رفتار اتصالات فولادی در شرایط آتش سوزی

دکتر محمود یحیایی
عضو هیئت علمی دانشگاه خواجه نصیر طوسی

مقدمه

Aug, 1970 - New York

50-story building burned for 6 hours over 5 floors

May, 1988 - Los Angeles

62-story building burned for 3.5 hours over 5 floors

Feb, 1991 - Philadelphia

38-story building burned for 18 hours over 8 floors

Oct, 2004 - Caracas, Venezuela

56-story building burned for 17 hours over 26 floors

مقدمه

یکی از موضوعات بحث برانگیز در سالهای اخیر، برآورد میزان تحمل آتش اتصالات فولادی و بررسی اثر نوع اتصال بر رفتار تیر در آتش‌سوزی می‌باشد. لذا به منظور بررسی عملکرد اتصالات سازه‌های فولادی در آتش، آزمایشهایی بر روی اتصالات مختلف تحت اثر ترکیبات بارگذاری، ابعاد، خواص مکانیکی مواد و شرایط مرزی مختلف صورت گرفته است تا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی حاصل، ضمن درک رفتار آنها در دماهای بالا، امکان کالیبراسیون مدل های تحلیلی پیشنهادی و صحت سنجی مدل های عددی برای محققان فراهم گردد.

مقدمه

طراحی سازه در شرایط آتش‌سوزی به علت نیروهای داخلی ناشی از انبساط حرارتی، کاهش مقاومت در دمای بالا، خیزهای بسیار بزرگ و عوامل دیگر غالباً از پیچیدگی برخوردار است. در سالهای اخیر تلاش های تحقیقاتی زیادی جهت شناخت بهتر رفتار سازه‌ها در شرایط آتش‌سوزی و همچنین ارائه راهکارهای طراحی مستدل برای برآورد میزان تحمل آتش در سازه‌ها صورت گرفته و با توسعه آیین‌نامه‌های معتبر طراحی نظیر Eurocode و AISC همراه بوده است.

بررسی تحقیقات انجام شده قبلی نشان می‌دهد که داده‌های آزمایشگاهی بسیار محدودی در این خصوص آن هم برای تعداد معدودی از اتصالات وجود دارد و تا کنون گزارشی مبنی بر آزمایش اتصال نبشی جوشی و اتصال وصله ای پیچی جان و بال در آتش منتشر نشده است. این درحالیست که در سالهای اخیر استفاده از این سیستم ها در سازه‌های فولادی رشد چشم گیری داشته است.

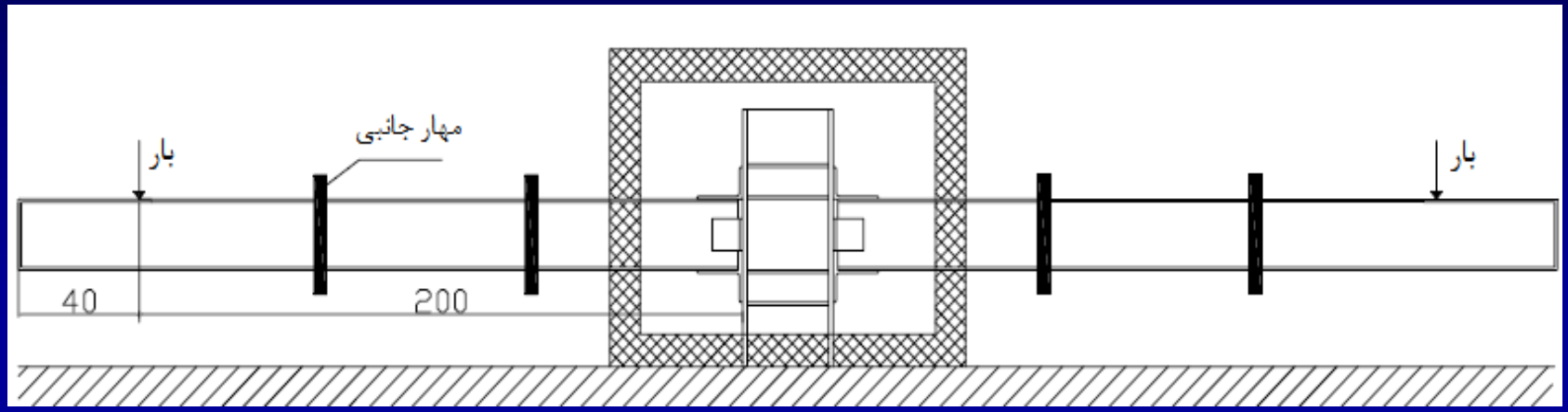
مقدمه

این مطالعه به منظور شناخت رفتار اتصالات نبشی جوشی در قاب های ساده و اتصالات وصله ای پیچی جان و بال در قاب های خمشی تحت اثر آتش انجام گرفته و بر اساس انجام آزمایش های آتش روی نمونه‌هایی در مقیاس واقعی بنا نهاده شده است. نتایج این تحقیق علاوه بر ایجاد شناخت لازم از رفتار این گونه اتصالات در آتش، اطلاعات مفیدی بدست می‌دهد که می‌توانند در ارائه راهکارهای طراحی این اجزاء در سازه‌های فولادی تحت اثر آتش مورد توجه قرار گیرند.

اتصال نبشی جوشی

اتصال نبشی جوشی یکی از اتصالات متداول تیر به ستون در سازه های فولادی با سیستم قاب مهاربندی شده است که به دلیل هزینه کمتر و سهولت اجرای آن در برخی از کشورها از جمله ایران کاربرد بیشتری دارد. با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی در مورد رفتار آنها تحت شرایط آتش سوزی، در بخش اول نتایج هشت آزمایش در دمای بالا بر روی دو نوع مختلف از اتصالات نبشی جوشی ارایه شده است. نتایج حاصل در قالب نمودارهای دما-دوران ارایه و مودهای گسیختگی مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف ازجمله ضخامت نبشی، میزان لنگر وارد بر اتصال و سایر مشخصات هندسی بر رفتار این اتصالات بررسی شده است.

