین ارائه اتصالات مناسب با داشتن سهولت اجرایی و هزینه اجرایی کم و مناسب با روشهای ساخت در ایران را می‌توان بعنوان مجموعه تلاشهای مورد نیاز مطرح نمود.

لذا در راستای ضرورت ایجاد شده و ارتقا اتصالات رایج در کشور، در این مقاله، اتصال نوین با مقطع کاهش یافته توسط قطعات کمانی شکل در بال تیر، مورد مطالعه عددی قرار می‌گیرد. برای انجام مطالعه حاضر، به انجام مدل‌سازی عددی از هر دو اتصال پیشنهادی



شکل ۱- هندسه زیر سازه مدل RBS مورد مطالعه پاچومیس و همکاران [۱۲]
 جدول ۱- مشخصات ابعادی مدل RBS مورد مطالعه پاچومیس و همکاران [۱۲]

Table 4
RBS region dimensions.

Specimens	b_f (mm)	d_b (mm)	a		b		g		s (mm)	r (mm)
			% b_f	(mm)	% d_b	(mm)	% b_f	(mm)		
RBS _a	180	171	80	144	75	128.25	40	36	208.125	75.11

جدول ۲- مشخصات هندسی تیر و ستون در مدل RBS مورد مطالعه پاچومیس و همکاران [۱۲]

European beams in accordance with Euronorm 53-62.

Designation	Depth of section h (mm)	Width of section b (mm)	Thickness		Root radius r (mm)	Area of section A (cm ²)	Mass per metre G (kg/m)	Second moment of area	
			of web, t_w (mm)	of flange, t_f (mm)				Axis y-y I_y (cm ⁴)	Axis z-z I_z (cm ⁴)
HE 180A	171	180	6	9.5	15	45.3	35.5	2510	925
HE 300B	300	300	11	19	27	149	117	25170	8563

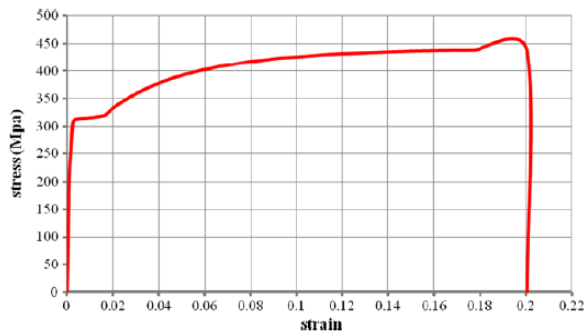
استفاده شده است (شکل ۲). تفاوت دو مدل ۲۰۱ پیشنهادی در اتصال قطعات کمانی با جان تیر است در مدل شماره ۱ - (DAFS1: Double Arc Flange Section1) بین جان تیر و کمان نزدیک به آن اتصالی برقرار نگردیده است و در مدل شماره ۲ (DAFS2) کمان و جان به هم متصل و باقید Tie در نرم افزار مقید گردیده اند.

معرفی مدل شماره ۲۰۱: مطابق مشخصات ارائه شده جهت اتصال، با برش قسمتی از بال به طول ۱۲/۸ سانتیمتر (از ابتدای فاصله ۱۴/۴ سانتیمتری وجه ستون) و قطعی از جان تیر به عمق ۲ سانتیمتر از دو قطعه کمانی، هر یک به عمق ۲ سانتیمتر، ضخامت ۰/۸ سانتیمتر و با عرضی به اندازه عرض بال تیر که بر روی طولی از تیر به اندازه ۱۲/۸ سانتیمتر (مشابه طول RBS مورد مطالعه پاچومیس) بصورت دابل که ایجاد یک مقطع بیضی شکل می نمایند،

در این مدل با هدف بررسی رفتار اجزاء مدل، جوشهای اتصال بصورت صریح مدلسازی نشده و با قید Tie به هم مقید گردیده‌اند. شرایط تکیه‌گاهی دو سر ستون، مفصل تعریف و حرکت در سه جهت مهار می‌گردد. جهت مدل کردن تکیه‌گاه جانبی نیز، حرکت خارج از صفحه جان تیر و ستون مهار گردیده است.

۲-۳- خصوصیات مصالح

با توجه به وارد شدن مصالح به محدوده غیر خطی رفتار، تحلیلها باید، با در نظر گرفتن اثر غیر خطی مادی انجام گردند. برای معرفی مشخصات مکانیکی، از نمودار ارائه شده تنش- کرنش در تحقیق پاچومیس و همکاران [۱۲] با نوع سخت شونده کینماتیک، به صورت دو خطی استفاده شده است که در آن شیب ناحیه ارتجاعی رفتار (تا تنش حد جاری شدگی F_y) برابر مدول یانگ مصالح ($E=2.03e+6 \text{ kg/cm}^2$) و شیب ناحیه رفتار غیر خطی مصالح از اتصال نقطه تسلیم به نقطه نهایی در نمودار تنش-کرنش بدست آمده است. در کلیه تحلیلها ضریب پواسون برای مصالح فولاد برابر 0.3 می‌باشد. در اینجا تنش تسلیم (F_y) و تنش نهایی (F_u) به ترتیب برابر 3100 و 4500 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در نظر گرفته شده است. همچنین کرنش تسلیم (ϵ_y) و کرنش نهایی (ϵ_u) به ترتیب 0.0012 ، 0.2 لحاظ گردیده است.

