



اولین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف



بررسی اثر کابل های پس کشیده بر رفتار اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش

نادر فنائی^۱، آذین آل کجباف^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، aalkajbaf@mail.kntu.ac.ir

چکیده

هدف این مقاله بررسی اثر کابل های پس کشیده بر عملکرد اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش می باشد. این اتصال که در قاب های خمشی و مهاربندی شده به کار می رود، به طور خاص برای نواحی لرزه خیز طراحی شده است. اتصال مرکزگرا دارای اعضای پس کشیده چون کابل و میلگرد برای کاهش دررفت باقی مانده در سازه و اعضای اتلاف کننده برای استهلاک انرژی ناشی از زلزله می باشد. به دلیل آن که امکان وقوع آتش سوزی در حین یا بعد از رخداد زلزله بالا می باشد، ارزیابی رفتار این اتصالات و اجزای آن ها تحت اثر بارگذاری آتش از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از این رو در این مقاله یک اتصال مرکزگرا که دارای کابل به عنوان عضو پس کشیده و نبشی به عنوان عضو اتلاف کننده انرژی می باشد انتخاب شده است. این اتصال با استفاده از مدل سازی اجزاء محدود شبیه سازی شده و رفتار آن بر پایه نتایج آزمایشگاهی موجود صحت سنجی گردیده است. سپس آزمایش دیگری که شامل بررسی اتصال تیر به ستون دارای نبشی جان تحت اثر بارگذاری آتش بوده مدل سازی و صحت سنجی شده است. به دلیل آن که نتایج آزمایشگاهی برای اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش موجود نمی باشد، از این مدل صحت سنجی شده برای حصول اطمینان از دقت مدل سازی اتصال دارای نبشی تحت دماهای بالا استفاده شده است. در ادامه مدل اتصال مرکزگرا با فرض دو حالت کابل های بدون محافظ و کابل های دارای محافظ در برابر آتش سوزی تحت اثر بارگذاری آتش قرار گرفته و نمودارهای لنگر-دوران آن در دماهای مختلف به دست آمده اند. نتایج تحلیل نشان می دهد که تا دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس که خصوصیات مصالح فولادی افت قابل توجهی نمی یابند، نمودارهای هر دو حالت کاملاً منطبق بوده و در واقع اتصالات دارای رفتار یکسانی هستند. اما با افزایش دما مدلی که دارای کابل حفاظت شده است قادر به تحمل لنگر بیشتری نسبت به مدل دارای کابل بدون محافظ است. به طوری که لنگر ماکزیمم مدل دارای کابل حفاظت شده در دماهای ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ به ترتیب ۵٪، ۲۷٪ و ۸۸٪ بیش از لنگر ماکزیمم مدل با کابل بدون محافظ است.

کلمات کلیدی: کابل پس کشیده، اتصال مرکزگرا، بارگذاری آتش، مدل سازی اجزاء محدود

Investigation on the Influence of Posttensioned Strands on the behavior of Self-Centering Connection under Fire Loading

Nader Fanaie¹, Azin Al Kajbaf²

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, fanaie@kntu.ac.ir

2-M.Sc. Student, Civil Engineering Department, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, aalkajbaf@mail.kntu.ac.ir



Abstract

This paper aims to study the effects of posttensioned strands on the performance of self-centering connection subjected to the fire loading. This connection, which is used in moment resisting and braced frames, is particularly designed for areas with high seismic risk. Self-centering connection consists of posttensioned elements such as strands and bars to reduce the residual drift in the structure and energy dissipater devices to dissipate the seismic input energy. Since one of the most possible scenarios during or post an earthquake is a fire event, evaluating the behavior of these connections and their components under fire loading has significant importance. Accordingly, in this study a self-centering connection with strands as posttensioned members and angle as energy dissipater devices, is selected. This connection is simulated using finite element modeling and is verified based on available experimental results. Then, another experimental study, which includes testing of a beam to column connection with web cleat joint under fire, is modeled and validated. Since no experimental research is available for self-centering connection subjected to the fire loading, this verified model is used to ensure the precision of modeling the behavior of an angle connection at elevated temperatures. Afterwards, the connection model is subjected to the fire loading assuming two cases of protected and unprotected strands. The moment-rotation curves for both cases in different temperatures are obtained and compared. The analytical results show that up to 400 degrees Celsius these curves are completely matched since, up to these point material properties of steel do not undergo considerable degradation. However, as the temperature increases, the model with protected strand shows more strength compared to the model with unprotected strands. So that, maximum moment of the model with protected strands in 500, 600 and 700 degrees Celsius is 5%, 27% and 88% higher than that of the model with unprotected strands, respectively.