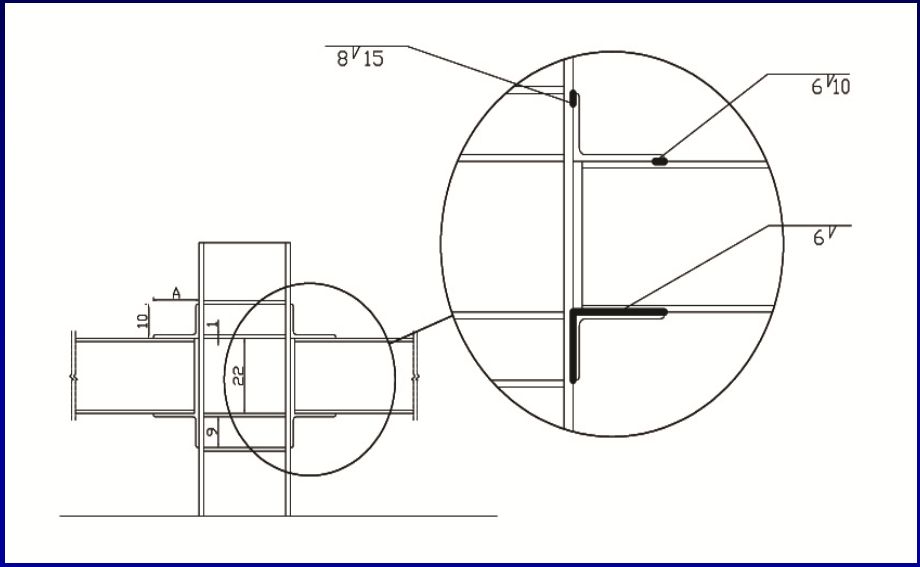
چیدمان آزمایش اتصال نبشی جوشی

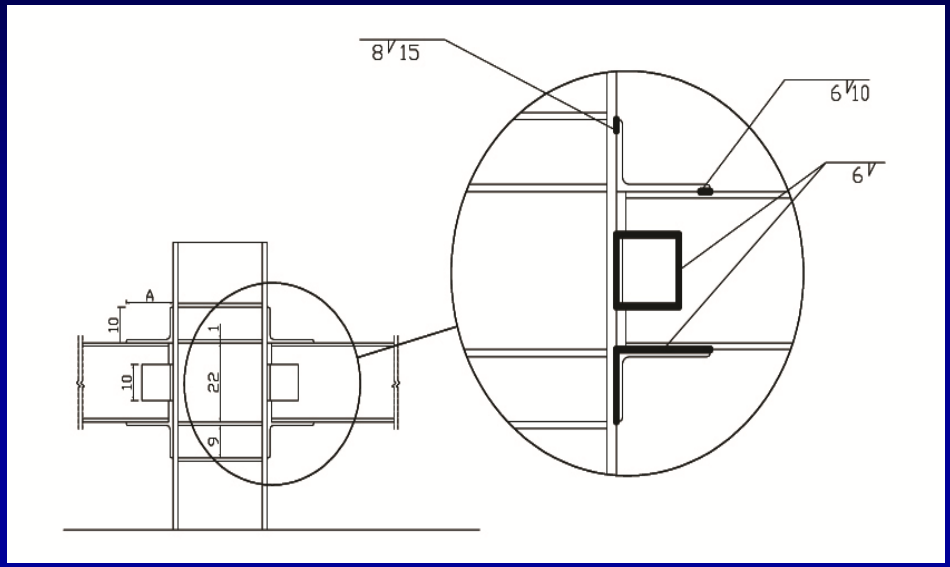


آزمایش ها در داخل یک کوره گازی که بدین منظور طراحی شده بود آنجام گردید. در آزمایش های آتش اتصال نبشی از یک چیدمان صلیبی متقارن که متشکل از یک ستون تکی به ارتفاع ۸۰۰ میلیمتر با مقطع **IPE 300** و دو تیر طره بطول ۲٤۰ سانتیمتر با مقطع **IPE 220** بود، استفاده گردید. بارها در فاصله ۲۰۰ سانتیمتری از ابتدای تیر وارد شدند. در این چیدمان در هر آزمایش دو نمونه آزمایشگاهی در طرفین ستون وجود دارد.

روند آزمایش شامل سه مرحله بود. در ابتدا نمونه ها تا رسیدن به تراز بار از پیش تعیین شده بارگذاری شدند. سپس در حالی که بار ثابتی بر روی نمونه ها اعمال می شد، کوره روشن گردید. نهایتاً وقتی که گسیختگی در اتصال رخ داد کوره خاموش شد. دمای کوره متناسب با منحنی **ISO 834** افزایش داده شد. جهت اندازه گیری داده های لازم، از شیب سنج، ترانس دیوسرهای جابجایی و ترموکوپل استفاده گردید.

مشخصات نمونه های آزمایشگاهی اتصال نبشی جوشی





در مجموع هشت آزمایش بر روی دو نوع متفاوت از اتصالات نبشی جوشی آنجام شد. اتصالات در دو گروه مختلف شامل: نمونه های بدون نبشی جان (گروه ۱) و نمونه های با نبشی جان (گروه ۲) دسته بندی شدند. اتصالات گروه ۱ از دو نبشی تشکیل شده بود که یک نبشی به بال بالایی تیر و دیگری به بال پایینی تیر جوش شده و سپس کل سیستم به بال ستون جوش داده شده بود. اتصالات گروه ۲ علاوه بر دو نبشی بالها دو نبشی دیگر هم داشتند که از یک طرف به جان تیر و از طرف دیگر به بال ستون جوش شده بودند. نبشی های جان در تمامی موارد با ابعاد ۱۰*۱۰۰*۱۰۰ میلیمتر بودند.

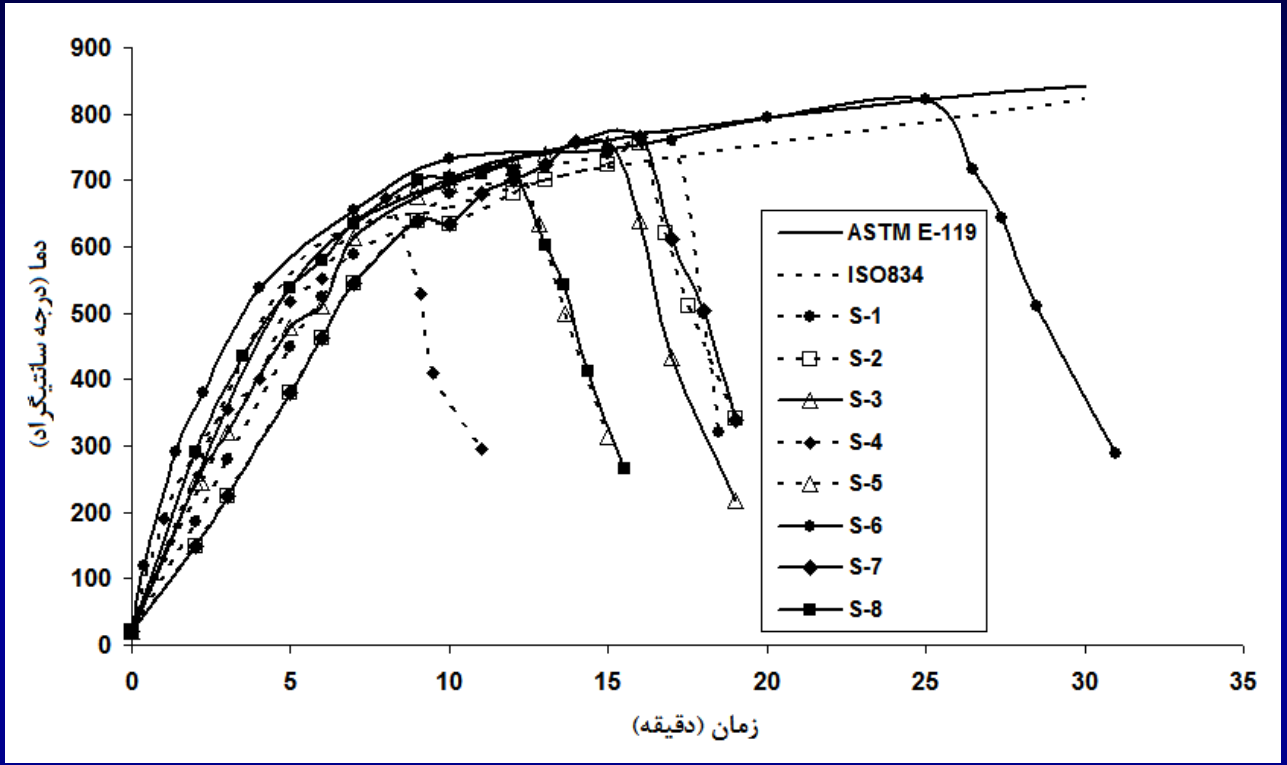
بارگذاری نمونه ها درآزمایش اتصال نبشی جوشی

