# بررسی تغییرات سختی خمشی اتصالات عرشه سکوهای نفتی در آتش‌سوزی

مصطفی زین الدینی[۱]، سید احمد حسینی[۲]، محمد رضا بهاری[۳]

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۵/۰۹ ،تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۴/۰۹)

## چکیده

اتصالات تیر–ستون تاثیر قابل توجهی بر رفتار سازه‌ها در دمای معمولی و در دماهای بالا دارند. وقتی سازه‌های فولادی در معرض آتش قرار می‌گیرند قابلیت تحمل آنها به شدت کاهش پیدا می‌کند و عملکرد اتصال در این مورد اهمیت خاص می‌یابد. بررسی‌های صورت گرفته بر روی آتش‌سوزی‌های واقعی و همچنین آزمایش‌هایی که صورت گرفته‌اند، مشخص می‌کنند که اتصالات بر زمان دوام اعضای سازه‌ای در آتش نیز تاثیر قابل توجهی دارند. ولی با این وجود به دلیل هزینه بالایی که آزمایش‌های در دمای بالا دارند در مورد طیف گسترده‌ای از اتصالات، اطلاعات آزمایشگاهی کافی موجود نیست. از جمله اتصالاتی که کمتر مورد توجه قرار گرفته اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای در عرشه سکوهای نفتی می‌باشد. به دلیل احتمال بالای خطر اتش‌سوزی در سکوهای نفتی، بررسی و رفتارسنجی این اتصالات در حرارت‌های بالا و تاثیر حرارت روی سختی اتصالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با توجه به این مهم در این تحقیق، تعدادی آزمایش در دمای بالا بر روی این نوع اتصالات انجام شده است. تغییرات سختی خمشی اتصال در نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل در قالب نمودارهای دما– سختی ارایه شده‌اند.

## کلمات کلیدی

اتصالات تیر به ستون لوله‌ای، سکوهای نفتی، رفتار در دمای بالا، آتش، مطالعه آزمایشگاهی، سختی

# Study of Stiffness Variation of Oil Platform Decks Connections in Fire

**M. Zeinoddini, S. A. Hosseini, M. R. Bahaari**

**ABSTRACT**

Beam-to-column connections have been found to be of great significance in influencing structural behavior at ambient and elevated temperatures. When steel-framed structures are subjected to fire, the load bearing capacity is decreased and the behavior of the joints is of particular concern. Observations from full-scale fire tests and damaged structures confirm that connections have a considerable effect on the stability time of structural components in fire. Due to the high cost of elevated temperature tests, adequate experimental data about a broad range of connections is not available. One type of such connections is the connections between I-shape beam and pipe shape columns in oil platform decks. Considering the high probability of fire in oil platforms, study of the behavior of these connections at elevated temperatures is of great importance. In the current study, a number of experimental tests have been conducted on this connection type to investigate their flexural bahaviour and in particular the bending stiffness of the connection in fire. Effects of the temperature rise on the rotational response of the specimens are studied and the results are presented as temperature-stiffness curves.

**KEYWORDS**

Beam-to-pipe column connection, Oil platforms, Elevated-temperature behavior, Rotation-stiffness curve, Fire, Experimental study, Stiffness

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، Zeinoddini@kntu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، hosseini@dena.kntu.ac.ir (نویسنده مسئول)

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه تهران، bahaari@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

قاب‌های فولادی از تیر و ستون‌هایی تشکیل شده‌اند که توسط اتصالات به هم متصل می‌شوند. عملکرد قاب از رفتار اتصالات تاثیر می‌پذیرد که در تحلیل کلی سازه باید در نظر گرفته شود. برای ساده‌سازی در طراحی و تحلیل قاب‌های فولادی و مرکب، فرض می‌شود که اتصالات تیر-ستون یا کاملاً مفصلی و یا کاملاً گیردار هستند [۱]. فرض کردن اتصالات به صورت مفصلی و یا گیردار طراحی و تحلیل را به طور قابل ملاحظه‌ای ساده می‌کند ولی در عمل رفتار واقعی اتصال در طیف گسترده‌ای بین این دو حد است. اکثر اتصالاتی که مفصلی در نظر گرفته شده‌اند دارای مقداری سختی دورانی هستند و اتصالاتی که صلب در نظر گرفته شده‌اند نیز مقداری انعطاف‌پذیری نشان می‌دهند. طراحان می‌توانند در تحلیل از رفتار دقیق‌تر اتصالات استفاده کنند ولی اکثر طراحان از این کار احتراز دارند؛ زیرا روش‌های ساده‌سازی شده باعث صرفه جویی در وقت و هزینه‌ها می‌شوند و در ضمن نتایج حاصل به اندازه کافی قابل اعتماد هستند. اگر چه این روش‌های ساده‌سازی شده برای طراحی در دمای معمولی کفایت می‌کنند ولی وقتی سازه‌های فولادی در معرض آتش قرار می‌گیرند رفتار اتصالات تاثیر بیشتری بر پاسخ کلی سازه می‌گذارند و در صورتی که رفتار اتصال به درستی بررسی نشود نتایج حاصل از اعتبار کافی برخوردار نخواهند بود.

با توجه به اهمیت رفتار اتصالات در سازه‌های فولادی در حین آتش‌سوزی تحقیقات متعددی به صورت آزمایشگاهی و عددی بر روی رفتار اتصالات فولادی انجام شده است [۲-٦]. با این وجود، روی رفتار اتصالات سکوهای نفتی در برابر آتش‌سوزی مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است.

Evertt و Nehring در سال ۱۹۷٦، روشی را برای مقابله با حریق‌های ایجاد شده در سکوهای عظیم مناطق دورافتاده دریای شمال، ارائه دادند. در این تحقیق، که نتایج تجربه چندین ساله کمیته بهره‌برداران از سازه‌های فراساحلی انگلستان می‌باشد، بعد از ارائه پارامترهای طراحی، پیشنهادهایی برای جایابی کشتی‌های اطفای حریق و حالات اجرایی برای مناطق با تمرکز فعالیت بیشتر در دریای شمال، داده شده است [۷].

