



بررسی رفتار اتصالات خمشی فولادی به روش مؤلفه‌ای پیشرفته

علی صادقی^۱، محمدرضا سهرابی^{۲*}، سید مرتضی کاظمی^۳

<http://journaliss.ir>

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کاشمر، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشمر، ایران

*زاهدان، صندوق پستی ۹۸۷-۹۸۱۵۵، Sohrabi@hamoon.usb.ac.ir

چکیده

یکی از پرکاربردترین روش‌های تحلیلی جهت بررسی رفتار خمشی اتصالات، رویکرد مؤلفه‌ای است که در آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا به آن اشاره شده است. این روش دارای نقص‌هایی همچون حجم محاسبات، نقدهای وارده در بحث راستی آزمایی و ضعف‌های آن در بخش رفتار پلاستیک نمودار لنگر-دوران است. در این پژوهش، به منظور کارآمدتر و قابل اتکا کردن روش مؤلفه‌ای، نسخه‌ی پیشرفته‌ی این روش پیشنهاد شد به گونه‌ای که محاسبات روش فشرده‌تر شد، بخش پلاستیک نمودار لنگر-دوران فرای دستورالعمل آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا توسعه یافت و سپس برای دو اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و صفحه‌ی انتهایی اجرا و با نمودار لنگر-دوران محاسبه شده از روش آزمایشگاهی و روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس راستی آزمایی گردید. در انتها، بررسی‌های پارامتریکی در چهارچوب تحلیل حساسیت بر روی این اتصالات به کمک رویکرد تحلیلی مؤلفه‌ای پیشرفته انجام گرفت. یافته‌ها نشان دادند که روش مؤلفه‌ای پیشرفته (روش توسعه یافته در این پژوهش) در مقایسه با روش مؤلفه‌ای مرسوم در آیین‌نامه شماره ۳ اروپا به خوبی می‌تواند بخش پلاستیک نمودار لنگر-دوران دو اتصال را پیش‌بینی کند. به طوری که درصد اختلاف لنگر نهایی در اتصال صفحه انتهایی شش پیچی در مقایسه نمونه آزمایشگاهی با خروجی‌های رویکرد مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته به ترتیب ۳۱/۵۶ و ۲/۴۶- درصد به دست آمد. در مقایسه با خروجی‌های رویکرد اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس، درصد اختلاف سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب ۱۴/۷۵- و ۵/۵۵ درصد برای اتصال مستقیم جوشی مورد بررسی و ۲/۹۸- و ۲۰/۰۹ درصد برای صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی به دست آمد. همچنین، روشن شد که در میان پارامترهای هندسی بررسی شده برای دو اتصال، عمق تیر بیشترین اثر را بر تغییر سختی آغازین و لنگر اتصال دارد به گونه‌ای که در اتصال صفحه‌ی انتهایی مورد بررسی، کاهش عمق تیر به میزان ۲۰ درصد سبب فروکاست سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب به میزان ۲۷/۵۳ و ۲۱/۵۴ درصد شد در حالی که با افزایش عمق تیر به میزان ۲۰ درصد، سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب ۲۸/۶۵ و ۲۱/۵۴ درصد افزایش یافتند.

واژگان کلیدی

روش مؤلفه‌ای پیشرفته، نمودار لنگر-دوران، روش اجزای محدود، اتصال خمشی فولادی، آباکوس، تحلیل حساسیت

Investigating the behavior of steel moment connections using advanced component method

A. Sadeghi, M.R. Sohrabi, S.M. Kazemi

Abstract

One of the most widely used analytical methods to investigate the bending behavior of joints is the component method, which is mentioned in Eurocode 3. However, this method has some shortcomings such as a large amount of calculation, its reliability-low and its weaknesses in the post-yield behavior of the moment-rotation curve. In this research, to make the component method more efficient and reliable, this method was developed in the three mentioned aspects in such a way that the calculations of the method became more compact, the post-yield part of the moment-rotation curve was developed beyond the concept of Eurocode 3 and then it was used for fully welded and end plate connection. In the following, the obtained moment-rotation curves were verified by comparing them with the curve extracted using the laboratory method and finite element method in ABAQUS. In the end, parametric investigations within sensitivity analysis framework were carried out on these connections using advanced component method. The findings indicated that the advanced component method (the method developed in this research) compared to the conventional component method in Eurocode 3 can accurately predict the plastic part of the moment-rotation curve of the two connections. So that the difference percentage of the ultimate moment for the six-bolt extended end-plate connections in the comparison of the laboratory model with the outputs of conventional and advanced component method was obtained as 31.56 and -2.46 percent, respectively. compared to the outputs of the finite elements approach using ABAQUS, the difference percentage of initial stiffness and the moment of the connection is -14.75 and 5.55 percent respectively for the fully welded connection has been examined and -2.98 and 20.09 percent for the eight-bolt extended end-plate connections. Furthermore, it became clear that among the geometrical parameters studied for the two connections, the beam depth has the greatest effect on the change of the initial stiffness and the moment of the connection, as in the end plate connection has been examined, reducing the beam depth by 20 percent decreases the initial stiffness and the moment of the connection by 27.53 and 21.54 percent, respectively, while by increasing the beam depth by 20 percent, the initial stiffness and the moment of the connection increases by 28.65 and 21.54 percent, respectively.

Keywords

Advanced component method, Moment-rotation curve, Finite element method, Steel moment connection, ABAQUS, Sensitivity analysis



یکی از پارامترهای مهمی که در بررسی اتصالات مختلف مورد توجه قرار می‌گیرد، رفتار آن‌ها تحت اثر لنگر وارده است. برای این منظور، منحنی‌های لنگر - دوران اتصال، تهیه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و نسبت به گیرداری، سختی آغازین و رفتار کلی اتصال تحت اعمال لنگر خمشی، قضاوت می‌شوند. اصولاً برای تعیین میزان گیرداری یک اتصال، منحنی لنگر - دوران را به روش‌های تحلیلی، عددی یا آزمایشگاهی تعیین و اتصال را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که ظرفیت چرخش انتهایی با چرخش ایجاد شده در اثر بار وارده سازگار باشد. این منحنی‌ها برای تعیین میزان گیرداری اتصال از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۱ و ۲].

هر چند دقیق‌ترین شناخت از رفتار اتصالات به کمک بررسی‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید، این رویکرد بسیار پرهزینه است و رفتار دورانی اتصالات گاهی می‌تواند اختلافاتی با نمونه‌های آزمایشگاهی داشته باشد. در رویکرد اجزای محدود غیرخطی نیز، اتصال باید به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزارهای اجزای محدود همچون ABAQUS و ANSYS همانندسازی شود. این رویکرد نیز دارای نقاط قوت و ضعف مخصوص به خود است بدین صورت که برای دستیابی به نتایج قابل استناد نیاز به رایانه‌هایی با ظرفیت بالا و آگاهی کامل از قابلیت‌های نرم‌افزار است. همچنین، انجام تحلیل‌های پارامتریک، حساسیت و بهینه‌سازی در دو رویکرد یاد شده بسیار دشوار یا نشدنی است [۱]. روشن است که توسعه‌ی یک مدل ساختاربنده‌ی ریاضی که بتواند رفتار قابل اتکایی از اتصالات و نمودارهای لنگر - دوران آن‌ها را فراهم کند به چه میزان می‌تواند در این زمینه افق‌های گسترده‌ای را به روی پژوهشگران و مهندسان محاسب و طراح سازه‌های فولادی بگشاید.

برای دهه‌ها، پژوهشگران مختلفی سعی در ارائه‌ی یک رابطه‌ی ریاضی یا یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی منحنی لنگر - دوران

اتصالات داشته‌اند. عمده‌ی ضعف این مدل‌ها این است که این روابط تنها برای برخی از اتصالات کاربرد داشتند و در پیش‌بینی رفتار بیشتر اتصالات نوپدید تقریباً ناکارآمداند. همچنین، حجم محاسبات در برخی از مدل‌ها بسیار زیاد است و از این روی احتمال خطا را افزایش می‌دهد. در این میان، روشی به نام روش مؤلفه‌ای در سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۸۳ توسط ژوئیت مایر^۱ توسعه یافت که گیرداری هر یک از مؤلفه‌های اتصال توسط فنرهای خطی یا غیرخطی مدل‌سازی شده و مجموعه‌ی این فنرها به صورت سری یا موازی برای تعیین گیرداری اتصال سر هم می‌شوند. سپس منحنی‌های لنگر - دوران دوطخطی اتصال بر اساس دو پارامتر لنگر اتصال ($M_{j,Rd}$) و سختی دورانی آغازین ($S_{j,ini}$) به دست می‌آید. این روش جای خود را در آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا^۲ باز کرد و هم اکنون می‌توان نمودارهای لنگر - دوران شماری از اتصالات را بر اساس روابط و ضوابط آورده شده در این آیین‌نامه محاسبه کرد [۳].

بر پایه‌ی روش مؤلفه‌ای مطرح شده در آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا، هرگونه تغییرشکل در اتصال توسط یک فنر (مؤلفه) مدل می‌شود که بر اساس آن دو پارامتر خمشی اتصالات یعنی شیب بخش الاستیک و لنگر مقاوم طراحی همچنین نمودار لنگر - دوران دوطخطی اتصالات به دست می‌آید. برای این کار، تمامی مؤلفه‌های اتصالات به صورت یک مدل مکانیکی سرهم‌بندی می‌گردند. مزیت اصلی این روش تطبیق‌پذیری و تعمیم‌پذیری آن است که گونه‌ای که نکته‌ی اصلی در کاربرد این روش، تعیین مشخصات هر مؤلفه یعنی رابطه‌ی نیرو - جابه‌جایی همچنین نحوه‌ی سرهم‌بندی آن‌ها است [۳].

از این روش، بارها و بارها برای بررسی رفتار خمشی اتصالات مختلف در شرایط و بارگذاری‌های متفاوت استفاده شده است. سیلوا^۳ و همکاران [۴] به بررسی رفتار اتصالات فولادی تحت آتش‌سوزی به کمک روش مؤلفه‌ای پرداختند. آن‌ها یک

^۱ Silva^۲ Zoetemeijer^۳ Eurocode 3

نتایج مدل آزمایشگاهی اتصال صفحه انتهایی تراز شده با دو ردیف پیچ و اتصال صفحه انتهایی چهار پیچی را با برنامه کامپیوتری که در دانشگاه کویمبرا^۶ برای تحلیل غیرخطی اتصالات به روش مؤلفه‌ای ارائه شده بود، مقایسه کردند.

در زمینه مدل‌سازی با نرم افزار آباکوس، کاظمی و همکاران [۱۲] به بررسی یک پیکره‌بندی فولادی پیش‌ساخته‌ی مدولار جدید با اتصالاتی ویژه پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود اثر ضخامت ورق اتصال، استفاده از سخت کننده با ابعاد مختلف و استفاده از زائده‌ی هرمی را بر رفتار این اتصال با تمرکز بر منحنی بار - تغییر مکان تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. سپس، برای مدل‌سازی اتصال پیشنهادی خود از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده و نتایج خود را با یک مدل آزمایشگاهی راستی‌آزمایی کردند. کریستف^۷ و همکاران [۱۳] بر ساده‌سازی روش مؤلفه‌ای برای طراحی اتصالات تیر به ستون تمرکز کردند. آن‌ها در پژوهش خود یک روش ساده جهت انتخاب مناسب ضخامت صفحه انتهایی با توجه به قطر پیچ‌ها پیشنهاد دادند. تاکید پژوهش سلیمانی و بهرام‌فر [۱۴] بر اتصالات جوشی تیر به ستون به کمک این روش برای محاسبه‌ی نمودارهای لنگر - دوران آن‌ها بود. مقایسه بین نتایج تحلیلی ارائه شده توسط آن‌ها و مدل‌های اجزای محدود نشان داد که مدل پیشنهادی قادر به تخمین منحنی‌های لنگر - دوران اتصالات تیر به ستون جوشی با دقت بسیار خوب است. هرتنیکو و فالكون^۸ [۱۵] از این روش برای بهینه‌سازی اتصالات قاب‌های دوبعدی استفاده کردند. آن‌ها توانستند هزینه اتصالات قاب دوبعدی ارائه شده توسط کاربرو^۹ و بایو^{۱۰} را با استفاده از الگوریتم ژنتیک کاهش دهند.

