

# بررسی اثر آتش بر رفتار اتصال پیچی در سازه های فولادی به روش عددی و مقایسه آن با نتایج حاصل از بررسی های آزمایشگاهی

امیر ساعدی داریان<sup>۱</sup>، علی رضایی فر<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترای عمران- سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[amir\\_saedi\\_d@yahoo.com](mailto:amir_saedi_d@yahoo.com)

[a.rezaiefar@yahoo.com](mailto:a.rezaiefar@yahoo.com)

## چکیده

آیین نامه های روز دنیا ضوابطی برای در نظر گرفتن اثر حرارتیهای بسیار بالا بر رفتار فولاد و اعضاء فولادی ارائه نموده اند. اتصالات در سازه های فولادی از مهمترین ارکان در رفتار این سازه ها تحت شرایط خاص هستند. آتش سوزی و اثر آن بر رفتار اتصالات پیچی سازه های فولادی در این مقاله به روش عددی اجزاء محدود و با بکارگیری نرم افزار ANSYS بررسی شده و نتایج آن با بررسی های معتبر آزمایشگاهی مشابه مقایسه گردیده است که نهایتاً منجر به ارائه دیدگاههای مناسبی نسبت به مدلسازی عددی در مسائل این چنینی شده است.

کلمات کلیدی: آتش سوزی، اتصالات پیچی، سازه فولادی، روش اجزاء محدود

## مقدمه

یکی از مهمترین اجزاء سازه های فولادی که وظیفه انتقال نیروهای اعضاء به یکدیگر و به تکیه گاهها را بر عهده دارد اتصال میان اعضاء می باشد. با اندکی دقت در نحوه شکست اکثر سازه های فولادی تحت بارگذاری های مختلف می توان دریافت که ضعف اتصال می تواند عامل بسیار تعیین کننده ای در خرابی سازه های فولادی باشد. بعد از حادثه فروپاشی برجهای تجارت جهانی در اثر برخورد هواپیما و آتش سوزی ناشی از آن می توان دریافت که حتی اگر سازه ای بتواند تحت شرایط بسیار سخت حاصل از برخورد یک هواپیمای غول پیکر رفتار مناسبی از خود نشان دهد، باز هم در مقابل آتش سوزی بعد از آن بسیار ضعیف است و رفتار ضعیف فولاد تحت اثر حرارتیهای بالا منجر به تخریب آن می شود. در دهه های اخیر محققین بسیاری بر روی رفتار فولاد، اعضاء فولادی و سازه های فولادی تحت اثر دماهای بالا بررسی هایی انجام داده اند. این بررسی ها عموماً از طریق انجام تست های آزمایشگاهی میسر بوده و با توجه به هزینه های بسیار زیاد کارهای آزمایشگاهی و تعداد زیاد آزمایشات مورد نیاز برای حصول یک نتیجه قابل قبول، می توان دریافت که انجام چنین بررسی هایی در کشور ما با سختی های بسیاری همراه است.

اتصالات پیچی به دلیل سرعت بسیار بالا در اجرا و اطمینان از رفتار آنها به گونه مورد انتظار، از بهترین انواع اتصال برای اعضاء فولادی می باشند. یکی از انواع مختلف اتصال میان تیر و ستون فولادی، اتصال پیچی بوسیله نبشی های اتصال می باشد. در این نوع اتصال، نبشی هایی بر روی بالهای تیر و در برخی موارد در جان تیر نصب می گردند که با متصل کردن آنها به بال ستون، اتصال برقرار شده است. این نوع اتصال به دلیل سادگی از سرعت بسیار بالایی برخوردار است و به همین دلیل دارای طرفداران بسیاری در صنعت ساخت و ساز فولادی می باشد.