Eberg و همکارانش در سال ۱۹۹۲، به توسعه روشی برای تحلیل خرابی سکوهای دریایی قرار گرفته در معرض آتش پرداختند. در این روش که توافق خوبی با نتایج آزمایش‌های انجام شده روی تیر-ستون‌ها و قاب‌ها و همچنین با پیش بینی‌های عددی در سازه‌های واقع بر خشکی دارد، نشان داده شده است که ارائه مدل ساده شده‌ای از نیمرخ دمایی مقطع قابل پذیرش می‌باشد و دما در خرابی نهایی، بطور عمده بزرگتر از دما در خرابی اولین عضو می‌باشد [۸].

در سال ۱۹۹۸، Shetty و همکارانش، یک روش احتمالاتی برای بررسی ایمنی در برابر آتش و طراحی بهینه سیستم حفاظت در برابر آتش برای عرشه سازه‌های دریایی ارائه دادند. تحلیل قابلیت اعتماد، هم برای خواص مکانیکی و حرارتی فولاد، عایق کاری سازه‌های روکش دار و سازه‌های قابی عرشه، که جز عدم قطعیت‌ها در بارگذاری آتش و انفجار می‌باشند، ارائه شده است. بهینه‌سازی سیستم حفاظت در برابر آتش به نحوی انجام شده است که مجموع هزینه‌های مورد انتظار سیستم‌های حفاظتی حداقل شده باشد [۹].

اهمیت طراحی دقیق اتصالات در طراحی سازه‌ها با افزایش سطح اهمیت سازه مورد نظر افزایش مضاعف می‌یابد. بدان معنا که در سازه‌هایی که کاربردهای خاص و با اهمیت ویژه دارند طراحی دقیق و واقع گرایانه با کمترین فرضیات ساده‌کننده لازم و ضروری است. لذا با توجه به این مساله طراحی دقیق اتصالات در سازه‌هایی مانند سکوهای نفتی که از نظر سیاسی، اقتصادی و استراتژیک از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند و علاوه بر این احتمال بروز آتش‌سوزی نیز در آنها بسیار بالاست، بسیار مهم و ضروری است.

با توجه به موارد ذکر شده هدف اصلی در این تحقیق بررسی رفتار اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای در عرشه سکوهای نفتی در آتش‌سوزی و تاثیرات حرارت بر سختی اتصال می‌باشد. در شکل (۱) نمایی از عرشه یک

سکوی نفتی نشان داده شده است. اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای در این نما به خوبی مشاهده می‌شود.

**شکل (۱): نمایی از کاربرد وسیع اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای در عرشه سکوهای نفتی**

## ۲- سکوهای فراساحل نفتی

نفت یکی از مهمترین منابع تامین انرژی در سطح جهان می‌باشد و افزایش و یا کاهش استخراج نفت در کشورهای نفت خیز تاثیرات اقتصادی و سیاسی متعددی را در سطح بین المللی ایجاد می‌کند. این مساله موجب شده که استخراج نفت از میادین نفتی یکی از مسائل مهم کشورهای نفت خیز باشد. با توجه به وجود میادین نفتی متعدد در اعماق دریاها، ساخت و استفاده از سکوهای نفتی همواره مورد توجه بوده است.

با توجه به کاربرد فراوان سکوهای نفتی فلزی و وجود منابع سوختی دائمی در آنها، خطر آتش‌سوزی یکی از مهمترین خطراتی است که سکوهای فلزی نفتی را تهدید می‌نماید. علاوه بر آتش‌سوزی‌هایی که بر اساس بروز حوادث در حین کار در این سازه‌ها بروز می‌نماید، به دلیل اهمیت بالای این سازه‌ها از نظر استراتژیک و نظامی در حین بروز جنگ‌ها نیز سکوهای نفتی جزو مهمترین اهداف نظامی می‌باشند که در بسیاری موارد، مورد هدف تسلیحات نظامی قرار گرفته و علاوه بر بروز انفجار، دچار آتش‌سوزی نیز می‌شوند. انفجار و آتش‌سوزی سکوهای نفتی در جنگ بین ایران و عراق از جمله شواهد این مساله می‌باشد [۱۰]. آمار ارائه شده در مجموعه "World wide offshore accident data bank" نیز نشان می‌دهد که هر ساله وقوع آتش‌سوزی یکی از عواملی است که بیشترین خرابی را در سکوهای فلزی نفتی ایجاد می‌کند [۱۱].

## ۳- تئوری تحقیق

همانطور که گفته شد هدف اصلی در این تحقیق تعیین خصوصیات رفتاری اصلی اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای در حرارت بالاست. از جمله مهمترین خصوصیات یک اتصال که در طراحی آن از اهمیت بالایی برخوردار است میزان دوران اتصال و همچنین میزان سختی اتصال می‌باشد. اطلاع از این مقادیر و نحوه تغییرات آنها تحت حرارت به منظور یک طراحی ایمن در برابر آتش لازم می‌باشد. در این تحقیق این دو پارامتر به صورت زیر مورد محاسبه قرار گرفته‌اند:

$$K_{\varphi} = M_b / \varphi \qquad (۱)$$

که در این رابطه $M_b$ لنگر سطح مشترک تیر-ستون، و $\varphi$ چرخش اتصال و $K_{\varphi}$ سختی خمشی اتصال می‌باشد.

در آزمایش‌هایی که گزارش خواهند شد، برای اندازه گیری چرخش اتصال، از شیب سنج و تغییر مکان سنج (LVDT) استفاده شده است. تغییر مکان‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری خیز عمودی در نقاط مختلف تیر بکار برده شده‌اند. با این وجود می‌توان از آنها به طرز غیر مستقیم برای اندازه‌گیری دوران اتصال استفاده کرد. دوران اتصال $\varphi$ را براساس مقدار قرائت شده از تغییر مکان‌سنج‌ها می‌توان از معادله‌ی زیر بدست آورد:

$$\varphi = \tan^{-1}(u / L) \qquad (۲)$$

که در معادله بالا $u$ خیز نقطه مورد نظر از تیر و $L$ فاصله بین مرکز اتصال و نقطه اندازه‌گیری خیز بر روی تیر است.