تفاوت پژوهش شعبانیان و همکاران [۱۶] با دیگر پژوهش‌ها، استفاده از این روش برای اتصالات دارای ورق‌های بال بود.

روش تحلیلی برای ارزیابی رفتار اتصالات فولادی در برابر آتش‌سوزی پیشنهاد دادند. در ادامه منحنی لنگر - دوران را از روش مؤلفه‌ای موجود در آیین نامه اروپا به صورت دوطبقی محاسبه و با نتایج به دست آمده از روش آزمایشگاهی و عددی مقایسه کردند. سیلوا و همکاران [۵] در پژوهشی دیگر بر بررسی رفتار اتصال صفحه‌ی انتهایی تراز شده تحت اثر همزمان خمش و نیروی محوری به کمک روش مؤلفه‌ای پرداختند. سیلوا و همکاران [۵] در پژوهش خود نمودار لنگر - دوران مدل‌های آزمایشگاهی خود را با نمودار حاصل از روش مؤلفه‌ای مرسوم مقایسه کردند، با توجه به این که رفتار روش مؤلفه‌ای در بخش پلاستیک به صورت یک خط با شیب صفر است، نتوانستند به خوبی بخش پلاستیک نمودارها را مدل‌سازی کنند. بایو^۱ و همکاران [۶] یک مدل کارآمد بر گرفته شده از روش مؤلفه‌ای را برای اتصالات نیمه‌گیردار در قاب‌های مرکب توسعه دادند. ساویو^۲ و همکاران [۷] به بررسی اتصالات فولادی با گنجاندن اثر اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی به کمک روش مؤلفه‌ای پرداختند. آن‌ها فرمول‌بندی دقیقی از روش تحلیلی خود ارائه دادند و به کمک آن نتوانستند نمودار لنگر - دوران را برای اتصال صفحه انتهایی با نمودار روش مؤلفه‌ای مرسوم در آیین‌نامه اروپا مقایسه کنند. دمونکائو^۳ و همکاران [۸] به کمک روش مؤلفه‌ای به بررسی اتصال صفحه‌ی انتهایی چهارپیچی پرداختند. لیو^۴ و همکاران [۹] از این روش برای بررسی رفتار اتصالات تحت خرابی پیش‌رونده استفاده کردند. والد^۵ و همکاران [۱۰] از روش مؤلفه‌ای تحت رویکرد اجزای محدود به منظور تحلیل و طراحی اتصالات فولادی بهره بردند. شهبازیان و همکاران [۱۱] به توسعه‌ی مدلی برای ارزیابی رفتار یکنوا و چرخه‌ای اتصالات فولادی به کمک روش مؤلفه‌ای پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود

^۶ Coimbra

^۷ Kristóf

^۸ Hortencio and Falcón

^۹ Cabrero

^{۱۰} Bayo

^۱ Bayo

^۲ Savio

^۳ Demonceau

^۴ Liu

^۵ Wald

۱-۲- فشرده سازی روابط

در این بخش، یک رابطه بندی ساده تر و همه جانبه تر برای روش مؤلفه ای در زمینه ی محاسبه ی لنگر مقاوم طراحی اتصال ($M_{j,Rd}$) پیشنهاد می گردد که از پیچیدگی و حجم محاسبات روش مؤلفه ای مرسوم می کاهد. در این رویکرد، از همان مؤلفه های پیشنهادی در آیین نامه ی شماره ی ۳ اروپا استفاده شده با این تفاوت که سختی اتصال به عنوان تابعی از سختی فنرهای کششی به جای سختی دورانی آغازین تعریف می گردد. تفاوت اصلی این است که رابطه ی تعادل نیروی محوری به همراه رابطه ی تعادل لنگر در نظر گرفته شده و نیروهای فنر می تواند در دو حالت الاستیک و پلاستیک عمل کنند. افزون بر این، محور معادل گیری از میانه ی بال فشاری تیر به میانه ی تیر انتقال می یابد تا حجم محاسبات کمتر شود.

اصلاح نخست در روش مؤلفه ای مرسوم از سختی چشمه ی اتصال آغاز می شود. تغییر شکل برشی چشمه ی اتصال در آیین نامه ی شماره ی ۳ اروپا توسط یک فنر قرار گرفته شده در بال فشاری تیر مدل می شود [۳]. فرض می گردد که چشمه ی اتصال تحت تنش برشی خالص در بازه ی الاستیک است. اگر محیط چشمه ی اتصال صلب باشد، لنگر خمشی می تواند به دو نیروی خود متعادل تبدیل شود. بنابراین، برای مؤلفه ی چشمه ی اتصال (w_p)، رابطه ی میان لنگر خمشی و سختی فنر از رابطه ی (۱) به دست می آید.

$$F = \frac{M}{z} = k_{wp} \delta \quad \left\{ \begin{array}{l} \delta = \varphi z \end{array} \right\} \rightarrow M = z^2 k_{wp} \varphi \quad (1)$$

در این جا، z بازوی لنگرگیری که برابر با عمق چشمه ی اتصال است (میانه ی بال بالایی تا میانه ی بال پایینی تیر)، همچنین φ زاویه چرخش اتصال است. نیروی برشی حاصل ($V_{wp,Ed}$) در چشمه ی اتصال از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$V_{wp,Ed} = F = \frac{M}{z} \beta \quad (2)$$

β پارامتر تبدیل که در این پژوهش بر پایه ی توصیه ی آیین نامه ی شماره ی ۳ اروپا برابر با یک فرض می شود و مقدار آن

در بسیاری از این پژوهش ها توجه کافی به راستی آزمایی رفتار بخش پلاستیک نمودار لنگر - دوران نشده است. بر این اساس، پیشنهاد می شود روش مؤلفه ای به گونه ای توسعه یابد تا فرای آیین نامه ی شماره ی ۳ اروپا، داده های بیشتر از نمودارهای لنگر - دوران با تمرکز ویژه بر بخش پلاستیک نمودار فراهم کند. روشن است با توسعه ی یک مدل ریاضی بر پایه ی روش مؤلفه ای، می توان امکان بررسی های آماری، پارامتری و بهینه سازی را فراهم کرد. همچنین، یکی از کاستی های بزرگ روش های آزمایشگاهی و عددی، تعمیم پذیری نتایج است. پژوهش های گسترده ی انجام شده بر روی اتصالات نشان داده است که نمودارهای لنگر - دوران به میزان چشم گیری وابسته به پارامترهای هندسی و مصالح اتصال اند به گونه ای که با تغییر هر کدام، این نمودارها نیز تغییر خواهند کرد. این کاستی را می توان به کمک انجام تحلیل های حساسیت گسترده تعمیم پذیر کرد به گونه ای که می توان فهمید این نمودارها به تغییرات کدام یک از پارامترهای ذکر شده حساس تراند و نتایج پژوهش را برای این پارامترها به دست آورد. بر اساس آن چه که گفته شد، در این پژوهش، یک مدل ریاضی ساختار بسته به منظور پیش بینی رفتار الاستوپلاستیک خمشی اتصالات فولادی ارائه می گردد که امکان اجرای بررسی های پارامتری گسترده ای را فراهم می کند. در کنار این موضوع، مقایسه و راستی آزمایی نمودارهای لنگر - دوران به دست آمده از روش مؤلفه ای با روش های آزمایشگاهی و اجزای محدود مورد ارزیابی قرار می گیرد. همچنین، توسعه ی روش مؤلفه ای برای دستیابی به داده های بیشتر از نمودارهای لنگر - دوران فرای آیین نامه ی شماره ی ۳ اروپا با تمرکز ویژه بر بخش پلاستیک نمودار و انجام بررسی های پارامتری در چهارچوب تحلیل حساسیت به منظور رسیدن به نتایج تعمیم پذیر رفتار خمشی اتصال دنبال می شود. در ادامه، روش شناسی پژوهش به تفصیل بیان خواهد شد. این روش در پژوهش کنونی به نام روش مؤلفه ای پیشرفته نام گذاری شده است.

۲- روش شناسی



$$V_{wp} = \begin{cases} -V_{wp,Rd} & \text{if } \delta < -\delta_y \\ k_1 \delta & \text{if } -\delta_y \leq \delta \leq \delta_y \\ V_{wp,Rd} & \text{if } \delta > \delta_y \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{where } \delta_y = \frac{V_{wp,Rd}}{k_1} \quad \text{with } V_{wp,Rd} = \frac{0.9 A_{vc} f_{y,wc}}{\sqrt{3} \gamma_{MO}}$$

در اینجا، $\gamma_{MO} = 1.05$ و $f_{y,wc}$ مقاومت تسلیم جان ستون است. زیرنویس Rd به معنی مقاومت طراحی است [۳]. هنگامی که یک اتصال تحت خمش قرار می‌گیرد، مؤلفه‌های مقاوم آن اتصال تشکیل تعدادی ردیف موازی با محور معادل‌گیری می‌دهند. این مؤلفه‌ها در هر ردیف به صورت فنرهای سری معادل می‌شوند که با دیگر ردیف‌ها به صورت موازی قرار می‌گیرند. اکنون، برای رسیدن به نیروی معادل هر ردیف، بر حسب این که تغییرشکل در ناحیه الاستیک یا پلاستیک قرار داشته باشد، از رابطه‌ی (۷) استفاده می‌شود.

$$F_{EQ,i} = \begin{cases} k_{row,i} \cdot \delta & \text{if } 0 \leq \delta \leq \delta_{y,i} \\ F_{EQ,Rd,i} & \text{if } \delta > \delta_{y,i} \end{cases} \quad (7)$$

$$k_{row,i} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^{i=row} k_{j,i}} \right)^{-1},$$

$j = \text{number of component}$

$$F_{EQ,Rd,i} = \text{Min}[V_{wp,Rd}, F_{j,i,Rd}]$$

$$\delta_{y,i} = F_{EQ,Rd,i} / k_{row,i}$$

در اینجا، $F_{EQ,i}$ برابر است با نیرو در فنر معادل هر ردیف، $F_{EQ,Rd,i}$ مقاومت، $k_{row,i}$ سختی و $\delta_{y,i}$ جابه‌جایی تسلیم آن است. $V_{wp,Rd}$ مقاومت برشی چشمه‌ی اتصال، $F_{j,Rd}$ مقاومت طراحی مؤلفه‌ی j ($j > 1$) و k_j سختی انتقالی مؤلفه‌ی j ($j > 1$) است. شایان ذکر است i بیانگر شماره‌ی ردیف و j نمایانگر شماره‌ی مؤلفه است. توجه شود که مؤلفه‌ی ۱ توسط رابطه‌ی (۵) و (۶) تعریف شده است. همان‌گونه که در رابطه‌ی (۷) دیده می‌شود، مقاومت فنر انتقالی برابر با کمینه‌ی مقدار مقاومت فنرهای

بر اساس نوع اتصال تعیین می‌شود. با در نظر گرفتن این که تحت برش الاستیک خالص، دوران اتصال برابر با زاویه‌ی اعوجاج برشی چشمه‌ی اتصال است:

$$\tau = \frac{V_{wp,Ed}}{A_{vc}} = \varphi G = \frac{\varphi E}{2(1+v)} \quad (3)$$