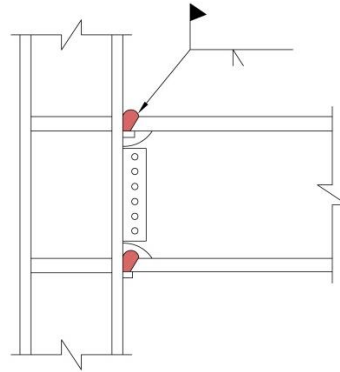
Keywords: posttensioned strand, self-centering connection, fire loading, finite element modeling

۱- مقدمه

بعد از وقوع هر زلزله مخربی، عیوب و نواقص سیستم های سازه ای موجود بررسی می گردند تا در طراحی های بعدی رفع شوند. ایده اتصالات جدید نیز بعد از زمین لرزه نورث ریچ در سال ۱۹۹۴ شکل گرفت که منجر به خرابی در بیش از ۱۰۰ قاب خمشی مقاوم در برابر زلزله شده بود [۱]. پیش از این زلزله، اتصال رایج به کار رفته در قاب های خمشی جوشی شامل یک ورق پیچ شده به جان تیر و جوش شیاری با نفوذ کامل میان بال پایینی تیر و بال ستون می شد (شکل ۱) [۲]. به علت شکل پذیری فولاد، انتظار می رفت که این قاب ها دچار تغییر شکل غیرالاستیک شده و در نتیجه انرژی لرزه ای وارده را مستهلک کنند. تغییر شکل های غیرالاستیک سبب شکل گیری مفصل پلاستیک می شود که انتظار می رفت در تیرها تشکیل شوند. اما این مفصل ها در حین زلزله تشکیل نشدند که باعث آسیب گسترده در اتصالات گردید. در میان دلایلی که باعث بروز آسیب شد، گسیختگی ای که در جوش بال پایینی تیر به ستون اتفاق افتاد، علت اصلی بود [۳]. بعد از زلزله نورث ریچ تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی برای ساختن قاب خمشی بهبود یافته انجام شد. از جمله آن ها می توان به مقاوم سازی اتصال توسط تیر با مقطع کاهش یافته [۴]، اتصال با ورق های پوششی [۵] و ورق های کناری [۶] اشاره کرد. با وجود آن که این اتصالات عملکرد بهتری دارند و قادرند زلزله سطح طراحی را تحمل کنند، آسیب های وارده به اعضای سازه ای چون تسلیم و کماتش تیرها باعث می شود که در ساختمان تغییر شکل های باقی مانده دائمی به وجود بیاید که بهسازی آن ها صرفه اقتصادی ندارد.

به عنوان جایگزینی برای قاب های خمشی با اتصالات جوشی و با الهام از اتصالات پس کشیده بتنی مانند مطالعه کوراما (۱۹۹۹) [۷] بر روی دیوارهای بتنی پس کشیده پیش ساخته، رایکلز و همکاران (۲۰۰۱) [۸] اتصال فولادی جدیدی را پیشنهاد دادند که به آن اتصال مرکزگرا گفته می شود. این اتصال دریافت باقی مانده را در سازه حذف می کند و بدین صورت آسیب های لرزه ای را به حداقل می رساند. این اتصالات شامل اعضای پس کشیده و اعضای اتلاف کننده انرژی می باشند. اعضای پس کشیده چون میلگرد و کابل با مقاومت بالا که تیر را به بال ستون

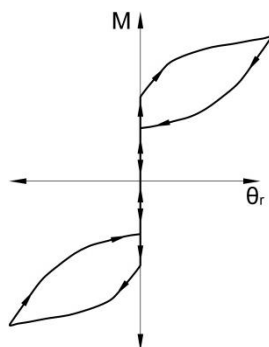
می‌فشارند، بعد از وقوع زلزله، سازه را به موقعیت اولیه‌اش برمی‌گردانند و به این شکل به آن خاصیت مرکزگرایی می‌دهند. در خلال جابه‌جایی‌های چرخه‌ای قاب، اعضای اتلاف‌کننده انرژی دچار تغییرشکل پلاستیک می‌شوند و مفصل پلاستیک تشکیل می‌دهند و به این واسطه انرژی ورودی لرزه‌ای را مستهلک می‌کنند.