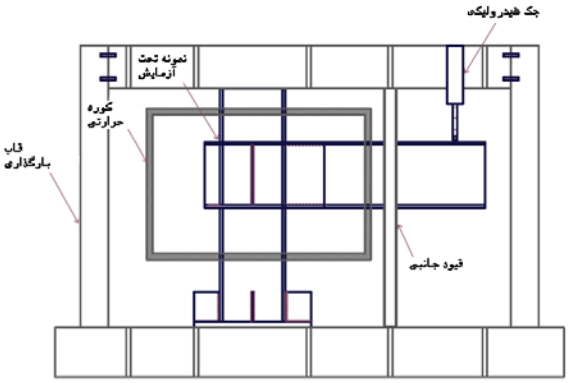
در آزمایش‌ها، بین اعداد ثبت شده توسط شیب سنج‌ها و مقادیر محاسبه شده از تغییر مکان‌سنج‌ها، اختلاف ناچیزی وجود داشت. با توجه به این موضوع دوران‌های محاسبه

شده براساس تغییر مکان‌سنج‌ها در مواقعی که شیب‌سنج‌ها در برخی آزمایش‌ها دچار مشکل شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

## ٤- مطالعات تجربی

### ٤-١- تنظیمات و ابزار آزمایش

آزمایش‌ها در داخل یک کوره گازی که به منظور انجام مطالعه تجربی اتصال در آتش طراحی شده بود انجام گردید. شکل (٢) تنظیمات آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.




**شکل (٢): چیدمان آزمایش**

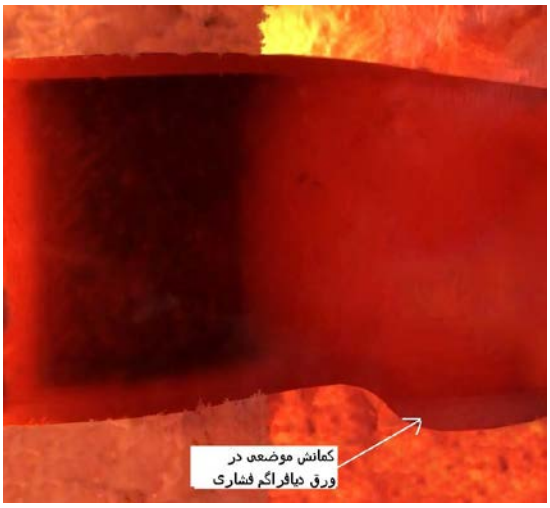
از آنجایی‌که در این تحقیق هدف بررسی رفتار اتصالات تحت شرایط کوره استاندارد بوده است لذا دمای کوره متناسب با منحنی‌های ISO834,ASTME119 [١٢ و ١٣] افزایش یافته است.

ابزار آزمایش شامل شیب سنج برای اندازه‌گیری دوران، تغییر مکان‌سنج‌ها و سلول‌های اندازه‌گیری بار و ترموکوپل بوده است. هم ابزارهای آنالوگ و هم ابزارهای دیجیتال توسط یک سیستم جمع‌آوری داده مدل TDS-303 ساخت کمپانی TML ژاپن ثبت شده‌اند. توضیح کامل در مورد ابزارهای استفاده شده در آزمایش‌ها، قبلاً منتشر شده است [١٤].

فرآیند آزمایش شامل سه مرحله است. در ابتدا نمونه‌ها در دمای معمولی تا رسیدن به تراز خمش از پیش تعیین شده بارگذاری شده‌اند. سپس کوره روشن شده در حالیکه بار اعمال شده بر روی نمونه‌ها ثابت نگه داشته شده است و دمای کوره بر اساس منحنی‌های ISO834 افزایش می‌یابد. وقتی که گسیختگی در اتصال رخ داد، کوره خاموش می‌شود. هم‌چنین لازم به توضیح است که در طول هر آزمایش در دماهای مختلف عکسبرداری انجام شده است.

تیر و ستون نمونه‌ها که در داخل کوره قرار گرفته است با روکش فیبرسرامیک به ضخامت ٢/٥ cmپوشانده شده‌اند. تنها ناحیه اتصال در معرض آتش قرار داده شده است.

در شکل (٣) نمایی از یکی از نمونه‌ها در داخل کوره در حین آزمایش نشان داده شده است. در این تصویر فیبرهای سرامیکی در بالا و پایین محدوده چشمه اتصال روی ستون به خوبی مشاهده می‌شوند. همانطور که ذکر شد با استفاده از این فیبرهای سرامیکی سعی شده تا صرفاً محل چشمه اتصال حرارت داده شود و سایر نقاط مستقیماً گرم نشوند.




**شکل (٣): نمایی از یکی از نمونه‌ها در حین حرارت دهی**

### ٤-٢- جزییات نمونه‌ها

تمام موارد نمونه‌های آزمایشگاهی، شامل یک ستون استوانه فولادی تکی به ارتفاع ٨٠ سانتیمتر به قطر ٢١٩/١ mm و ضخامت ١٢/٧ mm و یک تیر فولادی IPE220 به طول ٧٥ cm بودند. این نمونه‌ها، یک اتصال با مقیاس حدودا ٠/١٥ را از یکی از سکوهای موجود در پارس جنوبی را نمایندگی می‌کنند. بار نیز به صورت متمرکز در فاصله ٩٠ سانتیمتری از محور ستون وارد می‌شده است. جزییات دقیق اتصال تیر I شکل به ستون

