

ارزیابی اثر جنس مصالح بر رفتار پس از آتش اتصالات صلب پیچی با ورق انتهایی

محمدجواد نجارنصب^۱، نوید سیاه پلو^{۲*}، روح اله راه نورد^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز

۲- استادیار، مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز

* اهواز، صندوق پستی ۶۱۳۵۵-۱۳۶، siahpolo@acecr.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۴)

چکیده

اتصال تیر به ستون نقش بسیار مهمی در رفتار سازه‌های فولادی تحت بارهای مختلف دارد. اتصال صلب در قاب‌های خمشی فولادی، نقش ویژه‌ای در رفتار این سازه‌ها دارد. همچنین مقاومت و پایداری این اتصالات تحت اثر آتش‌سوزی می‌تواند حائز اهمیت باشد. در این میان، جنس فولاد مصرفی در اتصال بسیار مهم و بررسی آن ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله رفتار ۹ اتصال خمشی فولادی با ورق انتهایی فولادی تحت اثر حرارت‌های مختلف با استفاده از روش اجزاء محدود و با بکارگیری نرم‌افزار ABAQUS ارزیابی شده‌اند. این اتصالات بر اساس سه نوع فولاد طراحی، مدل سازی و تحلیل شده‌اند. روش مدل‌سازی عددی با استفاده از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی در محدوده‌های الاستیک و پلاستیک رفتار اتصال صحت سنجی شده است. تحلیل‌های عددی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی هندسی و غیرخطی مصالح انجام پذیرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از سخت کننده ظرفیت اتصال و عملکرد آن را تحت اثر حرارت بهبود می‌بخشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شیب کاهش ظرفیت خمشی در اتصالات با سخت کننده در همه دماهای وارده، ملایم و تقریباً ثابت است. هرچند مشاهده شد که شیب کاهش ظرفیت اتصال با و بدون سخت شونده که با فولاد کم مقاومت طراحی شده از دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه از سایر اتصالات کمتر است، که نشانگر عملکرد بهتر این اتصال است.

واژگان کلیدی

فولاد پرمقاومت، اتصال با ورق انتهایی، ظرفیت خمشی، دوران اتصال

Evaluation of Steel Material Effect on Post-Fire Behavior of End Plate Connections

M.J. Najarnasab, N. Siahpolo, R. Rahnvard

Abstract

A beam-to-column connection has a significant role in the behavior of steel structure under the effect of verity loads. Rigid connection in steel moment frame has a special role in the behavior of these structures. Moreover, the fire resistance of these connections can be important. Among these parameters, steel material used in the connection is important and its investigation seems necessary. In this article, the behavior of 9 steel moment end-plate connections under the effect of various degrees of temperatures was studied using finite element methods through ABAQUS software. The connections have been designed, modeled and analyzed using three types of steel materials. The models verified by the use of an experimental model through elastic and plastic amplitudes up to collapse and during numerical results, the effect of large deformation in the nonlinear region has also been considered. The results of this study show that using of the stiffeners improves connection capacity and performance. The results of this study show that declined slope of moment capacity of connection with stiffener coming in all temperatures and is almost smooth and constant. However, it observed that the declined slope of moment capacity of connection with and without stiffener which designed with low strength steel was less than other connections during 800 to 900 degree which shows better performance of this connection.

Keywords

High strength steel, Endplate connection, Moment capacity, Connection rotation

وظیفه‌ی عمده اتصالات انتقال نیروها از تیر به ستون و تحمل این نیروها است. بسیاری از طراحان برای محاسبه و طراحی اتصالات از یک سری ساده‌سازی‌ها استفاده می‌کنند که اتصال را ساده، نیمه صلب و یا گیردار فرض می‌کنند. اگرچه این ساده‌سازی‌ها تحلیل و طراحی را به صورت قابل ملاحظه‌ای آسان می‌کند ولی در واقعیت، رفتار این اتصالات از نظر درصد گیرداری همیشه دارای مقداری بین این حدود است، مثلاً اکثر اتصالاتی که ساده فرض می‌شوند، دارای سختی دورانی و اتصالات صلب نیز دارای اندکی انعطاف پذیری هستند.

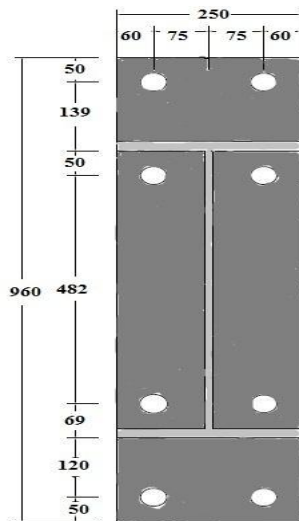
این روش‌های طراحی برای حالت‌های اتصال در دمای معمولی می‌تواند مناسب باشد، ولی زمانی که آتش‌سوزی اتفاق می‌افتد، رفتار اتصالات تغییر یافته و تاثیر بیشتری بر رفتار سازه می‌گذارد و اگر رفتار اتصال در چنین مواقعی به درستی بررسی نگردد، ممکن است اعتبار طراحی از بین رفته و به دنبال آن آسیب‌های جدی به سازه وارد شود. بعد از حادثه‌ی برج‌های تجارت جهانی و برخورد هواپیمای گول پیکر به ساختمان‌ها، می‌توان دریافت که علی‌رغم اینکه این ساختمان‌ها برای بارهای بسیار شدید طراحی شده بودند و در برابر بار ناشی از برخورد هواپیمای گول پیکر مقاومت نشان دادند ولی در برابر حرارت ناشی از انفجار بعد از آن ضعیف عمل کردند و ساختمان‌ها فرو پاشیدند [۱ و ۲].

در گذشته بسیاری از محققین بر روی اثر آتش و حرارت بر سازه‌های فولادی مطالعاتی انجام داده‌اند و حاصل کار آن‌ها چندین تست آزمایشگاهی بوده است ولی به علت هزینه بر بودن این آزمایش‌ها و همچنین نبودن امکانات کامل آزمایشگاهی، استفاده از روش‌های عددی اجتناب ناپذیر بوده است. Daryan و همکارانش (۱۳۹۱) آزمایشاتی در مورد اتصالات ساده با نبشی نشمین، در دو حالت جوش شده و پیچ شده انجام داده‌اند [۳-۵]. Lawson (۱۹۹۰) به بررسی آزمایشگاهی اتصال صلب فولادی تحت اثر آتش پرداخت. نتایج او نشان داد که رفتار اتصال با پوشش بتن بر ناحیه اتصال در برابر آتش بهبود می‌یابد [۶]. Rahnavaad و همکارانش (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹) به بررسی عددی سه نوع اتصال صلب رایج فولادی شامل اتصال پیچی با صفحه انتهایی^۱، اتصال با ورق پوششی پیچ شده^۲ و اتصال با سپری پیچ شده^۳ پرداختند و نحوه‌ی مدل‌سازی حرارت را در نرم افزار اجزای محدود Abaqus [۷] بیان نمودند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که صفحه انتهایی و اتصال با سپری پیچ شده