با توجه به آنچه گفته شد برای بررسی رفتار این نوع اتصالات تحت شرایط حرارتیهای بسیار زیاد که تداعی کننده آتش سوزی در ساختمان می باشد بررسی های عددی می تواند با تقریب خوبی به نتایجی منتهی شود که صرفه جویی هایی در کارهای آزمایشگاهی به ارمغان می آورد. در این مقاله برای

<sup>1</sup> دانشجوی دکترای عمران- سازه دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>2</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

انجام این بررسی ها از مدلسازی بوسیله نرم افزار ANSYS انجام می شود. هدف از انجام این مدلسازی ها بدست آوردن روابط میان نیروهای وارده و رفتار اتصال به صورت منحنی های لنگر- دوران و یا لنگر- دوران- دما می باشد که با در دست داشتن این منحنی ها می توان شناخت مناسبی از رفتار این نوع اتصال تحت شرایط گفته شده بدست آورد.

#### آزمایشات انجام شده مورد استفاده

با توجه به آنچه در قسمت مقدمه آورده شد، برای بررسی رفتار سازه های فولادی در شرایط آتش سوزی نیاز به انجام آزمایشاتی است که تداعی کننده شرایطی مشابه آنچه در واقعیت اتفاق می افتد باشد به این منظور می توان سازه را در ابعاد واقعی<sup>۳</sup> و یا ابعاد کوچکتر ساخته و آتش سوزی را در آن بوجود آورد و یا فقط به ساخت مدلی از قسمتی از سازه که مورد بررسی است اقدام نمود که در این صورت نیاز است با انجام تحلیلهای سازه ای به روشهای موجود، نیروهایی به مدل اعمال کرد که شبیه به آنچه در واقعیت اتفاق می افتد باشد.

در این مقاله از نتایج آزمایشاتی که توسط Aziznamini [15] بر روی اتصالات نبشی در دمای معمولی انجام شده است و به عنوان مرجع معتبری برای مطالعات عددی بر اتصالات نبشی شناخته شده است به عنوان مرجع اولیه در دمای معمولی استفاده می شود.

در مورد مدلهایی که قرار است در دماهای بالاتر مورد بررسی قرار گیرند برای انجام مقایساتی که نشان دهنده دقت مدلسازی باشند از آزمایشات انجام شده توسط ساعدی و همکاران [16] استفاده می شود که این گونه اتصالات را در حالتی مختلف مورد آزمایش در دماهای مختلف قرار داده اند.

#### مدلسازی و بررسی های عددی

نرم افزار اجزای محدود ANSYS برای مدلسازی پارامتریک نمونه ها بکار رفته است. مدلهاى اجزای محدود پارامتریک نمونه ها با استفاده از APDL ایجاد شده اند. با توجه به پارامتری بودن مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح، مدت زمان ایجاد مدلهاى متفاوت بطور چشمگیری کاهش یافته است.

مدلسازی عددی اتصالات با در نظر گرفتن فرضیات زیر صورت گرفته است:

- کلیه اجزای اتصال از قبیل تیر، ستون، نبشی ها و سرپیچ و مهره پیچها توسط المانهای درجه اول هشت گرهی SOLID64 مدل می شوند. این نوع المان قادر به در نظر گرفتن تغییرات حرارتی اعمالی بمنظور وارد ساختن اثر آتش در آزمایشات دمای بالا می باشد.
- برای پیش تنیدگی پیچ ها از المان پیش تنیدگی استفاده شده است.
- سوراخ پیچها ۱/۶ میلیمتر بزرگتر از قطر پیچها مدل شده اند.
- با استفاده از خاصیت تقارن نمونه ها و بمنظور کاهش حجم عملیات محاسباتی فقط نصف نمونه حول صفحه جان مدل شده است.
- بدلیل صلبیت بالای ستون ناشی از وجود سخت کننده ها فقط بال ستون و سخت کننده ها مدل شده است.

مدلسازی مسائل مربوط به تماس در نرم افزار ANSYS با استفاده از المانهای CONTA174 & TARGE170 میسر می باشد. این المانها طوری با یکدیگر مزدوج می گردند که در طی مرحله بارگذاری نفوذ آنها در داخل یکدیگر صورت نگیرد. بدین ترتیب اندکشن سطوح مجاور اجزای اتصال مانند نبشی- بال تیر، نبشی- بال تیر- سرپیچ- مهره، سوراخ پیچ- بدنه پیچ با استفاده از المانهای مذکور مدل شده است. در شکل ۱ اجزاء مختلف مدل و نحوه مش بندی آنها به المانهای مختلف در قسمتهای مختلف نشان داده شده است.