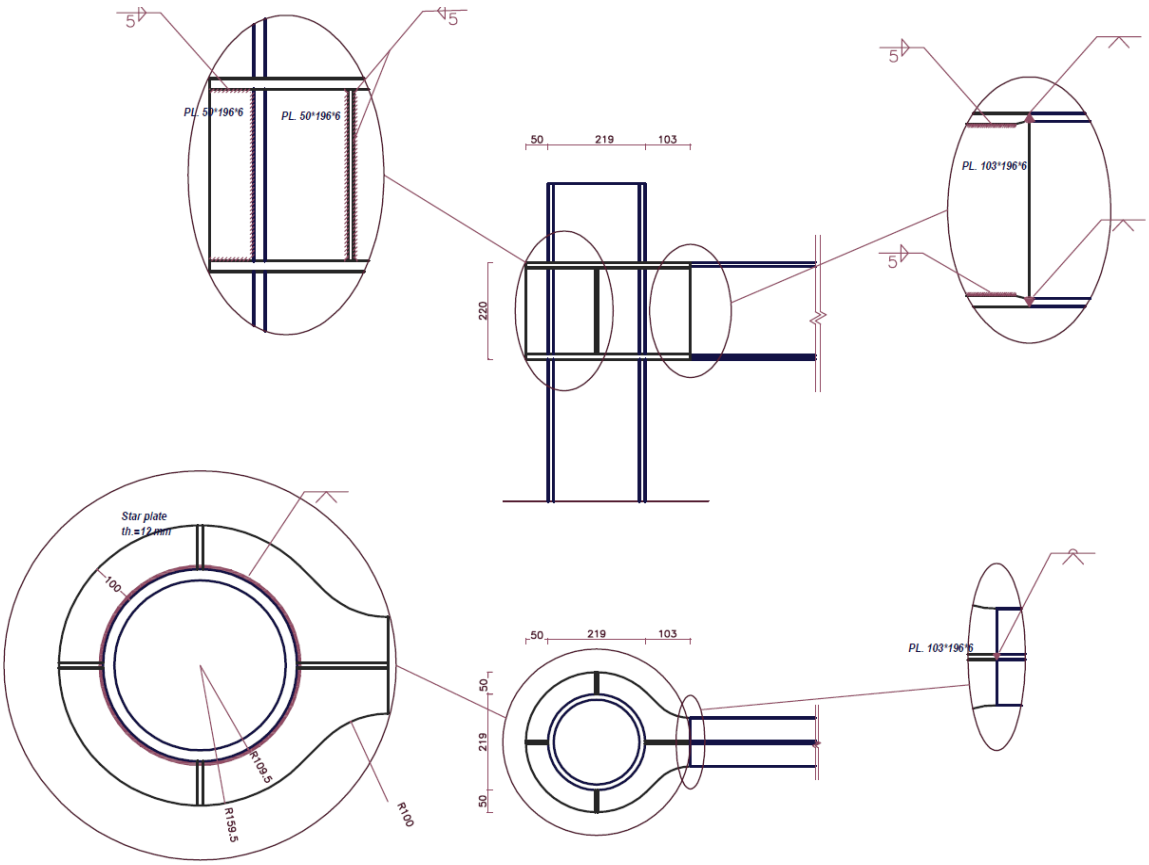
لوله‌ای در نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (٤) ارائـه شـده است.

به منظور جلوگیری از پیچش احتمـالی تیـر در طـی انجـام آزمایش، در طول تیر مهارهای جانبی تعبیه شده بـود؛ ایـن مهارها با توجه به حداکثر ظرفیت پیچشی تیر طراحی شده بودند. در شکل (۲) نوع مهارهای اسـتفاده شـده و جهـت قرار گیری آنها نشان داده شده است.

در مجموع ۹ آزمایش بر روی اتصالات فـوق انجـام شـده است. در جدول (۱) مشخصات اتصال در هر آزمایش ارائه شـده اسـت. بـا توجـه بـه حساسـیت و اهمیـت بـالای آزمایش‌هـای حرارتـی، نمونـه HS1 دو بـار آزمـایش شـد (جدول (٤) را ببینید) تا صـحت و دقـت نتـایج حاصـل از آزمایش‌هـا کـاملاً روشـن شـود. نتـایج حاصـل از دو بـار آزمایش انجام شده بر این نمونه با تقریب بسیار کم مشـابه هم بود.

**جدول (۱): مشخصات اتصالات به کار رفته در هر آزمایش**

| شماره آزمایش | ضخامت ورق جان (mm) | ضخامت ورق دیافراگم (mm) |
|---|---|---|
| ۱ | ٦ | ۱۲ |
| ۲ | ٦ | ۱۲ |
| ۳ | ٦ | ۱۲ |
| ٤ | ٦ | ۱۲ |
| ٥ | ٦ | ۱٥ |
| ٦ | ٦ | ۱۲ |
| ۷ | ۸ | ۱۲ |
| ۸ | ٦ | ۱۲ |
| ۹ | ٦ | ۱۲ |




**شکل (٤): جزییات نمونه‌های آزمایش**

### ٤-٣- بارگذاری نمونه‌ها

با توجه به اینکه نیروی وارده بر اتصالات در این آزمایش‌ها ترکیبی از لنگر ناشی از بار وارده توسط جک‌ها و نیروهای حرارتی ناشی از افزایش درجه حرارت می‌باشد در نتیجه مسلماً هرچه لنگر وارده بیشتر باشد اتصالات در درجه حرارت پایین تری گسیخته می‌شوند.

با توجه به این موضوع و از انجا که هدف از این تحقیق بررسی رفتار اتصالات در حرارت‌های بالا می‌باشد سعی شده تا لنگر وارده به نحوی انتخاب شود که گسیختگی زودهنگام در اتصالات رخ نداده و اتصال توانایی تحمل درجه حرارت بالاتری را داشته باشد تا بدین وسیله امکان بررسی رفتار اتصال در حرارت‌های بالا میسر شود. لذا ابتدا میزان ظرفیت خمشی هر اتصال به صورت نظری و با استفاده از روابط ارائه شده در مرجع [١٦]، محاسبه شد و سپس لنگر وارده به صورت ضریبی از این ظرفیت خمشی به هر نمونه اعمال شد. نحوه بارگذاری نمونه‌ها و ظرفیت خمشی اتصالات در جدول (٢) ارایه شده است.

**جدول (٢): تراز بار وارده بر اتصالات آزمایش شده**

| شماره نمونه | درصد لنگر خمشی | مقدار اسمی لنگر خمشی (kN.m) | مقدار لنگر خمشی ثبت شده در حین آزمایش (kN.m) |
|---|---|---|---|
| **HS1** | ٠/٤ Mcc | ٤٤/٨ | ٤٤/٧٨ |
| **HS2** | ٠/٤ Mcc | ٤٤/٨ | ٤٤/٨٥ |
| **HS3** | ٠/٤ Mcc | ٣٣/٦ | ٣٣/٦٥ |
| **HS4** | ٠/٤ Mcc | ٢٢/٤ | ٢٢/٤٢ |
| **HS5** | ٠/٤ Mcc | ١١/٢ | ١١/٢٨ |
| **HS6** | ٠/٤ Mcc | ٣٣/٦ | ٣٣/٦٦ |
| **HS7** | ٠/٤ Mcc | ٣٣/٦ | ٣٣/٦٤ |
| **HS8** | ٠/٤ Mcc | ٣٣/٦ | ٣٣/٥٥ |
| **HS9** | ٠/٤ Mcc | ٣٣/٦ | ٣٣/٥٥ |
| **HS1** | ٠/٤ Mcc | ٤٤/٨ | ٤٤/٧٨ |
| **HS2** | ٠/٤ Mcc | ٤٤/٨ | ٤٤/٨٥ |
| **HS3** | ٠/٤ Mcc | ٣٣/٦ | ٣٣/٦٥ |

Mcc: ظرفیت خمشی خمیری اتصال می‌باشد.