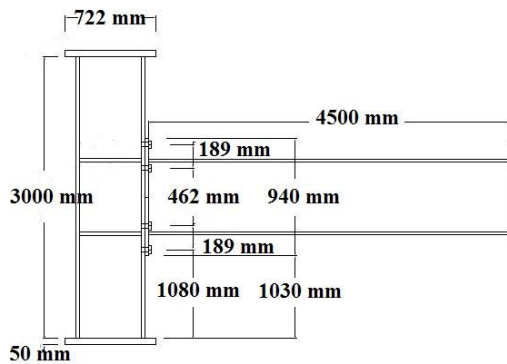
نسبت به اتصال با ورق پوششی پیچ شده دوام بیشتری دارد [۸-۱۶]. Garlock و Selamet (۲۰۱۰) با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی اتصال ساده فولادی پرداختند. مطالعات او نشان داد که مقاومت پیچ‌ها و قطر سوراخ‌ها در رفتار اتصالات ساده فولادی بسیار حائز اهمیت است [۱۷]. Karogelopoulos و Drosopoulos (۲۰۱۲) با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Abaqus یک اتصال صلب پیچی با صفحات انتهایی را مدل‌سازی کرد و تاثیر پارامترهایی همچون بارهایی مکانیکی، مقاومت پیچ‌ها، ضریب اصطکاک و سوراخ‌های پیچ را مورد ارزیابی قرار داد [۱۸]. Santiago و Silva (۲۰۰۶) چندین مدل آزمایشگاهی از اتصال صلب با صفحه انتهایی ساختند و مود خرابی و تغییر مکان وسط تیر را در این مدل‌ها با هم مقایسه کردند [۱۹]. Memari و همکارانش (۲۰۱۵) به بررسی اتصالات با مقطع بال کاهش یافته تحت اثر حرارت پرداختند. ایشان ابتدا سازه را تحت اثر زلزله سپس آن را تحت اثر حرارت مورد ارزیابی قرار دادند [۲۰]. در سال‌های اخیر تحقیقاتی بر روی اثر رفتار اتصالات بعد از حرارت نیز انجام شده است [۲۱-۲۹]. XuHong و همکارانش (۲۰۱۵) رفتار پس از حرارت را برای اتصال با ورق انتهایی پیچ شده با چند مدل آزمایشگاهی را بررسی کردند. ایشان فولاد با مقاومت بالا را برای این تحقیق بررسی کردند [۲۱]. Turk و همکارانش (۲۰۰۷) رفتار قاب‌های فولادی تحت اثر حرارت را بررسی کردند. نتایج ایشان اهمیت ستون‌های مختلف و عملکرد هرکدام از ستون‌ها را در قاب فولادی تحت اثر آتش بیان می‌کند [۲۲]. Suleiman و همکارانش (۲۰۱۷) به بررسی اتصال مفصلی با نبشی پیچ شده به جان تیر در یک طرف تحت اثر حرارت پرداختند. ایشان به بررسی انواع مودهای خرابی در این نوع اتصالات پرداختند [۲۳].

در گذشته مطالعات زیادی در خصوص هندسه و نحوه چینش پیچ‌ها در اتصال با ورق انتهایی صورت گرفت که عمدتاً در حین آتش‌سوزی مورد ارزیابی قرار گرفتند. از نواقص مطالعات قبلی می‌توان به عدم بررسی جنس مصالح فولادی بر رفتار این اتصالات حین و بعد از آتش می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود و با به کارگیری نرم افزار Abaqus اتصالات فولادی با ورق انتهایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از آنجایی که جزئیات هندسی و جنس مصالح اتصال با ورق انتهایی تاثیر مهمی بر روی رفتار این اتصال تحت اثر حرارت (بعد از آتش‌سوزی) دارد لذا بررسی دقیق آن





شکل ۲- ابعاد ورق انتهایی (میلی متر)



شکل ۳- هندسه مدل‌ها

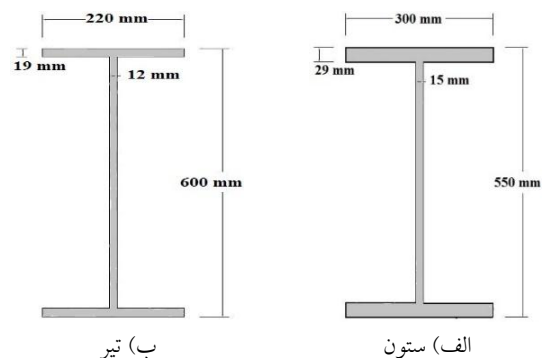
جدول ۱- جزئیات مدل‌ها

شماره مدل	نام مدل	ضخامت ورق انتهایی (میلی متر)	گرید فولاد ورق انتهایی	ضخامت سخت کننده (میلی متر)
۱	4E-TH30-Q345	۳۰	Q345	-
۲	4ES-Th18-Q345	۱۸	Q345	۱۰
۳	4E-Th20-S690	۲۰	S690	-
۴	4E-Th25-S690	۲۵	S690	-
۵	4E-Th35-S690	۳۵	S690	-
۶	4ES-Th20-S690	۲۰	S690	۱۰
۷	4ES-Th13-S690	۱۳	S690	۱۰
۸	4E-Th18-S960	۱۸	S960	-

ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه روش مدل‌سازی با جزئیات کامل شرح داده شده است. کلیه اتصالات مورد نظر در این مقاله برای یک لنگر یکسان طراحی شده اند و اثر جنس مصالح فولادی بر ظرفیت خمشی و دوران اتصال تحت اثر حرارت بررسی می‌شود. هم چنین اثر سخت کننده بر رفتار اتصالات بررسی می‌گردد.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود

برای بررسی دقیق اثر حرارت بر اتصالات پیچی فولادی از روش اجزای محدود استفاده گردیده است. نرم افزار اجزای محدود Abaqus برای انجام این کار بسیار مناسب است، هرچند مدل‌سازی نمونه‌های با پیچیدگی هندسی بسیار دشوار می‌باشد. با توجه به اینکه حرارت در سازه‌های ساخته شده اتفاق می‌افتد، لذا لازم است اتصالات پیچی قبل از مدل‌سازی طراحی گردد. در این مطالعه ابتدا کلیه اتصالات با توجه به الزامات آیین‌نامه‌ای [۳۰ و ۳۱] طراحی سپس با نرم افزار Abaqus مدل‌سازی شده‌اند. در این مطالعه تمامی مدل‌ها برای ظرفیت خمشی یکسان طراحی شده است. در کلیه مدل‌ها، طول تیر و ارتفاع ستون به ترتیب ۹ و ۳ متر است. ابعاد هندسی تیر و ستون و جزئیات ورق انتهایی به ترتیب در شکل (۱) و (۲) نشان داده شده است. به علاوه در شکل (۳) هندسه جانبی مدل‌ها شامل طول تیر و ارتفاع ستون برای مدل‌سازی عددی نمایش داده شده است. هم چنین برای راستی آزمایشی نتایج، مدل عددی بر اساس نمونه آزمایشگاهی ساخته شده است. در نمونه صحت سنجی مرجع [۲۹] برای مدل سازی تیر از مقطع HW300x300 و ستون‌ها HW400x400 استفاده شده است. هم چنین جزئیات کلیه مدل‌های مورد ارزیابی در این پژوهش در جدول (۱) آمده است. در جدول (۱) مدل‌های با سخت کننده (4ES) و بدون سخت کننده (4E) با ضخامت ورق انتهایی (TH) و نوع فولاد استفاده شده (به عنوان مثال Q345) نشان داده شده است.



شکل ۱- ابعاد هندسی مدل‌های تحقیق

۲-۱- جزئیات مدل‌سازی

در این مطالعه ۹ نمونه اتصال با ورق انتهایی پیچ شده با و بدون سخت کننده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که تحت ۴ نوع حرارت محیط (۲۰ درجه)، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه قرار می‌گیرند. خصوصیات مصالح و ضخامت ورق انتهایی در مدل‌ها متغیر است هرچند که کلیه مدل‌ها برای ظرفیت خمشی یکسان طراحی شده است. تمامی قطعات تیر، ستون و پیچ‌ها به صورت سه بعدی و با ابعاد واقعی با استفاده از المان شش وجهی C3D8T مدل‌سازی شده‌اند. این المان دارای هشت گره است که هر گره سه درجه آزادی انتقالی دارد. برای آنالیز این مدل‌ها از تحلیل استاتیکی ترکیبی حرارت-جابجایی^۴ استفاده شده است که برای تحلیل مسایل حرارت بسیار مناسب است [۱۶-۱۰].