مهره و سرپیچها بصورت شش وجهی و مشابه فرم واقعی مدل شده اند. برای در نظر گرفتن نیروهای اصطکاکی، ضریب اصطکاک کولمب ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. در مراجع [17] و [18] مقدار ۰/۱ که حدود یک سوم مقدار پیشنهادی ۰/۳۳ برای سطوح کلاس A می باشد، برای این ضریب در نظر گرفته شده است. [19]

از آنجا که هندسه اتصال متقارن است تنها یک چهارم اتصال مدل شده است و این کار نیازمند آن است که جابجایی تمام نقاط واقع بر صفحات تقارن در جهت های عمودی شان بسته شود. برای نمونه های در دمای معمولی با توجه به اینکه مقطع تیرهای اتصال از نوع فشرده می باشد لذا کماتش موضعی آن در تنشهای بالاتری رخ خواهد داد حال آنکه توزیع تنشهای وان- میسس<sup>۴</sup> مدلهاى اجزای محدود نشان می دهد که تیر تقریباً الاستیک باقی

3. Full scale

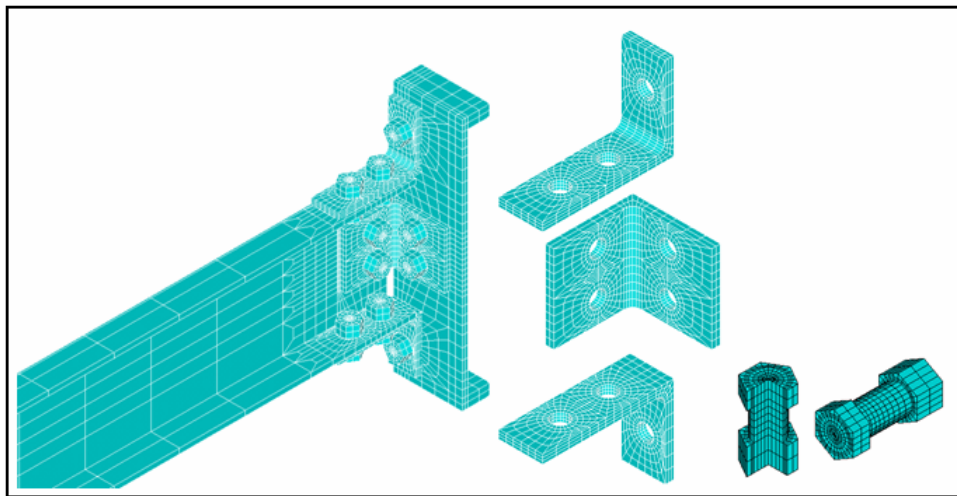
4. Von-mises

مانده است لذا کمانش موضعی تیر در مدل‌های اجزای محدود منتفی می باشد. بمنظور اعمال لنگر خمشی بر اتصال، تغییر مکان قائم ۵۰ میلی متری بصورت مونوتونیک بر گره های انتهایی تیر اعمال شده است. این میزان جابجایی در انتهای تیر، میزان دورانی تقریباً برابر با ۰/۰۳ رادیان را نتیجه می دهد. مقادیر ممان خمشی و دوران نسبی اتصال با استفاده از روابط ۱ و ۲ بدست می آید.

$$M = P \cdot L \quad \text{رابطه ۱}$$

$$R = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{h} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این روابط  $M$  لنگر اعمالی بر اتصال،  $P$  مجموع عکس‌العمل‌های ناشی از تغییر مکان گره های انتهایی تیر،  $L$  طول تیر،  $R$  دوران نسبی اتصال،  $h$  عمق تیر،  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  تغییر مکانهای نسبی افقی بال فوقانی و تحتانی تیر است.