با در نظر گرفتن A_{vc} به عنوان مساحت برشی ستون، v ضریب پواسون^۱ و G به عنوان مدول برشی الاستیک، مقادیر پیشنهادی برای سختی فنر معادل جان ستون در برش محاسبه می‌شود:

$$k_{wp} = \frac{M}{z^2 \varphi} = \frac{V_{wp}}{\beta z \varphi} = \frac{E}{2} \frac{A_{vc}}{1+v} \frac{1}{\beta z} \quad (4)$$

$$\approx 0.38 \frac{EA_{vc}}{\beta z}$$

روابط ارائه شده در آیین‌نامه با توجه به مؤلفه‌ی جان ستون در برش اصلاح می‌شود. مؤلفه‌ی متناظر با ناحیه‌ی برشی ستون ($C1$) توسط چندین فنر قرار گرفته شده در تراز دیگر مؤلفه‌ها مدل می‌گردد. در این روش، تغییرشکل برشی چشمه‌ی اتصال ($C1$) بر خلاف روش مؤلفه‌ای مرسوم که از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید، به صورت دو فنر قرار گرفته شده در بال بالایی و پایینی تیر در تراز ناحیه‌ی فشاری و کششی مدل می‌شود. علت این کار این است که در روش مؤلفه‌ای مرسوم، محور معادل‌گیری در میانه‌ی بال فشاری تیر در نظر گرفته می‌شود در حالی که در روش پیشنهادی، محور معادل‌گیری از میانه‌ی تیر می‌گذرد. شایان ذکر است که محور معادل‌گیری در این روش به محوری گفته می‌شود که از نیروهای معادل در هر ردیف حول آن لنگر گرفته تا لنگر اتصال به دست آید. بر این اساس، سختی متناظر مؤلفه‌ی $C1$ یعنی k_1 باید دو برابر سختی ارائه شده در رابطه‌ی (۴) باشد:

$$k_1 = 2k_{wp} = 0.76 \frac{EA_{vc}}{\beta z} \quad (5)$$

در هر فنر الاستوپلاستیک، نیرو در چشمه‌ی اتصال را می‌توان به صورت تابعی از تغییرشکل دانست. بنابراین، تابع بیانگر رفتار جان ستون در برش از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

¹ Poisson

به کمک دو معادله‌ی تعادل در راستای نیروی محوری و لنگرگیری حول محور معادل‌گیری به دست می‌آید:

$$\sum_{int} N = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^{i=row} k_{1PZ-B} \cdot y_i + k_{1compr} \cdot y_{compr} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{int} M = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^{i=row} k_{1PZ-B} \cdot y_i^2 + k_{1compr} \cdot y_{compr}^2 = k_{wp} z^2$$

در اینجا، k_{wp} سختی چشمه‌ی اتصال که از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید. رابطه‌ی (۹) دارای دو مجهول k_{1PZ-B} و k_{1compr} است. اکنون، می‌توان نیروهای معادل هر ردیف را به کمک روابط زیر محاسبه کرد. توابعی که رفتار هر فنر معادل را تعریف می‌کند برابر است با:

$$F_{EQ,i} = \begin{cases} k_{row,i} \delta & \text{if } 0 \leq \delta < \frac{F_{EQ,Rd,i}}{k_{row,i}} \\ F_{EQ,Rd,i} & \text{if } \delta \geq \frac{F_{EQ,Rd,i}}{k_{row,i}} \end{cases} \quad (10)$$

$$F_{EQ,compr} = \begin{cases} k_{compr} \delta & \text{if } 0 \leq \delta < \frac{F_{EQ,Rd,i}}{k_{compr}} \\ F_{EQ,Rd,compr} & \text{if } \delta \geq \frac{F_{EQ,Rd,i}}{k_{compr}} \end{cases}$$

هنگامی که مقادیر سختی متناظر با چشمه‌ی اتصال یعنی k_{1PZ-B} و k_{1compr} از رابطه‌ی (۹) به دست بیاید، فرهای متصل به صورت سری با فنر معادل جایگزین می‌گردد. در این روش، هنگامی که ردیف پیچی در فشار قرار گیرد، همه‌ی مؤلفه‌های آن به جز مؤلفه k_{1PZ-B} حذف خواهد شد. اکنون، می‌توان به کمک رابطه‌ی زیر سختی هر کدام از ردیف‌ها و نیروی معادل آن را محاسبه کرد:

$$k_{row,i} = \left(\frac{1}{k_{1PZ-B}} + \sum \frac{1}{k_{j,i}} \right)^{-1} \quad (11)$$

متصل شده به صورت سری در هر ردیف است. اکنون، تعادل نیروها و لنگرها از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید:

$$N_{Ed} = 0 = \sum_{int} N \Rightarrow 0 = F_{EQ,1} + F_{EQ,2}$$

$$M_{j,Rd} = \sum_{int} M \Rightarrow M_{j,Rd} = F_{EQ,1} y_t + F_{EQ,2} y_c$$

مقدار لنگر اتصال ($M_{j,Rd}$) با در نظر گرفتن رابطه‌ی (۷) و حل دستگاه معادلات رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود. این روابط تا این جا برای اتصالات ساده همچون اتصال مستقیم جوشی کارآمد است اما با افزودن مؤلفه‌های دیگر همچون پیچ، نیاز است تا روابط بیشتری اضافه گردد. بر این اساس، کاربرد روش مؤلفه‌ای برای اتصالات پیچی به دلیل تعداد بیشتر مؤلفه‌های درگیر پیچیده‌تر می‌شود. این مؤلفه‌ها در بخش هشتم آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا آورده شده‌اند و درست همانند اتصالات جوشی، فنی که تغییرشکل‌های چشمه‌ی اتصال در برش را مدل‌سازی می‌کند توسط یک فنر انتقالی در تراز بال کششی و فشاری تیر مدل‌سازی می‌گردد [۳].

در روش پیشنهادی، مؤلفه‌ی چشمه‌ی اتصال ($C1$) با دیگر مؤلفه‌های درگیر در اتصال یعنی ردیف‌های پیچ و بال فشاری تیر به صورت سری در نظر گرفته می‌شود. در این جا فرض می‌شود که سختی متناظر با چشمه‌ی اتصال در همه‌ی ردیف‌های پیچی بوده و برابر با k_{1PZ-B} است. این فرض زمانی درست است که تمامی پیچ‌ها یکسان بوده و تعداد یکسانی پیچ در هر ردیف وجود داشته باشد. سختی متناظر با چشمه‌ی اتصال در تراز بال فشاری تیر k_{1compr} است. بنابراین، در اتصالات پیچی، چشمه‌ی اتصال در برش توسط دو متغیر k_{1PZ-B} و k_{1compr} تعریف می‌شود. سختی مؤلفه‌های دیگر اتصال به صورت $k_{j,i}$ تعریف می‌شود که در آن زیرنویس یکم بیانگر شماره‌ی مؤلفه است و زیرنویس دوم بیانگر شماره‌ی ردیف پیچ است. در اتصالات پیچی همچون اتصال صفحه‌ی انتهایی، ردیف یکم دورترین ردیف از بال فشاری تیر انتخاب می‌شود. مقادیر k_{1PZ-B} و k_{1compr}



$$z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{row,i} h_i^2}{\sum_{i=1}^{n_b} k_{row,i} h_i} \quad (13)$$

در این جا، n_b تعداد ردیف پیچ در کشش و h_i فاصله‌ی ردیف پیچ نام از مرکز فشار است که در وسط ضخامت بال فشاری تیر فرض می‌شود. سختی کلی معادل (K_{eq}) ردیف‌های کششی پیچ با فرض دوران بدون تغییر شکل جان تیر حول مرکز فشار از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۳]:

$$K_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{row,i} h_i}{z_{eq}} \quad (14)$$

در پایان، سختی دورانی آغازین اتصال می‌تواند با ترکیب مناسب سختی مؤلفه‌های مستقل ردیف‌های پیچ (یعنی جان ستون در برش و در فشار) با سختی کلی ردیف‌های کششی پیچ معادل (K_{eq}) بر اساس رابطه‌ی زیر به دست آید [۳]:

$$S_{j,ini} = \frac{E z_{eq}^2}{\mu \left(\frac{1}{k_{wp}} + \frac{1}{k_{cwc}} + \frac{1}{K_{eq}} \right)} \quad (15)$$

در این جا، k_{cwc} مؤلفه‌ی جان ستون در فشار است که از روابط موجود در آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا محاسبه می‌شود. همچنین، μ نسبت سختی $S_{j,ini}/S_j$ است که بر اساس رابطه‌ی زیر تعیین می‌گردد [۳]:

$$if \ M_{j.Ed} \leq \frac{2}{3} M_{j.Rd} \quad (16)$$

$$\mu = 1$$

$$if \ \frac{2}{3} M_{j.Rd} < M_{j.Ed} \leq$$

$$M_{j.Rd}$$

$$\mu = (1.5 M_{j.Ed} / M_{j.Rd})^\Psi$$

در اینجا، $M_{j.Ed}$ لنگر خمشی داخلی اعمالی است که می‌تواند کمتر از لنگر الاستیک ($\frac{2}{3} M_{j.Rd}$) یا در میان لنگر الاستیک و لنگر مقاوم طراحی ($M_{j.Rd}$) قرار گیرد. Ψ به نوع اتصال وابسته بوده که برای اتصالات جوشی و صفحه انتهایی ۲/۷ است [۳].

۲-۲- توسعه‌ی بخش پلاستیک نمودار لنگر - دوران

اکنون می‌توان منحنی الاستوپلاستیک لنگر - دوران اتصالات جوشی و صفحه انتهایی را به صورت یک نمودار سه خطی یا

$$and \ F_{EQ,Rd,i} = Min[V_{wp,Rd}, F_{j,Rd}]$$

$$k_{row,i} = k_{1PZ-B}$$

$$and \ F_{EQ,Rd,i} = V_{wp,Rd}$$

$$k_{compr} = \left(\frac{1}{k_{1compr}} + \frac{1}{k_j} \right)^{-1}$$

$$and \ F_{EQ,Rd,compr}$$

$$= Min[V_{wp,Rd}, F_{j,Rd}]$$

در اینجا، k و F_{Rd} به ترتیب سختی و مقاومت طراحی هر مؤلفه است. زیرنویس EQ بیانگر نیروی معادل و Rd بیانگر مقاومت طراحی است. مقادیر مجاز j برای ردیف i باید یک به یک محاسبه شود. مقادیر سختی و مقاومت طراحی هر مؤلفه درگیر در اتصال با در نظر گرفتن طول مؤثر و مدل ریشه‌ی سپری پیشنهاد شده در آیین‌نامه به دست می‌آید [۳]. در این روش، مقاومت طراحی هر مؤلفه برای هر ردیف پیچ از مقدار کمینه‌ی مقادیر طراحی هر ردیف و اثر هر ردیف بر مقاومت طراحی بیشینه‌ی ردیف‌های کناری در گروه پیچ‌ها محاسبه می‌شود. با تعادل‌گیری در راستای نیروهای محوری و لنگرگیری حول محور تعادل‌گیری، مقادیر به رابطه‌ی (۱۲) ختم می‌شود:

$$N_{Ed} = 0 = \sum_{int} N \quad (12)$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^{i=row} F_{EQ,i} + F_{EQ,compr} = 0$$

$$M_{j,Rd} = \sum_{int} M \Rightarrow$$

$$M_{j,Rd} = \sum_{i=1}^{i=row} F_{EQ,i} \cdot y_i + F_{EQ,compr} \cdot y_{compr}$$

بر اساس این رابطه، مقدار لنگر اتصال ($M_{j,Rd}$) محاسبه می‌شود. اکنون، باید سختی دورانی آغازین ($S_{j,ini}$) را به عنوان شیب آغازین نمودار لنگر - دوران اتصال محاسبه کرد. این کار به روش آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا انجام می‌گیرد که در گام نخست باید سختی معادل هر ردیف ($k_{row,i}$) در دست باشد. سپس، بازوی معادل (z_{eq}) طبق رابطه‌ی (۱۳) محاسبه می‌شود [۳].

چهارخطی به دست آورد.

$\frac{E_h}{E}$ نسبت سخت‌شدگی مصالح است که با توجه به نوع فولاد تیر مقادیر مختلفی را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به مصالح به کار گرفته شده و پژوهش‌های آماری انجام شده، در این پژوهش، این مقدار برابر با ۲۰ است [۱۷-۲۳]. این بخش به $kM_{j.Rd}$ محدود می‌شود که k برابر با f_u/f_y است. در این پژوهش، با توجه به نوع مصالح مصرفی برای تیر، نسبت f_u/f_y برای اتصال جوشی و صفحه‌ای انتهایی به ترتیب ۱/۸۲ و ۱/۵۶ محاسبه شد. بخش چهارم یک خط افقی است که از $kM_{j.Rd}$ با شیب صفر ادامه می‌یابد. روش‌شناسی یاد شده در این بخش برآمده از روابط تجربی و بررسی‌های آماری است و در بخش بعدی دقت و درستی آن‌ها ارزیابی می‌شود [۱۷-۲۳]. تمامی محاسبات یاد شده به صورت یک الگوریتم همه‌جانبه در نرم‌افزار متلب نوشته شد تا روند محاسبات ساده‌تر صورت گیرد.

