



A parametric study on OPB fire response of steel CHS T-joints

F. Ahmadpour¹, M. Zeinoddini², M. Mo'tamedi^{3*}, R. Rashnooie¹, S.A. Hosseini³

¹Civil Engineering Department, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

²Civil Engineering Department, Parand Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³Structural Laboratory, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The behavior of steel circular hollow section (CHS) T-joints under combined fire load and out-of-plane bending (OPB) is investigated. A review of the literature indicates that the subject has not been previously considered by researchers. The authors carried out the first laboratory experimental study on OPB behavior of simple steel tubular T-joints under standard fire. The results of an experimental and numerical study performed on three small-scale steel tubular T-joint specimens are reported. One specimen was tested at ambient temperature under quasi-static incremental OPB moment in the brace and the other two specimens were tested under OPB moment plus exposure to ISO-834 standard fire. In order to have a deeper insight into the strength and failure mechanism of steel tubular T-joints under fire, their OPB behavior was also studied using coupled mechanical-thermal finite element modeling. The numerical model was validated against the experimental results and reasonable agreements were achieved. A parametric study was then performed on the OPB fire behavior of full-scale steel tubular T-joints. The results showed that the superimposed OPB ratio in the brace and the diameter ratio parameter had more pronounced effects on the fire response of the joint as compared to other geometric and loading parameters. Increasing the diameter ratio parameter from 0.2 to 1, reduced the joint's residual rotation by 56 % and increased the critical temperature by 23 %. By increasing the OPB ratio from 0.2 to 1, the residual rotation increased by 245 % and the critical temperature decreased by 37%.

Review History:

Received: May, 02, 2021

Revised: Mar. 29, 2022

Accepted: Apr. 09, 2022

Available Online: Apr. 28, 2022

Keywords:

Steel tubular T-joint

Out of Plane Bending (OPB)

Thermal - stress analysis

Failure mode

Critical temperature

1- Introduction

During a fire event, tubular joints play a critical role in maintaining the integrity of the structure. The mechanical performance of steel tubular joints at elevated temperatures or under fire conditions has been the focus of several previous studies. He et al. [1] conducted an experimental study to investigate the behavior of steel tubular K-joints subjected to brace axial loading at elevated temperatures. Fung et al. [2] experimentally and numerically studied the static behavior of CHS T-joints subjected to IPB at elevated temperatures. In an extensive numerical study, Ozyurt et al. [3] described the numerical parametric study on the IPB and OPB strength of circular and square tubular steel T, Y, K, and X joints under constant elevated temperatures. Azari Dodaran et al. [4] numerically investigated the effect of the joint geometry on the ultimate strength and initial stiffness of tubular K-joints under axial brace loading at elevated temperatures. The results showed that the ultimate strength and initial stiffness may decrease drastically by increasing temperature.

The aforementioned short review of the technical

literature points out that, despite the significance of the research already conducted on the subject, there is still a lack of knowledge on the OPB of steel tubular joints under fire conditions. The authors carried out the first laboratory experimental study on OPB behavior of simple steel tubular T-joints under ISO-834 standard fire [5]. The fire tests are numerically simulated using a sequentially coupled thermal-stress analysis. After the verification of the numerical model, a comprehensive numerical parametric study was carried out to determine the effects of some key parameters on the OPB structural behavior of tubular steel joints.

2- Experimental Study

The tubular specimens considered in the current study were fabricated to ~1:5 scale of a tubular T-joint in an existing steel offshore jacket platform in the South Pars Gas field in the Persian Gulf. The chord and brace members were cut from seamless as-delivered API-5L-X52 steel tubes. The brace was welded at 90° angle on the chord surface to form a tubular T-joint specimen. The geometrical ratios were $\alpha =$

*Corresponding author's email: motamedi.md@gmail.com



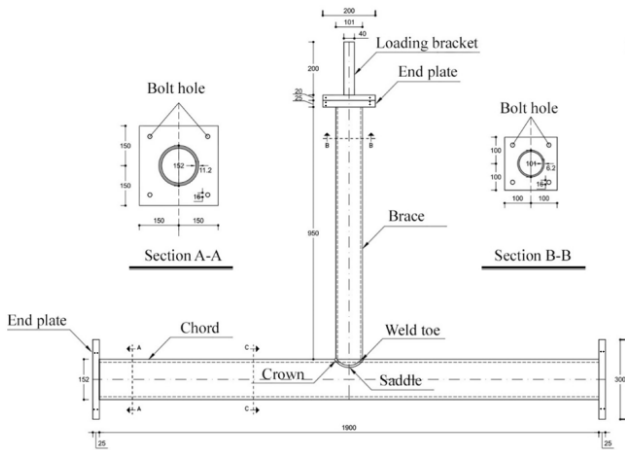


Fig. 1. Overall configuration and dimensions of the steel tubular T-joint specimens (dimensions in mm)

12.8, $\gamma = 6.8$, $\beta = 0.66$ and $\tau = 0.54$, which remained within typical ranges in offshore steel structures [6].

The fire tests on the tubular specimens proceeded in three steps: Step 1: a predefined vertical load was superimposed to the free end of the brace, in a force-controlled scheme. This step was carried out entirely at ambient temperature. Step 2: the furnace was ignited and the ISO834 [5] standard fire curve, was introduced to the programmer of the furnace. Step 3: the specimen was unloaded, the furnace was switched off and the specimen was allowed to gradually cool down to room temperature.

3- Numerical modeling

The numerical study was conducted using the commercial FE code, ABAQUS [7]. The sequentially coupled thermal-stress analysis modeling approach was used in the current study. A heat transfer analysis was first carried out to obtain the temperature development in the tubular joint. During the subsequent stress analysis, the transient nodal temperature outputs from the previous heat transfer simulation were time wisely imported to the stress model to account for the heat effects on stress development. The mechanical properties of the low-carbon steel material at elevated temperatures were defined using Eurocode 3 [8] equations. For accurate FE modeling of the elastoplastic behavior of a material, the true stress (σ) and strain (ϵ) were used. The brace and chord members were modeled using three-dimensional (3D) 8-noded DC3D8 solid elements and 8-noded C3D8I solid/incompatible elements for the thermal and stress models, respectively. The size, meshing, and connectivity of the DC3D8 and C3D8I elements remain similar (Figure 2).

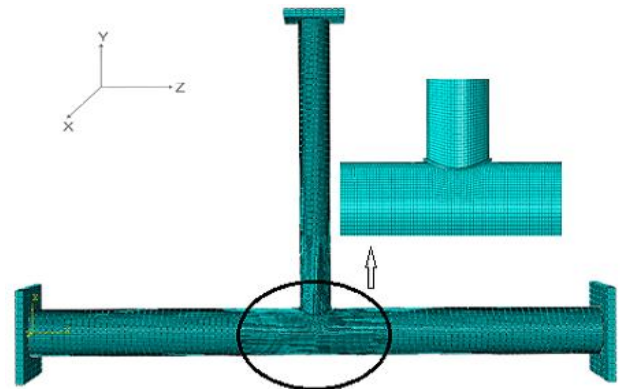


Fig. 2. Mesh details of the numerical model of tubular T-joint in ABAQUS

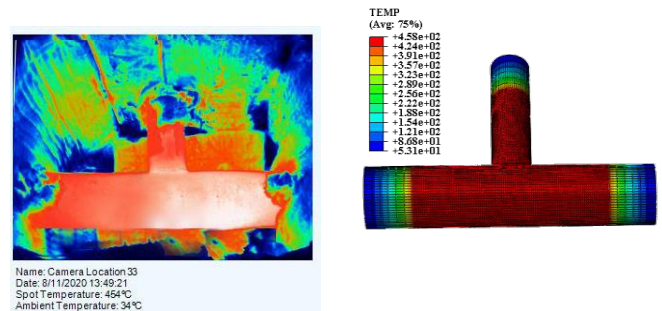


Fig. 3. Comparison of thermal gradient between experimental specimen (left) and numerical model (right)

Validation of the numerical model was conducted by comparison of the moment-rotation curve, rotation-temperature curve, critical temperature, thermal gradient (Figure 3), and failure mode of simulated models with experimental specimens already conducted by the authors. In general, there was a reasonable correlation between the results of the numerical analysis and those provided by the experimental study.

4- Discussion

A parametric study was then conducted to investigate the influence of geometrical parameters (α , γ , τ , β) and the ratio of the applied OPB moment to OPB capacity of the joint (η) on the structural fire performance of steel tubular T-joints. The rotation-temperature response, critical temperature, the residual rotation of the joints, and fire endurance time were investigated. It was found that the chord diameter to thickness ratio (γ), the brace/chord diameters' ratio (β), and the load ratio (η), play remarkable effects on the OPB fire response.

5- Conclusion

The main findings of the study are as follows: The structural fire response was noticeably improved by decreasing γ , increasing β , and decreasing η . The dominant fire-induced failure modes of the T-joint models subjected to OPB were identified as: a) the chord wall plastification, b) the plastic hinge formation in the brace, and c) the punching shear failure in the chord wall. The rotation rate of “1 milliradian/ $^{\circ}$ C” was introduced as a criterion to define the critical OPB rotation of steel tubular T-joints under fire.

References

- [1] S.Y. He SB, Zhang HY, Yang DP, Long FL, Experimental study on circular hollow section (CHS) tubular K-joints at elevated temperature, Eng Fail Anal 34 (2013) 204-216.
- [2] T.K. Fung TC, Nguyen MP, Structural behaviour of CHS T-joints subjected to static in-plane bending in fire condition, J Struct Eng 142 (3) (2015) 04015155.
- [3] Q.W. Shenggang Fan, Runmin Ding, Lianlian Jia, Hang Zhou, Experimental and numerical research on fire resistance of stainless steel tubular X-joints, J Constr Steel Res 182 (2021) 106654.
- [4] H.A. Neda Azari-Dodaran, Lei Zhu & Peiyang Li. , Experimental and numerical study of the ultimate load for collar-plate-reinforced tubular K-joints at fire-induced elevated temperatures, Ships and Offshore Structures, (2021) 1897221.
- [5] ISO 834, in: Fire-Resistance Tests-Elements of Building Construction: Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- [6] API, in: Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms. RP 2A, API Publishing Services. Washington, DC, 2007.
- [7] ABAQUS user's manual [Computer software], in, Hibbit Karlsson & Sorensen Inc, 2017.
- [8] Eurocode 3 (EC3), Part 1-2: General rules -Structural fire design, European Committee for Standardization, 2005.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Ahmadpour, M. Zeinoddini, M. Mo'tamedi, R. Rashnooie, S.A. Hosseini, A parametric study on OPB fire response of steel CHS T-joints, Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 747-750.

DOI: [10.22060/ceej.2022.19984.7307](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19984.7307)





مطالعه پارامتری رفتار خمشی خارج از صفحه اتصالات لوله‌ای T شکل فولادی تحت آتش استاندارد

فرید احمدپور^۱، مصطفی زین‌الدینی^۱، محمد معتمدی^{۲*}، رضا رشنوئی^۱، سید امین حسینی^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، پرند، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:

اتصال T شکل فولادی لوله‌ای

خمشی خارج از صفحه

تحلیل تنش - حرارت

مد خرابی

دمای بحرانی

خلاصه: مقاله حاضر به بررسی رفتار اتصالات T شکل دایره‌ای توخالی لوله‌ای فولادی تحت بار توأمان آتش و خمشی خارج از صفحه می‌پردازد. نویسندگان اولین مطالعه تجربی آزمایشگاهی را بر روی رفتار در دمای بالای اتصالات T شکل لوله‌های فولادی ساده تحت لنگر خمشی خارج صفحه انجام دادند. در ابتدا خلاصه نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی انجام شده بر روی سه نمونه اتصال T شکل فولادی گزارش می‌شود. یک نمونه در دمای محیط تحت خمشی خارج از صفحه شبه‌استاتیکی افزایشی وارده به مهار و دو نمونه دیگر تحت خمشی خارج از صفحه و آتش استاندارد ISO-۸۳۴ مورد آزمایش قرار گرفتند. در ادامه به منظور بررسی تفصیلی اتصالات مذکور، رفتار خمشی خارج از صفحه آن‌ها به کمک تحلیل اجزای محدود مکانیکی - حرارتی تحت آتش استاندارد شبیه‌سازی شد. پس از صحت‌سنجی مدل عددی از طریق مقایسه نتایج آن با نتایج مطالعات آزمایشگاهی، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و نرخ بارگذاری بر روی رفتار اتصالات، یک سری مطالعات پارامتری بر روی اتصالات T شکل در مقیاس کامل انجام شد. نتایج این مطالعات نشان داد که نرخ بار اعمالی به مهار و پارامتر هندسی نسبت قطر مهار به پایه، تأثیر پراهمیت‌تری نسبت به سایر پارامترهای هندسی بر روی رفتار اتصال تحت آتش داشته است. افزایش نسبت قطر مهار به پایه از ۰/۲ به ۱، باعث کاهش ۵۶ درصدی دوران پسماند اتصال و افزایش ۲۳ درصدی دمای بحرانی اتصال گردید. با افزایش نرخ بار اعمالی به مهار از ۰/۲ به ۱ نیز دوران پسماند ۲۴۵ درصد افزایش و دمای بحرانی ۳۷ درصد کاهش یافت.

۱- مقدمه

پدیده آتش‌سوزی در سازه‌های فولادی مورد توجه جدی محققین سازه قرار گرفته است. در طول یک رویداد آتش‌سوزی، اتصالات لوله‌ای نقش مهمی در حفظ یکپارچگی سازه دارند، به طوری که شکست یک یا چند اتصال، ممکن است منجر به فروریختن فاجعه‌بار کل سازه گردد. در حرارت‌های بالا، اتصالات لوله‌ای تحت اعمال بارهایی به مراتب کمتر از ظرفیت باربری در دمای محیط خود، تخریب می‌شوند. از این‌رو عملکرد مکانیکی اتصالات لوله‌ای فولادی در دماهای بالا یا در شرایط آتش‌سوزی، مورد توجه محققین متعددی قرار گرفته است که در ادامه به برخی از تحقیقات صورت گرفته اشاره خواهد شد.