شکل ۱- اجزاء مختلف مدل ساخته شده

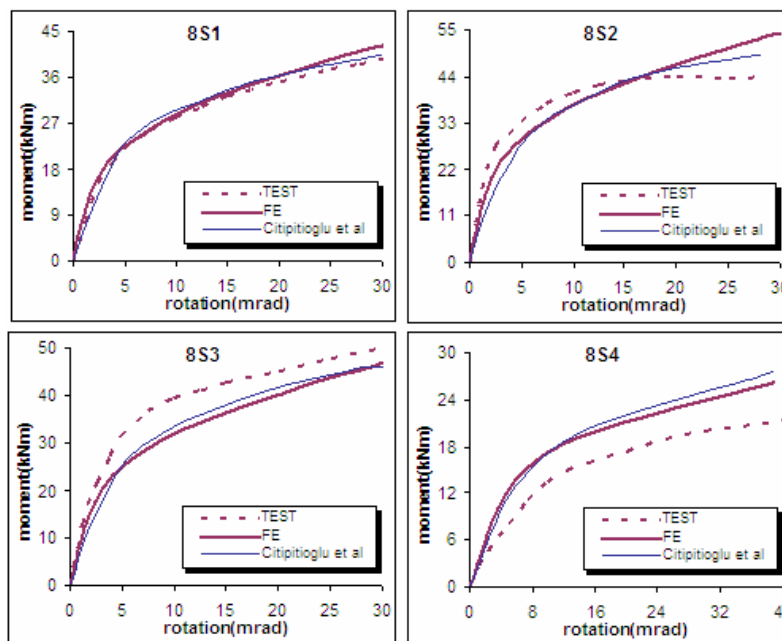
برای نمونه های در دمای بالا ابتدا نیروی متمرکز از قبل تعریف شده در فاصله ۲۰۰ cm از وجه بال ستون وارد شده تا لنگر مورد نیاز در اتصال را ایجاد کند و سپس درجه حرارت به صورت یکنواخت در همسایگی اتصال به تدریج بالا برده شده تا به تراز مطلوب برسد و امکان مطالعه اثر حرارت بر رفتار سازه ای پیکربندی های تیر به ستون به وجود آید. فرض شده که ستون از طرف پایین ثابت است زیرا انتظار نمی رود تغییر مکان در گره هایی که دور از اتصال قرار دارند اتفاق بیفتد. ستون از بال آزاد است تا نشان دهنده ابزار آزمایش آنگونه که در شکل نشان داده شده است باشد. تیر اجازه دارد تا تنها در جهت پایین خیز داشته باشد و تغییر مکان های جانبی آن مقید شده است تا احتمال گسیختگی پیش از موعد به دلیل کمانش پیچشی جانبی تیر وجود نداشته باشد تیر همچنین اجازه دارد تا به طور آزاد در طول محور خود انبساط پیدا کند تا اطمینان حاصل شود که تنش حرارتی ایجاد نمی کند تنها نواحی اطراف اتصال در معرض رژیم کامل حرارتی قرار گرفته اند در حالیکه نواحی دور از اتصال در معرض درجه حرارت معمولی قرار دارند تا آزمایشات تجربی شبیه سازی شود. رژیم حرارت دهی مطابق با نمودار دما-زمان اتصالات انجام شده است که این نمودار ناشی از حرارت دهی کوره مطابق با منحنی های ISO834 و ASTM E119 بوده است [20] و [21].

نتایج حاصله از مدلسازی عددی در مقابل آزمایشات انجام شده

در این بخش ابتدا با مقایسه نتایج حاصل از رفتار اتصال در دمای معمولی با نتایج آزمایشات aziznamini اعتبار مدل در دمای معمولی تایید شده و سپس در مرحله بعدی مدل مطابق با آزمایشات ساعدی بارگذاری شده و اعتبار آن در ارایه رفتار اتصال در دماهای بالا بررسی می شود.