۲-۳- امکان‌سنجی و راستی‌آزمایی روش پیشنهادی

به منظور ارزیابی روش مؤلفه‌ای پیشرفته، اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و اتصالات صفحه‌ای انتهایی هشت پیچی (چهار ردیف پیچ) و شش پیچی (سه ردیف پیچ) مورد بررسی قرار می‌گیرد و نمودار لنگر - دوران به دست آمده از این روش با نمودار لنگر - دوران محاسبه شده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس برای این اتصالات و روش آزمایشگاهی برای اتصال صفحه‌ای انتهایی شش پیچی مقایسه می‌شود. اتصال جوشی یعنی اتصال مثال یکم از پژوهش **مارتین و مونتز**^۱ [۱۸] برداشت شده و اتصال صفحه‌ای انتهایی هشت پیچی یعنی اتصال مثال دوم نیز برگرفته از مثال حل شده در آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا ویرایش انگلستان (EC3-UK) است [۱۸، ۲۴]. همچنین مثال سوم از مدل آزمایشگاهی پژوهش **کونیلو و بیجلارد**^۲ [۲۵] برداشت شده است. علت انتخاب این اتصالات بر این حقیقت استوار است که اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون یکی از رایج‌ترین اتصالات و اتصال صفحه‌ای انتهایی یکی از پرکاربردترین اتصالات است که

در حالتی که μ یک نباشد یعنی $M_{j.Ed}$ میان لنگر الاستیک ($\frac{2}{3}M_{j.Rd}$) و لنگر مقاوم طراحی ($M_{j.Rd}$) قرار گیرد، نمودار سه‌خطی شده (3l) و شیب شاخه‌ی اول از ضرب سختی دورانی آغازین ($S_{j.ini}$) در ۰/۶۷ به دست می‌آید که به لنگر خمشی مقاوم طراحی برابر با $M_{j.Rd}$ محدود است. این سختی را آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا، سختی ساختگی نامیده است و فلسفه‌ی آن بر اصلاح سختی دورانی آغازین است به گونه‌ای که در بازه‌ی میان $S_{j.ini}$ و $S_{j.ini}/\eta$ قرار گیرد. در این جا، η ضریب سختی است که به نوع اتصال وابسته بوده و برای اتصالات جوشی و صفحه‌ای انتهایی ۲ است [۳]. شاخه‌ی دوم میان دو لنگر $M_{j.Rd}$ و $kM_{j.Rd}$ قرار می‌گیرد که k برابر با f_u/f_y است. در این پژوهش، با توجه به نوع مصالح مصرفی برای تیر، نسبت f_u/f_y برای اتصال جوشی و صفحه‌ای انتهایی به ترتیب ۱/۸۲ و ۱/۵۶ محاسبه شد. شیب این شاخه نیز برابر با

$$S_{j.ini}/(3 \times 1.5^\Psi - 2) \approx S_{j.ini}/7$$

تعریف می‌شود، که Ψ برای اتصالات جوشی و صفحه‌ای انتهایی برابر ۲/۷ است. این رابطه‌ی بر اساس روابط پیش‌بینی ناحیه‌ی سخت‌شدگی کرنشی نمودار لنگر - دوران پیشنهاد شده است [۱۷].

در حالتی که μ برابر با یک باشد یعنی $M_{j.Ed}$ از لنگر الاستیک ($\frac{2}{3}M_{j.Rd}$) کمتر شود، نمودار چهارخطی شده (4l) و شیب شاخه‌ی اول برابر با سختی دورانی آغازین ($S_{j.ini}$) است و نیاز به اصلاح وجود ندارد. این شاخه به لنگر الاستیک یعنی $\frac{2}{3}M_{j.Rd}$ محدود است. بخش دوم که در بازه‌ی $\frac{2}{3}M_{j.Rd} < M \leq M_{j.Rd}$ می‌افتد با سختی برابر با

$$S_{j.ini}/(3 \times 1.5^\Psi - 2) \approx S_{j.ini}/7$$

تعریف می‌شود، همان‌طور که گفته شد Ψ برای اتصالات جوشی و صفحه‌ای انتهایی برابر ۲/۷ در نظر گرفته می‌شود. در بخش سوم، شیب این شاخه یا سختی از $S_{j.ini}/(\frac{E}{E_h})$ محاسبه می‌شود که

² Coelho and Bijlaard

¹ Martín and Montes



به عنوان اتصالات از پیش تأیید شده در آیین‌نامه‌های داخلی و بین‌المللی همچون آیین‌نامه‌ی AISC¹-358 شناخته شده است [۲۶].

مثال یکم در بر گیرنده‌ی یک اتصال ساخته شده از تیر IPE450 که دور تا دور آن به بال ستون HEB240 جوش شده است که ضخامت قاعده‌ی جوش آن ۹ میلی‌متر است. تمامی مقاطع، نورد گرم شده و از فولاد S275 با مقاومت نهایی ۵۰۰ مگاپاسکال می‌باشد [۲۴]. مثال دوم یک اتصال صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی است که در آن یک تیر IPE300 که دور تا دور آن به ورق انتهایی به ضخامت ۱۵ میلی‌متر با قاعده‌ی جوش ۶ میلی‌متر متصل شده است. ورق نیز به بال ستون HEB200 با ۸ پیچ M24 با سطح مقطع ۳۵۳ میلی‌مترمربع و طول ۵۷ میلی‌متر ساخته شده از رده‌ی فولاد ۶ - ۸ S275 با تنش نهایی ۵۰۰ مگاپاسکال وصل گردیده است [۱۸]. مثال سوم اتصال صفحه‌ی انتهایی شش پیچی است که توسط کوئیلو و بیجلارد [۲۵] مورد آزمایش قرار گرفته است. این اتصال به این شرح است که محیط یک تیر HE320A به ورق انتهایی به ضخامت ۱۰/۱۰ میلی‌متر با قاعده‌ی جوش ۸ میلی‌متر متصل شده است، طول تیر مشابه با مدل آزمایشگاهی ۱۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ورق نیز به بال ستون HE300M با ۶ پیچ M24 با سطح مقطع ۳۵۳ میلی‌مترمربع و طول ۵۳ میلی‌متر ساخته شده از رده‌ی فولاد ۹-۱۲ S690 با تنش نهایی ۱۴۱۲/۸ مگاپاسکال وصل شده است. اشکال (۱) تا (۳) نمایی از هندسه‌ی این سه اتصال را به ترتیب نشان می‌دهند. به منظور راستی‌آزمایی نمودارهای لنگر - دوران به دست آمده از روش مؤلفه‌ای توسعه یافته، مدل‌های اتصال به روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس بازتولید شدند. هندسه‌ی مدل‌ها درست همانند هندسه‌ی استفاده شده در روش مؤلفه‌ای بود. از المان solid برای ساخت تمامی اجزا بهره برده شد و از این روی مش استفاده شده از نوع C3D8R یعنی المان solid هشت‌گروه‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته و مهار تغییرشکل‌های ساعت‌شنی با روش مش‌بندی ساختاری صورت گرفت.

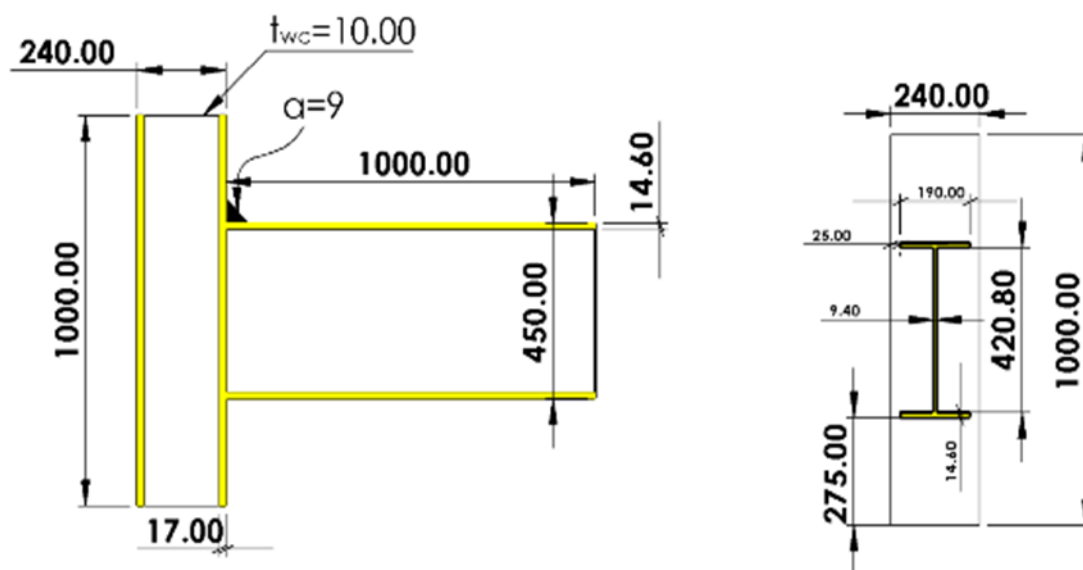
¹American Institute of Steel Construction

برای اتصالات صفحه‌ی انتهایی پیچی، در بخش‌هایی که دارای سوراخ پیچ بود از روش مش‌بندی خمیده بهره برده شد. اندازه‌ی مش‌بندی ۵۰ در ۵۰ میلی‌متر برای تیر و در بخش‌هایی که دارای هندسه‌ی پیچیده‌تر و حساسیت بیشتری بود (پیچ‌ها)، اندازه‌ی مش تا میزان ۵ در ۵ میلی‌متر کاهش یافت. در این پژوهش مصالح با رفتار الاستوپلاستیک کامل و اختصاص مدول الاستیسیته‌ی ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال برای مثال یکم و دوم و مدول الاستیسیته‌ی ۲۰۵۹۰۰ مگاپاسکال برای مثال سوم با ضریب پواسون ۰/۳ تعریف شدند و همچنین رفتار چندخطی مقادیر تنش - کرنش در حالت پلاستیک به صورت همسانگرد همگن به بخش‌های مختلف اتصال اختصاص داده شدند.

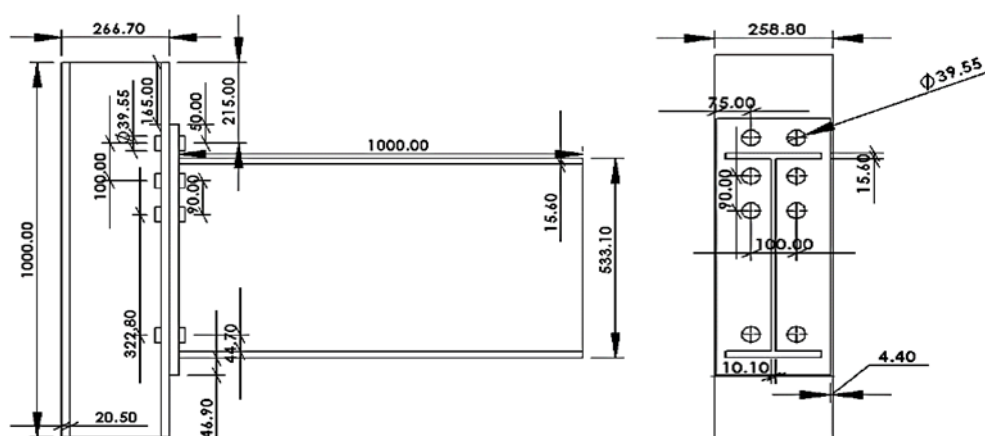
دیگر داده‌ها در زمینه‌ی رفتار پلاستیک فولاد مصرفی در جدول (۱) و شکل (۴) آورده شده است. طول تیر و ستون در اتصال اول و دوم یک متر و طول تیر و ستون در اتصال سوم با توجه به مدل آزمایشگاهی به ترتیب ۱/۳۰ و ۱/۵۴ متر در نظر گرفته شد. همچنین از حل گر استاتیک کلی برای حل مدل استفاده گردید.