کار جین و همکاران در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲، نخستین مطالعه آزمایشگاهی [۱] و عددی [۲] بر روی اتصال T شکل لوله‌ای در آتش محسوب می‌شود. آن‌ها اتصالات تحت بار فشاری محوری در عضو مهار را در حین آتش‌سوزی مطالعه کردند. مد شکست اتصال در هر دو مطالعه آزمایشگاهی و عددی، کماتش موضعی دیواره پایه بود. نرخ بارگذاری اولیه

اعضای توخالی لوله‌ای فولادی با توجه به خواص آیرودینامیکی مناسب، نسبت بالای ظرفیت فشاری و خمشی به وزن، حمل و نقل و نصب آسان به طور گسترده در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی همانند پل‌ها، فرودگاه‌ها، سازه‌های فضایی و سکوهای دریایی فراساحل کاربرد دارند. در یک سازه لوله‌ای، یک یا چند لوله توخالی به نام مهار بر روی سطح خارجی لوله توخالی دیگری به نام پایه جوش داده می‌شوند تا یک اتصال لوله‌ای ایجاد شود. با توجه به کاربرد فراوان اتصالات لوله‌ای در ساخت سکوهای دریایی فولادی فراساحلی (شکل ۱) جهت تحمل بارهای حین بهره‌برداری از یک طرف و وجود ناپیوستگی هندسی و پیچیدگی توزیع تنش از طرف دیگر، درک رفتار این نوع اتصالات در چنین سازه‌هایی، از اهمیت بالایی برخوردار است. در سالیان اخیر خصوصاً بعد از حادثه آتش‌سوزی ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ برج‌های تجارت جهانی و وقوع چند مورد آتش‌سوزی در سکوهای نفتی فراساحلی،

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: motamedi.md@gmail.com



وارد به مهار، اثر قابل توجهی بر تغییر شکل پسماند اتصال داشت. پس از صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی خود، یک مطالعه پارامتری به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهای هندسی بر روی رفتار اتصال انجام شد. هی و همکاران دو تحقیق مستقل آزمایشگاهی [۳] و عددی [۴] بر روی رفتار اتصال K شکل لوله‌ای توخالی فولادی در دماهای بالا انجام دادند. آن‌ها در مطالعه آزمایشگاهی خود، پس از اعمال بار محوری اولیه ثابت به انتهای مهار دو نمونه کوچک مقیاس، آن‌ها را در معرض حرارت قرار دادند. مطالعه آزمایشگاهی نشان داد که نمونه‌ها پس از رسیدن به یک دمای معین (دمای بحرانی)، دچار ضعف در عملکرد می‌شوند. آن‌ها همچنین در تحقیقی دیگر [۵]، روش طراحی بر مبنای درجه حرارت بحرانی را جهت ارزیابی مقاومت در برابر آتش اتصالات K شکل لوله‌ای توخالی در معرض بار محوری پیشنهاد دادند. ازرت و همکاران [۶] مطالعات عددی گسترده‌ای را بر روی مقاومت استاتیکی اتصالات T، Y، K و X شکل دایره‌ای، مربعی و بیضوی توخالی فولادی تحت خمش داخل و خارج صفحه در معرض حرارت ثابت در دمای بالا گزارش کردند. آن‌ها پس از صحت‌سنجی مدل‌های عددی خود با مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سایر محققین، به انجام مطالعات پارامتری به منظور درک بهتر رفتار اتصالات مذکور در دماهای ثابت بالا نظیر نحوه تغییرات درجه حرارت و مد خرابی اتصالات پرداختند. فانگ و همکاران [۷] مدهای خرابی و مقاومت نهایی اتصال T شکل لوله‌ای فولادی تحت خمش داخل صفحه و مهار را از طریق مطالعات عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. خمش موضعی و برشی، تغییر شکل خمیری دیواره پایه در نزدیکی تاج اتصال و ترک پنجه جوش، جزء مدهای اصلی گسیختگی اتصال بودند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی مشابه دیگری نیز به منظور بررسی رفتار اعضا [۸] و اتصالات لوله‌ای فولادی در دمای بالا توسط محققین دیگری گزارش شده است [۹-۱۴].

صابری و همکاران [۱۵] با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس^۶ [۱۶] به مقایسه عملکرد اتصالات پیچی تیر به ستون با صفحه انتهایی و سپری اتصال تحت بار آتش پرداختند. آن‌ها منحنی‌های جابه‌جایی-زمان، کانتورهای تنش و تغییر مکان را در سه حالت تغییر تعداد پیچ، افزایش ضخامت صفحه انتهایی و سپری اتصال استخراج و مورد تحلیل قرار دادند. با مقایسه نتایج اتصالات تیر به ستون پیچی، نمونه‌ی دارای صفحه انتهایی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر با تعداد ۸ پیچ به عنوان بهترین نمونه معرفی شد. اسماعیلی و همکاران [۱۷] رفتار کمانشی ستون‌های CFS با مقطع مرکب تحت بار محوری در دماهای بالا را با استفاده از روش عددی مورد بررسی

قرار دادند. آن‌ها پس از مدل‌سازی عددی ستون‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس [۱۶] و صحت‌سنجی آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایشات انجام یافته، به انجام مطالعات پارامتریک برای بررسی چگونگی تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل ضخامت مقطع و نوع فولاد در رفتار کمانشی ستون‌های CFS در دماهای بالا پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از فولاد پرمقاومت به جای فولاد کم مقاومت، باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها در دماهای مختلف می‌شود.

یحیایی و همکاران [۱۸] رفتار تیر و اتصالات وصله‌ای پیچی در قاب‌های خمشی درختی تحت اثر آتش را در مطالعه آزمایشگاهی خود بررسی کردند. دو قاب فولادی با اتصالات متفاوت در مقیاس واقعی تحت اثر آتش استاندارد ایزو ۸۳۴ [۱۹] مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از استخراج تاریخچه دماها، نمودارهای دما - خیز و زمان - خیز تیر، دما - دوران اتصال و مدهای خرابی، مشاهده گردید که اتصال تیر میانی به دستک به علت گسیختگی برشی پیچ‌های وصله بال بالایی در دمای بالاتر از ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد دچار خرابی می‌گردند. همچنین استفاده از ورق‌های دابل با پیچ‌های دوبرشه در وصله بال می‌تواند باعث بهبود تاب حرارتی و ظرفیت دورانی اتصالات وصله‌ای پیچی تیر شود. صابری و همکاران [۲۰] پارامترهای هندسی اتصال T شکل تحت بارگذاری آتش را ارزیابی کردند. ۹ نمونه اتصال با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس [۱۶] با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی مانند قطر و تعداد پیچ، طول و ضخامت اتصال T مدل‌سازی شد. با مقایسه نتایج ۹ مدل، با افزایش طول اتصال، مقادیر تنش بیشتری در اتصالات تیر به ستون مشاهده شد. با تغییر هر یک از پارامترها، حالت‌های شکست نسبت به ضخامت اتصالات تحت بارگذاری آتش تغییر کرد. تأثیر افزایش قطر پیچ بر مقدار جابه‌جایی نیز مورد تحلیل قرار گرفت.

با مرور ادبیات فنی مذکور، مشاهده می‌شود که در اکثر مطالعات قبلی صورت گرفته بر روی اتصالات لوله‌ای، عضو مهار تحت بار محوری بوده و تنها در یک مطالعه عددی، به بررسی رفتار اتصال T شکل لوله‌ای فولادی تحت لنگر خمش خارج صفحه پرداخته شده که در آن نیز به جای اعمال آتش، رفتار اتصال در دمای ثابت بررسی شده است [۶]. در یک مطالعه آزمایشگاهی نیز عضو مهار تحت لنگر خمشی داخل صفحه بود [۷]. مرور ادبیات فنی حاکی از آنست که هیچ‌گونه مطالعه توأمان آزمایشگاهی و عددی قبلی در مورد رفتار اتصالات لوله‌ای فولادی تحت لنگر خمشی خارج از صفحه و مهار به عضو مهار در شرایط آتش‌سوزی انجام نشده است. نویسندگان اولین مطالعه تجربی آزمایشگاهی را بر روی رفتار در دمای بالای



شکل ۱. نمونه اتصال T شکل به کار رفته در سکوی نفتی حفاری فراساحلی نصر ۶ واقع در میدان نفتی سیری.

Fig. 1. Sample of T-joint used in Nasr 6 offshore oil platform in Siri oil field.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱- جزئیات نمونه‌ها

نمونه‌های لوله‌ای در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر، دارای مقیاس یک‌پنجم اتصال T شکل لوله‌ای یک سکوی فراساحلی فولادی موجود در میدان گازی پارس جنوبی در خلیج فارس می‌باشند. نمونه‌ها در یکی از کارگاه‌های پیمانکاری زیرمجموعه‌ی شرکت نفت فلات قاره ایران در بندر قشم ساخته شدند. سه نمونه آزمایشگاهی با اسامی TJ1، TJ2 و TJ3 با مشخصات هندسی و مکانیکی یکسان جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. هر اتصال شامل یک عضو پایه و یک عضو مهار است که از طریق جوش دادن مهار به سطح خارجی پایه ساخته شده است. جنس لوله‌های اعضای پایه و مهار به کار رفته در اتصال، فولاد بدون درز -API-5L X52 می‌باشد. قطر خارجی عضو پایه ۱۵۲/۴ میلی‌متر، ضخامت آن ۱۱/۲ میلی‌متر و طول آن ۱۹۰۰ میلی‌متر است که در دو انتهای آن دو ورق انتهایی هر یک به ضخامت ۲۵ میلی‌متر جوش شده است. ورق‌های انتهایی

اتصالات T شکل لوله‌ای فولادی ساده تحت لنگر خمشی خارج صفحه انجام دادند [۲۱].

مقاله حاضر، نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی در مورد عملکرد حین آتش‌سوزی اتصالات T شکل توخالی لوله‌ای فولادی تحت لنگر خمشی خارج از صفحه وارده به عضو مهار را گزارش می‌کند. مطالعه آزمایشگاهی شامل بررسی رفتار سازه‌ای سه نمونه اتصال لوله‌ای با مقیاس یک‌پنجم بوده که یکی از نمونه‌ها تحت لنگر خمشی خارج از صفحه شبه‌استاتیکی افزایشی در دمای محیط و دو نمونه دیگر تحت خمش خارج از صفحه و آتش استاندارد ایزو ۸۳۴ [۱۹]، مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه به منظور بررسی تفصیلی اتصالات مذکور، مطالعه عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شد. صحت‌سنجی مدل عددی از طریق مقایسه نتایج با نتایج کارهای آزمایشگاهی صورت پذیرفت. نهایتاً به منظور تأثیر پارامترهای هندسی بر روی رفتار اتصالات دایره‌ای T شکل، مطالعات پارامتری بر روی نمونه‌های با مقیاس کامل انجام شد.

جدول ۱. میانگین خواص مکانیکی فولاد به کار رفته در آزمایش

Table 1. Average mechanical properties of steel used in the experiment.

کرنش نهایی (درصد)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	مدول ارتجاعی (گیگاپاسکال)	نوع فولاد	عضو
۱۹/۲	۵۷۹	۴۰۶	۲۰۴	API-5L-X52	پایه
۲۱/۶	۵۶۶	۴۰۲	۲۰۷	API-5L-X52	مهیار
۲۱/۱	۵۱۰	۳۵۵	۲۱۰	ST-52	ورق انتهایی

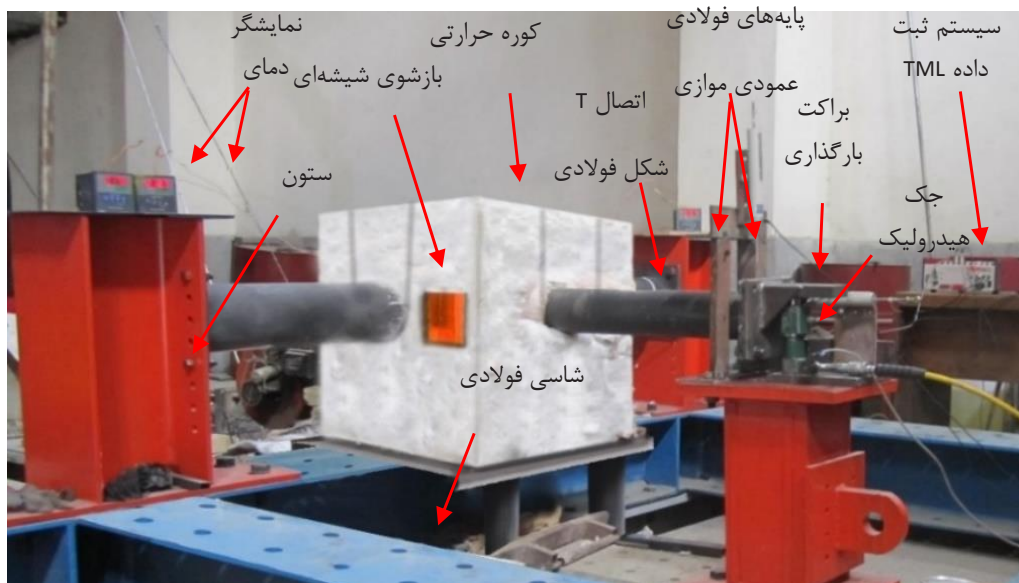


شکل ۲. نمای کلی نمونه اتصال T شکل لوله‌ای فولادی.

Fig. 2. Illustration of steel tubular T-joint specimen.

نسبت‌های هندسی اتصال شامل $\alpha=25$ ، $\gamma=6.8$ ، $\beta=0.66$ و $\tau=0.54$ هستند که در محدوده‌های معمول سازه‌های فولادی فراساحلی هستند [۲۳]. نمای کلی اتصال T شکل مورد استفاده در آزمایش‌های حاضر در شکل ۲ ارائه شده است. برای جوشکاری مهیار به پایه و نیز نصب صفحات انتهایی آن‌ها از مشخصات روش جوشکاری مصوب شرکت نفت فلات قاره ایران استفاده شده است. جزئیات جوش، مشخصات مندرج در آیین‌نامه AWS [۲۴] را برآورده می‌کند. ضمناً بر روی جوش‌ها، آزمایش‌های کنترل کیفیت شامل بازرسی چشمی، آزمایش‌های غیرمخرب التراسونیک و مایعات نافذ انجام و نقصی گزارش نشده است.