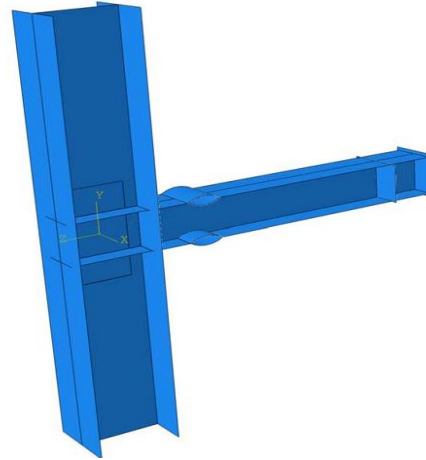


شکل ۴ - مشخصات مکانیکی فولاد بکار گرفته شده در مدل

RBS مورد مطالعه پاچومیس و همکاران [۱۲]

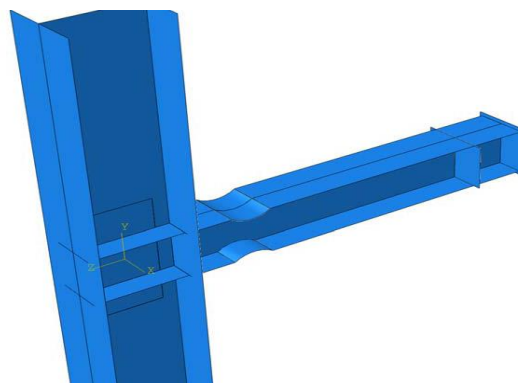
۲-۴- انتخاب نوع بارگذاری و تحلیل

برای مدل مفروض، تحلیل استاتیکی (Static General) در نظر گرفته شده است. در بخش بارگذاری (load) نیز، ضمن برقراری شرایط تکیه‌گاهی، به معرفی نحوه تغییر مقدار بارگذاری بار چرخه‌ای طبق بخش 6.2 استاندارد [AISC Seismic Provision 18] که به صورت جدول ۳ و مشابه کار پاچومیس است، بر روی تیر و به فاصله 100 سانتیمتری از وجه ستون انجام شد. بارگذاری تا زاویه تغییر مکان نسبی محل اعمال بار در تیر، به میزان 0.08 رادیان انجام گردیده است. بدین ترتیب که برای هر یک از زوایای 0.00375 ، 0.005 و 0.0075 رادیان به ترتیب ۶ سیکل چرخه‌ای، برای زاویه نسبی 0.01 رادیان، ۴ سیکل چرخه‌ای و برای زوایای



شکل ۲- مدل پیشنهادی DAFS (Double Arc Flange Section)

معرفی مدل شماره ۳ و ۴: در اینجا فقط از یک قطعه کمانی بصورت معکوس در هر دو بال تیر استفاده شده است، لذا با برش قسمتی از بال به طول $12/8$ سانتیمتر (از ابتدای فاصله $14/4$ سانتیمتری وجه ستون) و قطعی از جان تیر به عمق 2 سانتیمتر از یک قطعه کمانی، به عمق 2 سانتیمتر، با عرضی به اندازه عرض بال تیر در دو مدل یکی با ضخامت 0.95 سانتیمتر (AFS1) (Arc Flange Section 1) مشابه ضخامت بال تیر HE180A. جهت قطعه کمانی شکل معکوس و دیگری با ضخامت بیشتر، به میزان $1/5$ سانتیمتر (AFS2) مورد تحلیل عددی قرار می‌گیرد (شکل ۳).

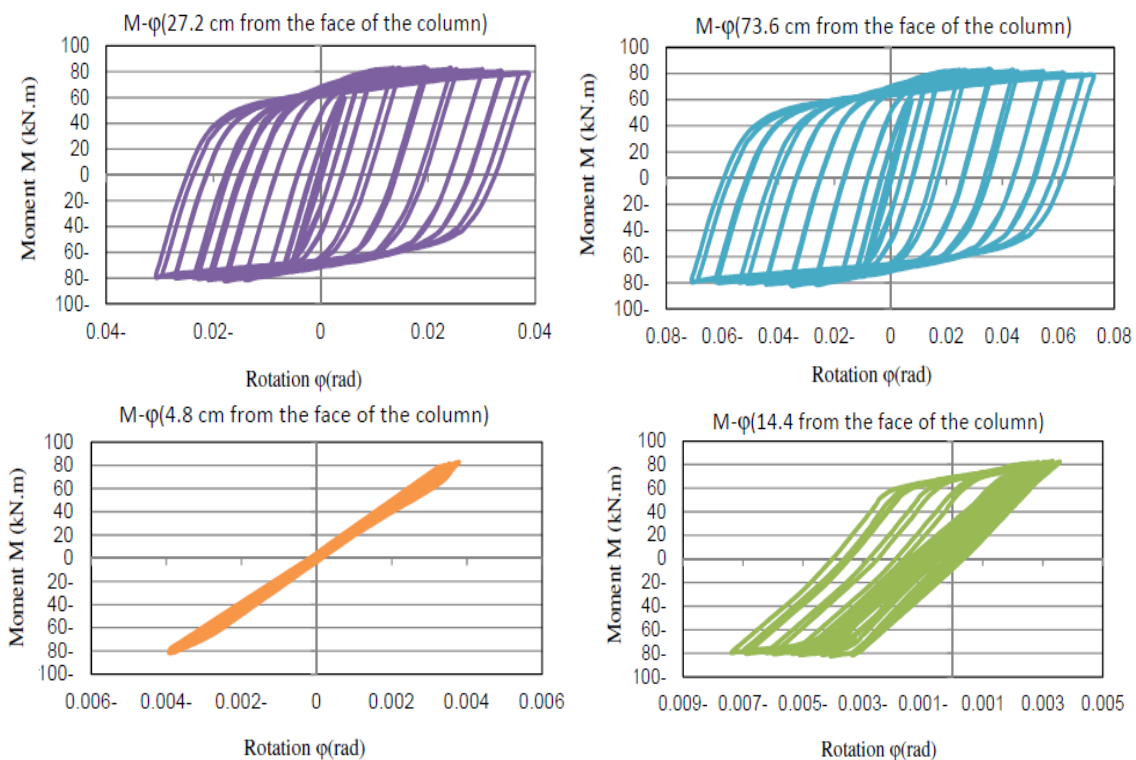


شکل ۳ - مدل پیشنهادی AFS (Arc Flange Section)

با توجه به فرض رفتار پوسته‌ای در مورد اجزاء مقطع، در مدلها، از تعریف SHELL برای تمامی اجزا و با انتخاب گزینه تغییر شکل پذیر (Deformable) استفاده شده است. اجزا بصورت المانهای چهار وجهی چهار گره‌ای با شش درجه آزادی (سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی چرخشی) تقسیم‌بندی شده‌اند. ابعاد تقسیم‌بندی برای تمام اجزا یکسان (حداکثر بعد $2/5$ سانتیمتر) و تمامی المانها مربعی در نظر گرفته شده است.