کد نمونه	گروه	تراز لنگر	لنگر وارده (kN.m)	ابعاد نبشی‌های بال (mm)
S-1	۱	۰/۶×M_{cc}	۸/۵	۱۵۰×۱۰۰×۱۵
S-2	۱	۰/۶×M_{cc}	۸/۵	۱۵۰×۱۰۰×۱۵
S-3	۲	۰/۴×M_{cc}	۸/۵	۱۵۰×۱۰۰×۱۵
S-4	۱	۱/۰×M_{cc}	۸/۵	۱۰۰×۱۰۰×۱۰
S-5	۱	۰/۶×M_{cc}	۸/۵	۱۰۰×۱۰۰×۱۵
S-6	۲	۰/۲×M_{cc}	۴/۲۵	۱۵۰×۱۰۰×۱۵
S-7	۱	۰/۳۵×M_{cc}	۴/۲۵	۱۰۰×۱۰۰×۱۵
S-8	۱	۰/۵×M_{cc}	۴/۲۵	۱۰۰×۱۰۰×۱۰

M_{cc} = Moment capacity of the connection

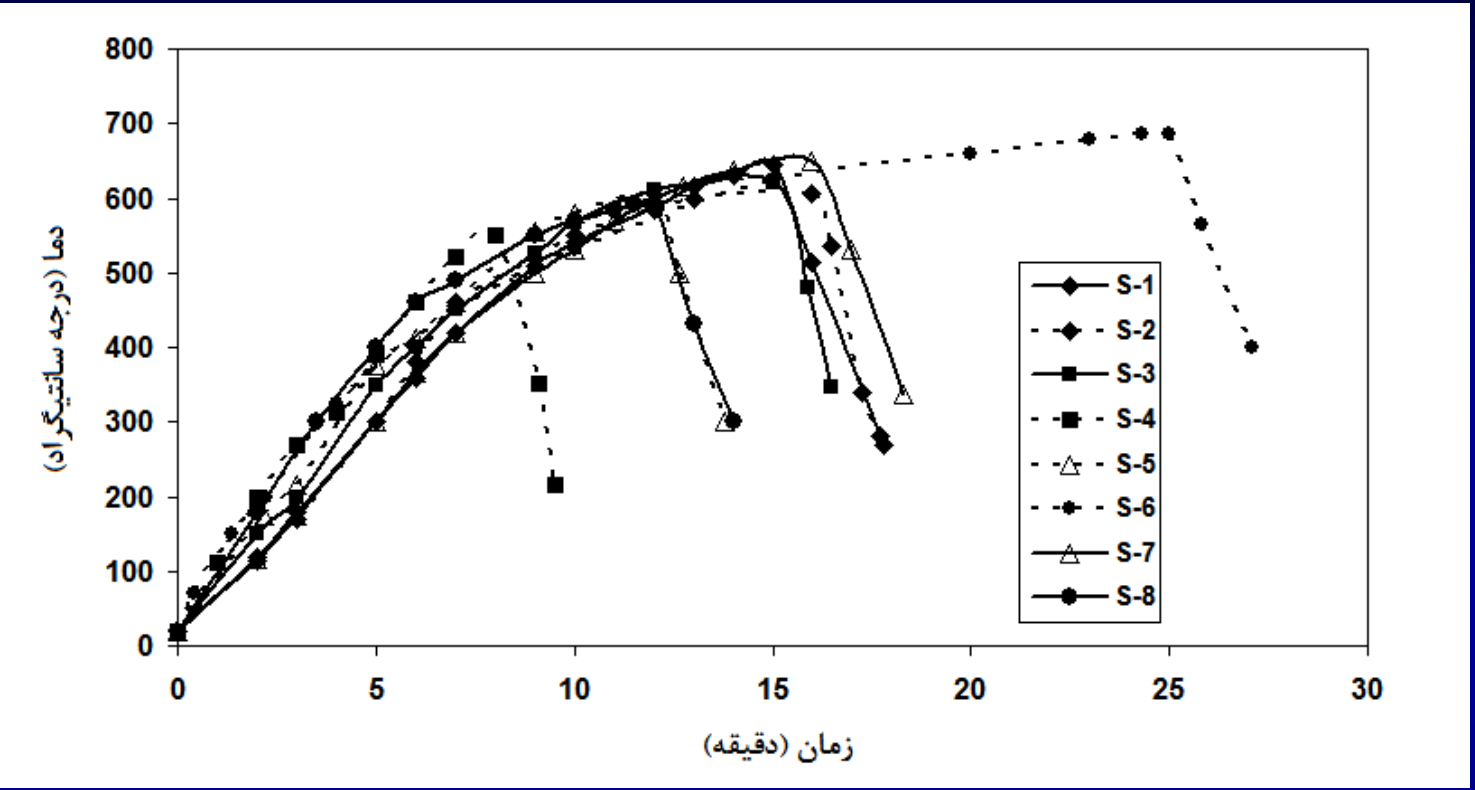
اتصالات نبشی در آزمایش ها تحت تاثیر دو عامل یعنی لنگر ناشی از بارهای ثقلی و کاهش مقاومت و سختی فولاد در اثر افزایش حرارت قرار دارند و به علت ترکیب اثر این دو عامل در نهایت دچار گسیختگی می شوند. لذا هرچه لنگر وارده بیشتر باشد اتصالات در درجه حرارت پایین تری گسیخته می شوند. از آنجایی که هدف از این تحقیق بررسی رفتار اتصالات در دماهای بالا می باشد سعی شد تا لنگر وارده به نحوی انتخاب شود که گسیختگی زود هنگام در اتصالات رخ ندهد و اتصال توانایی تحمل دماهای بالاتری را داشته باشد تا بدین وسیله امکان بررسی رفتار اتصال در حرارت های بالا میسر شود. لذا ابتدا میزان ظرفیت دورانی هر اتصال به صورت تئوری محاسبه شد و سپس لنگر وارده به صورت ضریبی از این ظرفیت دورانی به هر نمونه اعمال شد.