مربع شکل از جنس فولاد ST-52 و با ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر مربع و دارای ۴ سوراخ با قطر ۱۶ میلی‌متر جهت نصب نمونه به ستون‌های تکیه‌گاهی مورد استفاده قرار گرفتند. قطر خارجی عضو مهیار ۱۰۱/۲ میلی‌متر، ضخامت آن ۶/۱ میلی‌متر و طول آن ۹۵۰ میلی‌متر است. ابعاد ورق انتهایی مهیار ۲۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر مربع و ضخامت آن ۲۵ میلی‌متر است که در آن برای نصب قطعه اعمال نیرو، ۴ سوراخ با قطر ۱۶ میلی‌متر تعبیه شد. خصوصیات مکانیکی مصالح فولادی در دمای محیط از طریق آزمون‌های کشش استاندارد بر اساس آیین‌نامه ASTM-A370 [۲۲] تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳. نمایی از چیدمان آزمایشگاهی و ابزارهای اندازه‌گیری به کار رفته در حین آزمایش حرارت.

Fig. 3. View of the experimental layout and measuring tools.

، جک هیدرولیکی، حس‌گر اندازه‌گیری بار و سیستم ثبت داده می‌باشد. کوره حرارتی به کار رفته در آزمایش‌های آتش مطالعه اخیر دارای طول ۶۰۰ عرض ۵۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر، پوشش خارجی از جنس پشم سنگ و روکش داخلی از جنس فیبر سرامیکی با ضخامت ۵۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۳). الزامات آزمایش مقاومت در برابر آتش برای ارزیابی عملکرد سازه‌ای در حین ساخت و بهره‌برداری از کوره به دقت رعایت شد [۲۵-۲۸]. یک ترموکوپل کنترلی در داخل کوره نصب شد تا داده‌های دقیق و دمای واقعی را همزمان به یک کنترل کننده که تنظیم کننده قدرت مشعل است، فعال نماید. از یک دستگاه ثبت داده برای قرائت داده ورودی ترموکوپل کنترل دمای داخل کوره و شبیه‌سازی آتش استاندارد طبق منحنی گرمایش ایزو ۸۳۴ [۱۹] استفاده شده است.

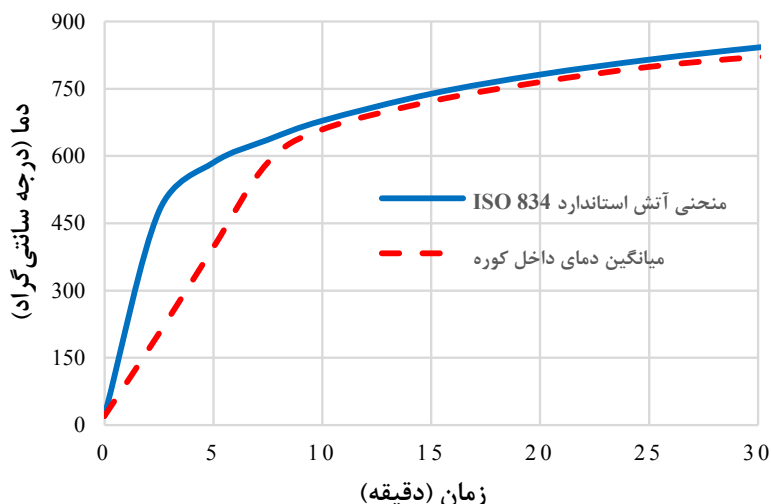
برای اندازه‌گیری تاریخچه دمایی در طول آزمایشات آتش، علاوه بر نصب یک دوربین حرارتی مدل 320 HR ساخت شرکت آرگوس که قابلیت ثبت و ضبط تصاویر به همراه دمای متناظر با آن را در لحظات مختلف آزمایش با وضوح بالا (۳۲۰×۲۴۰ پیکسل) دارد، از دوازده عدد ترموکوپل نوع K مقاوم در برابر حرارت از جنس نیکل - کروم استفاده شد. ترموکوپل‌ها بر روی سطح نمونه و در نواحی مختلف کوره توزیع و نصب

۲-۲- تنظیمات آزمایش

آزمایش‌ها بر روی یک کف صلب متشکل از تیرآهن‌های بال‌پهن شماره‌ی ۳۰۰ انجام شد. برای مهار کردن ورق‌های انتهایی دو سر پایه از دو ستون کناری کوتاه فولادی HPB300 که ارتفاع هر یک ۸۰۰ میلی‌متر و دارای یک صفحه زیرین به ابعاد ۱۵ × ۴۰۰ × ۸۰۰ میلی‌متر مکعب بوده، استفاده شد (شکل ۳). یک براکت یکپارچه فولادی به ابعاد ۲۰ × ۲۰ × ۱۲۰ میلی‌متر مکعب از جنس ST-52 در قسمت خارجی مرکز ورق انتهایی مهار، جوش داده شد. لنگر خمشی خارج از صفحه از طریق بار قائمی که توسط جک هیدرولیکی ۱۰۰ کیلونیوتنی به براکت فولادی اعمال می‌شد به نمونه وارد گردید. هر چند مهار اجازه تغییر مکان در راستای قائم را داشت اما به منظور اجتناب از تغییر مکان جانبی آن، از دو پایه فولادی عمودی موازی در طرفین مهار استفاده شد (شکل ۳).

۲-۳- تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی به کار رفته در این مطالعه شامل کوره حرارتی، ترموکوپل‌های مقاوم در برابر آتش، دوربین حرارتی، حس‌گرهای اندازه‌گیری جابه‌جایی، کرنش‌سنج‌های مقاوم در دمای بالا



شکل ۴. مقایسه میانگین دمای داخل کوره و منحنی آتش استاندارد ISO 834 [۱۹].

Fig. 4. Comparison of the average temperature inside the furnace and ISO 834 standard fire curve [16].

آزمایش‌های آتش‌سوزی بر روی نمونه‌های TJ2 و TJ3 در سه مرحله انجام شد. در مرحله اول، تحت دمای محیط، یک لنگر خارج از صفحه از پیش تعریف شده، به انتهای آزاد مهار اعمال شد. لنگر اعمال شده به نمونه TJ2، ۵/۱ کیلونیوتن متر (۲۲ درصد ظرفیت خمشی اتصال) و به نمونه TJ3، ۸/۰۲ کیلونیوتن متر (۳۵ درصد ظرفیت خمشی اتصال) بود. در مرحله دوم، تحت لنگر اعمالی ثابت، آتش استاندارد ایزو ۸۳۴ [۱۹] مطابق رابطه ذیل به کوره اعمال شد:

$$T = 20 + 345L \log(8t + 1) \quad (1)$$

در رابطه بالا، T دمای داخل کوره بر حسب درجه سانتی‌گراد و t زمان بر حسب دقیقه است. در مرحله سوم، هنگامی که تغییر مکان انتهایی مهار به حدود ۰/۱۶ طول مهار رسید، کوره خاموش شده و ضمن باربرداری نمونه، اجازه داده شد تا نمونه به تدریج سرد شود.

شکل ۴ مقایسه منحنی آتش استاندارد ایزو ۸۳۴ [۱۹] را با تاریخچه زمانی میانگین دمای ثبت شده توسط ترموکوپل‌های داخل کوره حین آزمایش حرارت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طی چند دقیقه اول، دمای میانگین نمونه‌ها، پایین‌تر از دمای منحنی ISO 834 است، اما دو

شدند.

حس‌گرهای اندازه‌گیری جابه‌جایی مدل Kyowa از نوع DT-200A و DT-100A در انتهای مهار برای اندازه‌گیری خمش خارج صفحه و داخل صفحه نصب شدند. سه کرنش‌سنج مقاوم در برابر حرارت شرکت TML (نوع ZFLA-5-11) بر روی سطح خارجی پایه جهت اندازه‌گیری کرنش محوری آن تعبیه شدند. یک لودسل کالیبره شده ۱۰۰ کیلونیوتنی مدل Omega LCM1001 به صورت سری بین جک هیدرولیکی و براکت بارگذاری جهت اندازه‌گیری بار اعمالی به مهار قرار گرفت. در طول آزمایش‌ها، یک سیستم ثبت داده مدل TDS 303 - ساخت شرکت TML ژاپن، سیگنال‌های حس‌گرهای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها، لودسل و کرنش‌سنج‌ها را در فواصل یک ثانیه ثبت می‌کرد.

۲-۴- مراحل انجام آزمایش

ابتدا میزان ظرفیت دورانی اتصال TJ1 با استفاده از آزمون بارافزون شبه‌استاتیکی در دمای محیط محاسبه و سپس لنگر وارده به صورت درصدی از این ظرفیت دورانی به دو نمونه دیگر اعمال شد. بدین منظور بار متمرکز قائم به تدریج به انتهای عضو مهار نمونه TJ1 وارد و ظرفیت لنگر خمشی خارج از صفحه اتصال TJ1 بر اساس معیار معرفی شده توسط یورا و همکاران [۲۹]، ۲۲/۷۳ کیلونیوتن متر به دست آمد.

سه بعدی و ناسازگار ۸ گره‌ای C3D8I جهت مش‌بندی مدل استفاده شد. جهت اطمینان از انتقال مستقیم درجه حرارت حاصل از تحلیل انتقال حرارت به تحلیل مکانیکی، ابعاد و شرایط مرزی هر دو المان در هر دو روش تحلیل مذکور، یکسان در نظر گرفته شد. علاوه بر این، اندازه المان‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که از المان‌های با ابعاد کوچک در مناطق با تمرکز تنش بالا (مناطق اطراف محل اتصال پایه به مهار) و از المان‌های درشت‌تر در مناطق دورتر استفاده گردد. برای اطمینان از صحت نتایج مدل اجزاء محدود، از سه لایه المان در دیواره اعضا استفاده شد. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر، صفحات انتهایی پایه، مهار و نیز هندسه جوش شبیه‌سازی شدند. از آنجایی که استفاده از المان‌های حجمی سه بعدی این اجازه را می‌دهد تا هندسه جوش واقعی‌تری ساخته شود و نیز با توجه به تأثیر پنجه جوش و تغییرات تنش در امتداد ضخامت دیواره، از این نوع المان جهت شبیه‌سازی جوش استفاده شده است (شکل ۵).

شرایط مرزی و بارگذاری مکانیکی و حرارتی مدل اجزاء محدود، مشابه نمونه آزمایشگاهی است، بدین صورت که قسمت انتهایی پایه در تمام جهات مقید شده است. مهاربند نیز در تمام جهات مقید شده و جابه‌جایی قائم و چرخش در سه جهت آن آزاد است. شکل ۵ جزئیات مش‌بندی مدل عددی اتصال T شکل لوله‌ای در محیط آباکوس را نشان می‌دهد.

۳-۳- تحلیل تنش - حرارت

شبیه‌سازی صحیح انتقال حرارت برای تحلیل رفتار یک اتصال لوله‌ای در شرایط آتش‌سوزی بسیار مهم و حائز اهمیت است. آباکوس چندین روش تحلیل تنش - حرارتی را ارائه می‌دهد که از جمله آن می‌توان به تحلیل حرارتی ساده، تحلیل حرارتی - سازه‌ای درگیر متوالی و تحلیل حرارتی - سازه‌ای درگیر کامل اشاره کرد. در این مقاله به دلیل تأثیر ناچیز اثر متقابل نیروهای خارجی و درجه حرارت و نیز مدت زمان تحلیل کمتر و نیاز به پردازنده کمتر از روش تحلیل درگیر متوالی غیرمستقیم تنش - حرارت، استفاده شد. بدین منظور، تحلیل حرارتی گذرا تحت بار ثابت و دمای متغیر، بر روی نمونه انجام شد، بدین صورت که در ابتدا تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت خمش خارج از صفحه اعمالی به انتهای مهار صورت پذیرفت. سپس تحلیل حرارتی بر روی مدل حرارتی انجام و تمام دماهای گره‌ای از طریق یک فایل دمایی از پیش تعریف شده به مدل استاتیکی انتقال یافتند. تحلیل تا زمان رسیدن دما به دمای بحرانی و وقوع خرابی در اتصال ادامه یافت.

منحنی پس از حدود ۷/۵ دقیقه بر روی یکدیگر منطبق می‌شوند. مشاهدات مشابه مورد مذکور توسط هی و همکاران [۳]، چنگ و همکاران [۱۱]، ژائو و همکاران [۳۰] گزارش شده است. برخی نتایج مطالعه آزمایشگاهی در بخش ۴ ارائه شده‌اند.

۳- مطالعه عددی

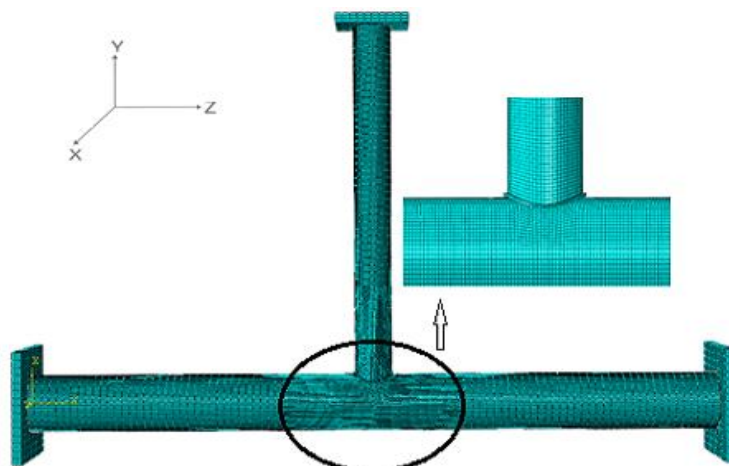
عملکرد اتصالات T شکل لوله‌ای فولادی در حین آتش‌سوزی به دلیل اندرکنش فرایندهای مکانیکی و حرارتی، بسیار پیچیده است. برای شناسایی دقیق رفتار چنین اتصالاتی، نیاز به انجام مطالعات گسترده آزمایشگاهی است که بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. شبیه‌سازی عددی یک روش جایگزین برای تحلیل گسترده‌تر با هزینه کم و اثربخشی بالا است که در آن اغلب از مدل‌های عددی که بر مبنای مدل‌های آزمایشگاهی کالیبره شده‌اند، برای پیش‌بینی و تخمین نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در ادامه این تحقیق، یک مطالعه عددی جامع با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود غیرخطی آباکوس [۱۶] انجام شده است.