ابتدا محل استفاده از مقاطع کمانی است، در ۲۷/۲ سانتیمتری وجه ستون که انتهای مقاطع کمانی می‌باشد و ۷۳/۶ سانتی از بر ستون) جهت مقایسه با منحنی‌های بدست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی پاجومیس که در سه ناحیه تیر (۴ سانتی بر ستون، در محل تضعیف شده یعنی فاصله ۲۰/۴ سانتیمتری از بر ستون و در فاصله ۷۵ سانتیمتری ستون) ترسیم گردیده، تهیه گردید. نتایج در نمودارهای شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.

در مدل DAFS1 در شکل ۵، کاهش مقاومت لنگر خمشی بعد از زاویه تغییر مکان نسبی ۰/۰۳ رادیان سر تیر، مشاهده می‌گردد که این امر در مدل DAFS2 با برقراری اتصال جان با کمان برطرف شده و منحنی لنگر خمشی بدون کاهش مقاومت تا تغییر مکان نسبی ۰/۰۸ بدست آمده است. لذا هر دو اتصال ضوابط پذیرش اتصال قاب خمشی ویژه را بر اساس AISC مبنی بر اینکه، نمونه باید بتواند حداقل ۰/۰۳ رادیان زاویه تغییر شکل نسبی را تحمل نماید و در زاویه ۰/۰۴ رادیان، ظرفیت خمشی نمونه در وجه ستون، از ۸۰ درصد مقدار لنگر پلاستیک تیر 0.8Mp کمتر نگردد را شامل می‌شوند.



شکل ۵- منحنی لنگر پای اتصال تیر به ستون به زاویه تغییر مکان نسبی مقاطع مختلف تیر در مدل DAFS1

۰/۰۱۵، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۸ رادیان نیز به ترتیب دو سیکل چرخه ای در نظر گرفته شده است.

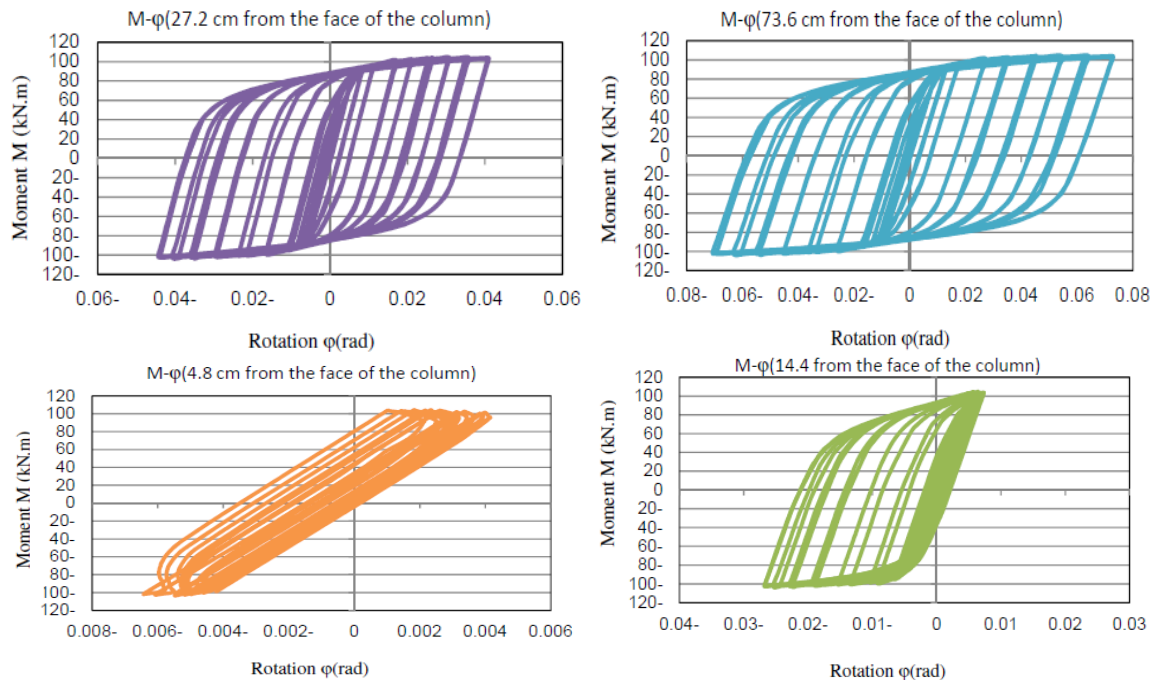
جدول ۳- بار چرخه ای مورد استفاده در مطالعه عددی مطابق [۱۸] AISC Seismic Provision

Load Step #	peak deformation θ	number of cycles, n
1	0.00375	6
2	0.005	6
3	0.0075	6
4	0.01	4
5	0.015	2
6	0.02	2
7	0.03	2

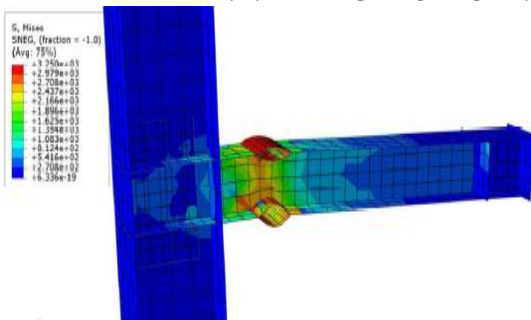
Continue with increments in θ of 0.01, and perform two cycles at each step