اندرکنش در مدل اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون به صورت تماس از نوع Tie تعریف شد. برای اتصالات صفحه‌ی انتهایی پیچی تماس بین صفحه انتهایی و تیر از نوع تماس Tie و همچنین تماس بین جداره صفحه و پیچ‌ها به صورت General contact و از نوع Penalty با ضریب اصطکاک ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

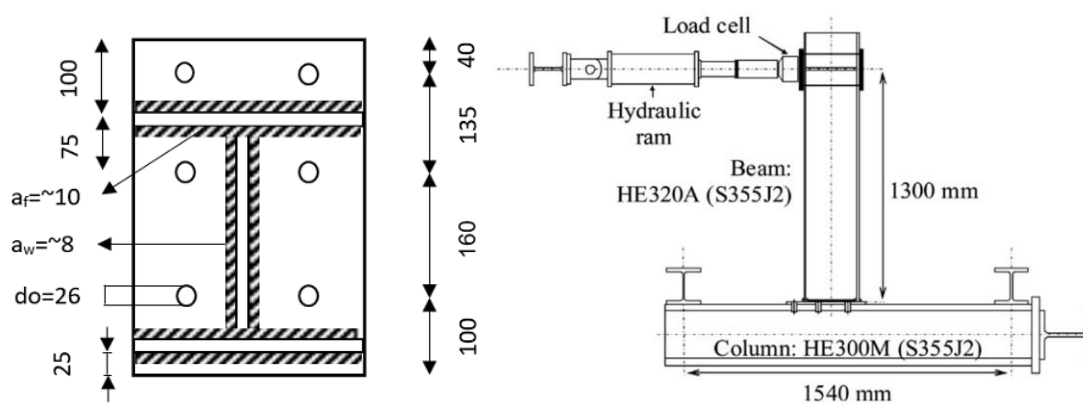
گره‌های سر تیر و دو سر ستون به نقاط مرجع زوج شدند تا شرایط مرزی برای این نقاط تعریف شود. بر این اساس، جابه‌جایی متناظر با نیرو به سر تیر اعمال شد و شرایط مرزی بالا همچنین پایین ستون به صورت غلتکی و مفصلی تنظیم گردید. افزون بر این، مهار جانبی نیز به میانه‌ی جان تیر اعمال شد تا از کماتش جانبی تیر جلوگیری کند. اشکال (۵) تا (۷) به ترتیب نمایی از مش‌بندی مدل اجزای محدود اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و اتصالات صفحه‌ی انتهایی چهار و شش پیچی را نشان



شکل ۱- نمایی از اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون [۲۴]



شکل ۲- نمایی از اتصال صفحه‌ای انتهایی هشت پیچی [۱۸]

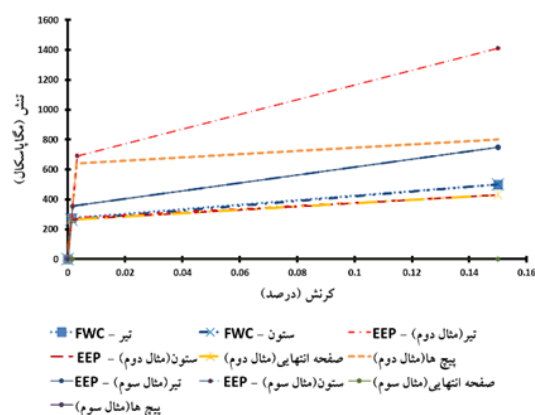


شکل ۳- نمایی از اتصال صفحه‌ای انتهایی شش پیچی [۲۵]

جدول ۱- مشخصات مصالح فولاد مصرفی در آباکوس [۲۴، ۲۵ و ۱۸]

نوع اتصال	مؤلفه	مدول یانگ (مگاپاسکال)	ضریب پوآسون	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)
اتصال مستقیم جوشی	تیر	۲۱۰۰۰	۰/۳	۲۷۵	۵۰۰
تیر به ستون (FWC)	ستون	۲۱۰۰۰	۰/۳	۲۷۵	۵۰۰
اتصال صفحه‌ای انتهایی	تیر	۲۱۰۰۰	۰/۳	۲۷۵	۴۳۰
هشت پیچی (EEP)	صفحه‌ای انتهایی	۲۱۰۰۰	۰/۳	۲۶۵	۴۳۰
	پیچ‌ها	۲۱۰۰۰	۰/۳	۶۴۰	۸۰۰
اتصال صفحه‌ای انتهایی	تیر	۲۰۵۹۰۰	۰/۳	۳۵۵	۷۴۹
شش پیچی (EEP)	ستون	۲۰۵۹۰۰	۰/۳	۳۵۵	۷۴۹
	صفحه‌ای انتهایی	۲۰۵۹۰۰	۰/۳	۳۵۵	۷۴۹
	پیچ‌ها	۲۰۵۹۰۰	۰/۳	۶۹۰	۱۴۱۲/۸

می‌دهد. خروجی‌ها نیز در برگیرنده‌ی کانتور تنش فون میسز^۱ این اتصالات در انتهای جابه‌جایی اعمال شده برای رسیدن به دوران نهایی ۰/۰۵۵، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ رادیان به ترتیب برای اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و اتصالات صفحه‌ای انتهایی چهار و شش پیچی (شکل (۸) و (۹)) است.



شکل ۴- نمودار دوطرفی مصالح فولاد مصرفی در آباکوس

اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و می‌توانند به عنوان معیاری مناسب در مقایسه‌ی مدل‌ها با یکدیگر به کار گرفته شوند. استخراج این پارامترها با چالش‌هایی روبه‌رو است. برای این کار، یک الگوریتم به منظور برازش منحنی‌های لنگر - دوران در نرم‌افزار متلب نوشته شد. این الگوریتم در برگیرنده‌ی بخش ورودی‌های نمودارها، پیدا کردن نقطه‌ی عطف منحنی، برازش بخش الاستیک، برازش بخش پلاستیک، یافتن نقطه‌ی تقاطع این دو بخش و رسم و استخراج خروجی‌ها است. فلسفه‌ی نگارش این الگوریتم بر این حقیقت استوار است که به منظور مقایسه‌ی منطقی نمودارهای چندخطی با نمودارهای منحنی، آن‌ها را باید دوطرفی کرد و پارامترهای اصلی یاد شده را با یک دیگر مقایسه نمود.

برای این کار، نخست باید مرز میان بخش الاستیک و پلاستیک نمودار مشخص شود که در این پژوهش نقطه‌ی چرخش منحنی انتخاب شد. برای یافتن نقطه‌ی چرخش از تابع گرادیان^۲ استفاده می‌شود. بر این اساس، جایی که شیب نقاط بیشترین تغییر را داشته باشد به عنوان نقطه‌ی چرخش انتخاب می‌شود [۲۷]. سپس، بخش الاستیک و بخش پلاستیک بر اساس قاعده‌ی برازش منحنی‌ها، خطی‌سازی شده و از تقاطع این دو خط دوران و لنگر تسلیم به دست می‌آید.

در بررسی، مقایسه و راستی‌آزمایی نمودارهای لنگر - دوران برگرفته از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس، پارامترهایی همچون دوران و لنگر تسلیم، دوران نهایی و لنگر نهایی همچنین شیب آغازین و شیب پست‌تسلیم نمودار لنگر - دوران مدل‌ها از

^۱ Von Mises^۲ Gradient

۳- یافته‌ها

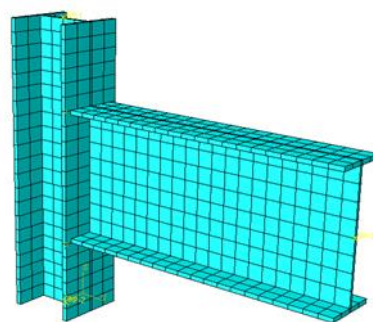
یافته‌های پژوهش دربرگیرنده‌ی دو بخش است که یکی به بحث راستی‌آزمایی و قابل اتکا بودن روش پیشنهادی می‌پردازد و در بخش دوم تحلیل پارامتریک و حساسیت آورده می‌شود.

۳-۱- بررسی نتایج راستی‌آزمایی

اشکال (۸) و (۹) به ترتیب نمایی از کانتور تنش فون میسر اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون، اتصال صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی را نشان می‌دهد. بیشترین میزان تنش در اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون، در چشمه‌ی اتصال و به میزان ۳۰۶ مگاپاسکال روی داده در حالی که در اتصال صفحه‌ی انتهایی، بیشترین میزان تنش برابر با ۸۰۰ مگاپاسکال و در جان پیچ‌ها دیده می‌شود.

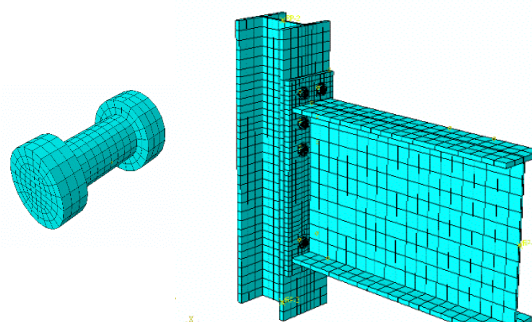
مقایسه‌ی نمودار لنگر - دوران اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی از روش اجزای محدود و روش مؤلفه‌ای مرسوم (EC3-2L) و روش مؤلفه‌ای پیشرفته (EC3-3L) نیز در شکل (۱۱) و جدول (۲) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی میان نتایج استخراج شده از روش مؤلفه‌ای پیشرفته و روش اجزای محدود وجود دارد. بر این اساس، روش مؤلفه‌ای پیشرفته توانسته است به خوبی بخش پلاستیک نمودار لنگر - دوران دو اتصال را پیش‌بینی کند و در مقایسه با خروجی‌های رویکرد اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس، درصد اختلاف سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب ۱۴/۷۵- و ۵/۵۵ درصد برای اتصال مستقیم جوشی و ۲/۹۸- و ۲۰/۰۹ درصد برای صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی به دست آمد.

شایان ذکر است درصد اختلاف لنگر نهایی برای اتصال مستقیم جوشی از روش مؤلفه‌ای مرسوم در آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا و روش مؤلفه‌ای پیشرفته با خروجی رویکرد اجزای محدود به ترتیب ۲۷/۹۵ و ۳۲/۳۹- درصد و همچنین برای اتصال صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی به ترتیب ۳۷/۸۱ و ۶/۷۲ درصد به دست آمد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود در بخش



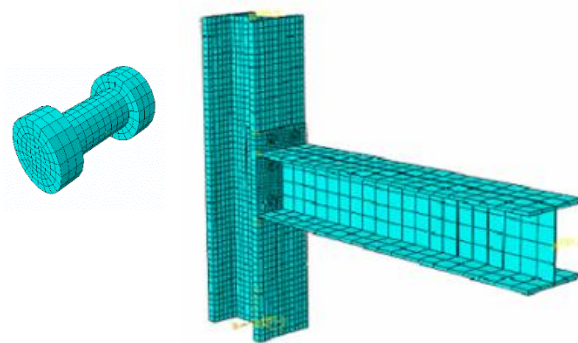
شکل ۵- نمایی از مش‌بندی مدل اجزای محدود اتصال

مستقیم جوشی تیر به ستون



شکل ۶- نمایی از مش‌بندی مدل اجزای محدود اتصال

صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی



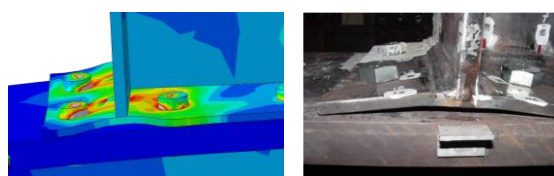
شکل ۷- نمایی از مش‌بندی مدل اجزای محدود اتصال

صفحه‌ی انتهایی شش پیچی کوئیلو و بیجلارد [۲۵]

از توابع lsqcurvefit و intersections موجود در کتابخانه‌ی متلب برای برازش منحنی‌ها و یافتن نقطه‌ی تقاطع استفاده گردید. شیب و معادله‌ی خط نیز بر اساس روابط ریاضی معادله‌ی خط تعریف شدند. نتایج راستی‌آزمایی در بخش بعدی ارائه شده است.