۲-۲- خصوصیات مصالح

خصوصیات مدل شامل خاصیت غیرخطی مصالح، رفتار غیرخطی هندسی و تحلیل غیرخطی می‌باشد. در استفاده از تمام اجزاء فولادی از خاصیت الاستو-پلاستیک مصالح استفاده شده است. خاصیت غیر خطی مصالح در Abaqus مستلزم بهره‌گیری از تنش واقعی متناظر با کرنش حد پلاستیک از رابطه تنش-کرنش مهندسی است. برای تعریف نمودار تنش-کرنش هر تعداد نقطه می‌تواند استفاده شود. بنابراین می‌توان با تقریب خوبی به رفتار واقعی مصالح دست یافت. رفتار مصالح تا حد تنش تسلیم به صورت الاستیک است. پس از آن وارد فاز سخت شدگی کرنشی تا حد رسیدن به تنش نهایی می‌شوند. حد مرحله الاستیک نمودار تنش-کرنش از طریق منوی Elastic تعریف می‌شود. که در آن مدول یانگ برابر است با $2/1 \times 10^5$ نیوتن بر میلی متر مربع و ضریب پواسون برابر است با ۰/۳ است. بخش پلاستیک نمودار تنش-کرنش فولاد از طریق منوی Plastic تعریف می‌شود. هم چنین کاهش ضریب الاستیسیته مصالح و نمودار تنش-کرنش ناحیه پلاستیک با دما در نظر گرفته شده است [۱۶-۱۰]. هم چنین ضریب افزایش طول متناسب با تغییرات دمای مدل در نظر گرفته شده است. در این مطالعه از فولاد Q345، S690 و S960، براساس استاندارد Eurocode-3 [۳۰] در تمام اجزاء سازه‌ای استفاده گردیده است. جدول (۲) خصوصیات مکانیکی این نوع فولادها را نشان می‌دهد.

۲-۳- شرایط مرزی و مش بندی

در این مطالعه برای تعریف شرایط مرزی، دو انتهای ستون به صورت گیردار تعریف شده است. این تکیه‌گاه از جابجایی

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی مصالح [۲۹]

مصالح	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)
Q345	۲۱۰۰۰۰	۳۴۵	۴۳۲
S690	۲۱۰۰۰۰	۶۹۰	۸۱۰
S960	۲۱۰۰۰۰	۹۶۰	۱۱۱۰

گره‌های سطح مقطع دو انتهای ستون جلوگیری می‌کند. از آنجایی که به دلیل تقارن نیمی از نمونه مورد نظر مدل‌سازی شده است، لذا انتهای تیر نیز تکیه‌گاه متقارن XSYMM استفاده شد (شکل (۴)). این تکیه‌گاه، جابجایی را در جهت طولی تیر محدود کرده و حالت تقارن را برای مدل ایجاد می‌کند.

جهت مشخص کردن اندازه مش در هر یک از بخش‌های سیستم مورد مطالعه، آنالیز حساسیت مش انجام گردید. جهت این امر اندازه‌ی مش در بخش‌های مختلف سیستم مورد مطالعه تغییر داده شد و برای تغییرات مذکور نمودار لنگر-دوران بدست آمد. برای مقایسه نتایج آنالیز حساسیت مش نمودار لنگر دوران در شماره مورد ۱ تا ۴ مطابق جدول (۳) با نمونه آزمایشگاهی مقایسه شد. با توجه به خطاهای به دست آمده در جدول (۳)، اندازه مش بندی بر اساس حالت شماره ۳ برای کلیه مدل‌ها تعیین گردید. هم‌چنین نوع المان مش بندی سازه مطابق المان‌های گفته شده در قسمت قبل انجام گردید.

جدول ۳- ابعاد مش و آنالیز حساسیت

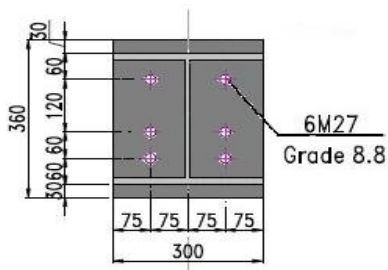
شماره مورد	حداقل اندازه مش (میلی متر)			خطا (درصد)
	تیر	ستون	پیچ	
۱	۶۰	۶۰	۲۰	۱۵
۲	۳۰	۳۰	۱۰	۱۲
۳	۵	۵	۵	۲/۵
۴	۳	۳	۳	۲/۵

شکل (۴) نمونه مدل عددی ساخته شده براساس مرجع [۲۹] را نشان می‌دهد. هم چنین مش بندی نمونه عددی در شکل (۵) نشان داده شده است.

۲-۴- صحت سنجی

انجام مدل آزمایشگاهی با مقیاس واقعی جهت ارزیابی رفتار اتصالات مشکل و بسیار هزینه بردار است. روش اجزای محدود یک گزینه‌ی مناسب جهت بررسی اتصالات پیچی است که



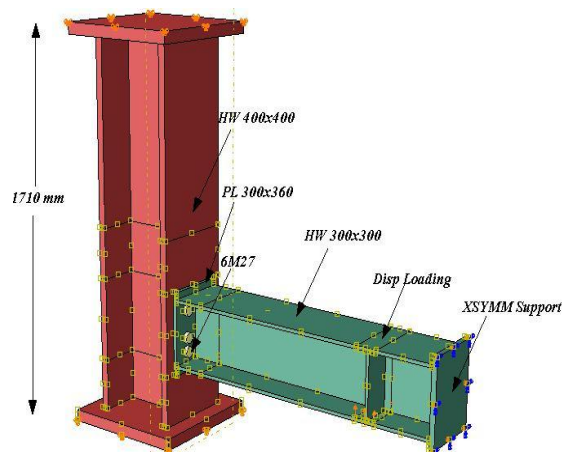


شکل ۷- جزئیات ورق انتهایی (میلی متر) [۲۹]

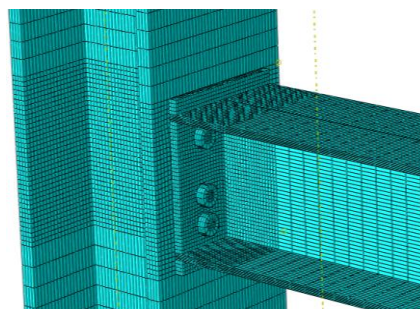
در مدل آزمایشگاهی ابتدا به اتصال تا از دمای محیط (۲۰ درجه) نرخ افزایش حرارت ۱۰ درجه در دقیقه به صورت پیوسته حرارت وارد می‌شود تا زمانی که حرارت ۵۵۰ درجه اعمال شود. بعد از رسیدن به دمای ۵۵۰ درجه دمای حرارت ثابت می‌ماند، سپس اعمال حرارت متوقف می‌شود و اتصال شروع به سرد شدن می‌کند تا مجدداً به دمای محیط می‌رسد. پس از آن به وسیله جک هیدرولیکی تا لحظه گسیختگی به انتهای تیر جابجایی وارد می‌شود. شکل (۸) مقایسه تغییر شکل مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی [۲۹] در پایان بارگذاری را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود نحوه تغییر شکل در کلیه قطعات نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی مشابه و نزدیک بهم است. هم‌چنین شکل (۹) مقایسه نمودار لنگر-دوران را برای مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که حداکثر لنگر در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به ترتیب ۲۴۵ و ۲۵۰ کیلو نیوتن-متر می‌باشد که نشانگر اختلاف ۲/۵ درصدی است. هم‌چنین حداکثر لنگر برای هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی در دوران ۲۲۰ میلی‌رادیان رخ داده است. بنابراین این مدل دارای دقت کافی جهت انجام تحلیل اتصالات تحت اثر حرارت می‌باشد. هم‌چنین برای مطالعه بیشتر روش راستی‌آزمایی و صحت‌سنجی مدل‌های بیشتر، می‌توان به مرجع [۱۱] مراجعه نمود.

۳- تحلیل و بررسی نتایج

در این مطالعه چندین اتصال با ورق انتهایی پیچ شده با و بدون سخت کننده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. خصوصیات مصالح و ضخامت ورق انتهایی در مدل‌ها متغیر است، هرچند که کلیه مدل‌ها برای ظرفیت خمشی یکسان طراحی شده است.