۳-ارائه نتایج مطالعه عددی

پس از انجام انجام بارگذاری و تحلیل عددی تا زاویه تغییر مکان نسبی محل اعمال بار بر روی تیر، به میزان ۰/۰۸، منحنی لنگر خمشی تیر در وجه ستون - زاویه تغییر مکان نسبی (تغییر مکان قائم نقاط روی تیر نسبت به فاصله از وجه ستون) در چهار ناحیه از تیر (در ۴/۸ سانتیمتری وجه ستون، در ۱۴/۴ سانتیمتری از وجه ستون که



شکل ۶- منحنی لنگر پای اتصال تیر به ستون به زاویه تغییر مکان نسبی مقاطع مختلف تیر در مدل DAFS2



شکل ۷- منحنی میزان تنش در مدل DAFS1

لذا هر دو اتصال نیز ضوابط پذیرش اتصال قاب خمشی ویژه را بر اساس AISC برآورده می‌نمایند. همچنین ملاحظه می‌گردد که منحنی‌های نزدیک وجه اتصال دارای رفتار الاستیک بوده و استفاده از مقاطع کمانی شکل، کاهش تقاضای تغییر شکل و تقاضای نیرویی را در محل اتصال ایجاد نموده است.

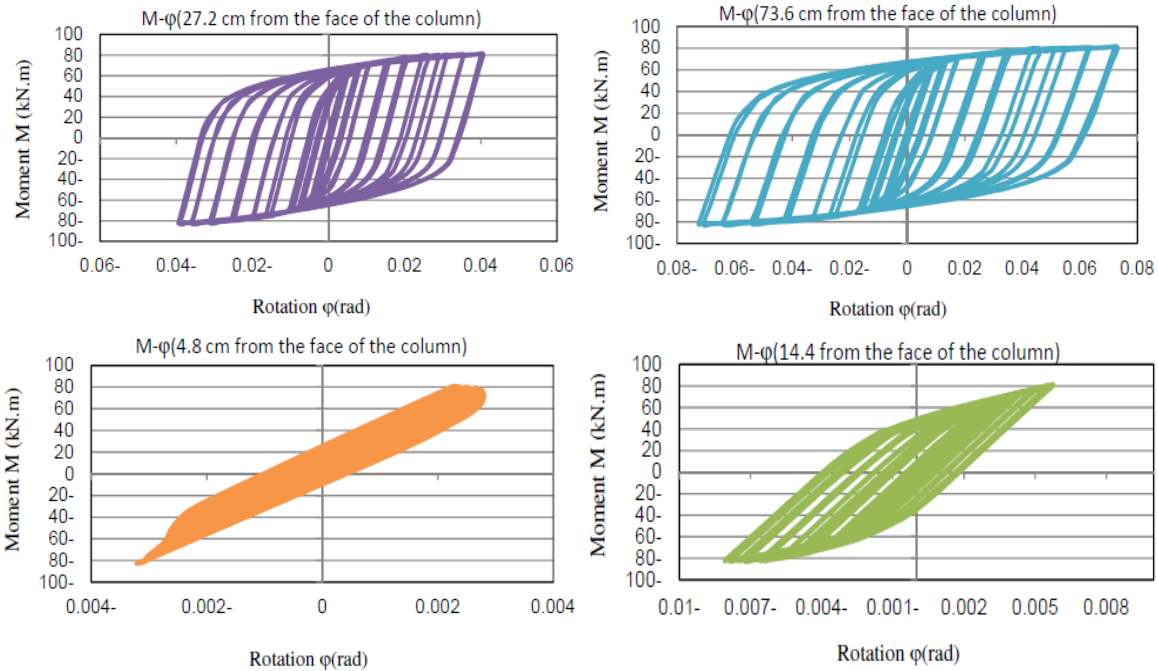
از نکات قابل توجه دیگر کاهش عدم تقارن در منحنی چرخه‌ای محل ابتدای مقاطع کمانی (فاصله ۱۴/۴ سانتی متری وجه اتصال) در هر دو مدل AFS1 و AFS2 نسبت به مدل‌های با دابل کمان می‌باشد. همچنین تغییر مکان ماندگاری که در نزدیکی وجه اتصال در تغییر مکان نسبی بیش از ۴٪ برای بال بالایی تیر در مدل AFS2 که قطعه کمانی دارای ضخامت بزرگتری است مشاهده می‌شود.

نکته دیگر ایجاد فیوز در بال تیر توسط مقاطع کمانی دابل است. همانطور که ملاحظه می‌شود منحنی‌های نزدیک وجه اتصال در شکل ۵ و ۶ دارای رفتار الاستیک بوده و استفاده از مقاطع کمانی شکل، کاهش تقاضای تغییر شکل و تقاضای نیرویی را در محل اتصال ایجاد نموده است.