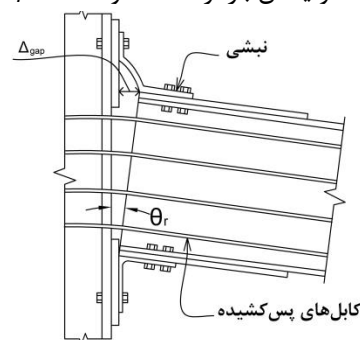
شکل ۱: اتصال جوشی معمول به کار رفته در قاب‌های خمشی قبل از زلزله نورتریج [۲]

در این اتصالات آسیب دیدگی به اعضای اتلاف‌کننده انرژی محدود می‌شود و اعضای اصلی یعنی تیر و ستون در تمام مدت الاستیک باقی می‌مانند. قاب‌هایی که دارای اتصال مرکزگرا می‌باشند ویژگی‌هایی دارند که آن‌ها را نسبت به قاب‌های خمشی متداول با اتصالات جوشی برتر می‌سازد. این اتصالات احتیاج به جوش کارگاهی ندارند، با مصالح مشابه اتصالات سنتی ساخته می‌شوند، سختی اولیه‌شان مشابه یک اتصال جوشی معمولی است، اعضای اتلاف‌کننده انرژی به راحتی قابل تعویض هستند و نهایتاً اتصال قابلیت مرکزگرایی دارد که باعث می‌شود دریافتی در اتصال باقی نماند و در نتیجه هزینه‌های تعمیر سازه بعد از زلزله به طور قابل توجهی کاهش پیدا کند [۹].

شکل ۱ (الف) یک اتصال مرکزگرای بیرونی را در یک قاب خمشی نشان می‌دهد. این اتصال دارای کابل‌های با مقاومت بالای پس‌کشیده که به صورت موازی با جان تیر قرار گرفته‌اند و نبشی‌های نشیمن و بالایی پیچی که به عنوان عضو اتلاف‌کننده انرژی استفاده می‌شوند، می‌باشد. شکل ۲ (ب) نمودار لنگر-چرخش $(M - \theta_r)$ اتصال پس‌کشیده را نشان می‌دهد که در آن θ_r چرخش نسبی بین تیر و ستون می‌باشد. این نمودار پرچمی شکل توسط باز شدن فاصله و بسته شدن اتصال زمانی که تحت اثر بار چرخه‌ای قرار گرفته است، تعریف می‌شود. سختی اولیه اتصال قبل از به وجود آمدن فاصله، مشابه اتصال جوشی می‌باشد. اما بعد از لنگری که باعث شروع بازشدگی می‌شود (M_d) ، سختی اتصال معادل با سختی الاستیک کابل‌ها و سختی نبشی‌ها می‌شود. ضمن بارگذاری، نبشی‌ها تسلیم می‌شوند و با باربرداری انرژی را مستهلک می‌کنند تا نهایتاً اتصال به موقعیت اولیه‌اش بازگرداننده شود $(\theta_r = 0)$ [۹].



(ب)



(الف)

شکل ۲: الف) اتصال مرکزگرای بیرونی بعد از بازشدگی [۹]، ب) پاسخ لنگر-چرخش اتصال مرکزگرا [۹]

در تحقیقات انجام شده بر روی اتصالات مرکزگرا از ابزار مختلفی برای اتلاف انرژی استفاده شده است که به طور کلی با دو مکانیزم تسلیم و اصطکاک انرژی وارد شده به سازه را مستهلک می‌کنند. رایکلز و همکاران [۸، ۱۰] و گارلوک و همکاران [۹، ۱۱] آزمایش‌هایی را بر روی اتصالات مرکزگرا با نبشی نشیمن و بالایی پیچی به عنوان عضو اتلاف‌کننده انرژی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای انجام دادند. آن‌ها تأثیر عواملی مانند



اولین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف



خصوصیات نبشی و نیروی پیش تنیدگی اولیه را در کابل‌ها بررسی کردند. علاوه بر نبشی ابزار دیگری که با مکانیزم تسلیم باعث اتلاف انرژی می‌شوند شامل میلگردهای مقاوم در برابر کمانش [۱]، ورق‌های بال کاهش یافته مقاوم در برابر کمانش [۱۲]، ورق‌های بال پایینی تیر [۱۳] و پین‌های ساعت شنی شکل [۱۴] توسط محققان پیشنهاد شده‌اند. از جمله وسایلی که از طریق مکانیزم اصطکاکی باعث اتلاف انرژی می‌شوند می‌توان به ابزار اصطکاکی بر روی هر دو بال تیر [۱۵]، ابزار اصطکاکی بر روی بال پایینی تیر [۱۶] و ابزار اصطکاکی قرار گرفته بر روی جان تیر [۱۷] اشاره کرد.