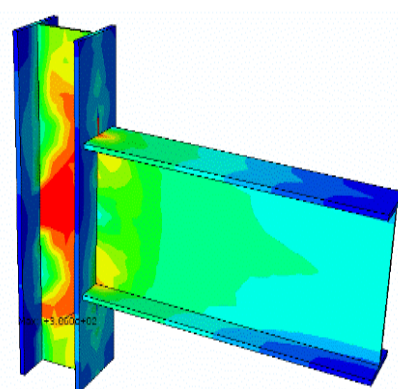
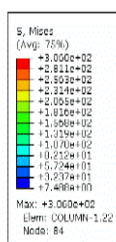
پلاستیک روش مؤلفه‌ای مرسوم اختلاف چشمگیری با نتایج روش اجزای محدود دارد.

شکل (۱۰) تصویر صفحه‌ی انتهایی پس از شکست در مدل‌آزمایشگاهی کوئیلو و بیجلارد [۲۵] و همچنین نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر شکل صفحه‌ی انتهایی در نرم‌افزار آباکوس هم‌خوانی مناسبی با مدل آزمایشگاهی دارد. در شکل (۱۲) مقایسه‌ی نمودار لنگر - دوران صفحه‌ی انتهایی کوئیلو و بیجلارد [۲۵] به روش آزمایشگاهی با روش‌های اجزای محدود و مؤلفه‌ای مرسوم (EC3-2L) و مؤلفه‌ای پیشرفته (EC3-3L) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده مقاومت خمشی ($M_{j,Rd}$)، سختی آغازین ($S_{j,ini}$) و لنگر نهایی (M_u) از چهار روش (آزمایشگاهی، مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته و اجزای محدود) به همراه درصد خطا بین روش‌های مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته و روش آزمایشگاهی و همچنین روش‌های مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته با روش اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس در جدول (۲) آمده است. در مقایسه مدل آزمایشگاهی کوئیلو و بیجلارد [۲۵] با خروجی‌های رویکرد مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته درصد اختلاف سختی آغازین و لنگر اتصال به‌ترتیب ۱۰/۲- و ۸/۲۴ درصد اختلاف لنگر نهایی در مقایسه مدل آزمایشگاهی با خروجی‌های رویکرد مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته به‌ترتیب ۳۱/۵۶ و ۲/۴۶- درصد به دست آمد.

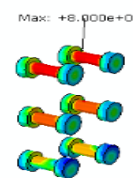
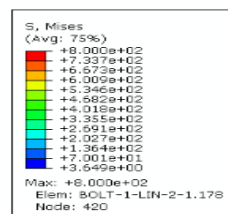
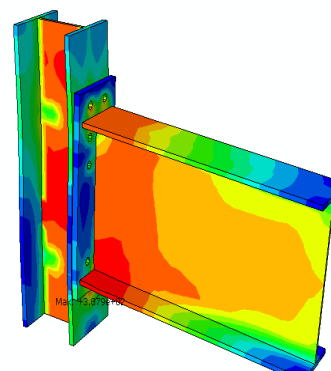
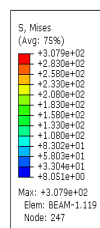
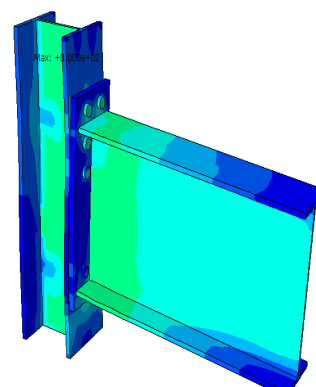
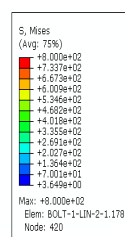


شکل ۱۰- مقایسه‌ی اتصال صفحه‌ی انتهایی کوئیلو و بیجلارد [۲۵] با خروجی نرم‌افزار آباکوس پس از شکست صفحه‌ی انتهایی

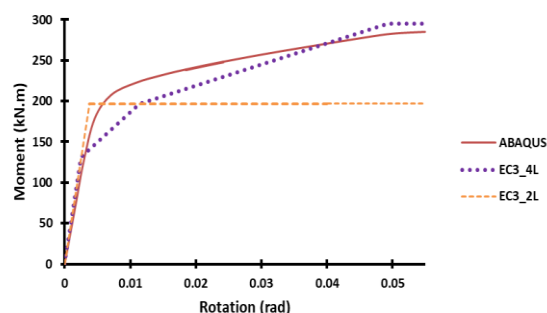
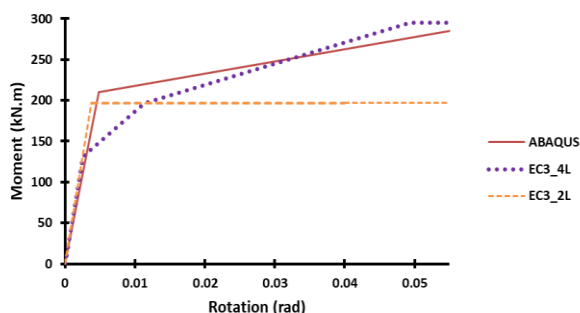
همان‌طور که در اشکال (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود، به دلیل این که در روش مؤلفه‌ای مرسوم در آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا، ناحیه‌ی پلاستیک نمودار لنگر - دوران به صورت خطی و با شیب صفر در نظر می‌گیرند، دقت این روش به ویژه در بخش پلاستیک



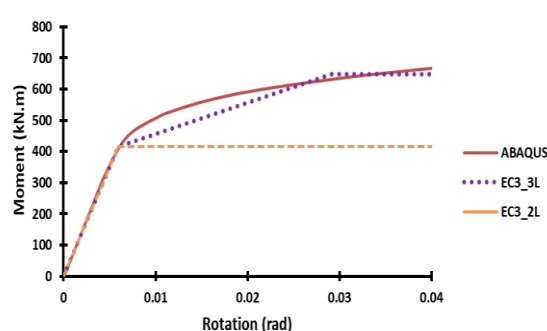
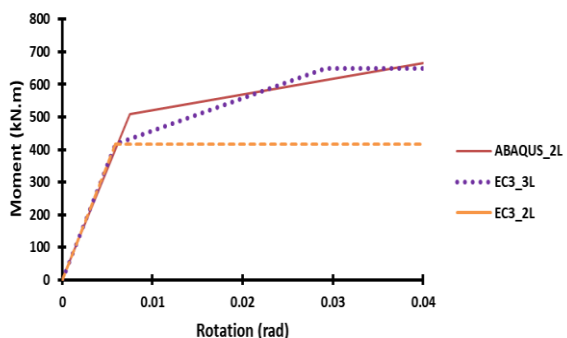
شکل ۸- کانتور تنش فون میسز اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون (یکا: مگاپاسکال)



شکل ۹- کانتور تنش فون میسز اتصال صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی (یکا: مگاپاسکال)



مقایسه‌ی نمودار لنگر - دوارن اتصال جوشی با خروجی نرم‌افزار آباکوس در دو حالت منحنی و خطی سازی شده



مقایسه‌ی نمودار لنگر - دوارن اتصال صفحه‌ای انتهایی هشت پیچی با خروجی نرم‌افزار آباکوس در دو حالت منحنی و خطی سازی شده

شکل ۱۱- مقایسه‌ی نمودار لنگر - دوارن اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و صفحه‌ای انتهایی از سه روش اجزای محدود و مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته

این دو اتصال یعنی لنگر مقاوم اتصال ($M_{j,Rd}$) و سختی دورانی آغازین ($S_{j,ini}$) دارد.

برای این کار، در اتصال جوشی مستقیم، پنج پارامتر هندسی یعنی ضخامت بال تیر (t_{fb})، عمق ستون (h_c)، ضخامت جان ستون (t_{wc})، ضخامت بال ستون (t_{fc}) و عمق تیر (h_b) در نظر گرفته شد و هر یک از این پارامترها تحت افزایش و کاهش ۲۰ درصدی قرار داده شدند. بدین منظور، مقادیر جدید برای سختی آغازین و لنگر اتصال به کمک روش مؤلفه‌ای پیشرفته محاسبه و نتایج برای اتصال جوشی مستقیم به همراه درصد اختلاف با مقادیر پایه در جدول (۳) ارائه شد. همین کار برای اتصال صفحه‌ای انتهایی تکرار گردید و در جدول (۴) نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی یعنی ضخامت بال ستون (t_{fc})، عمق ستون (h_c)، ضخامت جان ستون (t_{wc})، عمق تیر (h_b)، ضخامت صفحه

نمودار بسیار پایین است و از این روی ضرورت توسعه‌ی روش مؤلفه‌ای در این پژوهش را به خوبی نشان می‌دهد. در روش مؤلفه‌ای پیشرفته با توجه به این که روابط در برگیرنده‌ی مقادیر لنگر و دوران در ناحیه‌ی پلاستیک نیز است، می‌توان از نمودارهای استخراج شده از این روش با اطمینان استفاده کرد.

۴- تحلیل پارامتریک و حساسیت

در این بخش تلاش بر این است تا با تغییر پارامترهای هندسی اثرگذار بر رفتار اتصال جوشی و صفحه‌ای انتهایی هشت پیچی، توانمندی روش مؤلفه‌ای پیشرفته در ارائه خروجی‌های تعمیم‌پذیر روشن گردد، فهم جامعی از نقش و میزان اثرگذاری مؤلفه‌های مختلف این دو اتصال به دست آید و در نهایت روشن گردد کدام پارامتر هندسی بیشترین اثر را بر دو پارامتر کلیدی رفتار خمشی

روی مقادیر سختی آغازین و لنگر اتصال دارد به گونه‌ای که با کاهش عمق تیر به میزان ۲۰ درصد، سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب ۲۸/۷۷ و ۲۰/۶۷ درصد کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش عمق تیر به میزان ۲۰ درصد، سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب ۳۰/۴۳ و ۲۰/۶۷ درصد افزایش می‌یابد. پارامترهای اثرگذار بعدی به ترتیب ضخامت جان ستون (t_{wc})، ضخامت بال ستون (t_{fc})، عمق ستون (h_c) و ضخامت بال تیر (t_{fb}) برای سختی آغازین و ضخامت جان ستون (t_{wc})، عمق ستون (h_c)، ضخامت بال ستون (t_{fc}) و ضخامت بال تیر (t_{fb}) برای لنگر اتصال هستند. برای اتصال صفحه‌ای انتهایی هشت پیچی، با توجه به جدول (۴)، مشاهده می‌شود که در میان شش پارامتر بررسی شده، تغییر پارامتر عمق تیر (h_b) بیشترین اثر را بر روی مقادیر سختی آغازین و لنگر اتصال دارد به گونه‌ای که با کاهش عمق تیر به میزان ۲۰ درصد، سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب ۲۷/۵۳ و ۲۱/۵۴ درصد کاهش و با افزایش عمق تیر به میزان ۲۰ درصد سختی آغازین و

انتهایی (t_p) و فاصله‌ی افقی پیچ‌ها در یک ردیف (w) ارائه گردید. با افزایش و کاهش ۲۰ درصدی پارامترهای ذکر شده، مقادیر سختی آغازین و لنگر اتصال دوباره محاسبه و درصد اختلاف آن‌ها با مقادیر پایه مقایسه شدند. علت انتخاب این مقدار برای کاهش و افزایش این بود که تغییرات در آستانه‌ی مجاز بالا و پایین پارامترهای هندسی اتصال بر طبق ضوابط آیین‌نامه-AISC 358 قرار گیرند و اتصالات دارای پیکره‌بندی نامتعارف نباشند [۲۶]. برای درک بهتر خروجی‌ها همچنین درصد اختلاف میان مقادیر به دست آمده از تحلیل حساسیت با مدل پایه به صورت نمودارهای گردباد به ترتیب برای اتصال مستقیم جوشی و اتصال صفحه‌ای انتهایی در اشکال (۱۳) و (۱۴) ارائه گردیدند. دقت شود که برای اتصال مستقیم جوشی، نتایج اصلاح نشده‌ی سختی دورانی آغازین با یک دیگر مقایسه شدند. با توجه به جدول (۳)، برای اتصال مستقیم جوشی، مشاهده می‌شود که در میان پنج پارامتر بررسی شده، تغییر پارامتر عمق تیر (h_b) بیشترین اثر را بر