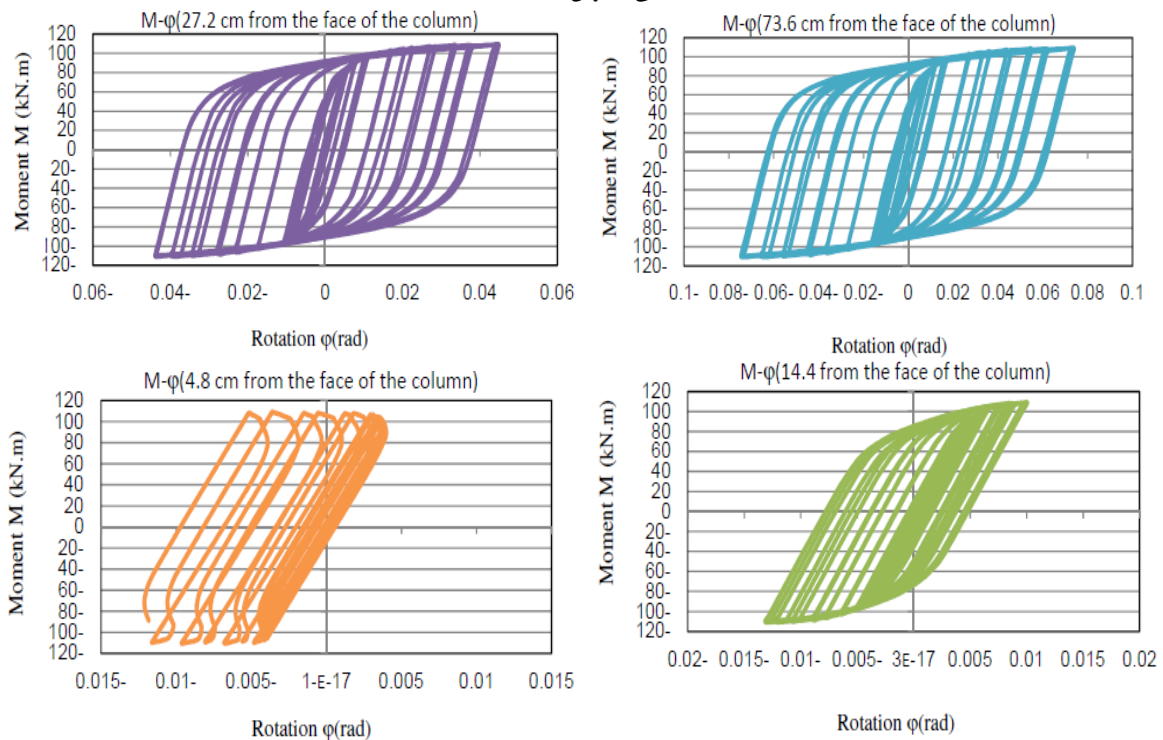
از نکات قابل توجه دیگر منحنی نامتقارن چرخه‌ای است که در محل ابتدای مقاطع کمانی (فاصله ۱۴/۴ سانتی متری وجه اتصال) در هر دو مدل DAFS1 و DAFS2 تجربه می‌گردد که بیانگر جلوتر بودن رفتار پلاستیک بال بالایی در این قسمت نسبت به بال پایینی تیر است. همچنین تغییر مکان ماندگاری که در نزدیکی وجه اتصال در تغییر مکان نسبی بیش از ۴٪ برای بال بالایی تیر در مدل DAFS2 مشاهده می‌شود. نحوه نمایش مقدار تنش در نمونه DAFS1 در زاویه تغییر مکان نسبی ۸٪ در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود تمرکز تنش و وقوع مفصل پلاستیک در محل مقطع تضعیف شده اتفاق می‌افتد و سایر اجزاء در امنیت نیرویی خواسته شده قرار می‌گیرند.

در ادامه منحنی‌های حاصل از مدل شماره ۳ و ۴ تحت عنوان AFS1 و AFS2 که از مقاطع کمانی معکوس استفاده شده را در شکل ۸ و ۹ نشان داده می‌شود.

در مدل AFS1, AFS2 در شکل ۸ و ۹، منحنی لنگر خمشی بدون کاهش مقاومت تا زاویه تغییر مکان نسبی ۰/۰۸ بدست آمده است.



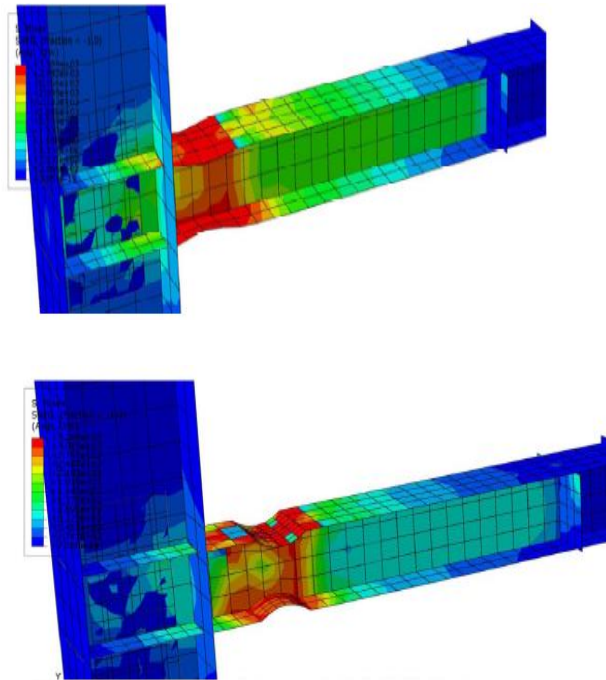
شکل ۸- منحنی لنگر خمشی تیر در وجه اتصال به ستون به زاویه تغییر مکان نسبی در نقاط مختلف تیر در مدل AFS1 با ضخامت 0.95 cm جهت مقاطع کمانی معکوس استفاده شده



شکل ۹- منحنی لنگر خمشی تیر در وجه اتصال به ستون به زاویه تغییر مکان نسبی در نقاط مختلف تیر در مدل AFS2 با ضخامت 1.2 cm جهت مقاطع کمانی معکوس استفاده شده

تنشها، که قابل تشخیص است، بصورت عدم کماتش بال تیر در حالت استفاده از فیوز کماتی شکل، نسبت به تیر معمولی مشاهده نمود.

شکل ۱۰، نحوه پخش تنش در تحلیل عددی بعد از تغییر مکان نسبی ۸٪ برای محل اعمال بار در تیر را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان کاهش تقاضا را در ستون و اتصال، علاوه بر نمایش رنگی



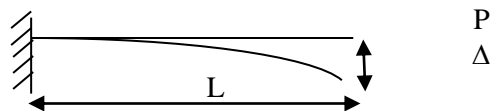
شکل ۱۰- مقایسه تیر AFS1 با تیر معمولی در تغییر مکان نسبی ۸ درصد تیر در محل اعمال بار

رابطه می‌توان بیان نمود که مدل‌های با قطعات کماتی شکل در بال تیر، ناحیه پلاستیک متمرکز تر و قابل کنترل تری از خود نشان داده است. همچنین زاویه تغییر مکان نسبی بیشتر بدست آمده در فاصله ۷۵ سانتی اتصال (بیش از ۷٪) نسبت به مدل RBS پاچومیس (حدود ۴ درصد) با توجه به الاستیک ماندن تیر در بعد از ناحیه تضعیف شده، بیانگر تغییر شکل بیشتر در ناحیه تضعیف شده مدل با قطعات کماتی شکل نسبت به مقطع کاهش یافته تیر RBS است.