نمودارهای زمان-دمای کوره



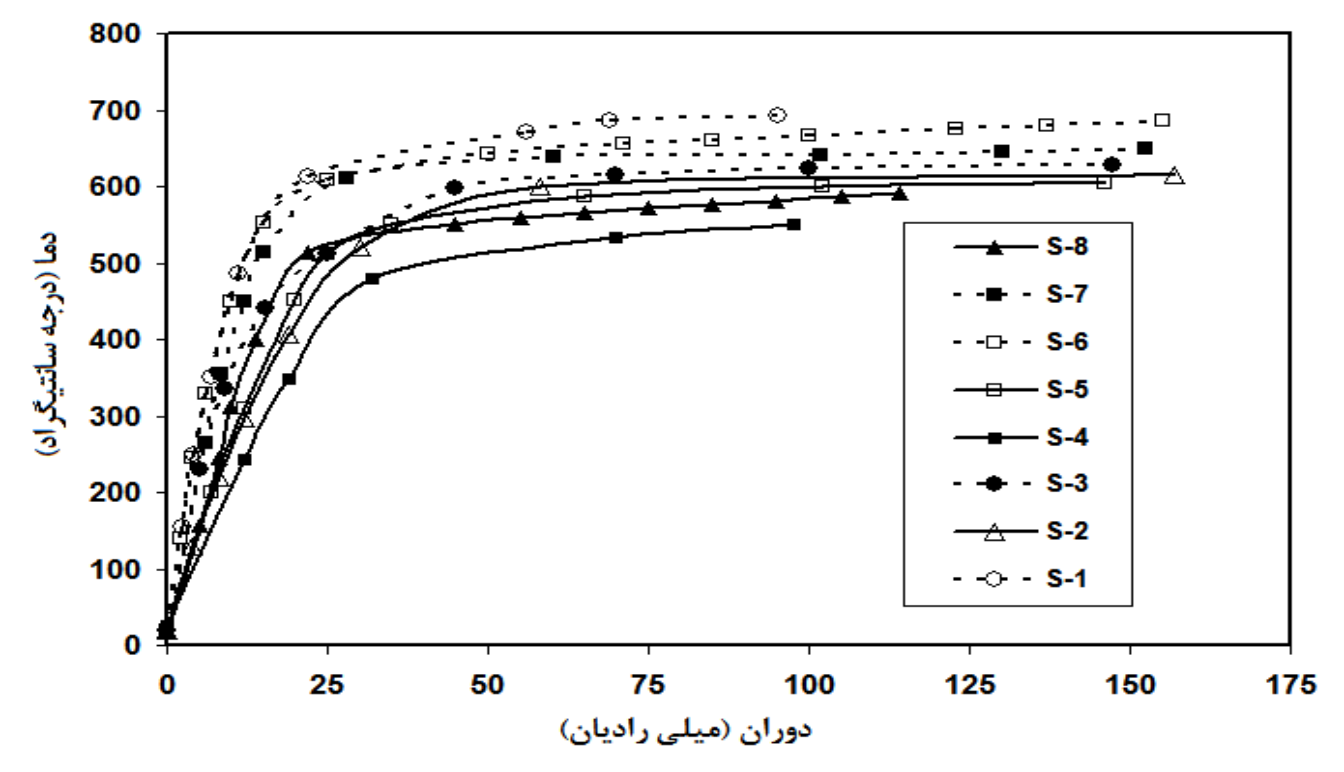
شش ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای محیطی کوره مورد استفاده قرار گرفتند. شکل بالا تغییرات متوسط دمای محیط کوره را با زمان که در حین حرارت دادن و سرد کردن کوره حاصل شده را در مقایسه با منحنی دمای آتش استاندارد ISO 834 و ASTM E119 نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود دمای کوره با اختلاف ناچیزی از منحنی دمای آتش استاندارد تبعیت می‌کند

نمودارهای توزیع دما در اتصال نبشی جوشی



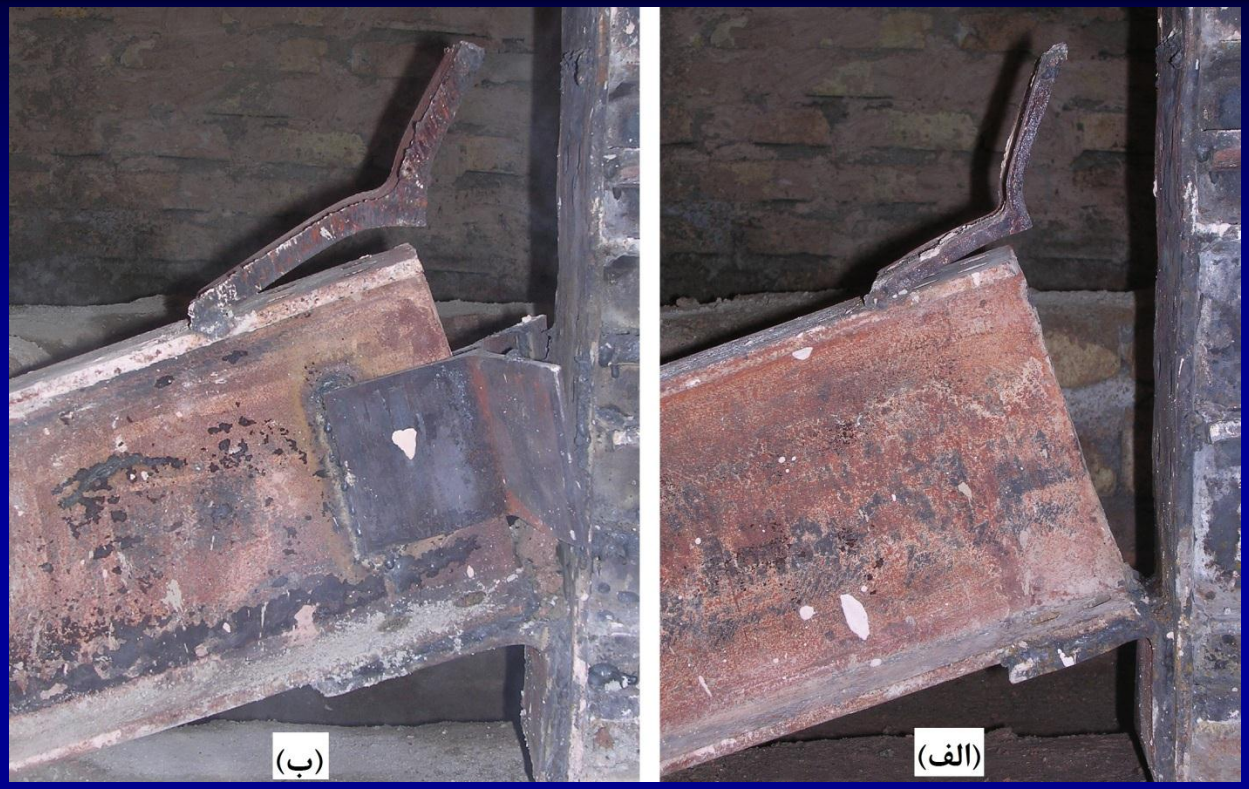
برای نمونه‌های با نبشی جان نه ترموکوپل و برای نمونه‌های بدون نبشی جان هفت ترموکوپل بر روی اتصال نصب شد تا تغییرات دما در طول ازمایش را اندازه‌گیری نمایند. نتایج حاصل از ترموکوپل ها نشان می داد که در توزیع حرارت در اطراف اتصال اختلافات اندکی وجود دارد. لذا برای انجام تحلیل از متوسط دمایی که توسط ترموکوپل‌ها ثبت شده استفاده شده است که در شکل بالا نشان داده شده است.