### ٤-٤- نحوه جوشکاری اتصالات و خصوصیات مصالح

ناحیه جوش از جمله مهمترین بخش‌های یک اتصال جوشی می‌باشند. استفاده از الکترود مناسب، سیستم جوشکاری مناسب و نحوه صحیح جوشکاری در اتصالات به کار رفته در سکوهای دریایی، که سازه‌هایی با اهمیت بالا تلقی می‌شوند از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. مطابق دستورالعمل جوشکاری تایید شده برای این اتصال، برای ساخت کلیه نمونه‌ها از جوشکاری به روش SMAW (shield metal arc welding) استفاده شده است. جزئیات دستورالمل فرآیند جوشکاری در مرجع [١٤] آورده شده است. ابزار جوشکاری از نوع ®Dialarc بوده که توسط شرکت Miller Weld ساخته شده است. الکترود مورد استفاده برای این آزمایش‌ها، الکترود E7018 بود که در فرایند جوش کاری به روش SMAW استفاده می‌شود و نسبت به الکترودهای معمول رفتار شکل‌پذیرتری را ارایه می‌دهد.

مطابق دستورالعمل جوشکاری تایید شده برای این اتصال، از دو نوع جوش گوشه و شیاری با نفوذ کامل در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. محل جوش کاری‌ها در شکل (٤) مشخص شده است.

با توجه به اهمیت عملکرد جوش‌ها در رفتار اتصالات، جوش‌ها به طور کامل بر اساس مشخصات ارائه شده در دستورالعمل جوشکاری مربوطه و توسط جوشکارهای حرفه‌ای انجام شده‌اند. در نهایت بعد از اتمام ساخت نمونه‌ها به منظور اطمینان از صحت جوشکاری‌های انجام شده، بازرسی و کنترل کامل جوش‌ها نیز به کمک تست غیرمخرب (با استفاده از اولتراسونیک) بر روی جوشکاری نمونه‌ها انجام شده است. لازم به ذکر است که ساخت اتصالات در کارگاه شرکت مهندسی و ساخت تاسیسات دریایی ایران انجام شد و کنترل کیفی هم، توسط آن شرکت انجام یافت.

علاوه بر آن، برای تمامی نمونه‌ها خصوصیات مصالح در دمای معمولی با استفاده از آزمایش‌های کوپن کششی استاندارد اندازه‌گیری شده و ابعاد، سطح مقطع و... قبل از

انجام آزمایش در کوره، یادداشت شده‌اند. نتایج گزارش آزمایش میل برای این نوع فولاد (mill test report) در جدول (۳) آمده است.

### ٤-٥- توزیع دما

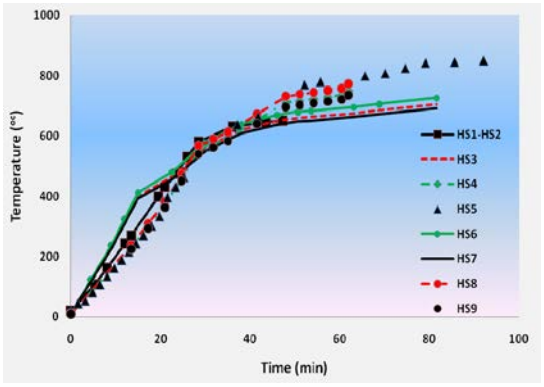
برای تمامی نمونه‌ها ۷ ترموکوپل بر روی اتصالات نصب شده بود تا تغییرات دما در طول آزمایش را اندازه‌گیری نمایند.

بررسی مقادیر دمای ثبت شده توسط ترموکوپل‌های مختلف نصب شده بر روی اتصالات نشان می‌دهد که در توزیع حرارت در اطراف اتصال اختلافاتی وجود دارد اما تفاوت دماها در اطراف اتصالات خیلی بزرگ نیست.

از آنجا که استفاده از توزیع حرارت غیر یکنواخت در طول اتصال در تحلیل‌ها با دشواری‌های زیادی همراه است در تحلیل فرض شده که اتصالات به طور یکنواخت گرم شده‌اند که برای این کار از متوسط دمایی که توسط ترموکوپل‌ها ثبت شده استفاده شده است که در شکل (۵) نشان داده شده است.

**جدول (۳): مشخصات مصالح**

| مصالح | تنش تسلیم ($N/mm^2$) | تنش نهایی ($N/mm^2$) | مدول ارتجاعی ($10^5 N/mm^2$) | CVN (J) |
|---|---|---|---|---|
| تیر، ستون و ورق‌ها | ۳۵۵ | ٤۹ | ۲/۰۵ | --- |
| مصالح جوش | ٤۸۵/۵ | ۵۵۵ | ۲/۰۵ | ۱۸۵ |




**شکل (۵): متوسط دمای هر نمونه**

## ۵- نتایج آزمایش‌ها و بررسی آنها

مجموعا ۹ آزمایش بر روی اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای صورت گرفته است و نتایج به صورت خانواده‌ای از منحنی‌های دما–سختی برای این اتصالات استخراج گردیده است. این نتایج علاوه بر آنکه رفتار این دسته از اتصالات را در حرارت‌های بالا مشخص می‌کند می‌تواند معیار مناسبی جهت مدل‌های قدرتمند عددی در زمینه رفتار سنجی این نوع اتصالات باشد. همانطور که در ابتدا اشاره شد در این بررسی تنظیمات آزمایش‌ها به گونه‌ای انجام شده است که بتوان تاثیر یا عدم تاثیر برخی از پارامترهای موثر بر رفتار اتصالات را در حرارت‌های بالا بررسی کرد. ارتباط میان این آزمایش‌ها، در جدول (٤) ارایه شده است. البته لازم به ذکر است که نتایج این تحقیق بر تعداد محدودی آزمایش استوار هستند و برای نتیجه‌گیری‌های جامع‌تر، نیاز به بررسی‌های بیشتری خواهد بود.