۴- مقایسه نتایج عددی با مطالعات مشابه عددی و آزمایشگاهی

با توجه به برقراری شرایط یکسان مدل‌سازی مدل‌های پیشنهادی با مطالعه اتصال RBS توسط پاچومیس [۱۲] در اینجا جهت مقایسه نتایج عددی حاصل از مدل‌های پیشنهادی، از نتایج عددی و آزمایشگاهی پاچومیس استفاده می‌گردد. در ابتدا منحنی‌های بدست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی اتصال RBS نشان داده شده ۱ پاچومیس (شکل ۱) که در سه ناحیه تیر (۴ سانتی بر ستون، در محل تضعیف شده یعنی فاصله ۲۰/۴ سانتیمتری از بر ستون و در فاصله ۷۵ سانتیمتری ستون) ترسیم گردیده، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

در حالیکه در مدل‌های پیشنهادی، تغییر مکان نسبی در نقطه بارگذاری (یک متری بر ستون) ۸٪ است، این تغییر مکان نسبی در فاصله ۷۳/۶ سانتی از بر ستون بیش از ۷٪ و در دو طرف قطعات کماتی استفاده شده، به ترتیب بیش از ۴ و ۰/۵ درصد می‌باشد، این میزان در فاصله ۴/۸ سانتی بر ستون به ۰/۳ درصد محدود و رفتار الاستیک در وجه اتصال مشاهده می‌گردد. این در حالی است که در مدل RBS (شکل ۱۱)، در نزدیکی محل اتصال به ستون نیز تغییر مکان نسبی ۱/۲ درصدی و رفتار پلاستیک مشاهده می‌شود. در این



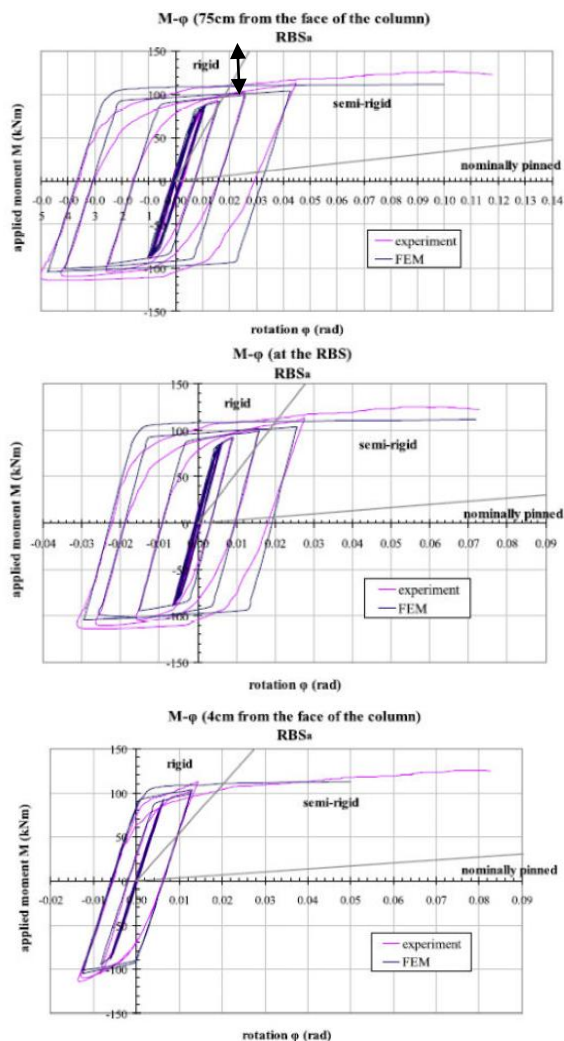
شکل ۱۲- محاسبه معیار سختی تیر مدل شده

$$K_{AFS} = \frac{P}{\Delta} = \frac{M}{L \cdot \Delta} \quad (۱)$$

با توجه به نمودار شکل ۶ و ۷، مقاومت خمشی الاستیک اتصال تیر برای مدل DAFS1، ۶۴KN.m و برای مدل DAFS2، ۷۳ بدست آمده است که بر اساس رابطه شماره ۱ معیار سختی حاصل از تقسیم نیرویی که از لنگر اتصال در حالت تعادل، برای یک تیر طره، در فاصله ۷۳/۶ سانتی متری به دست می آید به جابجائی تیر در همین فاصله از بر ستون، به ترتیب برای مدل DAFS1، ۱۴۵۹۲KN/m و برای مدل DAFS2، ۱۶۸۲۷KN/m خواهد بود. بر اساس نمودارهای حاصل در شکل ۸ و ۹ نیز می توان معیار سختی اتصال بر اساس رابطه شماره ۱، محاسبه نمود. نمودارها میزان مقاومت خمشی الاستیک برای مدل AFS1، ۶۰KN.m و برای مدل AFS2، ۷۸ KN.m را نشان می دهند. همچنین معیار سختی الاستیک حاصل از تقسیم نیروی به جابجائی تیر به ترتیب برای نمونه های AFS1، ۱۴۶۴۶KN/m و برای مدل AFS2، ۱۸۳۲۱KN/m خواهد بود.

جهت مقایسه بهتر، میزان معیار سختی تیر RBS مدل پاچومیس را نیز از نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ بدست آورده که با توجه به مقاومت خمشی ۷۵KN.m و جابجائی ۰/۵۶ سانتیمتری در فاصله ۷۵ سانتیمتری از وجه اتصال این مقدار برابر ۱۷۸۵۷ KN/m به دست می آید. در ادامه میزان معیار سختی برای یک تیر با اتصال صلب بدون ایجاد تضعیف مقطع با همین مقطع تیر و ستون و مشخصات اتصال در نرم افزار ABAQUS مدل و تحلیل عددی گردید که نتایج مقدار سختی برابر ۲۲۱۵۰KN/m را جهت این اتصال صلب نشان می دهد.