نمودارهای دما-دوران اتصال نبشی جوشی



با توجه به نمودار دما-دوران ارایه شده تمامی نمونه ها تا قبل از یک دمای خاص رفتار الاستیک دارند و بعد از این دما تا پایان آزمایش از یک منحنی تغییرشکل پلاستیک پیروی می کنند. شروع رفتار پلاستیک نمونه ها در دمایی بین 420 تا 540 درجه سانتیگراد و به دلیل جاری شدن یک یا چند المان اتصال می باشد. در نهایت با نزدیک شدن به گسیختگی اتصال، نرخ دوران به سرعت افزایش پیدا می‌کند که باعث ایجاد ناحیه‌ای نسبتاً مسطح در پاسخ اتصال می‌شود. مقایسه نمودارها نشان می دهد که افزایش ضخامت نبشی ها و کاهش لنگر وارده بر اتصالات می تواند به افزایش مقاومت اتصال نبشی در برابر حرارت کمک کنند.

مود خرابی اتصال نبشی جوشی در آتش



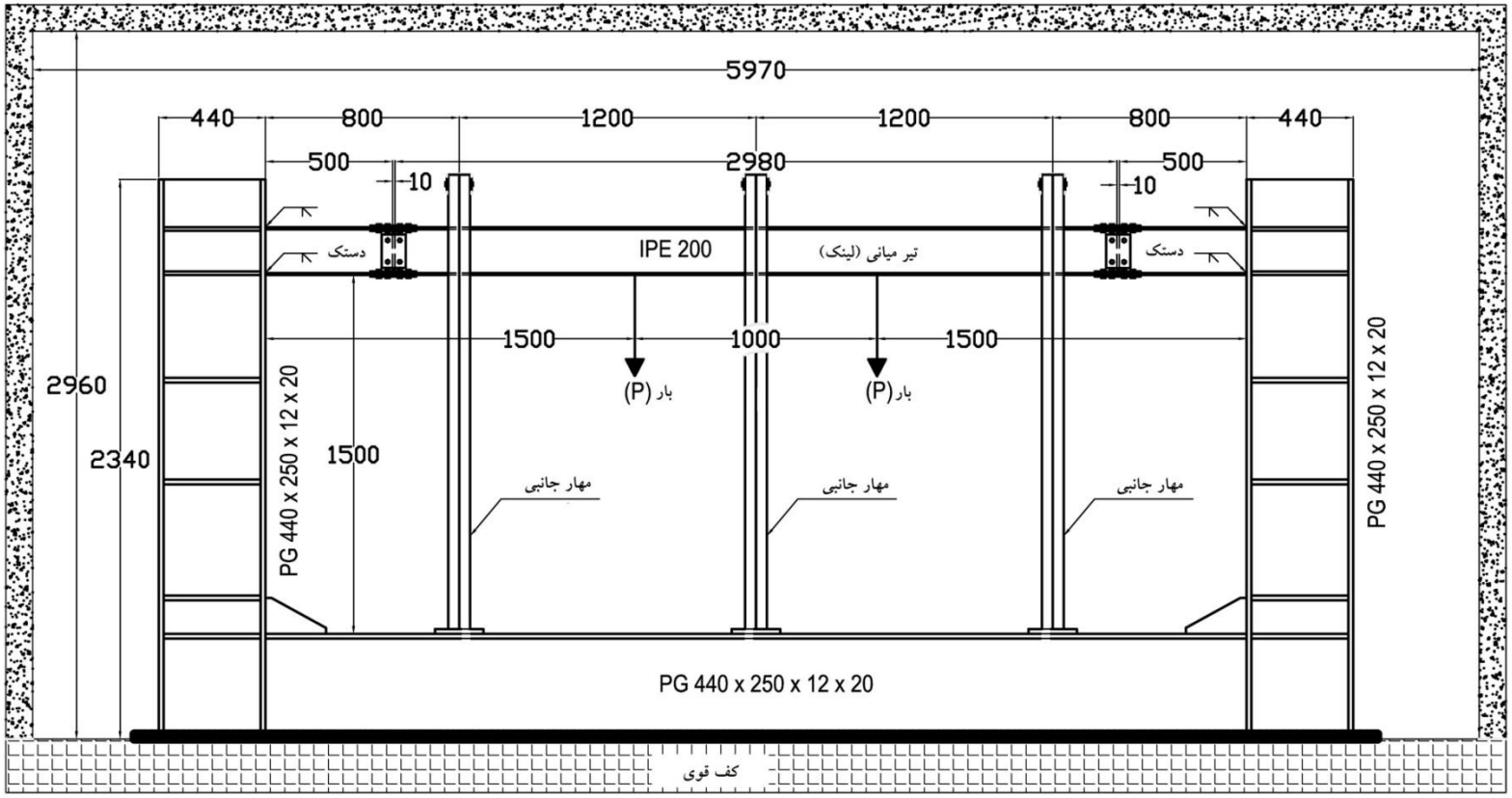
مود خرابی اتصالات بدون نبشی جان: در این نوع اتصالات ابتدا جاری شدن کامل نبشی بالا و پایین رخ می دهد و در نهایت گسیختگی جوش ها از محل ساق قائم نبشی بالا رخ می دهد (شکل الف).

مود خرابی اتصالات با نبشی جان: در این نوع اتصالات در ضمن آنکه جاری شدن کامل نبشی بالا و پایین روی می دهد نبشی های جان نیز جاری شده و جوش اتصال دهنده نبشی های جان به بال ستون از قسمت بالا دچار گسیختگی می شوند و در نهایت گسیختگی کامل جوش ساق نبشی بالا روی می دهد (شکل ب).

اتصال وصله ای پیچی در قاب های خمشی درختی

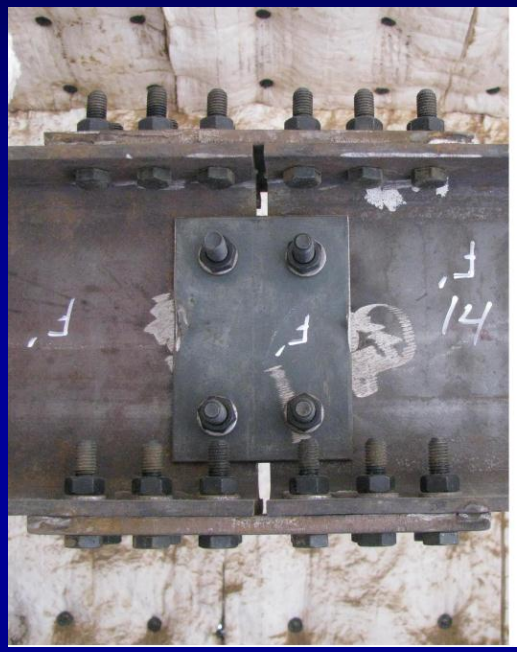
سیستم قاب خمشی درختی از سیستم های کارآمد و رایج سازه های فولادی در بسیاری از کشورهای جهان است. در این سیستم قطعات کوتاهی از تیر (دستک) در کارخانه به ستون ها جوش می شوند و پس از نصب ستون های درختی در محل پروژه، بخش میانی تیر (لینک) به سر دستک ها پیچ می شود.