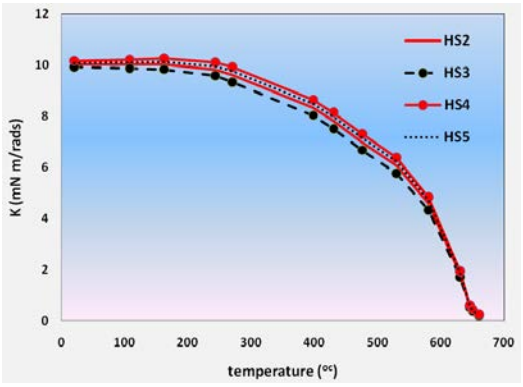
**جدول (٤): نحوه ارتباط آزمایش‌های مختلف**

| شماره آزمایش | ارتباط بین آزمایش‌ها |
|---|---|
| ۲، ۳، ٤ و ۵ | تاثیر میزان لنگر روی سختی اتصال |
| ۳، ٦ و ۷ | تاثیر تقویت اتصال |
| ۳، ۸ و ۹ | تاثیر استفاده از عایق |
| ۱ و ۲ | تکرار آزمایش |

### ۵-۱- بررسی اثر میزان لنگر اعمال شده به اتصال بر سختی خمشی آن

یک اتصال مشخص در یک سازه با قرارگیری در موقعیت‌های مختلف و در شرایط متفاوت تحت تاثیر لنگرهای مختلفی قرار می‌گیرد. به عنوان مثال در یک سکوی نفتی بارهای زنده و مرده وارده در شرایط مختلف کاری ممکن است متغیر باشد و در نتیجه، لنگرهای متفاوتی در زمان‌های مختلف بر اتصال وارد می‌شود. با توجه به این مهم در این تحقیق تاثیر میزان لنگر وارد شده بر اتصالات مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در جدول (٤) نیز ذکر شده است تنها تفاوت بین نمونه‌های HS2، HS3، HS4 و HS5 در میزان لنگر وارده بر اتصال

می‌باشد. به نمونه HS2، بالاترین میزان لنگر و به نمونه HS5، پایین ترین میزان لنگر وارد شده است. در شکل (٦) نمودار دما–سختی این نمونه‌ها ارائه شده است.




**شکل (٦): تاثیر لنگر اعمالی بر اتصال بر نمودار دما–سختی**

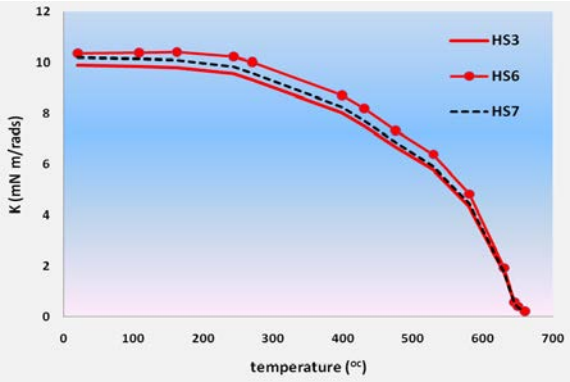
همانطور که از نتایج این نمونه‌ها مشخص است و از ابتدا نیز امکان پیش بینی بود، با ثابت ماندن هندسه و تغییر میزان بار وارده، میزان سختی دورانی اتصال تغییر چندانی پیدا نمی‌کند و و با تقریب خوبی می‌توان گفت که ثابت می‌ماند.

علت این رویداد، این است که با توجه به اینکه، هندسه اتصال ثابت مانده است و فقط میزان بار عوض شده است؛ و از طرفی، سختی اتصال مستقل از بارگذاری بیرونی می‌باشد و تابعی از خصوصیات هندسی عضو می‌باشد، پس در نتیجه تغییر میزان لنگر وارده، بر سختی اتصال تاثیر چندانی نمی‌گذارد. مختصر اختلافی هم که بین منحنی‌ها وجود دارد را هم، می‌توان به خطای وسایل اندازه گیری، خطای آزمایش و خطای حین ساخت نمونه‌ها ارتباط داد.

### ۵-۲- اثر تقویت اتصال بر سختی خمشی آن

همانطور که در جدول (٤) نیز اشاره شده است اثر تقویت اتصال بر رفتار دورانی اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای با مقایسه نتیجه حاصل از آزمایش نمونه HS3 با نمونه‌های HS6 و HS7 قابل بررسی است.

همانطور که در جدول (١) نیز قابل مشاهده است تنها تفاوت نمونه HS3 با دو نمونه دیگر در ان است که در نمونه HS6 ورق دیافراگم در محدوده چشمه اتصال تقویت شده و در نمونه HS7 ورق جان در محدوده چشمه اتصال تقویت شده است. در شکل (٧) نمودار دما–سختی برای این سه نمونه ارائه شده است.




**شکل (٧): تاثیر تقویت اتصال بر نمودار دما–سختی**

همانطور که از نتایج حاصل مشاهده می‌شود تقویت چشمه اتصال موجب تغییراتی نه چندان فاحش در سختی اتصال در دمای معمولی می‌شود. با افزایش ضخامت ورق جان در محدوده اتصال و یا ورق بال در محدوده اتصال، سختی این اعضا و در پی آن سختی اتصال افزایش می‌یابد. اتصال تقویت شده، در حرارت‌های بالا، با افت سختی کمتری نسبت به نمونه بدون تقویت مواجه می‌شود. لازم به یادآوری است که سختی و مقاومت یک اتصال به صورت مستقیم به میزان سختی و مقاومت اعضای آن اتصال وابسته می‌باشد و سختی و مقاومت اعضای اتصال وابسته به میزان مدول الاستیسیته و مقاومت فولاد به کار رفته در آنها دارد. با افزایش درجه حرارت، مدول الاستیسیته و مقاومت فولاد بر طبق جدول (٥) دچار زوال می‌شود و لیکن اتصالی که سختی بالاتری دارد در دمای بالاتری دچار زوال کامل سختی و مقاومت می‌شود و نتیجتاً نسبت به همان اتصال با ورق‌های نازک تر حرارت‌های بالاتری را تحمل می‌کند.