در جدول ۴، نتایج حاصل از نمونه های تک کمانی و دو کمانی از نقطه نظر ظرفیت خمشی الاستیک و معیار سختی تیر HE180A بر اساس رابطه شماره ۱ مقایسه گردیده است. همانطور که در نمودار شکل ۱۳ نیز قابل مشاهده است مقاومت خمشی الاستیک و معیار سختی معرفی شده در مدل AFS2 از سایر مدل های پیشنهادی و حتی مدل RBS مشابه بیشتر گردیده است. یعنی با افزایش ضخامت ورق قطعه کمانی شکل بر مقاومت خمشی الاستیک و معیار سختی افزوده و اتصال می تواند تقاضای خمشی زیاد در محل اتصال را علاوه بر تامین شکل پذیری، پاسخگو باشد. بدین ترتیب می توان از کمان معکوس با ضخامت بیشتر بجای دوپل کمان استفاده نمود. استفاده از کمان معکوس از نظر هزینه تامین قطعات کمانی شکل نسبت به دوپل کمان، مناسب تر خواهد بود.



شکل ۱۱- منحنی لنگر پای اتصال تیر به ستون به زاویه تغییر مکان نسبی مقاطع مختلف تیر در مدل RBS مورد مطالعه

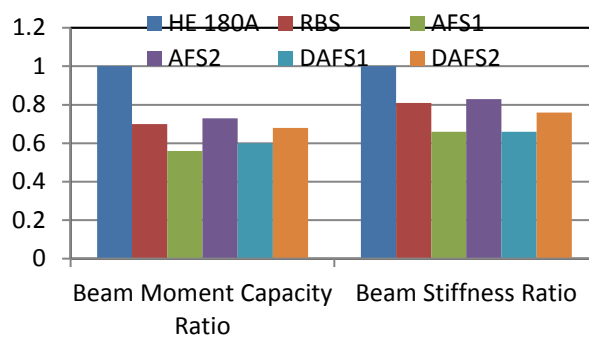
پاچومیس و همکاران [۱۲]

اگر چه نتایج ارائه شده، شکل پذیری مناسبی را جهت اتصال پیشنهادی نشان می دهد. با توجه به حضور تقاضای زیاد خمشی، در ناحیه اتصال تیر به ستون، اتصال می بایست دارای سختی و مقاومت قابل قبولی باشد. در اینجا جهت بررسی و محاسبه سختی اتصال از معیار معرفی شده در شکل ۱۲ استفاده گردید. اگر رابطه زیر را معیار سختی تیر مدل شده در نظر بگیریم. با داشتن لنگر وارد بر اتصال و میزان جابجائی یک نقطه از تیر می توان سختی تیرهای پیشنهادی را بدست آورد.



جدول ۴- مقایسه سختی و مقاومت تیرها در مدل‌های پیشنهادی

مدل DAFS2	مدل DAFS1	مدل AFS2	مدل AFS1	مدل RBS	اتصال معمولی	
۷۳	۶۴	۷۸	۶۰	۷۵	۱۰۷	ظرفیت خمشی الاستیک (kN-m)
%۶۸	%۶۰	%۷۳	%۵۶	%۷۰	%۱۰۰	نسبت ظرفیت خمشی الاستیک اتصالی پیشنهادی به اتصال معمولی
۱۶۸۲۷	۱۴۵۹۲	۱۸۳۲۱	۱۴۶۴۶	۱۷۸۵۷	۲۲۱۵۰	معیار سختی تیر بر اساس رابطه شماره ۱ (kN/m)
%۷۶	%۶۶	%۸۳	%۶۶	%۸۱	%۱۰۰	نسبت معیار سختی اتصال پیشنهادی به معیار سختی اتصال معمولی



شکل ۱۳- نمودار نسبت ظرفیت خمشی الاستیک و معیار سختی در مدل‌های پیشنهادی

۵- نتیجه گیری

میزان در تیر تضعیف شده RBS بر اساس مطالعات عددی و آزمایشگاهی پاچومیس [۱۲] برابر ۸۱٪ گزارش گردیده است. اتصال با کمان معکوس در بال تیر تا ۸٪ تغییر مکان نسبی در تیر را، بدون کاهش مقاومت خمشی در وجه اتصال و تا ۴٪ تغییر مکان نسبی در تیر را بدون تغییر مکان ماندگار در بال تیر تجربه می‌نماید. بدلیل عدم مناسب بودن اتصال RBS در تیر ورقها و تیرهای بال پهن، بخاطر تشدید پارامترهای ناپایداری در این نوع اتصال [۱۲]، بنظر می‌رسد استفاده از ایده بکارگیری کمان معکوس در بال تیر، بدلیل کاهش ارتفاع جان و محدودشدگی جان با ورقهای کمانی شکل با ضخامت بیشتر، که منجر به کاهش احتمال ایجاد ناپایداری جانبی- پیچشی تیر و همچنین حساسیت جان تیر به کمانشهای موضعی جان و بال می‌گردد، می‌تواند بعنوان گزینه مناسب در تیر ورقها مطرح گردد.

نتایج عددی بدست آمده نشان داد که از قطعات کمانی شکل، بر روی بال تیر می‌توان بعنوان قطعه مستهلک‌کننده انرژی القایی زلزله استفاده نمود بطوریکه سایر اجزاء و اتصال تیر به ستون در امنیت نیرویی و تقاضای تغییر شکلی قرار گیرند. مطابق بحث‌های ارائه شده مدل‌های پیشنهادی اتصال با دابل کمان و اتصال با قطعه کمانی شکل معکوس می‌توانند شرایط پذیرش اتصال صلب بر اساس AISC را برآورده سازند. در بین اتصالات پیشنهادی و چهار مدل انجام شده مدل استفاده از قطعه کمانی شکل معکوس با ضخامت بیشتر از ضخامت بال تیر، ضمن تامین شکل‌پذیری لازم، از نقطه نظر مقاومت خمشی الاستیک و معیار سختی تیر نیز نسبت به سایر مدل‌های پیشنهادی دارای نتایج بهتر می‌باشد بطوریکه با مدل RBS برابری می‌نماید. این اتصال، نسبت مقاومت خمشی الاستیک تیر در محل اتصال به ستون ۷۳٪ را نسبت به تیر معمولی در تیر بال پهن HE180A برآورده می‌نماید این در حالی است که جهت تیر RBS مشابه صورت گرفته این نسبت مقاومت خمشی الاستیک برابر ۷۰٪ بر اساس مطالعات عددی و آزمایشگاهی پاچومیس [۱۲] محاسبه گردیده است. همچنین معیار سختی محاسبه شده در وجه اتصال برای اتصال تضعیف شده با قطعه کمانی شکل معکوس نسبت به تیر معمولی بال پهن HE180A برابر ۸۳٪ محاسبه گردید که این