رفتار اتصالات فلزی در آتش‌سوزی در دهه‌های اخیر مورد توجه محققان بوده است. رفتار اتصالات تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار سازه دارد که باید در تحلیل کلی سازه در نظر گرفته شود. برای ساده سازی تحلیل، اتصالات در دمای محیط به صورت صلب و یا مفصلی فرض می‌شوند [۱۸]. اما، به علت وضعیت پیچیده‌ای که در شرایط آتش‌سوزی وجود دارد این فرضیات قابل استفاده نیستند. از این جهت رفتار اتصال در دماهای بالا باید به طور دقیق مشخص شود زیرا تأثیر قابل توجهی بر روی خرابی پیش‌رونده در سازه که در اثر آتش‌سوزی اتفاق می‌افتد، دارد [۱۹]. در این راستا تحقیقات آزمایشگاهی و عددی زیادی انجام شده است. یو و همکاران (۲۰۰۸) [۲۰] یک مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی برای بررسی اتصالات دارای نبشی جان تحت اثر آتش انجام دادند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که این اتصالات شکل‌پذیری خوبی دارند و مدهای مختلفی را با توجه به دمایی که دارند تجربه می‌کنند. وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱] تحقیقی آزمایشگاهی را بر روی انواع مختلفی از اتصالات فلزی مفصلی و نیمه صلب انجام دادند. مدهای گسیختگی و نیروی محوری اتصالات در دماهای بالا بررسی شد. همچنین قیانگ و همکاران (۲۰۱۴) [۲۲، ۲۳] مطالعات عددی و آزمایشگاهی را در رابطه با رفتار اتصالات دارای ورق انتهایی که تحت دمای پایدار قرار گرفته‌اند، انجام دادند. نتایج به دست آمده با نتایج اتصالات ورق انتهایی ساخته شده از فولاد نرمه مقایسه شد و مشخص گردید که ورق انتهایی ساخته شده از فولاد پر مقاومت با ضخامت کافی، ظرفیت چرخش اتصال را بهبود می‌بخشد.

با وجود آن که در دهه اخیر تحقیقات گوناگونی بر روی انواع مختلف اتصالات مرکزگرا انجام شده است، همچنان مطالعه آزمایشگاهی در رابطه با رفتار این اتصالات تحت شرایط آتش موجود نمی‌باشد. با این حال، احتمال زیادی وجود دارد که در حین یا پس از وقوع زلزله، آتش‌سوزی اتفاق بیفتد. از این جهت، مطالعه پاسخ اتصالات مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا می‌توان از مدل‌سازی اجزاء محدود برای بررسی این مسأله استفاده نمود. مطالعات تحلیلی نشان داده‌اند که مدل‌سازی اجزاء محدود، روشی مناسب برای تأیید نتایج آزمایشگاهی بوده و علاوه بر آن امکانی را فراهم می‌سازد تا بتوان عواملی را که بررسی آن‌ها در آزمایشگاه سخت و پرهزینه است، به شکل راحت‌تری مطالعه کرد.

هدف اصلی این مقاله بررسی اثر کابل‌های پس کشیده بر روی رفتار اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش می‌باشد. به دلیل آن که مهم‌ترین تفاوت این اتصال با اتصال نیمه صلب معمولی، وجود کابل‌های پس کشیده می‌باشد و این اعضاء بر عملکرد اتصال نقش ویژه‌ای دارند، بررسی رفتار کابل از اهمیت زیادی برخوردار است. در این راستا مدل اجزاء محدود یک نمونه اتصال مرکزگرا که دارای نبشی نشیمن و بالایی پیچی می‌باشد و توسط گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) [۹] مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته، با استفاده از نرم افزار آباکوس ساخته شده است [۲۴]. رفتار این نمونه با استفاده از نتایج آزمایش صحت سنجی شده است. سپس مطالعه آزمایشگاهی دیگری توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱] انتخاب شده است که شامل بررسی اتصال تیر به ستون دارای نبشی جان تحت اثر بارگذاری آتش می‌باشد. این نمونه نیز با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود ساخته شده و بر پایه نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است. از این مدل صحت سنجی شده جهت حصول اطمینان از دقت مدل‌سازی رفتار یک اتصال دارای نبشی در دماهای بالا استفاده شده است. در نهایت مدل اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش قرار گرفته است. برای کابل‌ها دو حالت در نظر گرفته شده است که شامل کابل‌های بدون محافظت در برابر آتش و کابل‌های دارای پوشش محافظ در برابر آتش می‌باشد. برای دو حالت نمودارهای لنگر-دوران در دماهای مختلف به دست آمده‌اند و مقایسه شده‌اند.