. به منظور بررسی میزان دقت روش مدلسازی اجزای محدود ۴ نمونه آزمایشی مطابق با آزمایشات aziznamini مدل شده و نتایج با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی مقایسه شده است. در شکل ۲ منحنی های لنگر- دوران مدل های عددی در مقایسه با منحنی های حاصل از آزمایشات تجربی

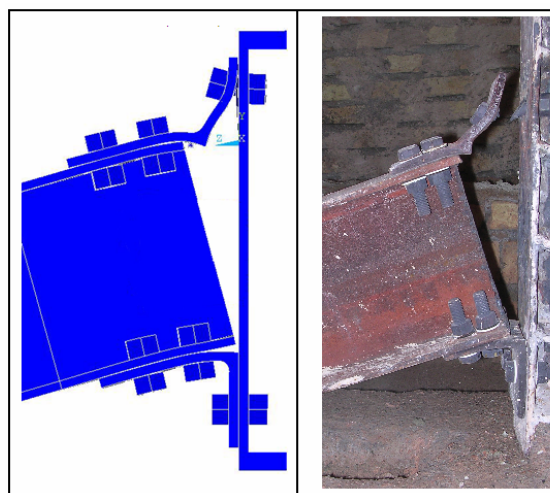
aziznamini و منحنی های حاصل از بررسی عددی citipitiuglu [23] را نشان می دهد. با توجه به اشکال ارائه شده مشخص می شود که مدل های اجزا محدود انطباق مناسبی با نتایج تجربی دارند.



شکل ۲. منحنی های لنگر- دوران بدست آمده در مقایسه با آنچه از بررسی های Citipitiuglu و Aziznamini بدست آمده است

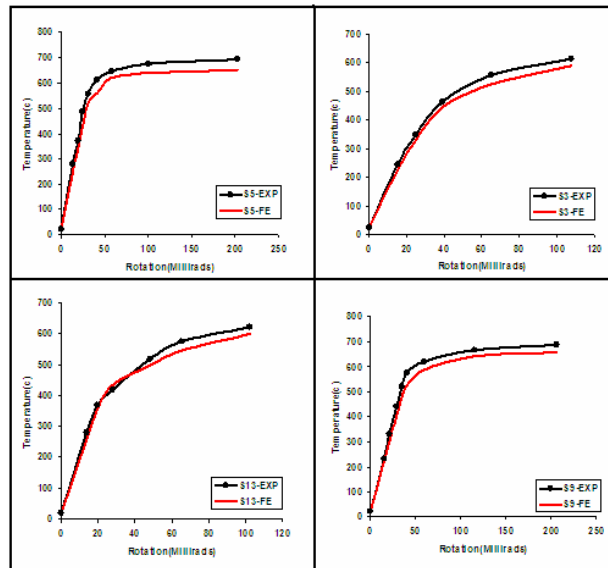
اختلاف بین مدلسازی عددی و نتایج آزمایشی ناشی از عوامل مختلفی چون ساده سازی در مدلسازی، نواقص آزمایشات، تنشهای پسماند، اندرکنش سطوح تماس نیروهای اصطکاکی و نیروی پیش تنیدگی پیچها می باشد. نیروی پیش تنیدگی پیچها و ضریب اصطکاک دو عامل اصلی و موثر بر رفتار اتصال بویژه در ناحیه غیر خطی اتصال می باشند و این در حالی است که تخمین مقادیر دقیق آنها مشکل است. عامل دیگری که در ایجاد این اختلاف موثر است مدل های رفتاری غیر خطی (nonlinear constitutive laws for materials) به کار رفته برای مصالح است. بویژه زمانی که فقط منحنی تنش- کرنش تک محوری موجود است و به همین علت است که اختلاف بین منحنی ها در محدوده غیر خطی افزایش می یابد.

در شکل ۳ فرم تغییر شکل یافته مدل عددی در مقابل فرم تغییر شکل یافته حاصل کار ساعدی و همکاران نشان داده شده است.