۳-۱- خصوصیات مصالح

در تحلیل عددی اخیر، از نتایج آزمون کششی استاندارد انجام شده بر روی نمونه‌های فولادی برای تعیین خصوصیات مکانیکی فولاد در دمای محیط استفاده شد. نسبت مشخصه‌های مکانیکی فولاد در دمای بالا نسبت به دمای پائین را می‌توان از آیین‌نامه‌هایی مانند Eurocode 3 [۳۱] محاسبه کرد. همچنین از منحنی تنش - کرنش واقعی فولاد در دماهای بالا مندرج در آیین‌نامه Eurocode 3 [۳۱] به جای منحنی تنش - کرنش مهندسی متناظر در دماهای بالا استفاده شده است. خواص غیرخطی مصالح و هندسه که تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت نهایی اتصالات لوله‌ای در دماهای بالا دارند نیز در این مطالعه لحاظ شد تا اثر تغییر مکان‌های بزرگ در تحلیل اجزاء محدود در نظر گرفته شود. علاوه بر این، از معیار تسلیم فون میسز و سخت‌شوندگی سینماتیکی جهت شبیه‌سازی تسلیم فولاد استفاده شد.

۳-۲- نوع المان‌ها، مش‌بندی و شرایط مرزی

همان‌طور که در ادامه توضیح داده خواهد شد (بخش ۳-۳)، تحلیل مدل اجزاء محدود در این مطالعه، شامل دو تحلیل مجزا و متوالی حرارتی و مکانیکی است، بر همین اساس در هر یک از تحلیل‌های مذکور، از المان منحصر به فرد مختص آن نوع تحلیل، استفاده شده است. در تحلیل حرارتی از المان سه بعدی ۸ گره‌ای DC3D8 و در تحلیل مکانیکی از المان حجمی



شکل ۵. جزئیات مش بندی مدل عددی اتصال T شکل لوله‌ای در محیط آباکوس.

Fig. 5. Mesh details of the numerical model of tubular T-joint in ABAQUS.

عددی نمونه TJI با نتایج استخراج شده از مطالعات آزمایشگاهی در دمای محیط را نشان می‌دهد. ظرفیت خمش قابل تحمل اتصال در مدل عددی، $23/71$ کیلونیوتن‌متر و در مطالعه آزمایشگاهی $23/04$ کیلونیوتن‌متر بوده است. این اختلاف کم بین پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی، به دلایل مختلفی از جمله ساده‌سازی‌های صورت گرفته در مدل‌سازی عددی و رفتار غیرخطی مصالح و صرف‌نظر کردن از تنش‌های پسماند می‌باشد.

۴-۲- مقایسه دمای بحرانی و گرادیان حرارتی

خرابی نمونه‌ها تحت بار آتش هنگامی رخ می‌دهد که دما از حد معینی به نام دمای بحرانی (T_c) فراتر رود. تطابق پاسخ‌های "دوران - دما" به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی نمونه‌های TJ2 و TJ3 از منظر تعیین صحیح دمای بحرانی اهمیت دارد. علیرغم مطالعات و روابط ارائه شده قبلی توسط برخی محققین همچون هی و همکاران [۳] و ژائو و همکاران [۳۲] جهت تعیین دمای بحرانی در اتصالات فولادی لوله‌ای، تاکنون معیار عمومی پذیرفته شده‌ای جهت تعیین دمای بحرانی اتصالات فولادی تحت لنگر خمشی خارج صفحه ارائه نشده است. در این بخش، از معیار معرفی شده توسط یورا و همکاران [۲۹] جهت تعیین دوران بحرانی استفاده شده است. آن‌ها در کار تجربی خود بر روی ظرفیت خمش داخل و خارج از صفحه اتصالات لوله‌ای فولادی در دمای محیط، دوران بحرانی را

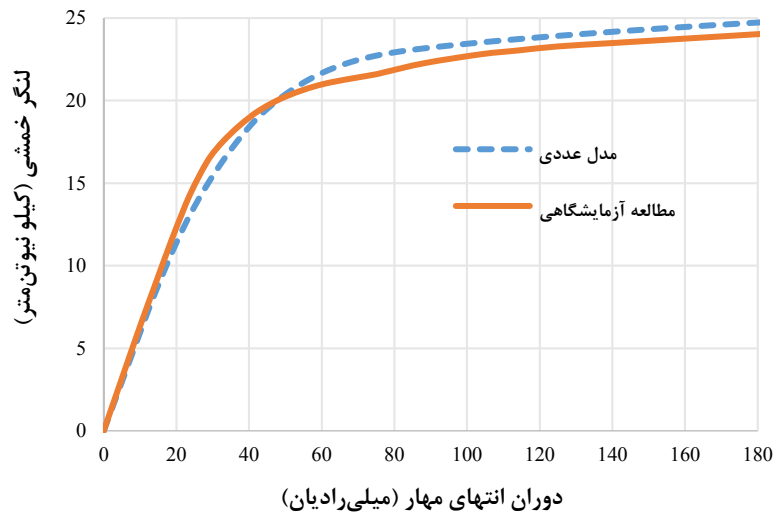
به صورت نظری، حرارت از منبع آتش به سطح خارجی لوله‌ها به دو طریق همرفت و تابش منتقل می‌شود. پارامترهای حرارتی مورد نیاز جهت تحلیل اجزاء محدود مانند ضریب همرفت، ضریب تابش، ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایش ویژه و ضریب انبساط طولی بر اساس اطلاعات مندرج در آیین‌نامه Eurocode 3 [۳۱] تعریف شدند. بر این اساس در این تحقیق از طریق مازول Interaction موجود در نرم‌افزار آباکوس، ضریب تابش $0/7$ ، ضریب همرفت 25 وات بر مترمربع - کلوین و همچنین از طریق منوی Model Attributes، دمای صفر مطلق $273/15-$ و ثابت بولتزمن $5/67 \times 10^{-8}$ به مدل حرارتی اعمال شدند.

۴-۴- مقایسه نتایج مدل عددی با مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش به منظور اطمینان از صحت‌سنجی مدل عددی ساخته شده، نتایج مدل عددی و رفتار نمونه آزمایشگاهی در آتش با یکدیگر مقایسه شدند. این مهم از طریق مقایسه منحنی لنگر - دوران، گرادیان حرارتی، منحنی دوران - دما و مدهای خرابی صورت گرفته است.

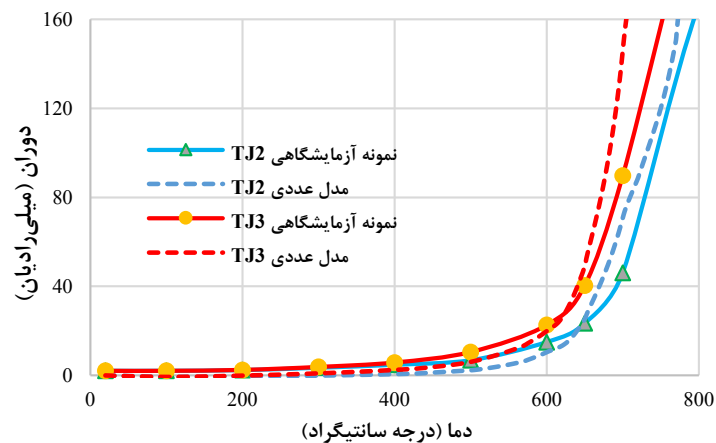
۴-۱- مقایسه منحنی لنگر - دوران

در ابتدا با استفاده از مدل اجزاء محدود، ظرفیت لنگر خمشی مجاز اتصال در دمای محیط، تحت لنگر خمشی افزایشی به انتهای مهار به دست آمد. شکل ۶ مطابقت خوب بین نتایج منحنی لنگر - دوران حاصل از شبیه‌سازی



شکل ۶. مقایسه منحنی لنگر - دوران مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل عددی نمونه TJ1.

Fig. 6. Comparison of moment-rotation curve of experimental study and numerical analysis of TJ1 specimen.



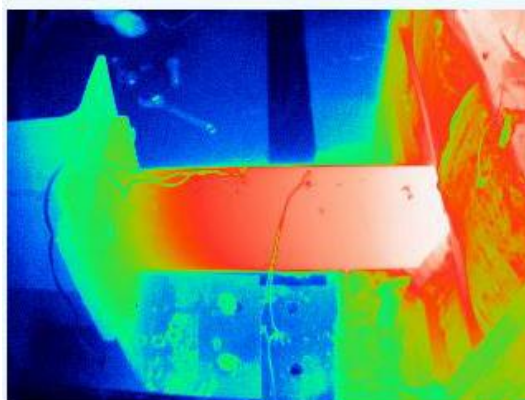
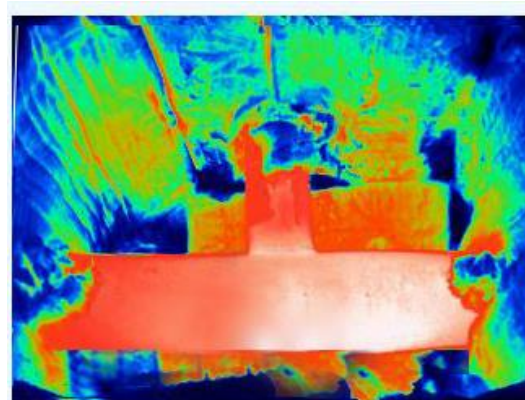
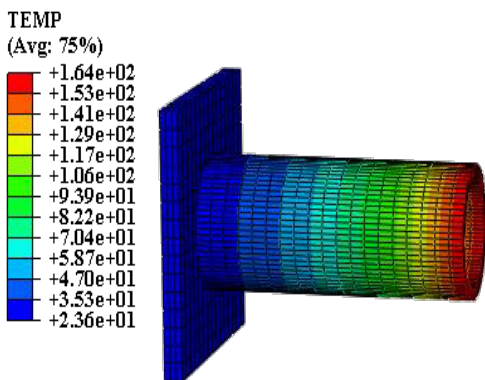
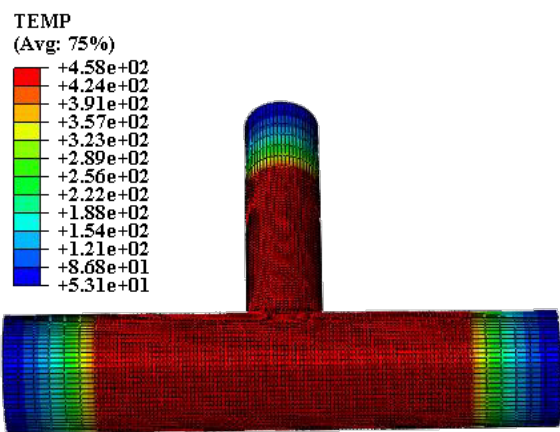
شکل ۷. مقایسه منحنی دوران - دمای مدل عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی TJ2 و TJ3.

Fig. 7. Comparison of rotation-temperature curve of numerical model and TJ1 and TJ2 experimental specimens.

نمونه TJ3، دمای بحرانی اتصال در مطالعه آزمایشگاهی و مدل عددی به ترتیب ۷۰۴ و ۶۸۳ درجه سانتی‌گراد است که نشان دهنده سازگاری معقولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی می‌باشد.

به منظور حصول اطمینان بیشتر، تغییرات گرادیان حرارتی به دست آمده از مدل عددی با تاریخچه دمایی نمونه‌های آزمایشگاهی که با دوربین حرارتی ثبت شده‌اند، مقایسه شده است (شکل ۸). دو عکس ثبت شده به

چهار برابر دوران تسلیم عضو مهار تعریف کردند. در مطالعه حاضر و برای خمش خارج از صفحه نمونه‌های در معرض آتش، دمای بحرانی برابر دمایی در نظر گرفته شده است که در آن دوران اتصال به دوران بحرانی معرفی شده توسط یورا و همکاران می‌رسد. بر اساس معیار فوق و با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که برای نمونه TJ2، دمای بحرانی اتصال در مطالعه آزمایشگاهی و مدل عددی به ترتیب ۷۳۸ و ۷۳۱ درجه سانتی‌گراد و برای



(ب) مدل عددی
b) Numerical model

الف) نمونه آزمایشگاهی
a) Experimental specimen

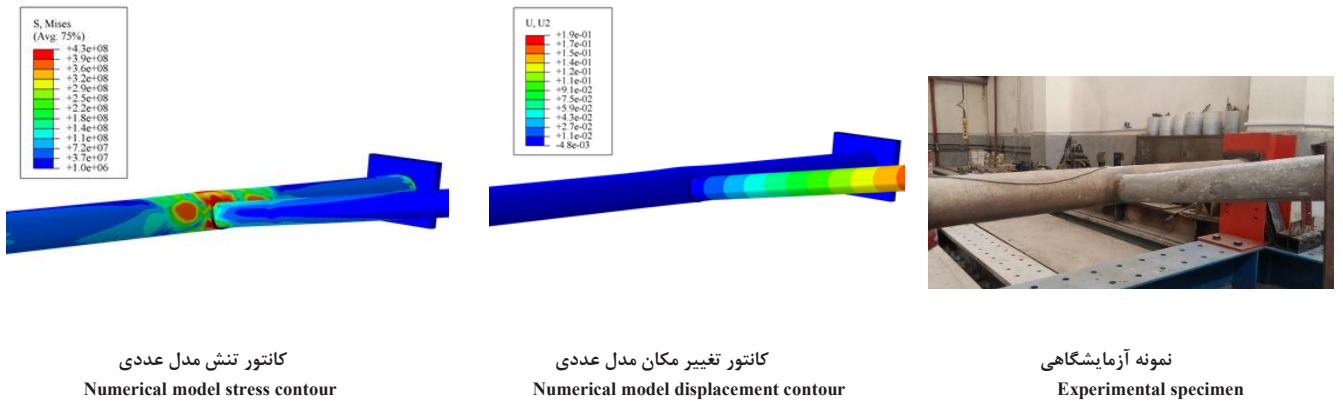
شکل ۸. مقایسه گرادیان حرارتی بین الف) نمونه آزمایشگاهی و ب) مدل عددی.

Fig. 8. Comparison of thermal gradient between a) experimental specimen and b) numerical model.