sections — experimental analysis and finite element model simulation. *Engineering Structures*, Volume 32, Issue 9, September 2010, Pages 2683-2692.

[13]. FEMA-350, Seismic design criteria for new moment-resisting steel frame construction, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[14]. D.V. Prasada Rao, S.R. Satish Kumar. RHS beam-to-column connection with web opening—parametric study and design guidelines. *Journal of Constructional Steel Research* 62 (2006) 747-756.

[15]. Qingshan Yang, Na Yang. Aseismic behaviors of steel moment resisting frames with opening in beam web. *Journal of Constructional Steel Research*. Volume 65, Issue 6, June 2009, Pages 1323-1336.

[16]. S.R. Mirghaderi, S. Torabian, A. Imanpour. Seismic performance of the Accordion-Web RBS connection. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 66, January 2010, Pages 277-288.

[17]. S. Wilkinson, G. Hurdman, A. Crouther. A moment resisting connection for earthquake resisting structure. *Journal of Constructional Steel Research*, 62 (2006), pp. 295-302.

[18]. AISC, ANSI/AISC 341-05, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago IL.

۶-مراجع:

[1]. FEMA-355D. State of the art report on connection performance. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[2]. S.J. Chen, Y.C. Chao. Effect of composite action on seismic performance of steel moment connections with reduced beam sections. *Journal of Construction Steel Research*, Volume 57, 2001, Pages 417-434.

[3]. S.L. Jones, G.T. Fry, M.D. Engelhardt. Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section moment connections. *Journal of Structural Engineering*, Volume 128(4), 2002, Pages 441-451.

[4]. JH. Jay Shen, A. Astaneh-Asl, D. McCallen. Use of deep columns in special steel moment frames. *AISC, Steel Tips*, 2002.

[5]. C.W Roeder. Connection performance for seismic design of steel moment frams. *Journal of Structural Engineering*, Volume 128(4), 2002, Pages 517-525.

[6]. J.M. Ricles, X.Zhang, L.W. Lu, J.W.Fisher. Development of seismic guidelines for deep-column steel moment connections. *ATLSS Report No 04-13*, 2004.

[7]. C.H. Lee, S.W. Jeon, J.H. Kim, C.M. Uang. Effect of panel zone strength and beam web connection method on seismic performance of reduced beam section steel moment connection. *Journal of Structural Engineering*, Volume 131(12), 2005, Pages 1854-65.

[8]. X.Zhang, J.M. Ricles. Experimental evaluation of reduced beam section connections to deep columns. *Journal of Structural Engineering*, Volume 132(3), 2006, Pages 346-357.

[9]. X.Zhang, J.M. Ricles. Seismic behavior of reduced beam section moment connections to deep columns. *Journal of Structural Engineering*, Volume 132(3), 2006, Pages 358-367.

[10]. A. MoslehiTabar, A. Deylami. Instability of beams with reduced beam section moment connections emphasizing the effect of column panel zone ductility. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 61, Issue 11, November 2005, Pages 1475-1491.

[11]. S.W. Han, H.H. Moon. Design equations for moment strength of RBS-B connection. *Journal of Construction Steel Research*, Volume 65, 2009, Pages 1087-1095.

[12]. D.T. Pachoumis, E.G. Galoussis, C.N. Kalfas, I.Z. Efthimiou. Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam

A Study of the Cyclic Behavior of Special Steel Moment Resistance with the Use of Double and Reverse Arc-Shaped Fuse on the Beam Flange

*Seyed Mehdi Zahrai

Professor, Center of Excellence for Engineering and management of Civil Infrastructures,
School of Civil Engineering, the University of Tehran

Seyed Rasoul Mirghaderi

Assistant Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran

AboozarSaleh

Faculty Member of Islamic Azad University Tafresh Branch

mzahrai@ut.ac.ir

Abstract:

Unexpected brittle failure in steel rigid frame connections by concentrated tensions on the welded area and connection vulnerability in high ductility demands as occurred during the Northridge (1994) and Kobe (1995) has challenged ductility properties and ability to absorb seismic energy in this type of structural system. So in design of this type of structural system, creating ductility and ability to withstand cyclic large deformations is important. On this basis, in present study two new beam-to-column moment connections with reduced beam section by double or reverse arc-shaped fuse are studied in capacity design approach. The arc-shaped fuse, by removing flange and a part of web and replacing double or reverse arc-shaped in the section bending of the beam, resulted in a ductile fuse away from beam-to-column connections components, which prevents connection vulnerability in high ductility demands. The purpose has been numerically studied by four numerical models under cyclic load using ABAQUS 6.10 finite element software. Obtained numerical results were compared with those of other studies. The numerical results show that arc-shaped fuse creates ductile fuses far away from beam-to-column connection components and can satisfy acceptance conditions of special moment resistance connection based on AISC and FEMA. The arc-shaped fuse can increase drift story capacity up to 8% without any significant strength loss through increasing the out-of-plane stiffness of the beam longitudinal axis against lateral-torsional buckling. According to elastic flexural strength and stiffness of beam criteria, the reverse arc-shaped fuse is a better choice than double arc-shaped fuse.

Keywords: Steel Moment Frames Connection, Reduced Beam Section, Double and Reverse Arc-Shaped Fuse, Numerical study