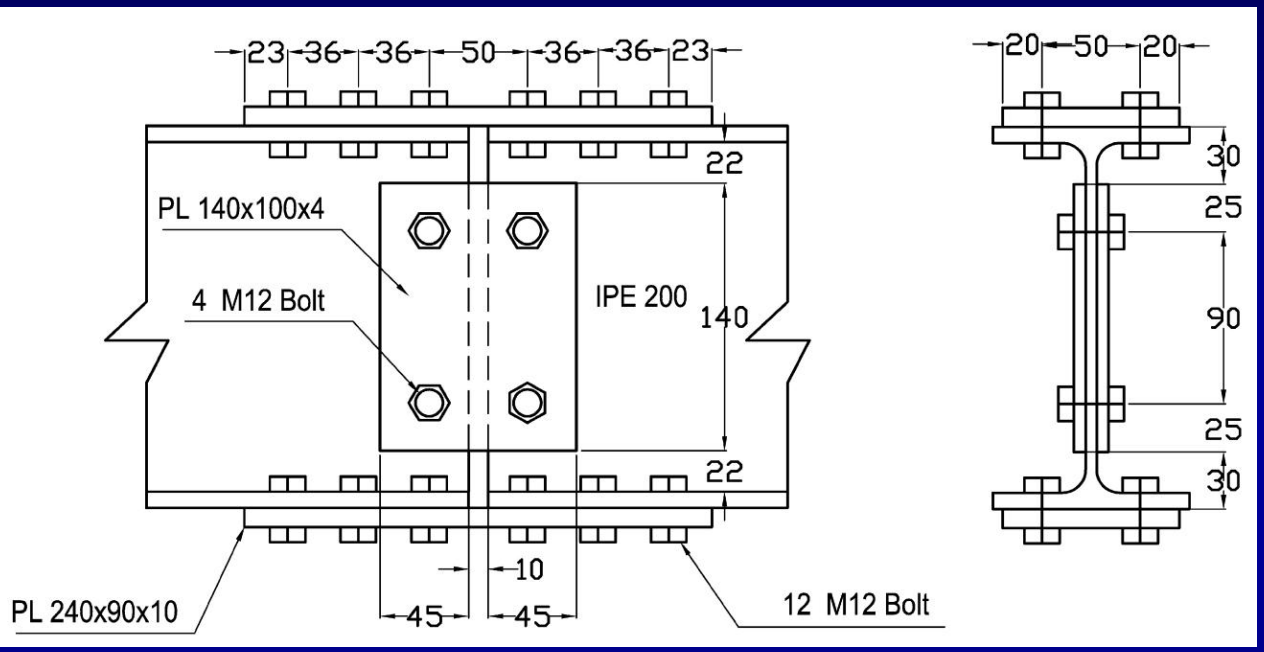
مطالعه آزمایشگاهی اتصال وصله ای پیچی



جهت انجام آزمایشهای آتش از یک کوره مکعب مستطیل به ابعاد داخلی ۲۹۶۰mm×۲۹۳۰×۵۹۷۰ و مجهز به هشت مشعل گازسوز استفاده گردید. کوره بگونه‌ای تنظیم شده بود که میانگین دمای ترموکوپل های آن تقریباً از منحنی زمان-دمای استاندارد ISO 834 تبعیت نماید. چیدمان دو آزمایش شامل نمونه‌های نصب شده در یک قاب نگهدارنده قوی بود تا ممانعت محوری و اندرکنش بین تیر و سازه واقعی در آزمایش لحاظ گردد.