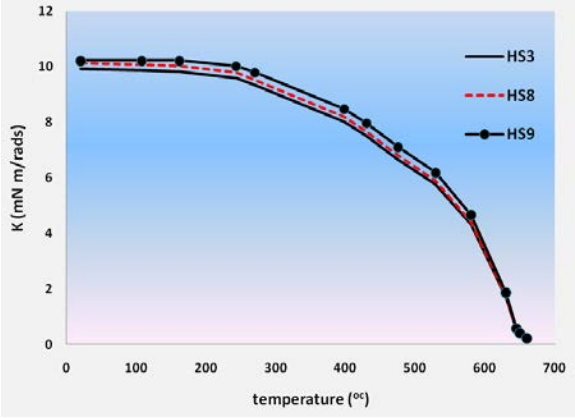
همانطور که مشاهده می‌شود تاثیر افزایش ضخامت ورق دیافراگم، اندکی بیشتر از تاثیر افزایش ضخامت ورق جان می‌باشد. این رویداد به این علت می‌باشد که گسیختگی نهایی اتصال عمدتاً در ورق دیافراگم می‌باشد. بنابراین افزایش این موضع، گسیختگی را به تاخیر انداخته و موثرتر از افزایش ضخامت ورق جان می‌باشد.

جدول (۵): ضرایب کاهش خصوصیات فولاد در دمای بالا [۱۵]

| دمای فولاد | ضریب کاهش مدول ارتجاعی $E_s$ | ضریب کاهش تنش تسلیم $f_y$ |
|---|---|---|
| ۲۰ | ۱ | ۱ |
| ۱۰۰ | ۱ | ۱ |
| ۲۰۰ | ۰/۹ | ۱ |
| ۳۰۰ | ۰/۸ | ۱ |
| ٤۰۰ | ۰/۷ | ۱ |
| ۵۰۰ | ۰/٦ | ۰/۷۸ |
| ٦۰۰ | ۰/۳۱ | ۰/٤۷ |
| ۷۰۰ | ۰/۱۳ | ۰/۲۳ |
| ۸۰۰ | ۰/۰۹ | ۰/۱۱ |
| ۹۰۰ | ۰/۰٦۷۵ | ۰/۰٦ |

### ۵-۳- اثر استفاده از عایق بر سختی خمشی اتصال

یکی از موارد متداول در مقاوم سازی اعضای فولادی در برابر آتش استفاده از عایق‌ها می‌باشد. استفاده از عایق‌ها بالاخص در سازه‌های با درجه اهمیت بالا مانند سکوهای نفتی بسیار متداول می‌باشد. اگرچه پر واضح است که استفاده از عایق میزان حرارت موثری را که بر اتصال وارد می‌شود کاهش داده و نتیجتا اتصال می‌تواند ترازهای حرارتی بالاتری را تحمل نماید؛ اما با توجه به قیمت بالای پوشش‌های حرارتی و همچنین دشواری‌های خاصی که در استفاده از آنها وجود دارد استفاده بهینه و حداقلی از عایق‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به این مساله در این تحقیق نمونه‌های HS8 و HS9 به منظور بررسی چینش عایق و همچنین میزان تاثیر عایق انتخاب شده‌اند. این دو نمونه کاملا مشابه نمونه HS3 هستند با این تفاوت که در نمونه HS8 ورق جان در محدوده چشمه اتصال عایق شده است و در نمونه HS9، ورق دیافراگم در محدوده چشمه اتصال عایق شده است. در شکل (۸) نمودار دما-سختی برای این سه نمونه ارائه شده است.

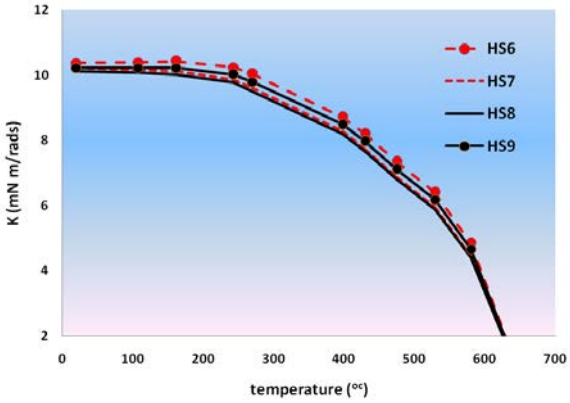



شکل (۸): تاثیر استفاده از عایق بر نمودار دما-سختی نمونه‌ها

نتایج ارائه شده در نمودارهای شکل (۸) نشان می‌دهند همانطورکه انتظار می‌رفت استفاده از عایق‌ها باعث می‌شود که سختی اتصال افزایش یابد.

مقایسه نتایج ارائه شده در بخش ۵-۲ و ۵-۳ نشان می‌دهد که اگرچه هر دو روش مقاوم سازی اتصال با استفاده از افزایش ضخامت اعضا و همچنین استفاده از عایق، باعث افزایش سختی اتصال شده است ولیکن در این سری آزمایش‌ها افزایش ضخامت اعضا موثرتر بوده است. در مورد علت این مساله، می‌توان اینطور نتیجه‌گیری نمود که احتمالا به دلیل انکه عایق صرفا در بخش کوچکی از محدوده چشمه اتصال استفاده شده است (مثلا ورق دیافراگم) موجب شده که آن بخش نسبت به سایر بخش‌های چشمه اتصال اختلاف گرمایی بسیار زیادی داشته باشد. وجود این مساله باعث شده که نسبت دوران و تغییر شکل‌های رخ داده در این بخش نسبت به بخش‌های مجاور در محدوده چشمه اتصال بسیار کمتر شده و پیوستگی بین اعضای چشمه اتصال و رفتار اندرکنشی بین آنها از بین رود و کلیه تغییر مکان‌ها و دوران‌ها به سایر بخش‌های چشمه منتقل شده و موجب شود آن بخش‌ها زودتر دچار گسیختگی شوند. در حالیکه در حالتی که عایق وجود نداشته دوران‌ها و تغییرشکل‌ها همزمان با افزایش حرارت ایجاد شده و بین بخش‌های مختلف اتصال توزیع شده و هر یک سهم مشخصی در پذیرش آنها دارند. با توجه به این نتیجه گیری، به نظر می‌رسد در صورت تمایل به استفاده از عایق، بایستی که کل محدوده چشمه

اتصال عایق شود تا اعضا چشمه اتصال هم زمان درجه حرارت یکسانی داشته و امکان عملکرد یکپارچه و اندرکنشی بین آنها فراهم شده و هر یک سهم مشخصی از تغییر شکل‌ها و اثرات حرارتی داشته باشند. مقایسه بین نتایج مقاوم کردن و عایق کردن اتصال در شکل (۹) نشان داده شده است.