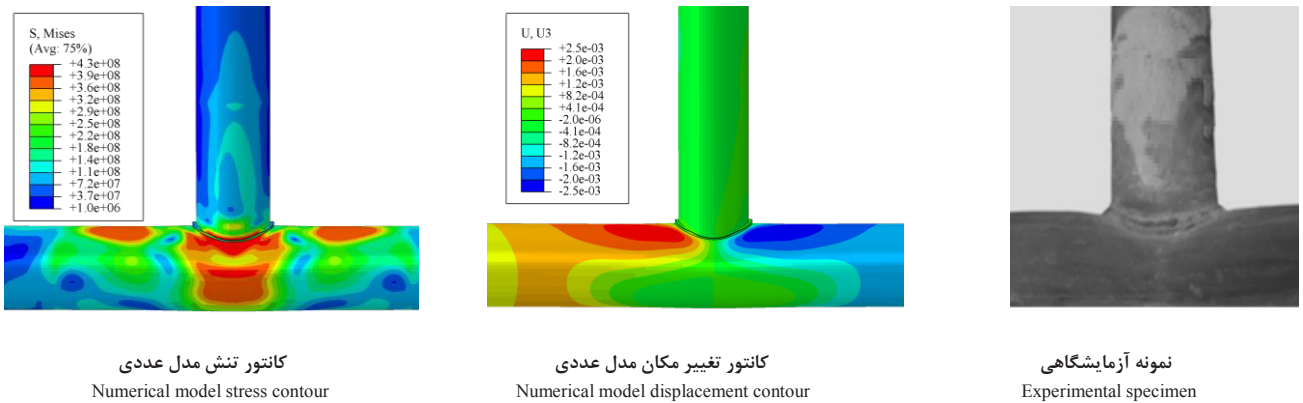
وسيله دوربين حرارتی، دمای نمونه در داخل کوره و نیز عضو پایه را به فاصله زمانی ۱۵ ثانیه از همدیگر و پس از اتمام آزمایش نشان می‌دهد. مطابق این شکل در دمای محیط (۳۴ درجه سانتی‌گراد)، در حالی که دمای مرکز اتصال در داخل کوره ۴۵۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، دما در نقطه‌ای به فاصله ۳۰ سانتی‌متری از تکیه‌گاه سمت چپ عضو پایه، ۱۶۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. نحوه تغییرات گرادیان حرارتی در داخل و خارج کوره، عیناً در نقاط مذکور و بر روی مدل عددی بررسی شد و همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، دمای متناظر با نقاط داخل و خارج کوره به ترتیب ۴۵۸ و ۱۶۴ درجه

۳-۴- مقایسه مدهای خرابی

یکی از موارد مهم در بررسی رفتار اتصالات، شناخت و بررسی نحوه گسیختگی آن‌ها است. مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که حالت‌های شکست پیش‌بینی شده از کانتورهای تنش و تغییر مکان مدل عددی با



الف) نمونه TJ1
a) TJ1



ب) نمونه TJ3
b) TJ3

شکل ۹. مقایسه مد خرابی نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی الف) نمونه TJ1 و ب) نمونه TJ3

Fig. 9. Comparison of failure mode of experimental specimens and numerical models a) TJ1 and b) TJ3.

۵- مطالعه پارامتری

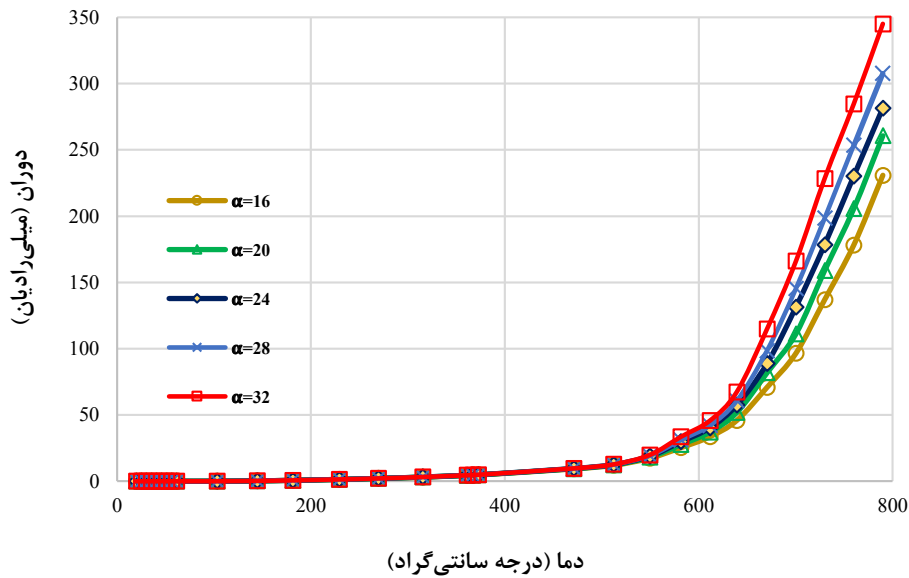
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی $(\alpha, \tau, \gamma, \beta)$ و نیز نرخ بارگذاری (η) بر عملکرد اتصالات T شکل لوله‌ای، یک مطالعه پارامتری انجام شده است. در این مطالعه، مجموعاً ۲۵ مدل اتصال T شکل مطابق جدول ۲ ساخته شده و تحت آتش استاندارد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. مدل‌های به کار رفته در تحلیل پارامتری بر اساس ابعاد واقعی تعریف شده‌اند. محدوده تغییرات هر یک از پارامترهای هندسی با قلم قرمز پررنگ در جدول ۲ مشخص شده‌اند. روش تحلیل و سایر خواص مکانیکی و حرارتی در دمای محیط و حرارت بالا، مشابه با موارد به کار

مشاهدات آزمایشگاهی سازگار هستند. همان طور که در شکل ۹-الف نشان داده شده است، مد شکست غالب نمونه TJ1 (که در دمای محیط تحت لنگر خمشی افزایشی آزمایش شده است)، تشکیل مفصل خمیری خمشی در مهار است، حال آن که مد شکست غالب در نمونه‌های TJ2 و TJ3 (تحت آزمایش آتش استاندارد ایزو ۸۳۴ [۱۹])، خمیری شدن وجه پایه بود (شکل ۹-ب). مطالعه صحت‌سنجی مذکور نشان می‌دهد که مدل اجزاء محدود معرفی شده، توانایی پیش‌بینی‌های معقول و دقیقی از رفتار مکانیکی اتصالات T شکل لوله‌ای فولادی را دارد و می‌توان از آن جهت انجام مطالعات پارامتری در دمای محیط و نیز دماهای بالا استفاده نمود.

جدول ۲. جزئیات مدل‌های عددی استفاده شده در مطالعه پارامتری

Table 2. Details of the numerical models used in the parametric study.

η	γ	β	τ	α	M_u (کیلو نیوتن متر)	t (میلی متر)	l (میلی متر)	d (میلی متر)	T (میلی متر)	L (میلی متر)	D (میلی متر)	مشخصات هندسی
نرخ لنگر خمشی اعمالی	نسبت قطر به ضخامت پایه	نسبت قطر مهار به پایه	نسبت ضخامت مهار به پایه	نسبت طول به قطر پایه	ظرفیت خمشی خارج از صفحه	ضخامت مهار	طول مهار	قطر مهار	ضخامت پایه	طول پایه	قطر پایه	شماره مدل
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۱۶	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۶,۱۰۰	۷۶۲	TJ01
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۰	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۷,۶۰۰	۷۶۲	TJ02
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ03
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۸	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۱۰,۷۰۰	۷۶۲	TJ04
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۳۲	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۱۲,۱۹۲	۷۶۲	TJ05
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۲۰	۲۴	۳۷۲/۹	۵/۱	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ06
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۴۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۰/۲	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ07
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۶۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۵/۲	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ08
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۸۰	۲۴	۳۷۲/۹	۲۰/۳	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ09
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۱/۰۰	۲۴	۳۷۲/۹	۲۵/۴	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ10
۰/۳۵	۱۵	۰/۲	۰/۵۰	۲۴	۱۰۴/۴	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۱۵۲	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ11
۰/۳۵	۱۵	۰/۴	۰/۵۰	۲۴	۲۵۴/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۰۵	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ12
۰/۳۵	۱۵	۰/۶	۰/۵۰	۲۴	۵۳۷/۴	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۴۵۷	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ13
۰/۳۵	۱۵	۰/۸	۰/۵۰	۲۴	۱,۰۶۹/۶	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۶۱۰	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ14
۰/۳۵	۱۵	۱/۰	۰/۵۰	۲۴	۱,۹۹۵/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۷۶۲	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ15
۰/۳۵	۱۰	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۸۰۲/۱	۱۹/۱	۴,۰۰۰	۳۸۱	۳۸/۱	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ16
۰/۳۵	۱۵	۰/۵	۰/۶۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۵/۲	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ17
۰/۳۵	۲۰	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۲۱۹/۰	۹/۵	۴,۰۰۰	۳۸۱	۱۹/۱	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ18
۰/۳۵	۲۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۱۴۶/۱	۷/۶	۴,۰۰۰	۳۸۱	۱۵/۲	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ19
۰/۳۵	۳۰	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۱۰۵/۶	۶/۴	۴,۰۰۰	۳۸۱	۱۲/۷	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ20
۰/۲	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ21
۰/۴	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ22
۰/۶	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ23
۰/۸	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ24
۱/۰	۱۵	۰/۵	۰/۵۰	۲۴	۳۷۲/۹	۱۲/۷	۴,۰۰۰	۳۸۱	۲۵/۴	۹,۲۰۰	۷۶۲	TJ25



شکل ۱۰. منحنی دوران - دما برای مقادیر مختلف α .

Fig. 10. Rotation-temperature curve for different values of α .

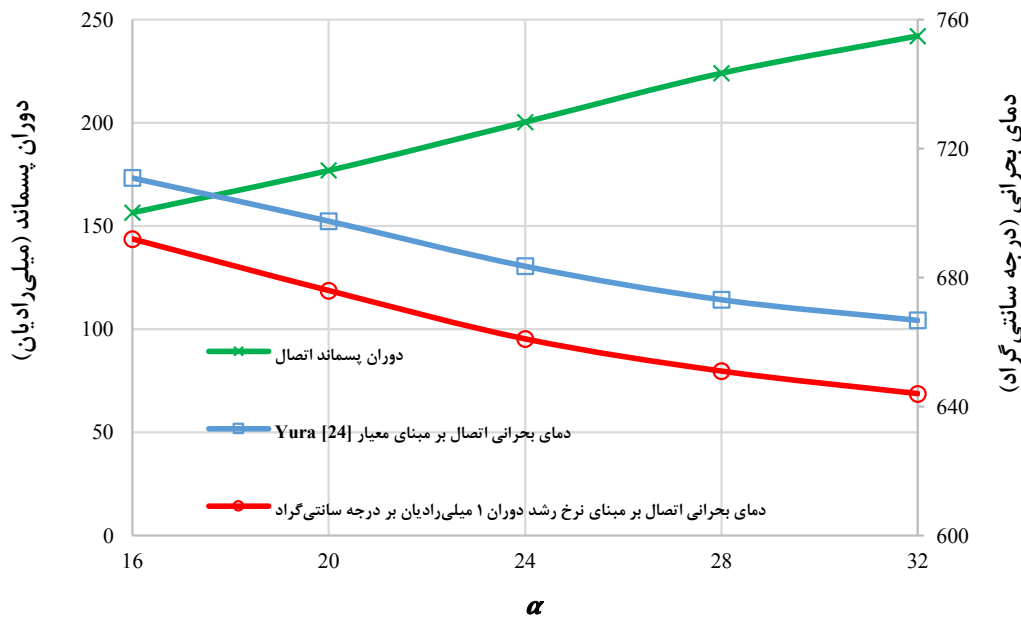
شکل ۱۰ تغییرات منحنی دوران - دما را در برابر تغییرات α نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که افزایش α ، بیانگر افزایش طول پایه است، بنابراین با افزایش α ، سختی پیچشی عضو پایه در محل اتصال کاهش خواهد یافت. شکل ۱۰ دوران خالص اتصال را گزارش می‌کند (دوران پیچشی عضو پایه حذف شده است)، لذا در دماهای پایین تر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، تغییر α تأثیر چندانی بر دوران خالص اتصال نداشته است. در دماهای بالاتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش α موجب افزایش دوران اتصال شده است.

شکل ۱۱ تأثیر α را بر دوران پسماند اتصال، یعنی دوران اتصال پس از وقوع آتش‌سوزی و هنگام رسیدن دمای اتصال به دمای محیط، نشان می‌دهد. این شکل همچنین تأثیر α را بر دمای بحرانی اتصال، بر اساس معیار معرفی شده توسط یورا و همکاران [۲۹] و نیز معیار جدید پیشنهادی توسط مولفین (نرخ رشد دوران یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد)، ارائه می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش α از ۱۶ به ۳۲، دوران پسماند اتصال از ۱۵۶ به ۲۴۲ میلی‌رادیان افزایش می‌یابد. افزایش α از ۱۶ به ۳۲ باعث کاهش دمای بحرانی اتصال از ۷۱۱ به ۶۶۶ درجه سانتی‌گراد (مطابق معیار یورا و همکاران [۲۹]) و از ۶۹۲ به ۶۴۴ درجه سانتی‌گراد (بر مبنای نرخ رشد دوران یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد) شده است.

رفته در مطالعه صحت‌سنجی می‌باشد. سعی شده است تا محدوده تغییرات پارامترهای هندسی رایج اتصالات لوله‌ای فولادی در مطالعه پارامتری پوشش داده شود. در مطالعه پارامتری حاضر، منظور از دوران و دوران پسماند، دوران خالص اتصال پس از حذف دوران ناشی از خمش تیری عضو مهار و نیز دوران پیچشی عضو پایه است. همچنین دمای بحرانی اتصال بر اساس معیار معرفی شده توسط یورا و همکاران [۲۹] و نیز معیار جدید پیشنهادی توسط مولفین (نرخ رشد دوران یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد) به دست آمده است.

۵-۱- تأثیر پارامتر α (نسبت طول به قطر پایه)

در این بخش به بررسی تأثیر پارامتر نسبت طول به قطر پایه (α) بر روی منحنی دوران - دما، دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال پرداخته شده است. مدل‌های مورد بررسی در این بخش، شامل مدل‌های TJ01-TJ05 هستند که در آن‌ها مقدار α از ۱۶ تا ۳۲ متغیر است (جدول ۲). مقادیر پارامترهای هندسی دیگر شامل β ، τ و γ ثابت بوده (به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۵، ۱۵) و نرخ بارگذاری (η) نیز ۰/۳۵ است.



شکل ۱۱. اثر α بر دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال.