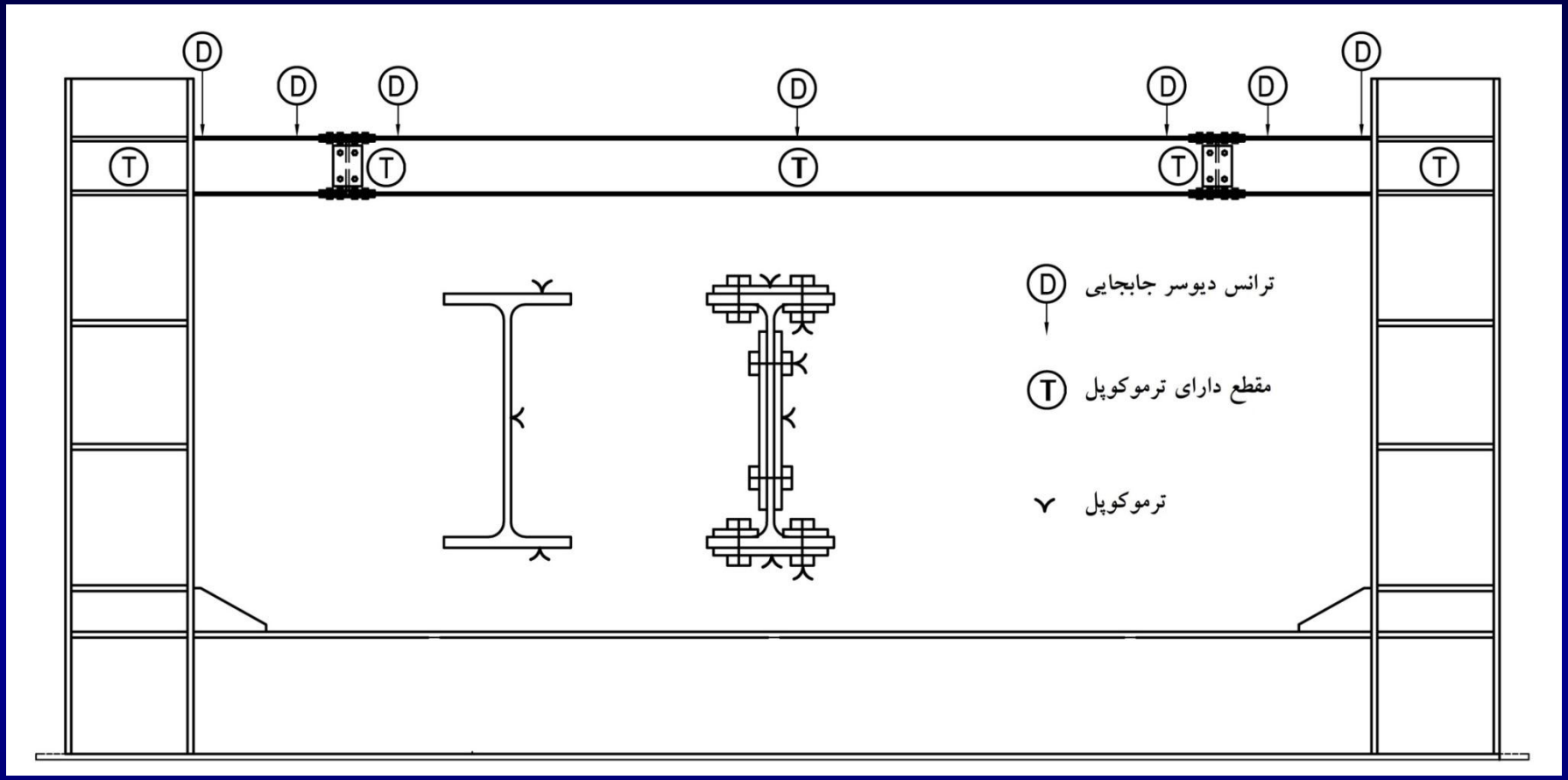
جزئیات اتصال وصله ای پیچی





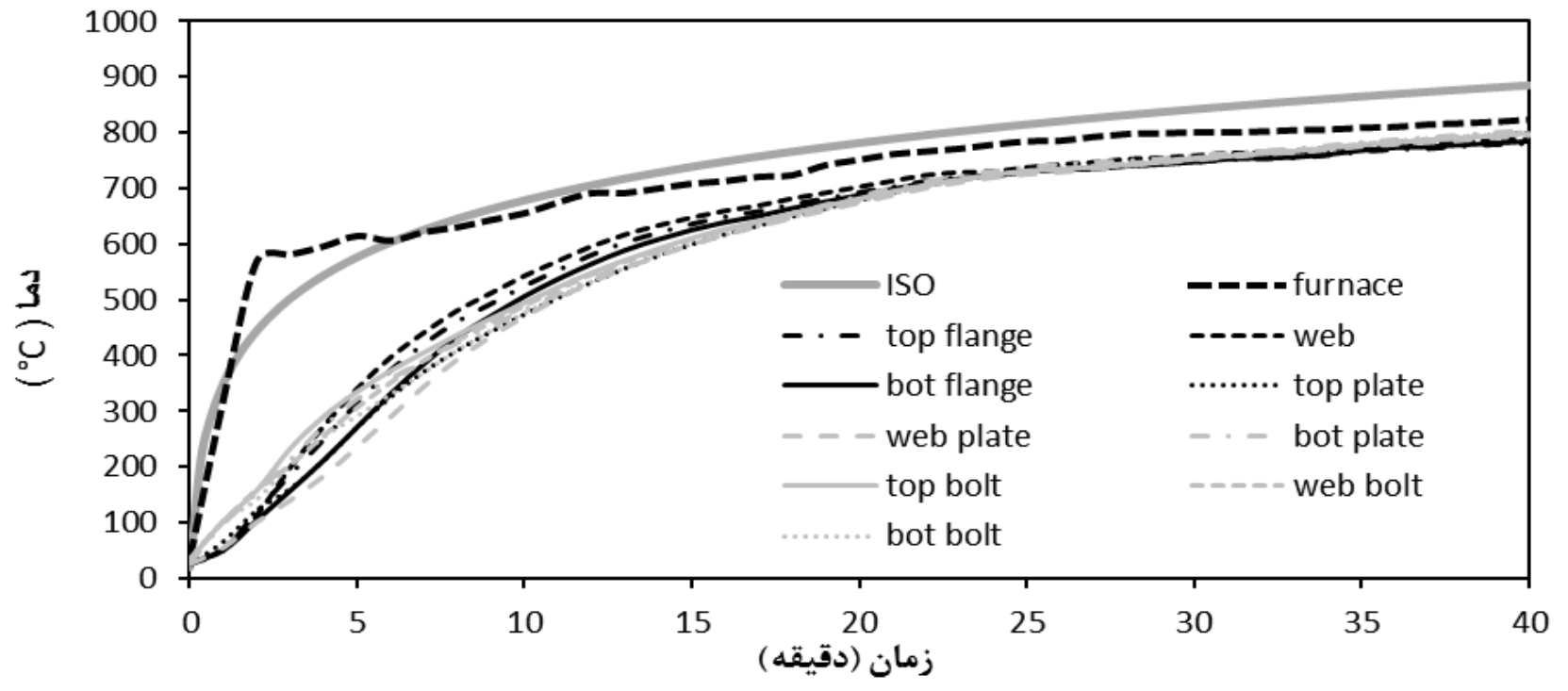
Material	Grade	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
Beam	S235	242	420	2.06×10^5
Plate	S235	296	442	2.06×10^5
Bolt	8.8	737	963	2.00×10^5

چیدمان ترموکوپلها و ترانس دیوسرهای جابجایی در اتصال وصله ای پیچی



روند انجام آزمایش شامل دو مرحله متوالی بود: ابتدا اعمال بارهای ثقلی ثابت و سپس روشن نمودن کوره و افزایش دما طبق استاندارد ISO 834 تا وقوع گسیختگی در اتصال تیر میانی به دستک. برای مشاهده توزیع دما در نمونه‌ها تعداد زیادی ترموکوپل تیپ k روی جان و بال تیر، ورقهای وصله، پیچ ها و قاب نگهدارنده نصب شده بود. ترانس‌دیوسرهای جابجایی نیز خیز وسط دهانه تیر و طرفین اتصال را از طریق میله‌های رابط سرامیکی اندازه‌گیری می‌نمودند.

نمودارهای ISO834، دمای کوره و توزیع دما در اتصال وصله ای پیچی



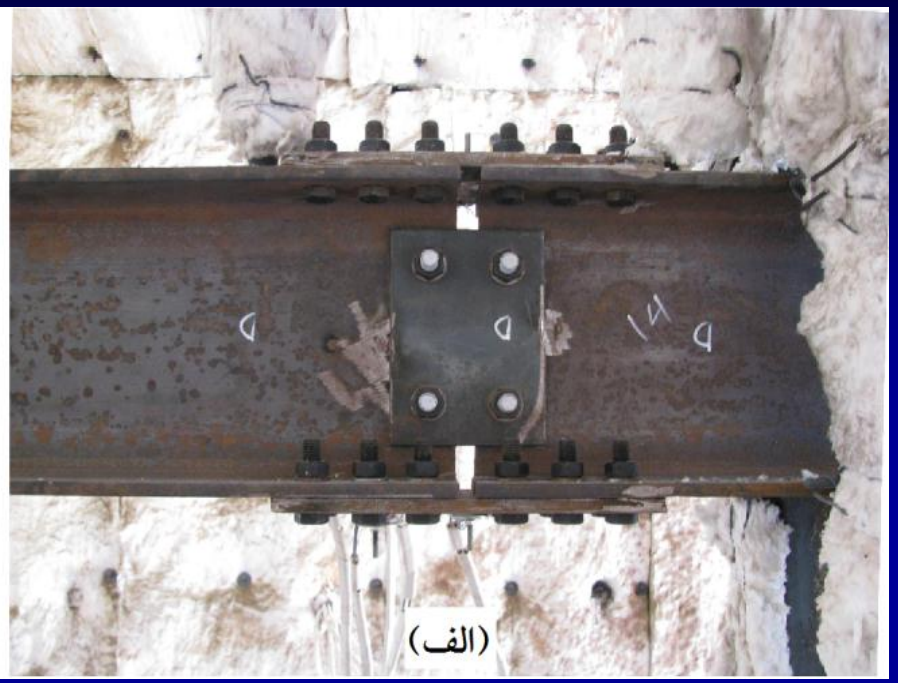
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دمای کوره به خوبی از منحنی استاندارد پیروی می‌نماید. تاریخچه دمایی نمونه شامل دمای جان و دو بال در وسط دهانه تیر و دمای ورق‌های وصله و پیچ‌های اتصال نیز در طول آزمایش اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که دمای اجزاء نمونه‌ها با اندکی اختلاف از روند مشابهی پیروی می‌کنند. اختلاف دما بین بال‌های بالا و پایین و همچنین بین اجزاء اتصال ناچیز بود. دمای میانگین قاب نگهدارنده نیز از ۱۶۷°C فراتر نرفت که بر خواص مکانیکی آن و عملکرد نمونه‌ها تأثیری نداشت.