جدول ۲- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی اتصال مستقیم جوشی

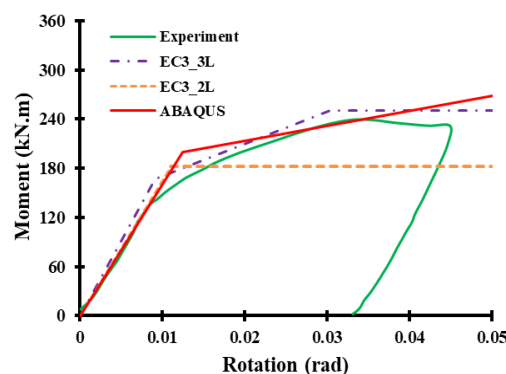
اتصال	رویکرد	S_{jini} (kN.m/rad)	$M_{j.Rd}$ (kN.m)	M_u (kN.m)
اتصال مستقیم جوشی	آباکوس	۳۹۶۷۰/۹۱	۲۱۷/۷۶	۲۸۵/۴۷
	روش مؤلفه‌ای	۴۵۵۲۱/۱۴	۲۰۵/۶۷	۲۰۵/۶۷
	روش مؤلفه‌ای پیشرفته	۴۵۵۲۱/۱۴	۲۰۵/۶۷	۲۹۵/۱۵
	روش مؤلفه‌ای و آباکوس	-۱۴/۷۵	۵/۵۵	۲۷/۹۵
درصد اختلاف	مؤلفه‌ای پیشرفته و آباکوس	-۱۴/۷۵	۵/۵۵	-۳/۳۹
	آباکوس	۶۸۱۳۹/۹۸	۵۲۰/۳۱	۶۶۸/۵۹
	روش مؤلفه‌ای	۷۰۱۷۲	۴۱۵/۷۷	۴۱۵/۷۷
	روش مؤلفه‌ای پیشرفته	۷۰۱۷۲	۴۱۵/۷۷	۶۲۳/۶۵
صفحه‌ی انتهایی چهارپیچی	روش مؤلفه‌ای و آباکوس	-۲/۹۸	۲۰/۰۹	۳۷/۸۱
	مؤلفه‌ای پیشرفته و آباکوس	-۲/۹۸	۲۰/۰۹	۶/۷۲
	آزمایشگاهی	۱۶۵۴۵/۴۵	۱۸۲	۲۴۴
	آباکوس	۱۷۴۴۷/۴۷	۱۷۲	۲۶۸
شش پیچی	روش مؤلفه‌ای	۱۸۲۳۳/۱۳	۱۶۷	۱۶۷
	روش مؤلفه‌ای پیشرفته	۱۸۲۳۳/۱۳	۱۶۷	۲۵۰
	روش مؤلفه‌ای و آزمایشگاهی	-۱۰/۲	۸/۲۴	۳۱/۵۶
	روش مؤلفه‌ای و آباکوس	-۴/۵	۲/۹۱	۳۷/۶۸
درصد اختلاف	مؤلفه‌ای پیشرفته و آزمایشگاهی	-۱۰/۲	۸/۲۴	-۲/۴۶
	مؤلفه‌ای پیشرفته و آباکوس	-۴/۵	۲/۹۱	۶/۷۲

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی اتصال مستقیم جوشی

پارامتر				t_{fb}
تغییرات	$0/8 t_{fb}$	درصد اختلاف	$1/2 t_{fb}$	درصد اختلاف
$S_{j,int}$	۶۷۶۶۰	-۰/۴۲	۶۸۲۱۶	۰/۴
M_{j_Rd}	۲۰۴/۲۹	-۰/۶۷	۲۰۷/۰۵	۰/۶۷
پارامتر				h_c
تغییرات	$0/8 h_c$	درصد اختلاف	$1/2 h_c$	درصد اختلاف
$S_{j,int}$	۶۸۷۲۱	۱/۱۵	۶۵۷۵۳	-۳/۲۲
M_{j_Rd}	۱۷۷/۲۳	-۱۳/۸۳	۲۱۸/۵۶	۶/۲۷
پارامتر				t_{wc}
تغییرات	$0/8 t_{wc}$	درصد اختلاف	$1/2 t_{wc}$	درصد اختلاف
$S_{j,int}$	۵۶۶۳۹	-۱۶/۶۴	۷۹۱۱۵	۱۶/۴۴
M_{j_Rd}	۱۷۱/۸۱	-۱۶/۴۶	۲۴۳/۱۱	۱۳/۸۳
پارامتر				t_{fc}
تغییرات	$0/8 t_{fc}$	درصد اختلاف	$1/2 t_{fc}$	درصد اختلاف
$S_{j,int}$	۶۲۴۷۸	-۸/۰۴	۷۳۵۴۸	۸/۲۵
M_{j_Rd}	۱۹۲/۹۸	-۶/۱۷	۲۱۸/۳۶	۶/۱۷
پارامتر				h_b
تغییرات	$0/8 h_b$	درصد اختلاف	$1/2 h_b$	درصد اختلاف
$S_{j,int}$	۴۸۳۹۳	-۲۸/۷۷	۸۸۶۱۴	۳۰/۴۳
M_{j_Rd}	۱۶۳/۱۶	-۲۰/۶۷	۲۴۸/۱۸	۲۰/۶۷

عمق ستون (h_c)، ضخامت بال ستون (t_{fc})، فاصله‌ی افقی پیچ‌ها در یک ردیف (w) و ضخامت صفحه‌ی انتهایی (t_p) برای سختی آغازین همچنین ضخامت جان ستون (t_{wc})، ضخامت بال ستون (t_{fc})، ضخامت صفحه‌ی انتهایی (t_p)، فاصله‌ی افقی پیچ‌ها در یک ردیف (w) و عمق ستون (h_c) برای لنگر اتصال هستند.

با توجه به شکل (۱۳)، با افزایش و کاهش ۲۰ درصدی پارامترهای اتصال جوشی مستقیم، مقدار لنگر اتصال و سختی آغازین افزایش و کاهش می‌یابد، به جزء پارامتر عمق ستون که از روند معکوسی پیروی می‌کند به گونه‌ای که با افزایش آن مقدار سختی آغازین کاهش و با کاهش عمق ستون مقدار سختی آغازین افزایش می‌یابد. علت این موضوع این است که با افزایش عمق ستون، سختی جان ستون در برش افزایش یافته در حالی که سختی جان ستون در فشار و سختی جان ستون در کشش کاهش می‌یابد.

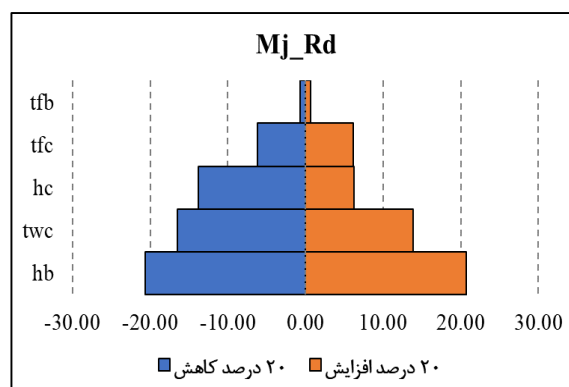
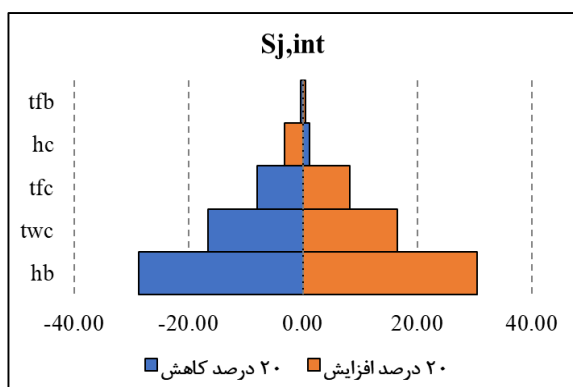


شکل ۱۲- مقایسه‌ی نمودار آزمایشگاهی لنگر - دوران اتصال صفحه‌ی انتهایی پژوهش کوئیلو و بیجلارد [۲۵] با روش اجزای محدود خطی‌سازی شده و روش مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته

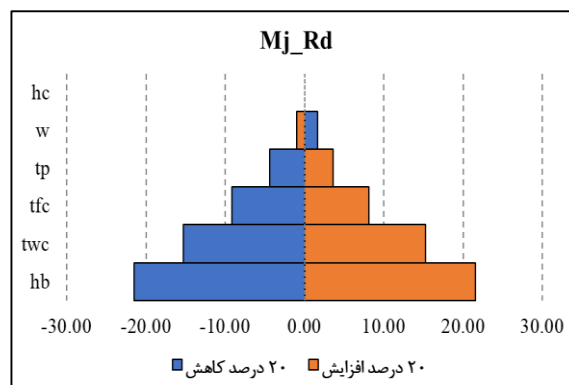
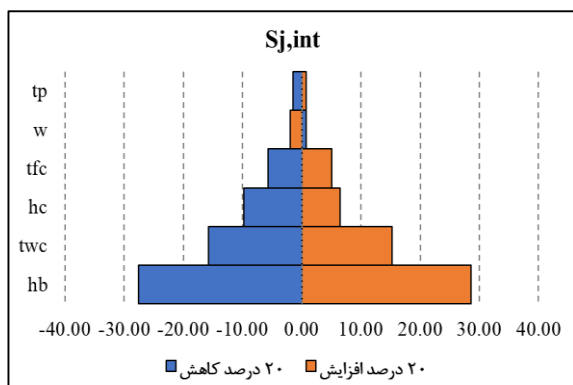
لنگر اتصال به ترتیب ۲۸/۶۵ و ۲۱/۵۴ درصد افزایش می‌یابند. پارامترهای اثرگذار بعدی به ترتیب ضخامت جان ستون (t_{wc}),

جدول ۴- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی اتصال صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی

پارامتر			
h_b			
تغییرات	$0/8 h_b$	درصد اختلاف	$1/2 h_b$
$S_{j,int}$	۵۰۸۵۲	-۲۷/۵۳	۹۰۲۷۳
M_{j_Rd}	۳۲۶/۲۳	-۲۱/۵۴	۵۰۵/۳۲
درصد اختلاف			
			۲۸/۶۵
			۲۱/۵۴
پارامتر			
t_{wc}			
تغییرات	$0/8 t_{wc}$	درصد اختلاف	$1/2 t_{wc}$
$S_{j,int}$	۵۹۱۴۴	-۱۵/۷۲	۸۰۹۱۱
M_{j_Rd}	۳۵۲/۲۴	-۱۵/۲۸	۴۷۹/۳۴
درصد اختلاف			
			۱۵/۳۰
			۱۵/۲۹
پارامتر			
h_c			
تغییرات	$0/8 h_c$	درصد اختلاف	$1/2 h_c$
$S_{j,int}$	۶۳۳۲۹	-۹/۷۵	۷۴۷۰۷
M_{j_Rd}	۴۱۵/۷۷	.	۴۱۵/۷۷
درصد اختلاف			
			۶/۴۶
			.
پارامتر			
t_{fc}			
تغییرات	$0/8 t_{fc}$	درصد اختلاف	$1/2 t_{fc}$
$S_{j,int}$	۶۶۲۱۷	-۵/۶۴	۷۳۷۱۱
M_{j_Rd}	۳۷۷/۵۹	-۹/۱۸	۴۴۹/۵۷
درصد اختلاف			
			۵/۰۴
			۸/۱۳
پارامتر			
w			
تغییرات	$0/8 w$	درصد اختلاف	$1/2 w$
$S_{j,int}$	۷۰۶۸۴	۰/۷۳	۶۸۷۷۴
M_{j_Rd}	۴۲۲/۶۲	۱/۶۵	۴۱۱/۷۸
درصد اختلاف			
			-۱/۹۹
			-۰/۹۶
پارامتر			
t_p			
تغییرات	$0/8 t_p$	درصد اختلاف	$1/2 t_p$
$S_{j,int}$	۶۹۱۱۴	-۱/۵۱	۷۰۶۸۱
M_{j_Rd}	۳۹۷/۵۹	-۴/۳۷	۴۳۰/۶۱
درصد اختلاف			
			۰/۷۳
			۳/۵۷



شکل ۱۳- درصد اختلاف نتایج تغییر لنگر و سختی آغازین اتصال مستقیم جوشی با مقادیر پایه برای پارامترهای هندسی



شکل ۱۴- درصد اختلاف نتایج تغییر لنگر و سختی آغازین اتصال صفحه‌ی انتهایی با مقادیر پایه برای پارامترهای هندسی

راستی آزمایی گردید و از درستی رسم نمودارهای لنگر- دوران با دو بخش الاستیک و پلاستیک به روش مؤلفه‌ای پیشرفته اطمینان حاصل شد. در انتها، بررسی‌های پارامتریکی در چهارچوب تحلیل حساسیت بر روی این اتصالات به کمک رویکرد تحلیلی مؤلفه‌ای پیشرفته انجام گرفت تا بر تعمیم‌پذیری این روش تأکید شده و فهم بهتری نیز از رفتار خمشی اتصالات به ویژه اتصال صفحه‌ی انتهایی به عنوان یکی از پرکاربردترین اتصالات از پیش تأیید شده فراهم آید.