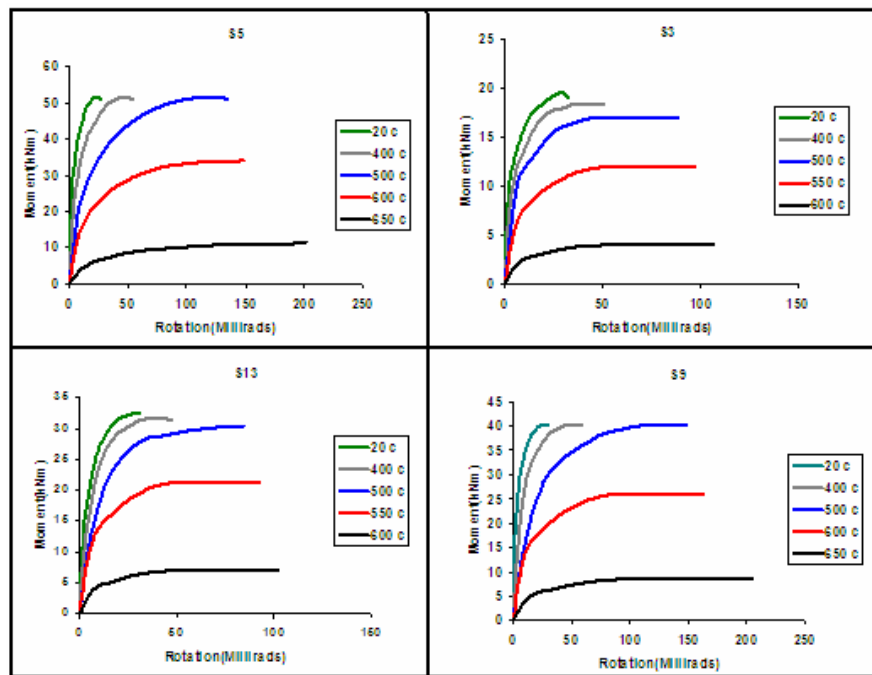
شکل ۳. فرم تغییر شکل یافته مدل عددی در مقایسه با نتیجه آزمایش

در شکل ۴ منحنی های دما- دوران حاصل از مدل سازی عددی در مقابل نتایج کار ساعدی و همکاران ترسیم شده است. ملاحظه می شود که این منحنی ها برای هر اتصال به طور مناسبی با نتایج حاصل از آزمایش در محدوده الاستیک و پلاستیک مطابقت دارد. با این وجود در ناحیه پلاستیک اندکی تفاوت بین نتایج وجود دارد که در قسمت قبل تشریح شد.



شکل ۴. منحنی های دما- دوران

در شکل ۵ منحنی های لنگر- دوران در دماهای مختلف حاصل از مدل سازی عددی ترسیم شده است که به وضوح می توان پایین آمدن ظرفیت خمشی اتصال با بالا رفتن دما را مشاهده نمود.



شکل ۵. نمودارهای لنگر- دوران در دماهای مختلف

## نتیجه گیری

تحلیل اجزاء محدود سه بعدی برای بررسی رفتار اتصالات پیچی نبشی بالا و پایین با نبشی جان و اتصالات نبشی بالا و پایین بدون نبشی جان در دماهای معمولی و دماهای بالا با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Ansys انجام شد. اجزاء اتصال با استفاده از المانهای solid مدل سازی شده و تماس بین اجزا با المانهای contact بر پایه قانون اصطکاک coulomb تعریف شد. غیر خطی بودن مواد برای اجزاء فولادی و اجزاء اتصال در نظر گرفته شد. در مدل های در دمای بالا منحنی های تنش - کرنش - درجه حرارت کلی در مدل مشارکت داده شده اند تا کاهش خصوصیات اتصال در دماهای بالا شبیه سازی شود و نتایج حاصل از شبیه سازی باداده های تجربی مقایسه گردید. نتایج حاصله نشان می دهد که تطابق مناسبی بین پاسخ پیش بینی شده و پاسخ اندازه گیری شده هم در ناحیه الاستیک و هم در ناحیه پلاستیک وجود دارد. این امر ثابت می کند که تکنیک اجزاء محدود قابلیت پیش بینی پاسخ اتصال چه در دمای معمولی و چه در دماهای بالا با دقت قابل قبول را با تقریب قابل قبولی دارا می باشد.