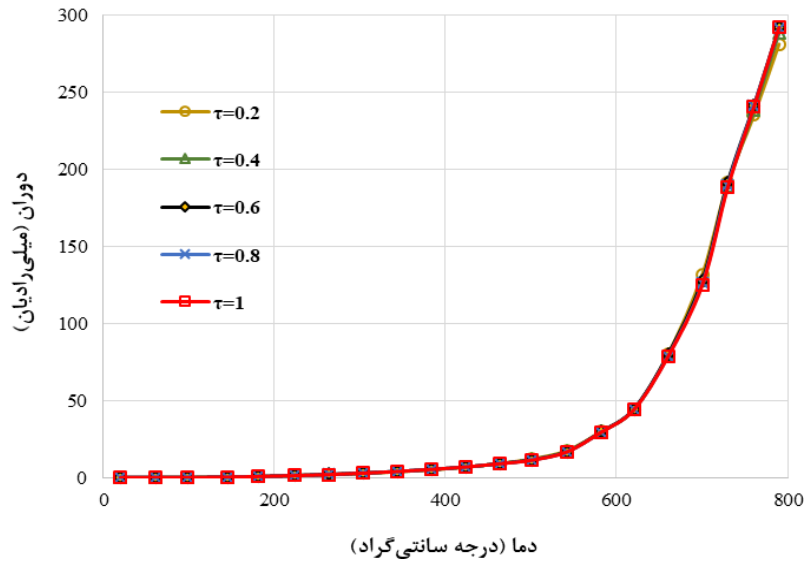
Fig. 11. Effect of α on residual rotation and critical temperature of the joint.

۵-۳- تأثیر پارامتر β (نسبت قطر مهار به پایه)

جهت بررسی اثر پارامتر β بر روی رفتار اتصال، پنج مدل TJ11-TJ15 (جدول ۲) انتخاب شدند، مقدار β در این مدل‌ها از ۰/۲ تا ۱ متغیر هستند. منحنی دوران - دمای این مدل‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نتایج استخراج شده نشان می‌دهد رفتار خمش خارج از صفحه اتصال T شکل با افزایش مقدار β به وضوح بهبود و دوران نهایی اتصال نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافت. مقدار β بزرگ‌تر به این مفهوم است که سطحی از محیط پایه که توسط مهار پوشش داده شده، افزایش یافته است. گرم شدن آن بخش از پایه که توسط مهار پوشانده شده است، زمان بیشتری می‌برد، با کاهش نرخ گرم شدن این بخش حساس اتصال، رفتار اتصال در برابر آتش بهبود یافته، دوران نهائی و پسماند آن کاهش یافته و زمان تحمل برابر آتش افزایش می‌یابد. یک مد خرابی غالب در نمونه‌های عددی مطالعه شده، خمیری شدن یک نوار شبه‌بیضی در سطح پایه در اطراف فصل مشترک مهار با پایه است. با افزایش β (و ثابت باقی ماندن قطر پایه)، فصل مشترک مهار با پایه نیز بزرگ‌تر شده در نتیجه محیط شبه‌بیضی که خمیری شدن بر روی آن رخ می‌دهد، بزرگ‌تر شده و مقاومت اتصال در برابر دوران، افزایش می‌یابد. با بررسی شکل ۱۵

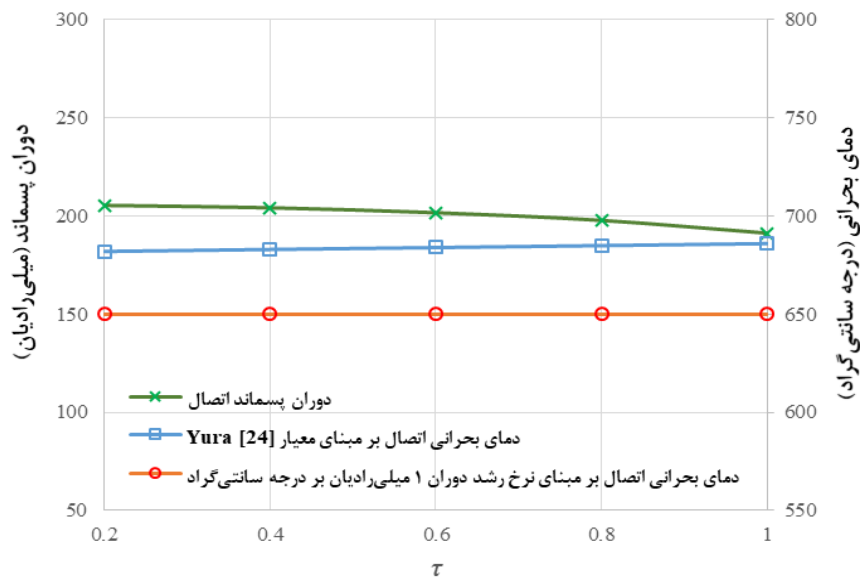
۵-۲- تأثیر پارامتر τ (نسبت ضخامت مهار به پایه)

به منظور بررسی اثر پارامتر τ بر روی رفتار اتصال، مدل‌های TJ06-TJ10 با مقادیر τ از ۰/۲ تا ۱ انتخاب شده‌اند. با بررسی منحنی‌های دوران - دما، دوران پسماند و دمای بحرانی مدل‌های مذکور (شکل‌های ۱۲ و ۱۳)، مشاهده می‌شود که تغییر پارامتر τ ، تأثیر چندانی بر روی پاسخ دوران خارج از صفحه اتصال در حین آتش‌سوزی و همچنین بر روی دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال ندارد، این شاید بدان علت باشد که در این مطالعه پارامتری، افزایش τ از ۰/۲ تا ۱ به مفهوم آن است که ضخامت دیواره و هندسه عضو پایه ثابت باقی مانده و ضخامت دیواره مهار از ۵/۱ تا ۲۵/۴ میلی‌متر افزایش یافته است. شکل‌های (۱۲ و ۱۳) معرف تغییرات دوران و دمای بحرانی اتصال تحت بار آتش هستند. در مهار با جداره نازک‌تر، خرابی تحت آتش‌سوزی در خود مهار رخ می‌دهد، لذا اتصال، دوران جدی را تجربه نمی‌کند. در حقیقت، دوران انتهایی مهار بسیار متأثر از مقدار τ بوده، حال آن که دوران خالص اتصال در آتش، چندان متأثر از تغییرات τ نبوده است. مطابق شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که با افزایش τ از ۰/۲ تا ۱، دوران پسماند تنها ۱۴ میلی‌رادیان کاهش و دمای بحرانی نیز فقط ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.



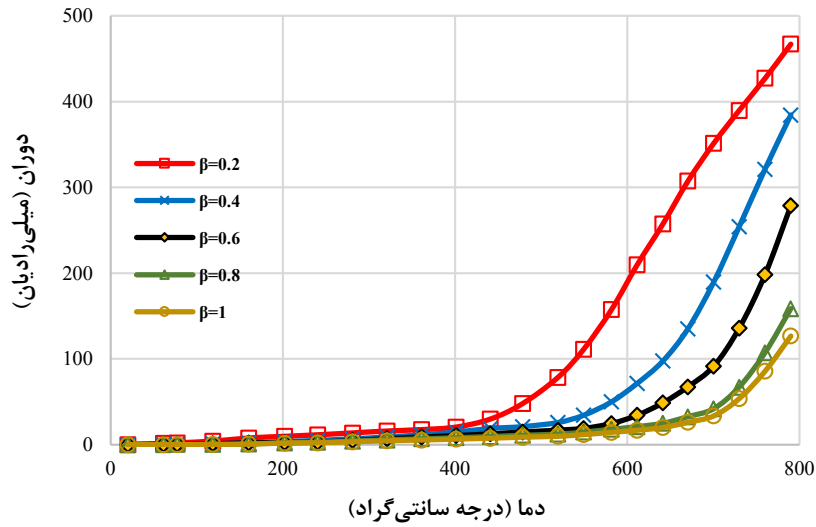
شکل ۱۲. منحنی دوران - دما برای مقادیر مختلف τ .

Fig. 12. Rotation-temperature curve for different values of τ .



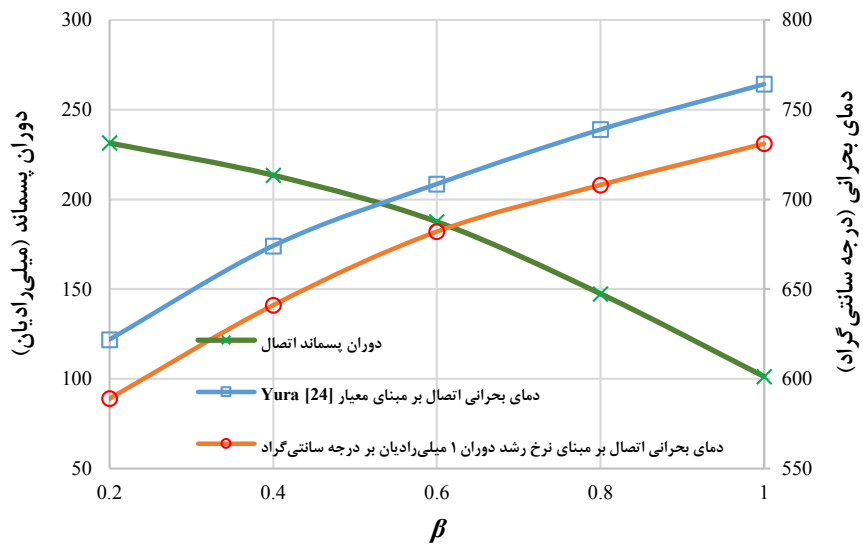
شکل ۱۳. اثر τ بر دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال.

Fig. 13. Effect of τ on residual rotation and critical temperature of the joint.



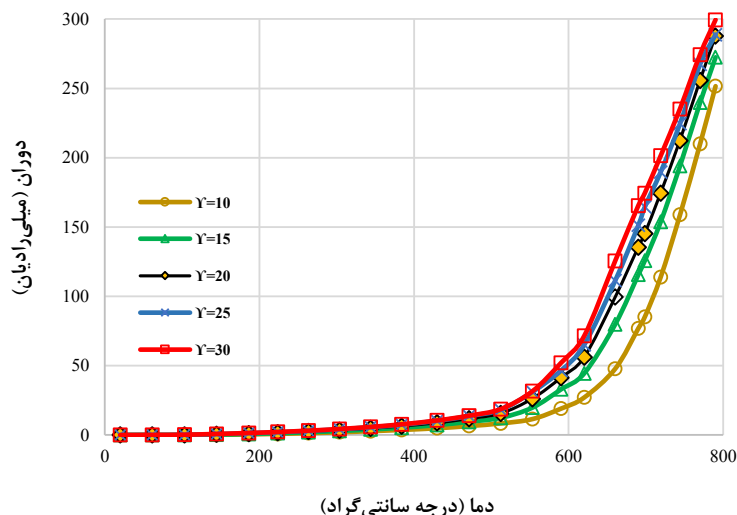
شکل ۱۴. منحنی دوران - دما برای مقادیر مختلف β .

Fig. 14. Rotation-temperature curve for different values of β .



شکل ۱۵. اثر β بر دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال.

Fig. 15. Effect of β on residual rotation and critical temperature of the joint.



شکل ۱۶. منحنی دوران - دما برای مقادیر مختلف γ .

Fig. 16. Rotation-temperature curve for different values of γ .

۶۲۱ درجه سانتی‌گراد (بر مبنای نرخ رشد دوران یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد) می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که برای مقادیر γ بزرگ‌تر از ۲۰، نرخ تغییر دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال کمتر است. هر چند نرخ لنگر خمشی در کلیه مدل‌های TJ16- TJ20، ثابت (۳۵ درصد ظرفیت خمشی اتصال) می‌باشد، مقدار لنگر اعمالی در هر یک از این مدل‌ها، به علت متأثر بودن ظرفیت خمشی اتصال از تغییر پارامتر γ ، متفاوت می‌باشد (جدول ۲).

۵-۵- تأثیر پارامتر η (نرخ بارگذاری)

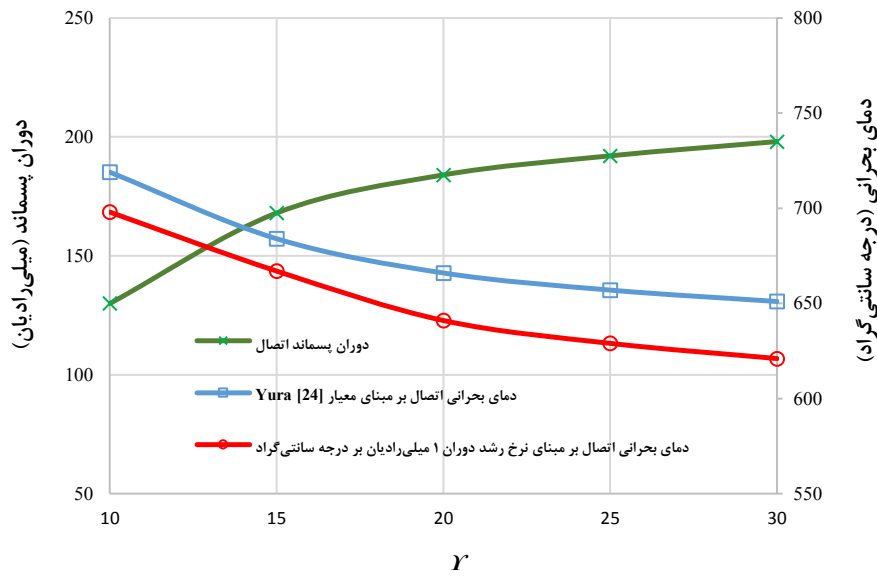
به منظور ارزیابی تأثیر نرخ بارگذاری (η) بر دمای بحرانی اتصال T، پنج مدل TJ21- TJ25 مورد تحلیل قرار گرفتند. نرخ بارگذاری (η) به عنوان نسبت لنگر خمشی خارج از صفحه اعمال شده در انتهای مهار به ظرفیت خمشی خارج از صفحه اتصال تعریف و به ترتیب از ۰/۲ تا ۱ به مدل‌های مذکور اعمال شد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش نرخ بارگذاری، نرخ دوران اتصال افزایش یافته و فروپاشی اتصال تسریع می‌شود. در واقع نرخ بارگذاری بالاتر، باعث ایجاد تنش اولیه بزرگ‌تری در ناحیه اتصال می‌شود که وقوع خرابی خمیری تحت آتش را تسهیل می‌کند. در نتیجه با افزایش نرخ بارگذاری، دمای بحرانی کاهش یافته و زمان تحمل برابر آتش کوتاه‌تر می‌شود. در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که افزایش نرخ بارگذاری (η) از ۰/۲ به ۱، منجر

مشاهده می‌شود که با افزایش β از ۰/۲ به ۱، دوران پسماند اتصال از ۲۳۱ به ۱۰۲ میلی‌رادیان کاهش و همچنین دمای بحرانی اتصال از ۶۲۱ به ۷۶۴ درجه سانتی‌گراد (مطابق معیار یورا و همکاران [۲۹]) و از ۵۸۹ به ۷۳۱ درجه سانتی‌گراد (بر مبنای نرخ رشد دوران یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد) افزایش می‌یابد.