مشاهده رفتار اتصال وصله ای پیچی در طول آزمایش

گسیختگی کامل اتصال　　گسیختگی برشی پیچ های بالایی　　برخورد بال های پایین

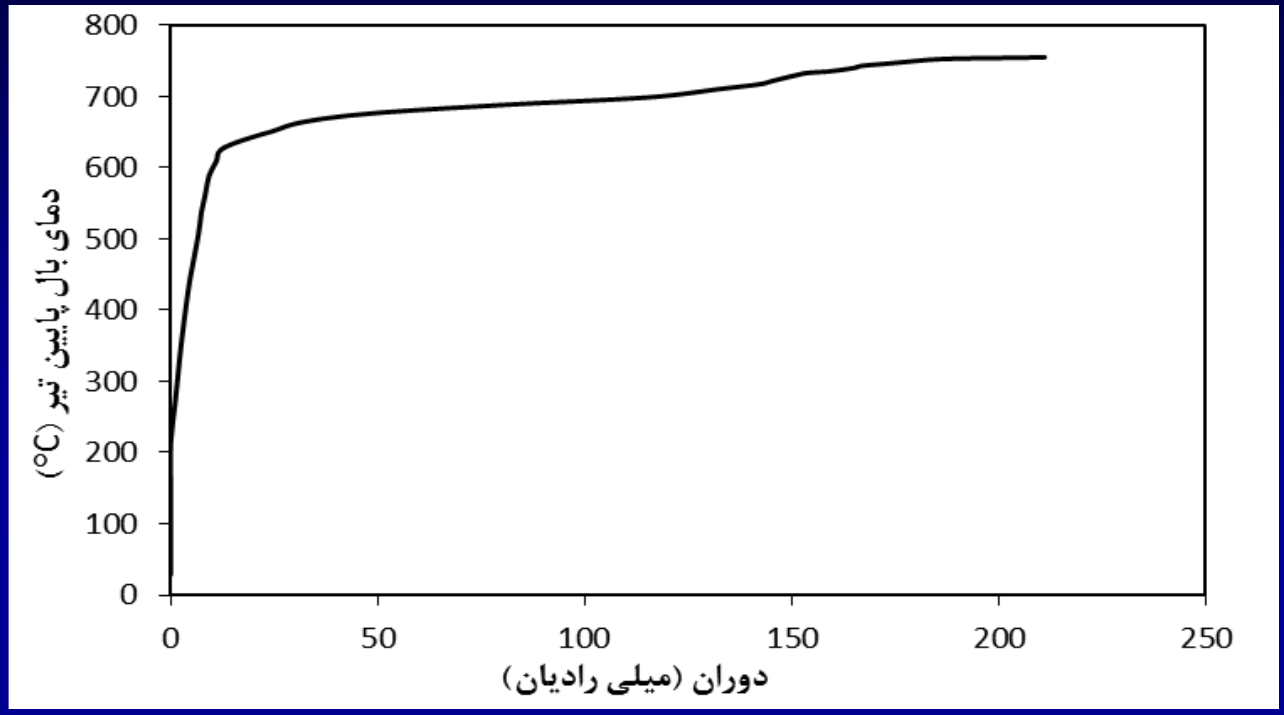
طی آزمایش مشاهده شد که نمونه منبسط گردیده و با فشردن پیچ‌ها به درون جداره سوراخ‌های جان و بال، درزهای بین تیر میانی و دستک‌ها را بستند. با افزایش دما سختی کاهش یافته و تیر دچار خیز قابل توجه‌ای شد. این خیز باعث دوران دو سر تیر میانی و فشار بال‌های پایین تیر میانی بر دستک‌ها گردید. سپس با زوال سختی فولاد و افزایش خیز، ادامه دوران دو سر تیر میانی باعث ایجاد کشش شدیدی در ورق وصله بال بالایی گردید. با افزایش دوران اتصال، تغییر شکل ناشی از لهیدگی در پیچ‌های بال بیشتر شده و تا گسیختگی کامل آنها پیش رفت.

مودهای خرابی اتصال وصله ای پیچی



خرابی‌ها به‌ترتیب در وصله بال بالا، وصله جان و وصله بال پایین اتصال رخ داد. همان‌گونه که مشاهده می-شود گسیختگی تک برشه پیچ‌های متصل‌کننده ورق وصله به بال بالایی دستک باعث خرابی اتصال شد. در جان دستک، برش قالبی از سوراخ‌های پیچ‌ها تا لبه دستک‌ها و در جان تیر میانی لهیدگی قابل توجه‌ای در جداره سوراخ‌ها رخ داده است. پیچ‌های جان نیز لهیدگی قابل توجه‌ای را تجربه نموده‌اند. آخرین مرحله خرابی به علت گسیختگی پیچ‌های وصله بال پایین بود. پیچ‌های مجاور درز اتصال، تغییر شکل‌های کششی و لهیدگی عمده‌ای را تجربه نموده و باریک‌شدگی بدنه پیچ‌ها قبل از گسیختگی مشاهده گردید

نمودار دما-دوران اتصال وصله ای پیچی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی



دوران اتصال با دما در سه فاز رخ داده است. در ابتدا رفتار تقریباً خطی بود. با افزایش دما تیر تمایل به انبساط داشت اما قاب نگهدارنده ممانعت کرده و درزهای بین تیر و دستک‌ها در محل اتصالات شروع به بسته‌شدن نمودند. سپس در دمای حدود ۶۰۰°C رفتار اتصال وارد فاز غیرخطی شد و تغییر شکل برشی پلاستیک پیچ-های بال و لهیدگی جداره سوراخ‌ها شروع شد. این مرحله با دوران شدید اتصال و خیز پیش‌رونده تیر میانی همراه بود. سرانجام در دماهای بالاتر از ۷۰۰°C، نمودار کاهش در نرخ دوران اتصال را نشان داد.

نتیجه گیری

- مقایسه رفتار اتصالات با نبشی جان و بدون نبشی جان نشان داد که با توجه به گسیختگی کششی زود هنگام جوش ها، استفاده از نبشی جان و افزایش سختی اتصال نتوانست تأثیری در مقاومت حرارتی اتصال داشته باشد. حال از آنجا که محاسبه اثر این گسیختگی زود هنگام روی ظرفیت اتصال کار مشکلی است بهتر است برای استفاده از ظرفیت کامل کششی اتصال، جوش ها قوی تر طراحی شوند.

- براساس استاندارد ASTM E119 حد بالایی دما برای تیرهای فولادی تحت خمش برابر 538 درجه سانتیگراد است، با توجه به این که در این دما اتصالات هنوز مقاومتی برابر ۵۰ درصد مقاومت جاری شدن خود را دارا می باشند. در محدوده این تحقیق می توان نتیجه گرفت که اتصالات نیمه صلب نبشی جوشی در همان شرایط دمایی گسیخته می شوند که خرابی قاب انتظار می رود.

- آزمایش اتصالات صلب وصله ای پیچی نشان داد که نمودارهای دما-دوران اتصال تا دمای حدود 600 درجه سانتیگراد در محدوده الاستیک باقی می ماند و سپس رفتار به شدت پلاستیک غیرخطی می شود. همچنین مودهای خرابی اتصالات تیر میانی به دستک ها در سیستم قاب خمشی پیچی بدست آمد. گسیختگی برشی پیچ های وصله بال فوقانی در دماهایی بالاتر از 750درجه سانتیگراد اتفاق افتاد. همزمان گسیختگی برشی از سوراخ های جان تا لبه دستک مشاهده گردید. افزایش رده یا اندازه پیچ های وصله بال در طراحی اتصال می تواند باعث بهبود تاب حرارتی و ظرفیت دورانی اتصالات وصله ای پیچی تیر شوند.