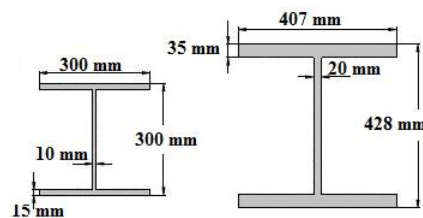


شکل ۸- نمونه مدل عددی ساخته شده بر اساس [۲۹]



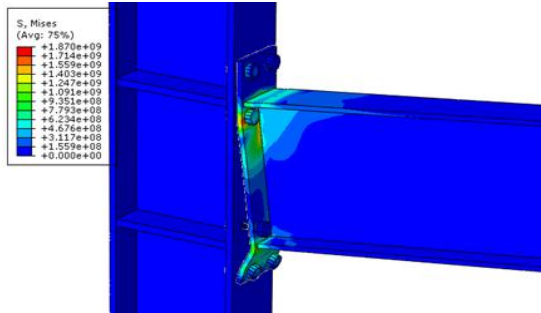
شکل ۹- مش بندی مدل عددی

با استفاده از آن می‌توان انواع این مدل‌ها را تحت اثر حرارت ارزیابی کرد. از این رو برای صحت‌سنجی مدل‌های مورد نظر در این مطالعه، یک نمونه آزمایشگاهی مطابق شکل (۴) در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی گردید. این مدل بر اساس اتصال استفاده شده در آزمایش Qiang و همکارانش [۲۹] مدل گردیده است. اندازه مقطع ستون و تیرها برابر با HW400x400 و HW300x300 می‌باشد. شکل (۶) جزئیات مقاطع تیر و ستون مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل (۷) جزئیات ورق انتهایی و محل قرارگیری پیچ‌ها را نشان می‌دهد [۲۹].

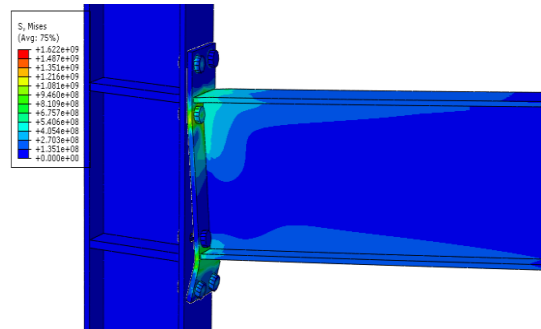


شکل ۶- جزئیات مقطع ستون و تیر [۳۲]

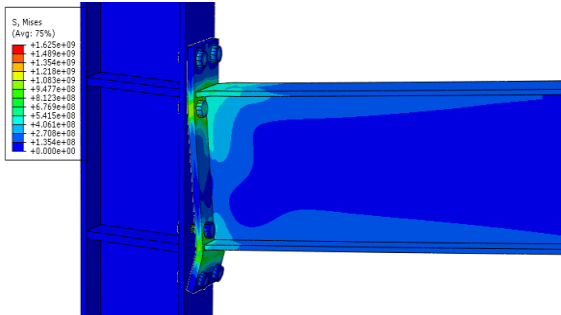
می‌شود حداکثر تنش فون مایسز در مدل با ضخامت ۲۰ میلی‌متر (مدل ۴) ۱۸۷۰ مگاپاسکال بوده و از بقیه نیز بیشتر است. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت ورق در هر دو مدل ۴ و ۵ نسبت به مدل ۳، تنش فون مایسز ۱۶٪ کاهش یافته است. هم چنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق تغییر شکل ورق انتهایی در ناحیه اتصال با بال تحتانی تیر کمتر شده است.



الف) مدل 4E-Th20-S690



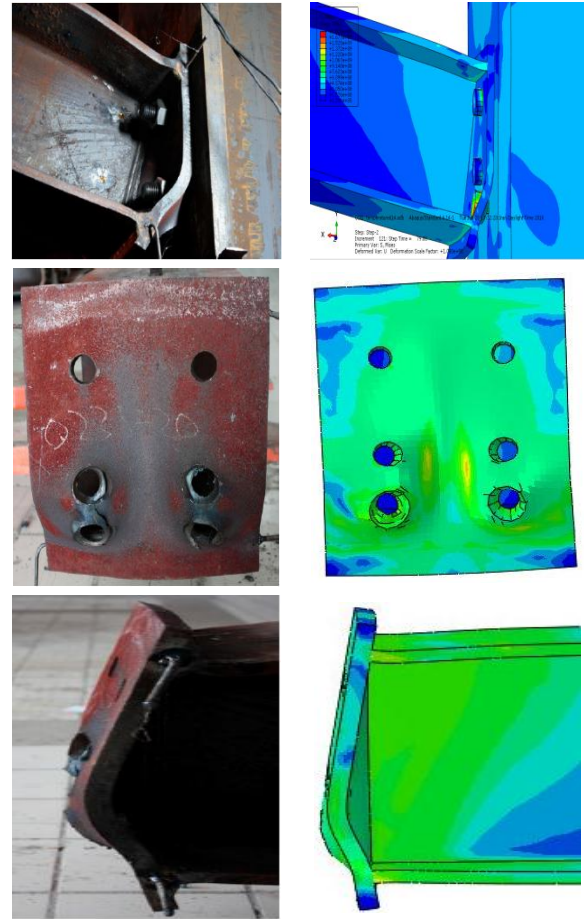
ب) مدل 4E-Th25-S690



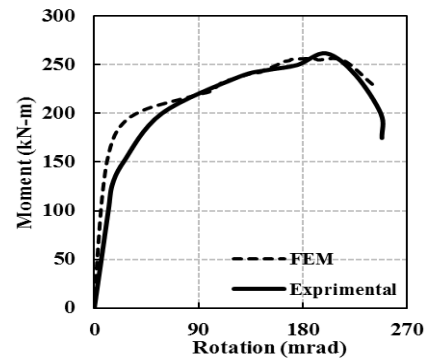
ج) مدل 4E-Th35-S690

شکل ۱۰- تنش فون مایسز

شکل (۱۱) مقایسه معیار فون مایسز در اتصال با ورق انتهایی برای دو حالت با و بدون سخت کننده با مصالح Q345 (مدل ۱ و ۲) را تحت حرارت ۶۰۰ درجه نشان می‌دهد. البته باید توجه شود که این دو برای یک بار یکسان طراحی شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود حداکثر تنش در مدل بدون سخت



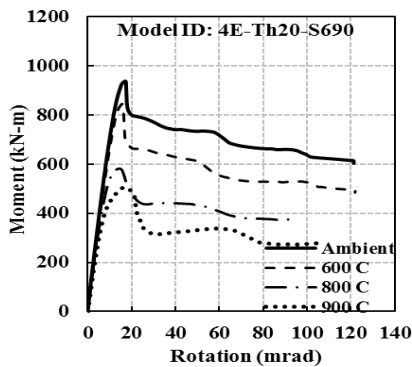
شکل ۸- مقایسه تغییر شکل در مدل عددی و آزمایشگاهی [۲۲]



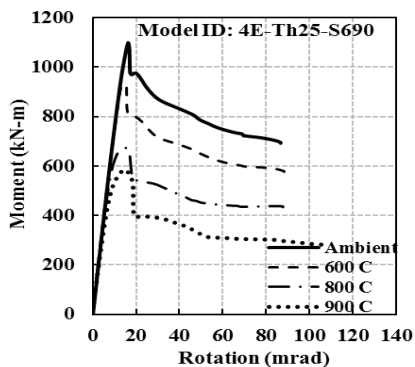
شکل ۹- مقایسه نمودار لنگر-دوران در مدل عددی و آزمایشگاهی [۲۹]