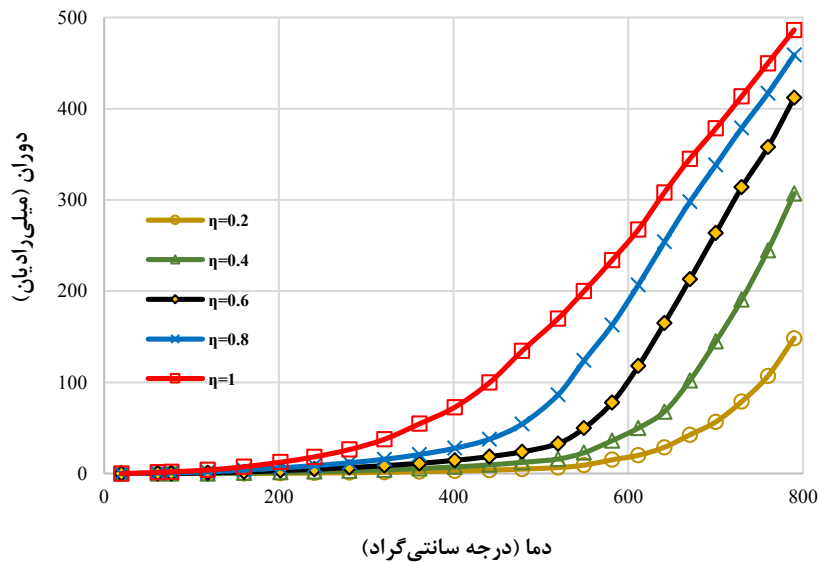
۵-۴- تأثیر پارامتر γ (نسبت قطر به ضخامت پایه)

پنج مدل به نام‌های TJ16-TJ20 برای مطالعه تأثیر پارامتر γ بر دوران، دمای بحرانی و دوران پسماند اتصالات T شکل، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مقادیر γ برای این مدل‌ها به ترتیب ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ انتخاب شد. افزایش γ صرفاً با کاهش ضخامت پایه انجام شد و قطر پایه در کلیه مدل‌های این قسمت ثابت در نظر گرفته شد. با بررسی منحنی دوران - دما (شکل ۱۶) می‌توان نتیجه گرفت، مقاومت در برابر آتش اتصالات T شکل لوله‌ای با کاهش γ (افزایش ضخامت پایه)، بهبود می‌یابد. علاوه بر این، دیواره پایه نازک می‌تواند باعث تسریع خمیری شدن دیواره پایه در محل اتصال در دماهای نسبتاً پایین‌تر شود. شکل ۱۷ نحوه تغییرات دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال را به ازاء مقادیر مختلف γ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، افزایش γ از ۱۰ به ۳۰، موجب افزایش دوران پسماند از ۱۳۰ به ۱۹۸ میلی‌رادیان و نیز کاهش دمای بحرانی اتصال از ۷۱۹ به ۶۵۱ درجه سانتی‌گراد (مطابق معیار یورا و همکاران [۲۹]) و از ۶۹۸ به



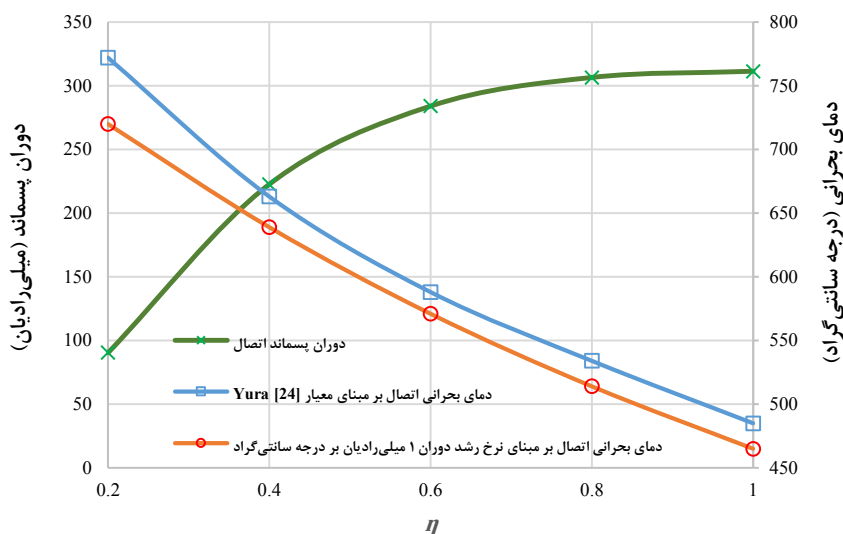
شکل ۱۷. اثر γ بر دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال.

Fig. 17. Effect of γ on residual rotation and critical temperature of the joint.



شکل ۱۸. منحنی دوران - دما برای مقادیر مختلف η .

Fig. 18. Rotation-temperature curve for different values of η .



شکل ۱۹. اثر η بر دوران پسماند و دمای بحرانی اتصال.

Fig. 19. Effect of η on residual rotation and critical temperature of the joint.

گسترش و دوران خمشی خارج از صفحه اتصال به تدریج افزایش می‌یابد. همزمان با توسعه رفتار خمیری در اطراف پنجه جوش در نقاط آستانه، تغییر شکل‌های قابل توجه (به صورت فرورفتگی در آستانه فشاری پایه و بیرون آمدگی در آستانه کششی پایه) رخ می‌دهد. در مرحله آخر و همزمان با رسیدن دما به حد معینی (دمای بحرانی)، دوران خمشی خارج از صفحه اتصال به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و شکست نهایی اتصال اتفاق می‌افتد.

بر اساس مشاهدات صورت گرفته بر روی تغییر شکل نهایی نمونه‌های عددی، مدهای خرابی مدل‌های اتصالات T شکل تحت خمش خارج از صفحه در مطالعه پارامتری حاضر را می‌توان به سه مد کلی زیر دسته‌بندی کرد:

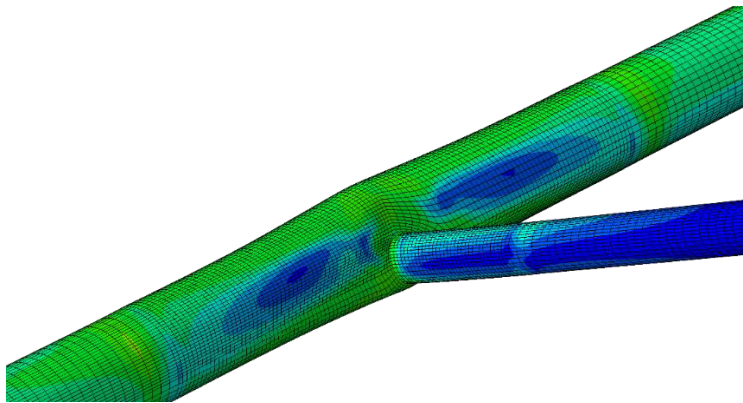
۱- خرابی از نوع خمیری شدن دیواره پایه بر روی یک نوار شبه‌بیضی با فاصله‌ای از فصل مشترک مهار با پایه (شکل ۲۰-الف). پس از خمیری شدن نوار شبه‌بیضی، با افزایش دما، فرورفتگی موضعی دیواره پایه در سمت آستانه تحت فشار و بیرون آمدگی موضعی دیواره پایه در سمت آستانه تحت کشش پایه توسعه خواهند یافت. این مد خرابی، غالب‌ترین نوع خرابی گزارش شده در مطالعات قبلی صورت گرفته بر روی اتصالات لوله‌ای در حرارت بالا است [۱۳، ۹، ۴ و ۳] و مد غالب خرابی در مدل‌های TJ01-TJ05، TJ10 و TJ08، TJ13-TJ15، TJ17، TJ21-TJ22 و TJ22 بوده است.

۲- خرابی خمیری در عضو مهار در محل اتصال آن به پایه (شکل ۲۰-

به افزایش دوران نهایی اتصال از ۱۴۸ به ۴۸۶ میلی‌رادیان شده است. شکل ۱۹ نشان می‌دهد افزایش نرخ بارگذاری تأثیر مشابهی بر دوران پسماند داشته است. با تغییر η از ۰/۲ تا ۱، دوران پسماند اتصال از ۹۰ به ۳۱۱ میلی‌رادیان افزایش یافته است. تأثیر نرخ بارگذاری بر دمای بحرانی اتصال بر عکس تأثیر آن بر دوران پسماند است. با افزایش نرخ بارگذاری (η) از ۰/۲ به ۱، دمای بحرانی اتصال از ۷۷۲ به ۴۸۵ درجه سانتی‌گراد (مطابق معیار یورا و همکاران [۲۹]) و از ۷۲۰ به ۴۶۵ درجه سانتی‌گراد (بر مبنای نرخ رشد دوران یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد) کاهش می‌یابد.

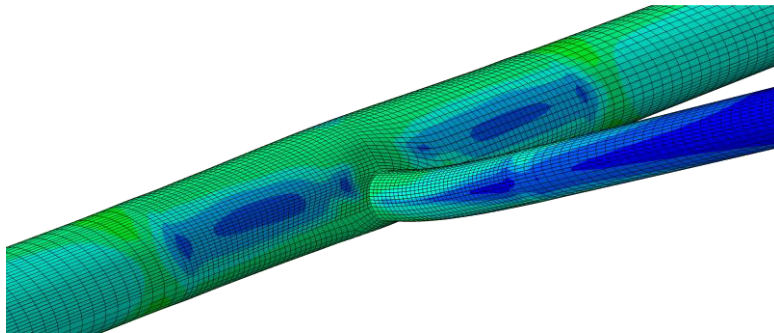
۵-۶- مدهای خرابی تحت بار آتش

با هدف شناخت بهتر رفتار خمش خارج از صفحه اتصالات لوله‌ای فولادی تحت بار آتش، مدهای خرابی ۲۵ اتصال T شکل مدل شده در مطالعه پارامتری استخراج و دسته‌بندی شدند. مد خرابی این اتصالات به شدت متأثر از پارامترهای هندسی و نسبت بار بوده‌اند ولی به طور کلی، فرآیند تغییر شکل اتصال تحت خمش خارج از صفحه و بار آتش شامل ۳ مرحله بوده است. در مرحله اول با افزایش دما و انبساط حرارتی فولاد، تنش‌ها در آستانه اتصال متمرکز می‌شوند. در مرحله دوم، به دلیل کاهش خواص مکانیکی فولاد در دمای بالا، تسلیم مصالح در آستانه رخ داده و به آرامی به سمت تاج



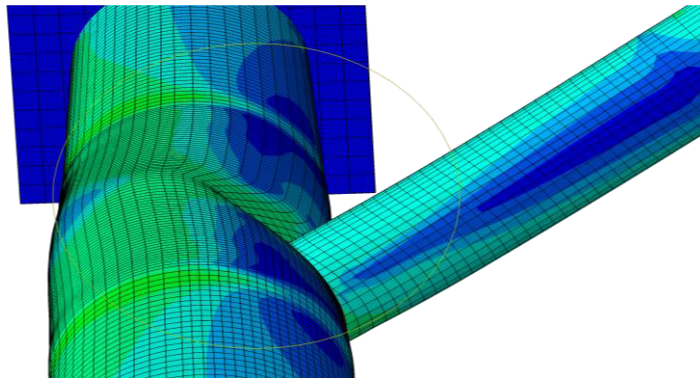
الف) خمیری شدن و فرورفتگی موضعی دیواره پایه

a) Plastification and local indentation of the chord wall.



ب) تشکیل مفصل و خرابی خمیری عضو مهار

b) Hinge formation and plastic failure of the brace.

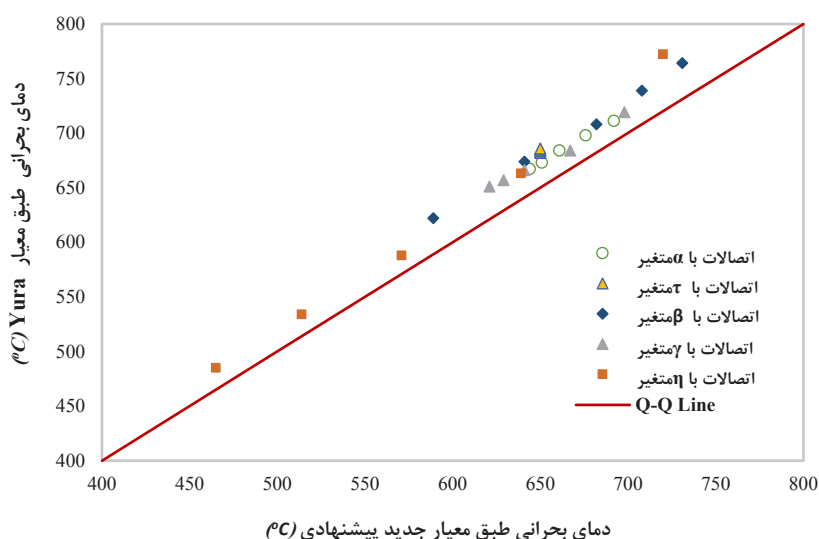


ج) برش منگنه‌ای در دیواره پایه.

c) Punching shear in the chord wall.

شکل ۲۰. مدهای غالب خرابی در مطالعه پارامتری

Fig. 20. Dominant failure modes in the parametric study.



شکل ۲۱. مقایسه معیار یورا و همکاران [۲۹] و معیار پیشنهادی مولفین "نرخ یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد"

Fig. 21. Comparison of Yura et al. [29] criterion with the newly suggested criterion.