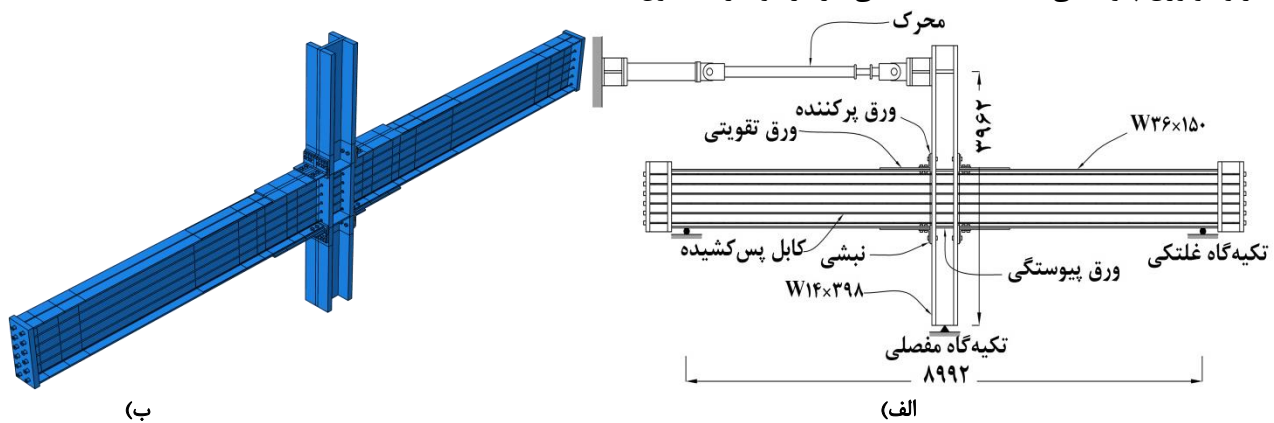
۲- مدل‌سازی اجزاء محدود اتصال مرکزگرا

۲-۱- مدل‌سازی هندسه

از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی آباکوس برای شبیه‌سازی رفتار یک اتصال داخلی مرکزگرا که توسط گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) [۹] مورد آزمایش قرار گرفته استفاده شده است. در تحقیق آن‌ها، شش نمونه اتصال تیر به ستون مرکزگرا با کابل‌های با مقاومت بالای پس کشیده و نبشی‌های نشیمن و بالایی پیچی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها تقریباً مشابه بودند و تفاوت آن‌ها در

تعداد کابل، طول ورق تقویتی و نیروی پس کشیدگی اولیه کابلها بود تا به این صورت حالات حدی مختلفی برای هر نمونه به وجود بیاید. در این مقاله نمونه ۱۸-۲۰s برای مدل سازی انتخاب شده است. این نمونه دارای ۲۰ کابل، ورق تقویتی به طول ۹۱۴ میلی متر و نیروی پس کشیدگی اولیه به مقدار ۱۵۲۶ کیلونیوتن می باشد. پیکربندی آزمایشگاهی در آزمایش گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است.

فاصله تکیه گاه تیرها از یکدیگر ۸۹۹۲ میلی متر و ارتفاع ستون ۳۹۶۲ میلی متر می باشد. نمونه از ستونی با مقطع $W36 \times 150$ و تیری با مقطع $W14 \times 398$ ساخته شده است. کابل های پس کشیده در دو طرف جان تیر و در شش ردیف با فواصل مساوی قرار گرفته اند. هر کابل دارای مساحت مقطع ۱۴۰ میلی متر مربع می باشد و از سوراخ هایی به قطر ۴۴ میلی متر که در بال ستون حفر شده اند می گذرد. نبشی های با مقطع $L8 \times 8 \times 3/4$ بر روی بال بالایی و پایینی تیر قرار گرفته اند. این نبشی ها از طریق یک ردیف چهار تایی و دو ردیف دوتایی پیچ $A490$ به ترتیب به ستون و تیر متصل شده اند. ورق های پرکننده با ابعاد $292 \times 406 \times 32$ میلی متر به بال های ستون پیچ شده اند تا مساحت خالص مقطع ستون را که به دلیل وجود سوراخ های موجود در بال کاهش یافته است، جبران کنند. ورق های تقویتی با ابعاد $914 \times 356 \times 25$ میلی متر به بال های تیر جوش شده اند تا از کماتش موضعی آن ها جلوگیری کنند. برای الاستیک نگه داشتن چشمه اتصال نیز یک ورق مضاعف با ضخامت ۱۹ میلی متر و دو ورق پیوستگی با ضخامت ۲۵ میلی متر در دو طرف ستون استفاده شده است.