۳-۱- تنش و تغییر شکل اتصال

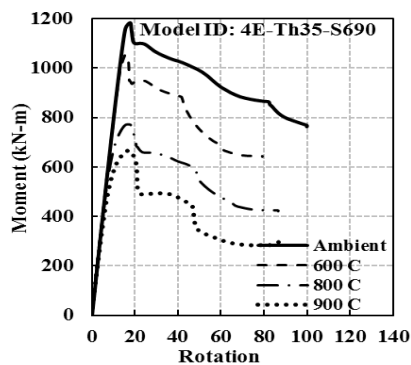
در این بخش توزیع تنش، اندازه تنش و تغییر شکل مدل‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد. شکل (۱۰) معیار فون مایسز برای مدل با ورق انتهایی پیچ شده بدون سخت کننده با مصالح S690 در سه ضخامت ۲۰، ۲۵ و ۳۵ (مدل‌های شماره ۳، ۴ و ۵) را تحت حرارت ۶۰۰ درجه نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده



4E-Th20-S690 مدل (الف)



4E-Th25-S690 مدل (ب)

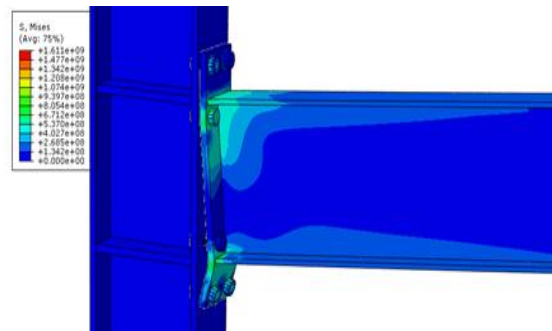


4E-Th35-S690 مدل (ج)

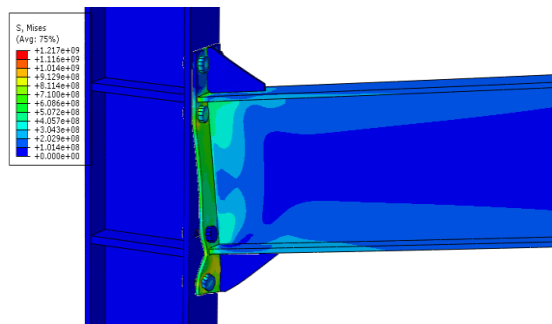
شکل ۱۲- نمودار لنگر-دوران

با توجه به شکل نشان داده شده است که با افزایش حرارت از دمای محیط به ۶۰۰ درجه حداکثر لنگر در مدل با ورق انتهایی با ضخامت ۲۰، ۲۵ و ۳۵ میلی متر به ترتیب ۱۱٪، ۱۰٪ و ۹٪ کاهش یافته است، این در حالی است که با افزایش حرارت از دمای محیط به ۸۰۰ درجه حداکثر لنگر ۳۸٪، ۳۵٪ و ۳۰٪ کاهش مشاهده روبرو می‌شود. هم چنین از نمودارهای شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش حرارت از دمای محیط به ۹۰۰ درجه حداکثر لنگر به ترتیب ۴۷٪، ۴۵٪ و ۴۱٪ کاهش یافته است. با توجه به نتایج فوق می‌توان دریافت که افزایش دما

کننده و با سخت کننده به ترتیب ۱۶۱۱ و ۱۲۱۷ مگاپاسکال بوده که نشان می‌دهد استفاده از سخت کننده (مدل ۲) تنش را تا ۲۵٪ کاهش داده است. هم چنین با مقایسه تغییر شکل در اتصال با ورق انتهایی برای دو حالت با و بدون سخت کننده با مصالح Q345 (مدل ۱ و ۲) مشاهده گردید که در حالت بدون سخت کننده (مدل ۱) در کل ورق انتهایی تغییر شکل رخ می‌دهد ولی در حالت با سخت کننده (مدل ۲) تغییر شکل بیشتر به صورت موضعی در ناحیه اتصال بال تیر به ورق رخ می‌دهد.



4E-Th30-Q345 مدل (الف)



4ES-Th13-Q345 مدل (ب)

شکل ۱۱- تنش فون مایسز

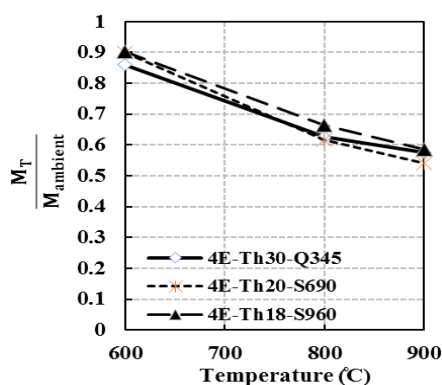
۳-۲- نمودار لنگر-دوران

در این بخش به ارزیابی نمودار لنگر-دوران اتصالات مورد تحقیق در این مقاله پرداخته می‌شود. نمودار لنگر-دوران یکی از پارامترهای مهم در بررسی رفتار اتصالات می‌باشد که در آن می‌توان حداکثر لنگر و دوران متناظر با آن و به طبع ظرفیت خمشی را به دست آورد. ظرفیت خمشی واقعی اتصال برابر با حداکثر ظرفیت فرائت شده از روی نمودار لنگر دوران می‌باشد. شکل (۱۲) نمودار لنگر-دوران برای مدل با ورق انتهایی پیچ شده بدون سخت کننده با مصالح S690 در سه ضخامت ۲۰، ۲۵ و ۳۵ (مدل‌های شماره ۳، ۴ و ۵) را تحت چهار نوع حرارت محیط (۲۰ درجه)، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه نشان می‌دهد.

۳-۳- اثر خصوصیات مصالح بر لنگر و دوران اتصال

اتصال‌های فولادی باید هنگام مواجهه با آتش بتوانند سهم قابل توجهی از ظرفیت خمشی خود را حفظ کنند تا از خسارت‌های دیگر در سازه جلوگیری کنند. در این بخش شش اتصال شامل سه اتصال با ورق سخت کننده و سه اتصال بدون ورق سخت کننده بررسی می‌شود. این اتصالات برای سه نوع مصالح مختلف طراحی شده اند ولی ظرفیت خمشی آنها یکسان است.

شکل (۱۴) نسبت لنگر قابل تحمل تحت اثر حرارت مختلف به لنگر اتصال تحت شرایط محیطی $\left(\frac{M_T}{M_{Ambient}}\right)$ را برای اتصالات با ورق انتهایی بدون سخت کننده نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در دمای ۶۰۰ درجه نسبت $\frac{M_T}{M_{Ambient}}$ برای دو اتصال 4E-Th18-S960 و 4E-Th20-S690 یکسان و برابر ۰/۸۶ می‌باشد. هم چنین در دمای ۸۰۰ درجه نسبت $\frac{M_T}{M_{Ambient}}$ برای دو اتصال 4E-Th30-Q345 و 4E-Th20-S690 یکسان و برابر ۰/۶۲ و برای اتصال 4E-Th18-S960 برابر ۰/۷۷ می‌باشد. به همین ترتیب در دمای ۹۰۰ درجه این نسبت برای دو اتصال 4E-Th30-Q345 و 4E-Th18-S960 یکسان و برابر ۰/۶ و برای اتصال 4E-Th20-S690 برابر ۰/۵۴ می‌باشد. با بررسی دقیق شکل (۱۴) می‌توان دریافت که از دمای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه کاهش ظرفیت خمشی اتصالات با شدت صورت می‌گیرد ولی از دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه شیب کاهش ظرفیت خمشی ملایم‌تر است. هم چنین مشاهده می‌شود که طراحی براساس جنس مصالح بر حداکثر لنگر اتصالات در دماهای مختلف تفاوت محسوسی ندارد.

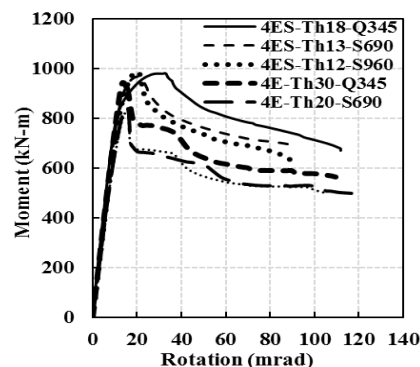


شکل ۱۴- نمودار نسبت ظرفیت خمشی اتصال بدون سخت کننده تحت حرارت

شکل (۱۵) نسبت $\left(\frac{M_T}{M_{Ambient}}\right)$ را برای اتصالات با ورق انتهایی به همراه سخت کننده نشان می‌دهد. همانگونه که

تا ۶۰۰ درجه تاثیر کمی بر ظرفیت اتصال دارد ولی با افزایش دما بیشتر از ۶۰۰ درجه افت ظرفیت با شدت بیشتری صورت می‌گیرد. هم چنین مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت ورق انتهایی درصد افت ظرفیت خمشی کاهش می‌یابد ولی این افت چشمگیر نیست.