**شکل (۹): مقایسه بین نتایج مقاوم کردن و عایق کردن اتصال روی سختی دورانی اتصال**

## ٦- نتیجه گیری

با توجه به نقش مهم نفت در عرصه‌های سیاسی و اقتصادی و همچنین اهمیت سکوهای نفتی در استخراج نفت، حفظ و افزایش عمر مفید این سازه‌ها از اهمیت به سزایی برخوردار است. با توجه به این مساله از یک سو و احتمال بالای وقوع آتش‌سوزی از سوی دیگر، در این تحقیق رفتار اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای به عنوان یکی از انواع رایج اتصالات به کار رفته در این سازه‌ها در برابر آتش مطالعه شده است. به منظور انجام این تحقیق ۹ آزمایش مختلف بر روی این نوع اتصالات انجام شده است.

از نتایج تجربی، خانواده ای از منحنی دما-سختی برای این اتصالات استخراج گردید. انتظار می‌رود که این نتایج برای سایر تحقیقات در مورد رفتار اتصالات در آتش نیز مفید باشد؛ بالاخص از نتایج این آزمایش‌ها برای ایجاد مدل‌های عددی متناسب برای این نوع اتصالات می‌توان سود برد. زیرا چنین داده‌هایی به دلیل کمبود داده‌های تجربی در این زمینه در دسترس نیستند. تاثیر یا عدم تاثیر پارامترهای متعددی بر رفتار این دو دسته از اتصالات بررسی شده که با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت استفاده از عایق‌های حرارتی، افزایش ضخامت اعضای اتصال (ورق دیافراگم، استیفنر و ...)، از جمله مواردی هستند که به کمک آنها می‌توان سختی اتصال را در برابر حرارت افزایش داد.

در بحث افزایش مقاومت اعضای اتصال باید توجه نمود که در صورت وجود محدودیت، موثرترین گزینه برای افزایش ضخامت ورق دیافراگم می‌باشد؛ چرا که مد اصلی گسیختگی این اتصالات جاری شدن و گسیختگی ورق دیافراگم از محل جوش آن بود با افزایش ضخامت ورق دیافراگم و پیرو ان افزایش عمق جوش شیاری ان مد گسیختگی به تعویق افتاده و ظرفیت افزایش می‌یابد.

ولیکن این نکته قابل توجه است که همانطور که نتایج این آزمایش‌ها نیز نشان می‌دهد در صورت استفاده از فولاد معمولی ساختمانی امکان آنکه اتصال دمایی بالاتر از ۷۵۰ درجه سانتیگراد را تحمل کند وجود ندارد و در این دما سختی اتصال به صفر می‌رسد.

## ۷- تشکر و قدردانی

مولفین مقاله لازم می‌دانند از شرکت IOEC بدلیل تامین مصالح، ساخت نمونه‌ها، از آقای چنگیزی از شرکت تنش الکتریک آسیا برای ساخت کوره حرارتی و تامین تجهیزات آزمایش و از آقای مهندس رهبری از شرکت IOEC و آقای دکتر دقیق از شرکت POGC بدلیل مشاوره‌های مفیدشان تشکر نمایند.

## ۸- مراجع

[1] Jones, S.W., Kirby, P.A. and Nethercot, D.A. (1981), "The Analysis of Frames with Semi-Rigid Joints: A State-of-the-Art Report", Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield.

[2] Liu, T.C.H. (1999), "Moment-Rotation-Temperature Haracteristics of Steel/Composite Connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 10, pp. 1188-1197.

[3] Mao, C.J., Chiou, Y.J, Hsiao, P.A. and Ho, M.C. (2009), "Fire Response of Steel Semi-Rigid Beam Column Moment Connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 1290-1303.

[4] Rahman, R., Hawileh, R. and Mahamid, M. (2004), “The Effect of Fire Loading on a Steel Frame and Connection”, In: Brebbia CA, de Wilde WP, editors. High-performance structures and materials II. WIT Press; pp. 307-316.

[5] El-Housseiny, O.M., Abdel Salam, S., Attia, G.A.M. and Saad, A.M. (1998), “Behavior of Extended End Plate Connections at High Temperature”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46, No. 1-3, pp. 299.

[7] Wald, F., Simo˜ nes da Silva, L., Moore, D.B., Lennon, T., Chaldna, M. and Santiago M. (2006), “Experimental Behavior of a Steel Structure under Natural Fire,” Fire Safety Journal, Vol. 41, No. 5, pp. 509-522.

[8] Shetty, N.K., Soares, C., Thoft-Christensen, P. and Jensen, F.M. (1998), “Fire Safety Assessment and Optimal Design of Passive Fire Protection for Offshore Structures”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 61, No. 1-2, pp. 139-149.

[9] Eberg, E., Amdahl, J., Homlas, H. and Hekkelstrand, B. (1992), “Integrated Analysis of Offshore Structures Subjected to Fire”, Conference on Structural Design against Accidental Loads-London, UK, 23-24.

[10] Everett, E.G. and Nehring, G. (1976), “An Approach to Fire Control in Offshore Operations in the North Sea”, Eighth Annual Offshore Technology Conference Proceedings. Publ. by: Offshore Technology Conference; Dallas, TX (USA), Vol. 2, pp. 405-416 OTC-2558.

[11] Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran, www.ripi.ir, 2010.

[12] WOAD, “Worldwide Offshore Accident Databank”, Det Norske Veritas, Oslo, published biannually.

[13] ISO 834. (2002), “Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction”.

[14] ASTM-E 119-05a. (2003), “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials”.

[۱۵] حسینی، س.ا. (۱۳۹۱)، ”بررسی رفتار اتصالات تیر به ستون عرشه سکوهای نفتی در آتش‌سوزی“، رساله دکتری، مصطفی زین الدینی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

[16] European Committee for Standardisation (CEN). (2003), Eurocode 3; Design of steel structures, Part 1.2: General rules structural fire design, prEN-1993-1-2.

[۱۷] زین الدینی، م. (۱۳۸٤)، طراحی و اجرای سکوهای ثابت نفتی“، ESDEP پروژه اروپایی آموزش دانشگاهی طرح فولاد، چاپ مرکز ملی اقیانوس شناسی، چاپ اول ۱۳۸٤.