بر پایه‌ی نتایج مشخص شد که روش مؤلفه‌ای پیشرفته‌ی ارائه شده در این پژوهش به نسبت روش مؤلفه‌ای مرسوم در آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا دارای حجم محاسبات کمتر به دلیل فشرده‌سازی روابط است که این سبب می‌شود احتمال خطا در روند محاسبات کمتر شود. در مقایسه با خروجی‌های رویکرد اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس، درصد اختلاف سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب $14/75$ - و $5/55$ درصد برای اتصال مستقیم جوشی و $2/98$ - و $20/09$ درصد برای صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی است. افزون بر این، این روش به خوبی می‌تواند بخش پلاستیک نمودار لنگر- دوران اتصالات را پیش‌بینی کند. به طوری که درصد اختلاف لنگر نهایی برای اتصال مستقیم جوشی از روش مؤلفه‌ای و روش مؤلفه‌ای پیشرفته در مقایسه با خروجی رویکرد اجزای محدود به ترتیب $27/95$ و $3/39$ - درصد و همچنین برای صفحه‌ی انتهایی هشت پیچی به ترتیب $37/81$ و $6/72$ درصد به دست آمد.

بنابراین، بر پایه‌ی رابطه‌ی (۹)، مقدار سختی آغازین نیز کاهش خواهد یافت. با توجه به شکل (۱۴)، در اتصال صفحه‌ی انتهایی، مشخص می‌شود که با استفاده از روش مؤلفه‌ای پیشرفته در محاسبه سختی آغازین، با افزایش ۲۰ درصدی پارامترهای یاد شده، سختی آغازین نیز افزایش می‌یابد به جز در حالتی که افزایش فاصله‌ی افقی پیچ‌ها منجر به کاهش سختی آغازین شده است. همچنین، در حالت کاهش ۲۰ درصدی پارامترها نتیجه برعکس بوده است. برای لنگر اتصال، با افزایش ۲۰ درصدی پارامترهای یاد شده، لنگر اتصال افزایش یافته به جز پارامتر فاصله‌ی افقی پیچ‌ها که با افزایش ۲۰ درصدی، لنگر اتصال کاهش می‌یابد و در حالت کاهش ۲۰ درصدی این پارامتر، رفتار اتصال برعکس می‌باشد. شایان ذکر است افزایش و کاهش ۲۰ درصدی عمق ستون اثری بر روی مقدار لنگر اتصال ندارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بهبود روش مؤلفه‌ای، این روش در سه وجه توسعه یافت به گونه‌ای که روابط مربوط به محاسبه‌ی مقادیر سختی آغازین ($S_{j,int}$) و لنگر اتصال ($M_{j,Rd}$) فشرده‌سازی شدند، بخش پلاستیک نمودار لنگر- دوران فرای دستورالعمل آیین‌نامه‌ی شماره‌ی ۳ اروپا توسعه یافت، قابل اتکا بودن این نمودارها برای دو اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و صفحه‌ی انتهایی به واسطه‌ی مقایسه‌ی آن‌ها با نمودارهای لنگر- دوران استخراج شده از روش آزمایشگاهی و روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس

۶- مراجع

- [۱] ازهری، م. و میرقادی، ر. (۱۳۹۳). طراحی سازه های فولادی - طراحی اتصالات به روش حالت حدی و مقاومت مجاز، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، ایران، ص. ۸-۱۸.
- [2] Chen, W., Kishi, N., and Komuro, M. (2011), "Semi-rigid connections handbook", J. Ross Publishing, United States.
- [3] CEN, E. (2005), "Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.8: Design of joints. Brussels", The European Committee for Standardization.
- [4] Da Silva, L.S., Santiago, A. and Real, P.V. (2001), "A component model for the behaviour of steel joints at elevated temperatures", Journal of Constructional Steel Research, V. 57, N. 11, pp. 1169-1195.
- [5] Da Silva, L.S., de Lima, L.R., da Svelasco, P.C. and de Andrade, S.A. (2004), "Behaviour of flush end-plate beam-to-column joints under bending and axial force", Steel and Composite structures, V. 4, No. 2, pp. 77-94.
- [6] Bayo, E., Cabrero, J.M., and Gil, B. (2006), "An effective component-based method to model semi-rigid connections for the global analysis of steel and composite structures", Engineering structures, V.28, No. 1, pp. 97-108.
- [7] Del Savio, A.A., Nethercot, D.A., Vellasco, P.C.G.S., Andrade, S.A.L. and Martha, L.F. (2009), "Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction", Journal of Constructional Steel Research, V. 65, No. 8-9, pp.1876-1895.
- [8] Demonceau, J.F., Weynand, K., Jaspert, J.P. and Müller, C. (2010), "Application of Eurocode 3 to steel connections with four bolts per horizontal row", In Proceedings of the SDSS'Rio 2010 conference (pp. 199-206). Rio de Janeiro.
- [9] Liu, C., Tan, K.H. and Fung, T.C. (2015), "Component-based steel beam-column connections modelling for dynamic progressive collapse analysis", Journal of Constructional Steel Research, V.107, pp. 24-36.
- [10] Wald, F., Šabatka, L., Kabeláč, J., Kolaja, D. and Pospíšil, M. (2015), "Structural Analysis and Design of Steel Connections Using Component Based Finite

در مقایسه مدل آزمایشگاهی اتصال صفحه‌ای انتهایی شش پیچی کوئیلو و بیجلارد [۲۵] با خروجی‌های رویکرد مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته درصد اختلاف سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب $10/2$ - و $8/24$ درصد اختلاف لنگر نهایی در مقایسه مدل آزمایشگاهی با خروجی‌های رویکرد مؤلفه‌ای مرسوم و پیشرفته به ترتیب $31/56$ و $2/46$ - درصد به دست آمد. بنابراین در بخش پلاستیک روش مؤلفه‌ای مرسوم اختلاف چشمگیری با نتایج آزمایشگاهی و روش اجزای محدود دارد. بر این اساس، روش مؤلفه‌ای پیشرفته یک رویکرد تحلیلی قابل اتکا با درصد خطای اندک و دقت بالا به منظور پیش‌بینی رفتار خمشی و نمودارهای لنگر - دوران اتصال مستقیم جوشی و صفحه‌ای انتهایی برای فاز الاستیک و پلاستیک است.

خروجی‌های تحلیل حساسیت به کمک روش مؤلفه‌ای پیشرفته برای دو اتصال یاد شده نشان دادند که در میان پارامترهای هندسی بررسی شده برای دو اتصال، عمق تیر بیشترین اثر را بر تغییر سختی آغازین و لنگر اتصال دارد به گونه‌ای که در اتصال صفحه‌ای انتهایی مورد بررسی، کاهش عمق تیر به میزان ۲۰ درصد سبب فروکاست سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب به میزان $27/53$ و $21/54$ درصد شد در حالی که با افزایش عمق تیر به میزان ۲۰ درصد، سختی آغازین و لنگر اتصال به ترتیب $28/65$ درصد و $21/54$ درصد افزایش یافتند. همچنین، تغییر در عمق ستون در اتصال جوشی مستقیم مورد بررسی و فاصله‌ی افقی بین پیچ‌ها در اتصال صفحه‌ای انتهایی مورد بررسی دارای روندی متفاوت است به گونه‌ای که در اتصال جوشی مستقیم، با افزایش عمق ستون سختی آغازین کاهش می‌یابد و بالعکس. همچنین، در اتصال صفحه‌ای انتهایی مورد بررسی، با افزایش فاصله‌ی افقی بین پیچ‌ها، مقدار لنگر اتصال و سختی آغازین کاهش می‌یابد. افزون بر این، در میان پارامترهای هندسی، در اتصال جوشی مستقیم، کم‌اثرترین پارامتر بر روی مقدار لنگر اتصال و سختی آغازین، ضخامت بال تیر است در حالی که در اتصال صفحه‌ای انتهایی، افزایش یا کاهش عمق ستون اثری بر روی لنگر اتصال ندارد.

- [20] Da Silva, L.S., Santiago, A. and Real, P.V. (2002), "Post-limit stiffness and ductility of end-plate beam-to-column steel joints", *Computers & Structures*, V. 80, N O. 5-6, PP. 515-531.
- [21] Yun, X. and Gardner, L. (2017), "Stress-strain curves for hot-rolled steels", *Journal of Constructional Steel Research*, V. 133, pp. 36-46.
- [22] Elflah, M., Theofanous, M., Dirar, S. and Yuan, H. (2019), "Behaviour of stainless steel beam-to-column joints—Part 1: Experimental investigation", *Journal of Constructional Steel Research*, V. 152, pp. 183-193.
- [23] Qiang, X., Wu, N., Luo, Y., Jiang, X. and Bijlaard, F. (2018), "Experimental and theoretical study on high strength steel extended endplate connections after fire", *International Journal of Steel Structures*, V. 18, pp. 609-634.
- [24] Gil-Martín, L.M., and Hernández-Montes, E. (2020), "A compact and simpler formulation of the component method for steel connections", *Journal of Constructional Steel Research*, V. 164, 105782.
- [25] Coelho, A.M.G. and Bijlaard, F.S. (2007), "Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections", *Journal of Constructional Steel Research*, V. 63, No. 9, pp. 1228-1240.
- [26] ANSI, A. (2005), *Aisc 358-05 prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications*. American Institute of Steel Construction Inc., Chicago.
- [27] Eng, M.B.P.D., Uang, C.M. and SE, R.S. (2011), "Ductile design of steel structures", McGraw-Hill Education.
- Element Model (CBFEM)", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, V.9, pp. 895-901.
- [11] Shahbaziana, A., Gentilia, F., Costaa, R. and Rebeloa, C. (2015), "Advanced Tools for Simulating Monotonic and Cyclic Response Of Beam To Column Steel Joints", X Congresso de Construção Metálica e Mista Conference, Coimbra.
- [12] Kazemi, M., Sohrabi, M., Haji Kazemi, H. (2017), "Study of BSB connections behavior under cyclic loads", *Journal of structure and steel*, V. 10, No. 20, pp. 31-44.
- [13] Kristóf, I., Novák, Z. and Hegyi, D. (2017), "A Simplified Method for the Design of Steel Beam-to-column Connections", *Periodica Polytechnica Architecture*, V. 48, No. 2, pp. 79-86.
- [14] Soleimani, E., & Behnamfar, F. (2017). New moment-rotation equation for welded steel beam-to-column connections. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 389-411.
- [15] Hortencio, R.D.S. and Falcón, G.A.S. (2018), "Optimal design of beam-column connections of plane steel frames using the component method. Latin American", *Journal of Solids and Structures*, V. 15, No. 11.
- [16] Shabaniyan, S.M., Abdollahzadeh, G. and Davoodi, M. (2020), "Evaluation of the moment-rotation curve of steel beam-to-column joints with flange-plate", *Asian Journal of Civil Engineering*, V. 21No. 3, pp. 517-531.
- [17] Faella, C., Piluso, V. and Rizzano, G. (1999), "Structural steel semirigid connections: theory, design, and software", CRC press. Publishing, 1st Edition.
- [18] Jaspart, J.P. and Weynand, K. (2016), *Design of Joints in Steel and Composite Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structure. Part 1-8-design of joints: Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures. Part 1-1-general rules and rules for buildings*.
- [19] Brown, D., Iles, D., Brettle, M., Malik, A. and BCSA/SCI Connections Group. (2013), *Joints in Steel Construction: Moment-Resisting Joints to Eurocode 3. Vol BCSA/SCI Connections Group*. London: The British Constructional Steel work Association Limited.