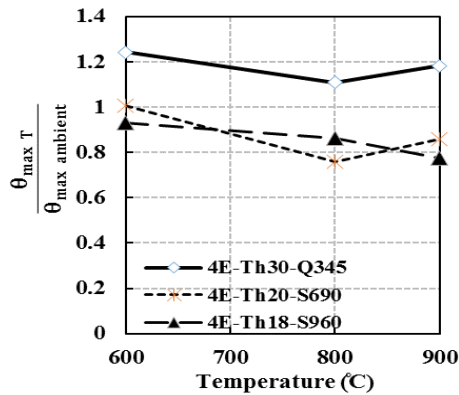
شکل (۱۳) نمودار لنگر-دوران را برای مدل‌های اتصال با ورق انتهایی پیچ شده با و بدون سخت کننده تحت حرارت ۶۰۰ درجه نشان می‌دهد. کلیه اتصالات برای یک ظرفیت باربری یکسان طراحی شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود زوال سختی در مدل‌های بدون سخت کننده (مدل‌های ۱، ۳، ۴، ۵ و ۹) در دوران ۱۷ میلی رادیان اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در مدل‌های با سخت کننده به ترتیب برای اتصالات 4ES-Th13-S690، 4ES-Th18-Q345 و 4ES-Th12-S960 پس از دوران‌های ۳۴، ۲۱ و ۳۵ میلی رادیان با افت مقاومت خمشی مواجه می‌گردد. هم‌چنین در شکل (۱۳) مقایسه بین عملکرد خمشی اتصال‌های طراحی شده با فولاد کم مقاومت و پرمقاومت را تحت حرارت ۶۰۰ درجه نشان می‌دهد. با مقایسه نمودار لنگر دوران مدل‌های بدون سخت کننده 4E-Th30-Q345، 4E-Th20-S690 و 4E-Th18-S960 مشاهده می‌شود که عملکرد اتصال با مصالح فولاد کم مقاومت (4E-Th30-Q345) مناسب‌تر است و مساحت زیر نمودار بیشتر و در نتیجه ظرفیت استهلاک انرژی پلاستیک آن بیشتر است. هم‌چنین با مقایسه نمودار لنگر دوران مدل‌های با سخت کننده 4ES-Th18-Q345، 4ES-Th13-S690 و 4ES-Th12-S960 مشاهده می‌شود که عملکرد اتصال با مصالح فولاد کم مقاومت (4ES-Th18-Q345) مناسب‌تر است و مساحت زیر نمودار بیشتر و در نتیجه ظرفیت استهلاک انرژی پلاستیک آن بیشتر است.



شکل ۱۳- نمودار لنگر-دوران برای مدل‌های اتصال با ورق انتهایی با و بدون سخت کننده

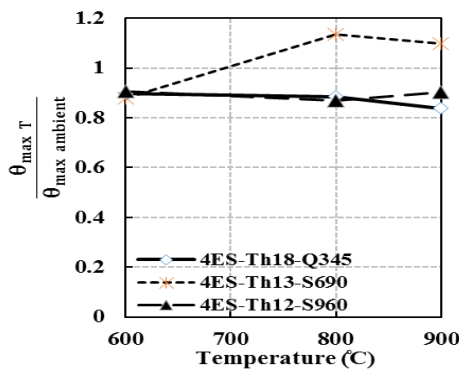


۸۰۰ درجه نسبت دوران بیشینه متناظر با حداکثر لنگر کاهش یافته است و پس از دمای ۸۰۰ درجه افزایش می‌یابد. هرچند این نسبت در اتصال با فولاد پرمقاومت با افزایش دما روند کاهشی داشته است.



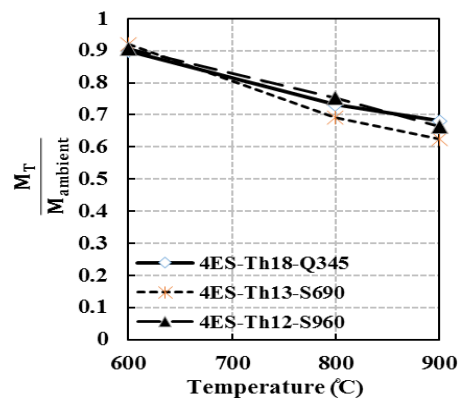
شکل ۱۶- نمودار نسبت چرخش اتصال بدون سخت کننده تحت حرارت

نسبت دوران بیشینه متناظر با حداکثر لنگر اتصال تحت اثر حرارت‌های مختلف به دوران بیشینه متناظر با حداکثر لنگر اتصال تحت شرایط محیطی برای اتصالات با ورق انتهایی با سخت کننده در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در دمای ۶۰۰ درجه نسبت دوران برای همه اتصالات با سخت کننده یکسان و برابر ۰/۹ است. در دمای ۸۰۰ درجه نسبت دوران برای اتصال 4ES-Th13-S690 افزایش و از ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه تقریباً ثابت می‌ماند. همانگونه که در شکل (۱۷) نشان داده شده است نسبت دوران بیشینه متناظر با حداکثر لنگر برای دو اتصال با سخت کننده که از با مصالح فولاد پرمقاومت و کم مقاومت طراحی شده‌اند در دمای ۶۰۰ تا ۹۰۰ تغییر محسوسی نداشته‌اند.



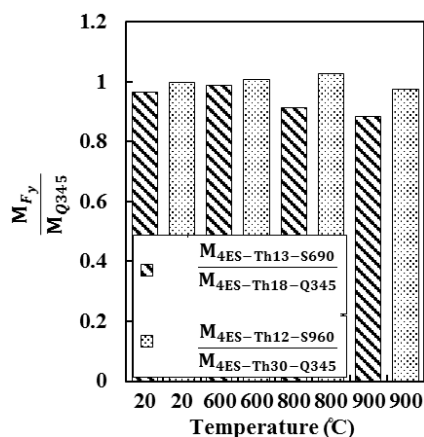
شکل ۱۷- نمودار نسبت چرخش اتصال با سخت کننده تحت حرارت

در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود این نسبت در دمای ۶۰۰ درجه برای هر سه اتصال 4ES-Th18-Q345، 4ES-Th13-S690 و 4ES-Th12-S960 برابر ۰/۹ است. این نسبت در دمای ۸۰۰ درجه کاهش یافته و به ترتیب برای اتصالات 4ES-Th12-S960 و 4ES-Th13-S690، 4ES-Th18-Q345 برابر ۰/۷۴، ۰/۶۹ و ۰/۷۵ می‌باشد. به همین ترتیب در دمای ۹۰۰ درجه نسبت $(\frac{M_T}{M_{ambient}})$ برای اتصال 4ES-Th18-Q345، 4ES-Th13-S690 و 4ES-Th12-S960 به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۶۹ و ۰/۶۶ بدست آمده است. با بررسی شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که ظرفیت خمشی اتصالات با ورق انتهایی با افزایش درجه حرارت وارده کاهش می‌یابد. شیب کاهش ظرفیت خمشی در اتصالات با سخت کننده در همه دماهای وارده ملایم و تقریباً ثابت است. هرچند مشاهده شد که شیب کاهش ظرفیت اتصال با و بدون سخت شونده که با فولاد کم مقاومت طراحی شده از دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه از سایر اتصالات کمتر است که نشانگر عملکرد بهتر این اتصال است.