## مراجع

- 1- Eurocode 3: design of steel structures, part 1.2: general rules structural fire design (drafts), document CEN, European Committee for Standardisation; 1995.
- 2-Liu TCH, Morris LJ. Theoretical modelling of steel bolted condition under fire exposure. In: Proc. international conference on computational mechanics. 1994.
- 3-Liu TCH. Finite element modelling of behaviour of steel beams and connections in fire. J Construct Steel Res 1996;35(3):181-99.
- 4-Liu TCH. Effect of connection flexibility on fire resistance of steel beams. J Construct Steel Res 1998;45:99-118.
- 5-Liu TCH. Three-dimensional modelling of steel/concrete composite connection behaviour in fire. J Construct Steel Res 1998;45(1-3): [paper No. 361].
- 6-Liu TCH. Moment-rotation-temperature characteristics of steel/composite connections. J Struct Engng 1999;125(10):1188-97.
- 7-El-Houssieny OM, Abdel Salam S, Attia GAM, Saad AM. Behavior of extended end plate connections at high temperature. J Construct Steel Res 1998;45(1-3): [paper No. 172].
- 8-Spyrou S, Davison B, Burgess I, Plank R. Component-based studies on the behaviour of steel joints at elevated temperatures. In: Lamas A, Simões da Silva L, editors. Proc. third European conference on steel structures. Coimbra: University de Coimbra; 2002. p. 1469-78.
- 9-Rahman R, Hawileh R, Mahamid M. The effect of fire loading on a steel frame and connection. In: Brebbia CA, Wilde WP, editors. High performance structures and materials II. WIT Press; 2004. p. 307-16.
- 10-Sarraj M, Burgess IW, Davison JB, Plank RJ. Finite element modelling of fin-plate steel connections in fire. In: Proceedings of the fourth international workshop on structures in fire, Aveiro, Portugal, 2006. p. 315-26.
- 11-Wald F, Simões da Silva L, Moore DB, Lennon T, Chaldna M, Santiago M, et al. Experimental behaviour of a steel structure under natural fire. Fire Saf J 2006;41:509-22.
- 12-Al-Jabri KS, Seibi A, Karrech A. Modelling of un-stiffened flush endplate bolted connections in fire. J Const Steel Res 2006;62:151-9.
- 13-Lou G-B, Li G-Q. Non-linear finite element modelling of behaviour of extended end-plate bolted moment connections in fire. In: Proceedings of the fourth international workshop on structures in fire, Aveiro, Portugal, 2006. p. 327-43.
- 14- ANSYS User's manual, version 6.1

- 15- Azizinamini, "Monotonic response of semi-rigid steel beam to column connections." ,MS thesis, University of South Carolina, Columbia, 1982
- 16- Saedi Daeryan A. A Study on Behavior of Connections in Fire. MS thesis. Tehran (Iran): K.N. Toosi University; 2006.
- 17- Kishi N, Ahmed A, Yabuki N. Nonlinear finite element analyses of top and seat-angle with double web-angle connections. *Journal of Structural Engineering and Mechanics* 2001;12:201–14.
- 18- Ahmed, Kishi N, Matsuoka K, Komuro M. Nonlinear analysis on prying of top- and seat-angle connections. *Journal of Applied Mechanics* 2001;227-36
- 19- AISC. Manual of steel construction—Load and resistance factor design.38 Chicago (IL): American Institute of Steel Construction; 1995.
- 20- Iso 834 . Fire resistance tests – elements of building construction .;2002
- 21- ASTM- E 119 – 05a. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. 2003
- 22- K.S. Al-Jabria, A. Seibib,1, A. Karrech. Modelling of unstiffened flush end-plate bolted connections in fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 62 (2006) 151–159
- 23- Citipitioglu AM, Haj-Ali RM, White DW. Refined 3D finite element modeling of partially restrained connections including slip. *Journal of Constructional Steel Research* 2002;8:995–1013
- 24- Akbas Bulent, Shen Jay. Seismic behavior of steel buildings with combined rigid and semi-rigid frames. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 2003; 27:253–64.
- 25- BS 5950. Structural use of steelwork in buildings, part 8: code of practice for fire resistance design. London: British Standard Institution BSI; 1990.