۵-۷- مقایسه معیار یورا و همکاران [۲۹] و معیار پیشنهادی مولفین

همان‌گونه که گفته شد تاکنون معیاری برای تعیین دوران و دمای بحرانی خمش داخل یا خارج از صفحه اتصالات لوله‌ای فولادی تحت بار آتش، ارائه نشده است. در مطالعه حاضر از معیار یورا و همکاران [۲۹]، که اساساً برای تعیین دوران بحرانی در خمش داخل و خارج از صفحه اتصالات لوله‌ای فولادی در دمای محیط پیشنهاد شده بود، برای اتصالات در معرض آتش استفاده شده است. دما و زمانی که اتصال به دوران بحرانی می‌رسد به ترتیب به عنوان دمای بحرانی و زمان تحمل برابر آتش تعیین شده‌اند. همچنین مولفین، بر اساس نتایج کار آزمایشگاهی و عددی گزارش شده در این مقاله و کارهای عددی دیگر خود، معیار جدید "نرخ رشد دوران یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد" را برای تعیین دوران و زمان بحرانی اتصالات لوله‌ای فولادی تحت خمش خارج از صفحه و بار آتش پیشنهاد نموده‌اند. شکل ۲۱ مقایسه‌ای را بین دو معیار یاد شده در مدل‌های عددی حاضر در قالب نمودار Q-Q ارائه می‌نماید. مشاهده می‌شود که معیار پیشنهادی جدید، علیرغم سادگی، نزدیکی قابل قبولی با معیار یورا و همکاران [۲۹] نشان می‌دهد. البته زمان بحرانی به دست آمده از معیار پیشنهادی جدید، قدری نسبت به معیار یورا و همکاران، محافظه‌کارانه است که این موضوع، نکته قوت دیگری برای معیار پیشنهادی تلقی می‌شود.

ب). با افزایش دما ابتدا یک مفصل خمیری خمشی در عضو مهار با فاصله نزدیکی از عضو پایه تشکیل می‌شود. در ادامه چین‌خوردگی و فرورفتگی موضعی دیواره مهار در سمت آستانه تحت فشار مهار و کشیدگی دیواره مهار در سمت آستانه تحت کشش مهار و متعاقباً تغییر شکل‌هایی در دیواره پایه بروز می‌کند. مد خرابی شماره ۲ هنگامی اتفاق می‌افتد که ظرفیت خمیری خمشی عضو مهار کمتر از ظرفیت خمشی پایه در مد خرابی ۱ باشد. این مد خرابی در مدل‌هایی که عضو مهار در آن‌ها ضعیف بوده است (β ، γ و τ کوچک) رخ داده و در مدل‌های TJ06-TJ07، TJ11-TJ12 و TJ16 غالب بوده است.

۳- خرابی از نوع برش منگنه‌ای در دیواره پایه (شکل ۲۰-ج). این نوع خرابی هنگامی که ظرفیت خمشی اعضای مهار و پایه بالا بوده ولی پایه جدارنازک باشد (مدل‌های با γ بزرگ و β متوسط) رخ می‌دهد. در این مد خرابی، با افزایش دما، جداره عضو پایه تحت دوران عضو مهاربند به دلیل نازک بودن، دچار خرابی از نوع برشی می‌شود. در مطالعه عددی اخیر، مکانیک آسیب منظور نشده است لذا سوراخ شدگی عضو پایه مدل نمی‌شود و تغییر شکل‌ها به صورت فرورفتگی عمیق عضو مهار در جداره عضو پایه، خود را نشان می‌دهند. این مد، مد غالب خرابی در مدل‌های TJ18-TJ20 بوده است. در برخی مدل‌ها همچون TJ23-TJ25 مد خرابی، ترکیبی از ۳ مد یاد شده بوده است.

۶- نتایج

رفتار اتصالات T شکل لوله‌ای تحت لنگر خمشی خارج صفحه در دماهای بالا، کمتر مورد توجه محققین قبلی قرار گرفته است. یک مطالعه پارامتری به منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و نرخ بارگذاری بر روی پاسخ رفتار اتصال اتصالات T شکل لوله‌ای فولادی تحت خمشی خارج از صفحه در شرایط آتش‌سوزی انجام شد. مطالعه صورت گرفته با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و به روش تحلیل تنش - حرارت درگیر متوالی غیرمستقیم انجام شد. مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به شرح ذیل است:

۱- کاهش پارامتر هندسی $(\alpha = \frac{2L}{D})$ ، باعث کاهش دوران نهایی خارج از صفحه اتصال در حین آتش‌سوزی و دوران پسماند (پس از سرد شدن اتصال) شد. پارامتر هندسی $(\tau = \frac{t}{T})$ تأثیر چندانی بر روی دوران نهایی خارج از صفحه اتصال در حین آتش‌سوزی و دوران پسماند نداشت.

۲- پارامترهای هندسی $(\beta = \frac{d}{D})$ و $(\gamma = \frac{D}{2T})$ تأثیر مهم‌تری، نسبت به سایر پارامترهای هندسی بر روی پاسخ رفتار اتصال در آتش‌سوزی داشتند. افزایش نسبت قطر مهار به پایه (β) و کاهش نسبت قطر به ضخامت پایه (γ) ، باعث کاهش دوران نهایی اتصال در حین آتش‌سوزی، افزایش دمای بحرانی و کاهش دوران پسماند اتصال شد. افزایش نسبت قطر مهار به پایه از ۰/۲ به ۱، باعث کاهش ۵۶ درصدی دوران پسماند اتصال و افزایش ۲۳ درصدی دمای بحرانی اتصال گردید. افزایش γ از ۱۰ به ۳۰، موجب افزایش ۵۲ درصدی دوران پسماند و نیز کاهش ۹ درصدی دمای بحرانی اتصال گردید.

۳- افزایش نرخ بار اعمالی به مهار (η) باعث افزایش قابل توجه دوران نهایی اتصال در حین آتش‌سوزی و کاهش دمای بحرانی اتصال شد، به طوری که با افزایش نرخ بار از ۰/۲ به ۱، دوران پسماند ۲۴۵ درصد افزایش و دمای بحرانی نیز ۳۷ درصد کاهش یافت.

۴- سه مد خرابی غالب "خمیری شدن دیواره پایه"، "خرابی خمیری عضو مهار" و "برش منگنه‌ای در دیواره پایه" برای خمش خارج از صفحه اتصال T شکل تحت بار آتش، شناسایی شد.

۵- مولفین معیار جدید "نرخ رشد دوران یک میلی‌رادیان بر درجه سانتی‌گراد" را برای تعیین دوران و زمان بحرانی اتصالات لوله‌ای فولادی تحت خمش خارج از صفحه و بار آتش پیشنهاد نموده‌اند که علیرغم سادگی نزدیکی قابل قبولی با معیار یورا و همکاران [۲۹] نشان داد.

۶- پیشنهاد می‌گردد اثرات رفتار پس از آتش‌سوزی شامل تعیین مقاومت پسماند و خستگی اتصال در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد. بررسی اثر

تغییر نوع فولاد مصرفی و بار محوری اعمالی به عضو پایه نیز از موضوعات پیشنهادی جهت پژوهش‌های آتی محققین می‌باشد.

تشکر و قدردانی

مولفین مقاله لازم می‌دانند از آقای چنگیزی، مدیر عامل شرکت الکترونیک تنش آسیا برای ساخت کوره حرارتی و تهیه تجهیزات آزمایش در دمای بالا، آقایان دکتر قدیری و مهدیانی معاون پیشگیری و حفاظت از حریق و مدیر منطقه سه عملیات سازمان آتش‌نشانی و خدمات ایمنی شهرداری تهران بابت در اختیار گذاشتن دوربین حرارتی و آقای دکتر احمدیار بابت حمایت‌هایشان تشکر نمایند.

۷- فهرست علائم

مقاطع فولادی سرد نورد شده	CFS
مقاطع دایره‌ای توخالی	CHS
قطر خارجی پایه	D
قطر خارجی مهار	d
خمش داخل صفحه	IPB
طول پایه	L
طول مهار	l
خمش خارج از صفحه	OPB
ضخامت دیواره پایه	T
ضخامت دیواره مهار	t
زمان	t
دمای داخل کوره	T
دمای بحرانی	Tc
نسبت طول به قطر پایه $(2L/D)$	α
نسبت قطر مهار به پایه (d/D)	β
نسبت قطر به ضخامت پایه $(D/2T)$	γ
نرخ خمش خارج از صفحه اعمالی به انتهای مهار	η
نسبت ضخامت مهار به پایه (t/T)	τ

منابع

- [1] Z.J. Jin M, Chang J, Liu ML, Mechanical behavior of tubular T-joint after fire, Journal of Shanghai Jiaotong University 67 (2011) 75-78.

- tubular T-joints at elevated temperature by considering effect of chord compressive stress. , *Thin-Walled Struct* 98 (2016) 533-546.
- [13] H.Y. Lan X., Chan T.M. and Young, B. , Static strength of stainless steel K-and N-joints at elevated temperatures., *Thin-Walled Structures* 122 (2018) 501-509.
- [14] A. Azari-Dodaran N., H., Structural behavior of right-angle two-planar tubular TT-joints subjected to axial loadings at fire-induced elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, 108 (2019) 102849.
- [15] Saberi, V., saberi, H., Panahkhah, S., Sadeghi, A., Noroozinejad Farsangi, E. Investigation of the Effect of Fire Loading on the Behavior of Connections with Beam-to-Column Bolted End Plate and T-Connection. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2021. doi: 10.22065/jsce.2021.303562.2563.
- [16] ABAQUS user's manual [Computer software], in, Hibbit. Karlsson & Sorensen Inc, 2017.
- [17] Esmaeili niari, S., Ghandi, E., samiee, P. Investigation of Buckling Behaviour of Cold- Formed Steel Columns with Built-up Sections Subjected to Fire. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2021: 8(7). doi:10.22065/jsce.2020.232335.2146.
- [18] Yahyai, M., Rezaeian, A. Performance of Link-To-Stub Bolted Connection in Column-Tree Moment Resisting Frames under Fire Conditions. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2015: 2(3), 23-33.
- [19] ISO 834, in: *Fire-Resistance Tests-Elements of Building Construction: Part 1: General Requirements*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- [20] Saberi, H., Saberi, V., Khodamoradi, N. et al. Effect of detailing on performance of steel T-connection under fire loading. *J Build Rehabil*, 2022: 7(1). doi:10.1007/s41024-021-00147-w.
- [21] Z.M., Ahmadpour F, Mo'tamedi M, Rashnooie R. , Experimental study of fire effects on out-of-plane bending strength/ flexibility of steel tubular T-joints, *Structures*, 34 (2021) 2174-2188.
- [2] Z.J. Jin M, Chang J, Zhang D, Experimental and parametric study on the post fire behavior of tubular T-joint, *Journal of Constructional Steel Research*, 70 (2012) 93-100.
- [3] S.Y. He SB, Zhang HY, Yang DP, Long FL, Experimental study on circular hollow section (CHS) tubular K-joints at elevated temperature, *Eng Fail Anal* 34 (2013) 204-216.
- [4] S. He, Shao, Y., Zhang, H. and Wang, Q., Parametric study on performance of circular tubular K-joints at elevated temperature, *Fire Safety Journal*, 71 (2015) 174-186.
- [5] S.Y.Z. He S.B., H., Evaluation on fire resistance of tubular K-joints based on critical temperature method, *Journal of Constructional Steel Research*, 115 (2015) 398-406.
- [6] E.a.W. Ozyurt, Y.C., A numerical investigation of static resistance of welded planar steel tubular joints under in-plane and out-of-plane bending at elevated temperatures, *Engineering Structures*, 199 (2019) 109622.
- [7] T.K. Fung TC, Nguyen MP, Structural behaviour of CHS T-joints subjected to static in-plane bending in fire condition, *J Struct Eng* 142 (3) (2015) 04015155.
- [8] H.M. Darmian, R. Rahgozar, M. Mohammadizadeh, A.S. Daryan, K. Narmashiri. The effect of the behaviour of perforated short steel compression members and evaluation after retrofitting, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2021. doi:10.22060/ceej.2021.19938.7289, (in persian).
- [9] Q.W. Shenggang Fan, Runmin Ding, Lianlian Jia, Hang Zhou, Experimental and numerical research on fire resistance of stainless steel tubular X-joints, *J Constr Steel Res* 182 (2021) 106654.
- [10] H.A. Neda Azari-Dodaran, Lei Zhu & Peiyang Li. , Experimental and numerical study of the ultimate load for collar-plate-reinforced tubular K-joints at fire-induced elevated temperatures, *Ships and Offshore Structures*, (2021) 1897221.
- [11] S.Y. Cheng C, Jie Y, Experimental and numerical study on fire resistance of circular tubular T-joints. , 85 (2013) 24-39.
- [12] Z.Y. Shao YB, Zhao HC, Yang DP., Performance of

- beam-to-tubular column connection subjected to post-fire conditions, *Int J Steel Struct* 14 (3) (2014) 513-528.
- [28] P.J. Wang M, Chang PC, Quintiere JG., Scale modeling of compartment fires for structural fire testing. , *J Fire Prot Eng*, 18 (2008) 228-240.
- [29] Z.N. Yura JA, Edwards IF, Ultimate capacity equations for tubular joints, in: *Offshore Technology Conference*, Texas, 1980.
- [30] G.X. Gao F, Zhu HP, Ye Y. , Fire-resistance behavior of completely overlapped tubular joints under lap brace axial loading, *J Struct Eng* 144 (9) (2018) 04018137.
- [31] Eurocode 3 (EC3), in: *Design of steel structures - Part 1-2: General rules -Structural fire design*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
- [32] Z.H. Gao F, Liu XN., Failure behavior of axially loaded tubular Y-joints under fire, *Adv Struct Eng* 16 (9) (2013) 1523-1533.
- [22] ASTM A370, in: *American Society for Testing and Materials, standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.*, West Conshohocken: ASTM, 2014.
- [23] API, in: *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms. RP 2A*, API Publishing Services. Washington, DC, 2007.
- [24] AWS, in: *Structural welding code-steel*, American Welding Society. AWS D1.1; 2000.
- [25] H.S.A. Zeinoddini M., Fire response of externally stiffened steel I-beam-to-CHS welded connections: A numerical modelling, *Journal of Constructional Steel Research* 89 (2013) 42-51.
- [26] Z.M. Hosseini SA., Model fire tests on a beam to leg connection in an offshore platform topside, *Fire Mater J* 38 (2014) 529-549.
- [27] Z.M. Hosseini SA., Darian A.S., Modelling of I-shaped

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Ahmadpour, M. Zeinoddini, M. Mo'tamedi, R. Rashnooie, S.A. Hosseini, A parametric study on OPB fire response of steel CHS T-joints, Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 3675-3698.

DOI: 10.22060/ceej.2022.19984.7307