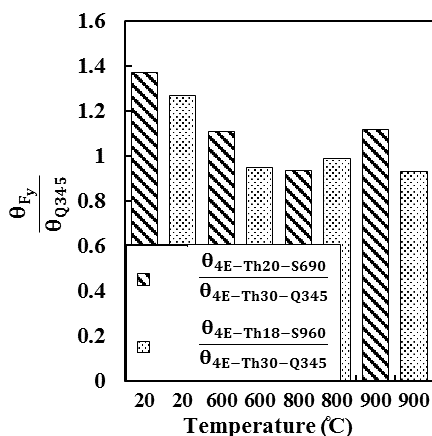
شکل ۱۵- نمودار نسبت ظرفیت خمشی اتصال با سخت کننده تحت حرارت

شکل (۱۶) نسبت دوران بیشینه متناظر با حداکثر لنگر اتصال تحت اثر حرارت‌های مختلف به دوران بیشینه متناظر با حداکثر لنگر اتصال بدون سخت کننده تحت شرایط محیطی $(\frac{\theta_T}{\theta_{ambient}})$ را برای اتصالات با ورق انتهایی بدون سخت کننده نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در دمای ۶۰۰ درجه نسبت $\frac{\theta_T}{\theta_{ambient}}$ برای دو اتصال 4E-Th18-S960 و 4E-Th20-S690 به ترتیب ۱/۲۳، ۱ و ۰/۹۵ می‌باشد. هم چنین در دمای ۸۰۰ درجه نسبت $\frac{\theta_T}{\theta_{ambient}}$ به ترتیب ۱/۱۲، ۰/۷۸ و ۰/۸۵ می‌باشد. به همین ترتیب در دمای ۹۰۰ درجه این نسبت برابر ۱/۲، ۰/۸۵ و ۰/۷۵ بدست آمده است. همانگونه که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود با افزایش حرارت از ۶۰۰ به



شکل ۱۹- نمودار نسبت لنگر تسلیم اتصال با سخت کننده تحت حرارت

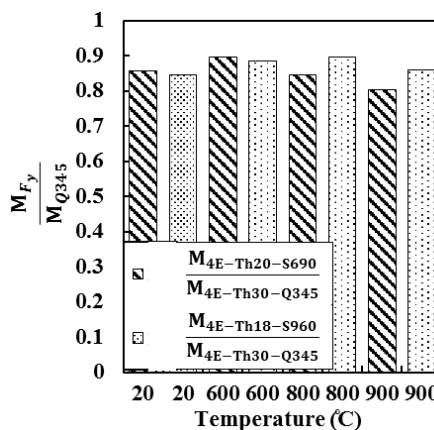
شکل (۲۰) نسبت دوران دو اتصال با فولاد پرمقاومت (4E-Th20-S690 و 4E-Th18-S960) به اتصال طراحی شده با فولاد نرم (4E-Th30-Q345) تحت حرارت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در دمای محیط و حرارت ۶۰۰ درجه اتصال با مصالح با مقاومت کمتر (S690) نسبت دوران بیشتری داشته است، ولی در دماهای بالاتر (۸۰۰ و ۹۰۰ درجه) اتصال طراحی شده با فولاد پرمقاومت (S960) نسبت دوران بیشتری را نشان می‌دهد. با مقایسه نسبت دوران برای اتصالات با سخت کننده در شکل (۲۱) مشاهده می‌شود که دوران اتصالات با مصالح S690 و S960 در دو دمای محیط و حرارت ۶۰۰ یکسان است ولی در حرارت‌های بالاتر فولاد با مقاومت کمتر (S960) نسبت دوران بیشتری را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰- نمودار نسبت دوران تسلیم اتصال بدون سخت کننده تحت حرارت

در این بخش برای بررسی دقیق تر اثر جنس مصالح فولاد پرمقاومت و کم مقاومت بر رفتار اتصالات با ورق انتهایی نسبت ظرفیت خمشی و نسبت دوران اتصال در دو اتصال با فولاد پرمقاومت به اتصال با فولاد کم مقاومت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نسبت لنگر خمشی دو اتصال بدون سخت کننده با فولاد پرمقاومت (4E-Th20-S690 و 4E-Th18-S960) به اتصال طراحی شده با فولاد نرم (4E-Th30-Q345) تحت درجه حرارت‌های مختلف در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در دمای محیط و حرارت ۶۰۰ درجه اختلاف محسوسی میان دو اتصال با مصالح S960 و S960 مشاهده نشده است، ولی در دماهای بالاتر (۸۰۰ و ۹۰۰ درجه) اتصال طراحی شده با فولاد پرمقاومت (S960) ظرفیت خمشی بیشتری را نشان می‌دهد.



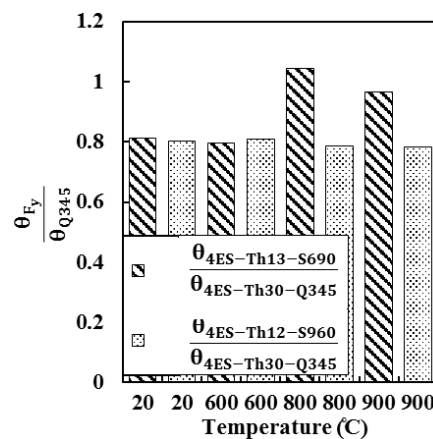
شکل ۱۸- نمودار نسبت لنگر تسلیم اتصال بدون سخت کننده تحت حرارت

شکل (۱۹) نسبت لنگر خمشی دو اتصال با سخت کننده طراحی شده با فولاد پرمقاومت (4ES-Th13-S690 و 4ES-Th12-S960) به اتصال طراحی شده با فولاد نرم (4ES-Th18-Q345) تحت حرارت‌های مختلف نشان داده شده است. این نوع اتصال نیز همانند اتصالات بدون سخت کننده در دمای محیط و حرارت ۶۰۰ درجه اختلاف میان دو اتصال با مصالح S960 و S960 مشاهده نشده است، ولی در دماهای بالاتر (۸۰۰ و ۹۰۰ درجه) اتصال طراحی شده با فولاد پرمقاومت (S960) ظرفیت خمشی بیشتری را نشان داد.

خمشی در اتصالات با سخت کننده در همه‌ی دماهای وارده ملایم و تقریباً ثابت است. هرچند مشاهده شد که شیب کاهش ظرفیت اتصال با و بدون سخت شونده که با فولاد کم مقاومت طراحی شده از دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه از سایر اتصالات کمتر است که نشانگر عملکرد بهتر این اتصال است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از سخت کننده باعث می‌شود که حداکثر لنگر اتصال در دوران‌های بزرگ‌تر رخ دهد یعنی اینکه رفتار اتصال شکل‌پذیرتر است، این در حالی است که دوران متناظر با حداکثر لنگر در اتصالات بدون سخت کننده بسیار کوچک بوده که نشانگر رفتار ترد و شکننده اتصال پس از حرارت است.

۵- مراجع

- [1] Rahnavard, R., Fathi Zadeh Fard, F., Hosseini, A. and Suleiman, M. (2018), "Nonlinear Analysis on Progressive Collapse of Tall Steel Composite Buildings", Case Studies in Construction Materials, Vol. 8, pp. 359-379
- [2] Rahnavard, R. and Siahpolo, N. (2018), "Function Comparison between Moment Frame and Moment Frame with Centrally Braces in High-Rise Steel Structure under the Effect of Progressive Collapse", Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 4, No. 4, pp. 42-57.
- [3] Pirmoz, A., Seyed Khoei, A., Mohammadrezapour, E. and Saedi Daryan, A. (2009), "Moment Rotation Behavior of Bolted Top Seat Angle Connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 973-984.
- [4] Yahyai, M. and Saedi Daryan, A. (2011), "The Study of Welded Semi-Rigid Connections in Fire", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 22, No. 10, pp. 783-801.
- [5] ساعدی داریان، ا. و رضایی‌فر، ع. (۱۳۹۱)، "بررسی اثر آتش بر رفتار اتصال پیچی با نبشی در سازه‌های فولادی به روش عددی و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان.
- [6] Lawson RM., (1990), "Behaviour of Steel Beam-to-Column Connections in Fire", Structure Engineering, Vol. 68, pp. 263-271.
- [7] ABAQUS, User's Manual Versin 6.11 (2011).
- [8] راه نورد، ر.، کهزادیان، م. و حسنی پور، ا. (۱۳۹۳)، "بررسی اثر آتش بر رفتار اتصال صلب پیچی فولادی در دو حالت اصطحاکای و اتکایی با استفاده از روش عددی"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی، بابل.
- [9] راه نورد، ر.، سیاهپلو، ن. و حسنی پور، ا. (۱۳۹۴)، "بررسی تحلیلی اتصالات رایج فولادی تحت اثر حرارت"، مجله علمی و پژوهشی اساس، سال شانزدهم، شماره ۳۹.
- [10] Rahnavard, R. and Hassanipour, A., (2015), "Steel Structures Analysis Using ABAQUS", Kerman: Academic Center for Education, Culture and Research, Publishing Organization of Kerman branch.
- [11] Rahnavard, R. and Thomas, R.J. (2018), "Numerical Evaluation of the Effects of Fire on Steel Connections; Part



شکل ۲۱- نمودار نسبت دوران تسلیم اتصال با سخت کننده تحت حرارت

۴- بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی عددی اثر جنس مصالح بر اتصالات فولادی با ورق انتهایی پیچ شده تحت اثر حرارت می‌پردازد. ۹ نمونه اتصال با و بدون سخت کننده با ظرفیت خمشی یکسان طراحی، مدل‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مدل‌سازی عددی از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شد. در این مطالعه روش مدل‌سازی با جزئیات کامل شرح داده شده است. از کاستی‌های تحقیقات قبلی را می‌توان به عدم بررسی اثر جنس مصالح در طراحی اتصال و عملکرد آن در برابر حرارت اشاره کرد که در این تحقیق برای اولین بار بررسی می‌شود. با مقایسه مدل‌ها مشاهده گردید که استفاده از سخت کننده تنش درون اتصال را کاهش می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش دما تا ۶۰۰ درجه تاثیر کمی بر ظرفیت اتصال دارد ولی با افزایش دما بیش از ۶۰۰ درجه افت ظرفیت با شدت بیشتری صورت می‌گیرد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که عملکرد خمشی اتصالات طراحی شده با فولاد کم مقاومت مناسب‌تر است و استهلاک انرژی آن از بقیه اتصالات بیش‌تر است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که از دمای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه کاهش ظرفیت خمشی اتصالات با شدت صورت می‌گیرد ولی از دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه شیب کاهش ظرفیت خمشی ملایم‌تر است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که طراحی براساس جنس مصالح بر اندازه حداکثر لنگر اتصالات در دماهای مختلف تفاوت محسوسی ندارد ولی بر دوران متناظر با آن لنگر حداکثر بسیار تاثیر می‌گذارد. با بررسی نتایج مقاله مشاهده می‌شود که ظرفیت خمشی اتصالات با ورق انتهایی با افزایش درجه حرارت وارده کاهش می‌یابد. شیب کاهش ظرفیت

- Cooling Phase of a Fire”, *Journal Construction Steel Research*, Vol. 65, pp. 1776–86.
- [22] Hozjan, T., Turk, G. and Srpcic, S. (2007), “Fire Analysis of Steel Frames with the Use of Artificial Neural Networks”, *Journal Construction Steel Research*, Vol. 63, pp. 1396–403.
- [23] Suleiman, M.F., Shahrooz, B.M., Bill, H.L., Fortney, P.J. and Thornton, W.A. (2017), “3-D Finite Element Modeling of Extended Single Plate Shear Connections: Predicting the Mode of Failure,” *International Journal of Steel Structures*, Vol. 17, No. 2, pp. 1–10.
- [24] Kloos1, M. and Walls, R.S. (2019), “Finite Element Modelling of the Structural Behaviour of a Novel Cellular Beam Non-composite Steel Structure in Fire”, *International Journal of Steel Structures*, pp. 1–14.
- [25] Aung1, M.P. and Hirohata, M. (2019), “Numerical Study on Post-weld Heat Treatment of Non-stifened Welded Box-Section Member and Its Compressive Behavior”, *International Journal of Steel Structures*, pp. 1–13.
- [26] Stranghöner, N., Afzali, N., Vries, P., Schedin, E. and Pilhagen, J. (2019), “Slip Factors for Slip-Resistant Connections Made of Stainless Steel”, *Journal of Constructional steel research*, Vol. 152, PP. 235–245.
- [27] Zahmatkesh, F., Osman, M.H., Talebi, E., Kueh, A.B.H. and Tahir, M. (2019), “Structural Performance of Steel Beams and Frames with Slant End-Plate Connections at Elevated Temperature”, *Engineering Structures*, Vol. 187, pp. 396–413.
- [28] Chen, W., Ye, J. and Zhao, M. (2018), “Steady- and Transient-State Response of Cold-Formed Steel-to-Steel Screwed Connections at Elevated Temperatures”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 144, pp. 13–20.
- [29] Qiang, X., Jiang, X., Bijlaard, F.S.K., Kolstein, H. and Luo, Y. (2015), “Post-Fire Behaviour of High Strength Steel Endplate Connections—Part 1: Experimental Study”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 108, PP. 82–93.
- [30] Eurocode 3, (2001), *Design of Steel Structures Part 1.2: General Rules Structural Fire Design ENV, 1993-1-2*. Brussels (Belgium): European Committee for Standardization.
- [31] ASCE/SEI-41, (2007), *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers.
- 1: Simulation Techniques”, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 12, pp. 445–453.
- [12] Rahnavard, R. and Thomas, R.J. (2019), “Numerical Evaluation of the Effects of Fire on Steel Connections; Part 2: Model results”, *Case Studies in Thermal Engineering*. Vol 13, 100361.
- [13] Rahnavard, R., Siahpolo, N., Naghavi, M. and Hassanipou, A. (2014), “Analytical Study of Common Rigid Steel Connections under the Effect of Heat”, *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2014, pp. 1–10.
- [14] Rahnavard, R., Hassanipour, A. and Siahpolo, N. (2015), “Analytical Study on New Types of Reduced Beam Section Moment Connections Affecting Cyclic Behavior”, *Case Studies in Structural Engineering*, Vol. 3, pp. 33–51.
- [15] Rahnavard, R., Taghi Khaje, M., Hassanipour, A. and Siahpolo, N. (2017), “Parametric Study of Seismic Performance of Steel Bridges Pier Rehabilitated with Composite Connection”, *Journal of structural and construction engineering*, DOI: 10.22065/JSCE.2017.92128.1259.
- [16] Hassanipou, A. and Rahnavard, R. (2015), “Analytical Study of Common Rigid Bolt and Weld Steel Connections under the Effect of Heat”, *International Journal of Advances in Engineering Sciences*, Vol. 5, No. 2, pp. 1–10.
- [17] Selamet, S. and Garlock, M.E. (2010), “Robust Fire Design of Single Plate Shear Connections”, *Engineering Structure*, Vol. 32, pp. 2367–78.
- [18] Kalogeropoulos, A., Drosopoulos, G.A. and Stavroulakis, G.E. (2012), “Thermal–Stress Analysis of a Three-Dimensional End-Plate Steel Joint”, *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp.619–626.
- [19] Silva, L. and Santiago, A. (2006), “Experimental Behaviour of a Steel Structure under Natural Fire”, *Fire Safety Journal*, Vol. 41, pp. 509–522.
- [20] Memari, M., Mahmoud, H. and Ellingwood, B. (2014), “Post-Earthquake Fire Performance of Moment Resisting Frames with Reduced Beam Section Connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 103, pp. 215–229.
- [21] Lien, K.H., Chiou, Y.J., Wang, R.Z. and Hsiao, P.A. (2009), “Nonlinear Behavior of Steel Structures Considering the

پی نوشت

¹ End plate connection² Bolted cover plate³ Bolted T joint⁴ Couple temperature-displacement