شکل ۳: الف) پیکربندی آزمایشگاهی در مطالعه گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) [۹]، ب) پیکربندی در مدل اجزاء محدود

در مدل اجزاء محدود، هندسه واقعی پیکربندی آزمایشگاهی گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) [۹] با اندکی تغییر اجرا شده است. در مدل سازی به جای شبیه سازی کابل هایی که در کنار هم به طور جداگانه قرار گرفته اند، یک کابل با مساحت معادل با دو کابل جایگزین شده است. همچنین ستون های کوتاهی که در انتهای تیر قرار گرفته اند مدل نشده اند و به جای آن ها از دو ورق استفاده شده است. این تغییرات باعث ساده سازی تحلیل می شوند و تأثیری در دقت نتایج نمی گذارند. تمامی اعضاء با استفاده از المان های سه بعدی شکل پذیر جامد ساخته شده اند. پیچ ها و کابل ها به ترتیب از فولاد $ASTM A490$ و $ASTM A416$ ساخته شده اند. سایر اعضاء از فولاد $ASTM A577$ ساخته شده اند. در جدول ۱ خصوصیات مصالح که توسط گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) [۹] از طریق آزمایش مصالح به دست آمده اند، ارائه شده است. مدول الاستیسیته و ظرفیت کششی کابل های پس کشیده به ترتیب برابر ۱۹۹ گیگاپاسکال و ۲۶۶ کیلونیوتن می باشد. مدول الاستیسیته سایر اعضاء معادل ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. چگالی و نسبت پواسون تمام اعضاء به ترتیب برابر ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۳ تعریف شده است.

جدول ۱: خصوصیات مصالح (گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) [۹])

عضو	σ_y (مگاپاسکال)	σ_u (مگاپاسکال)
بال تیر	۳۶۲	۴۹۸
جان تیر	۴۱۴	۵۲۷
ورق تقویتی	۳۹۷	۵۷۴
بال ستون	۳۵۶	۴۹۹
جان ستون	۳۴۵	۵۴۵
نبشی	۳۸۳	۵۲۳



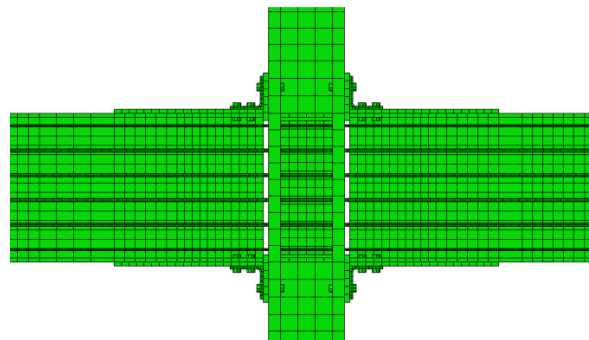
اولین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف



۱۹۰۰	۱۶۲۰	کابل پس کشیده
------	------	---------------

تماس میان اعضای جوشی با استفاده از قید tie تعریف شده است. تماس میان سایر اعضاء با استفاده از الگوریتم general contact تعریف گردیده است. رفتار مماسی و عمودی میان سطوح تماسی در نظر گرفته شده است. رفتار مماسی میان بدنه پیچ و سوراخ پیچ و بدنه کابل و سوراخ کابل به صورت بدون اصطکاک تعریف شده است. ضریب اصطکاک میان سایر سطوح تماسی مطابق دستورالعمل AISC (۲۰۰۵) [۲۵] برابر ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است. رفتار عمودی میان سطوح به صورت hard contact در نظر گرفته شده است تا از فرو رفتن دو سطح مجاور در یکدیگر جلوگیری شود.

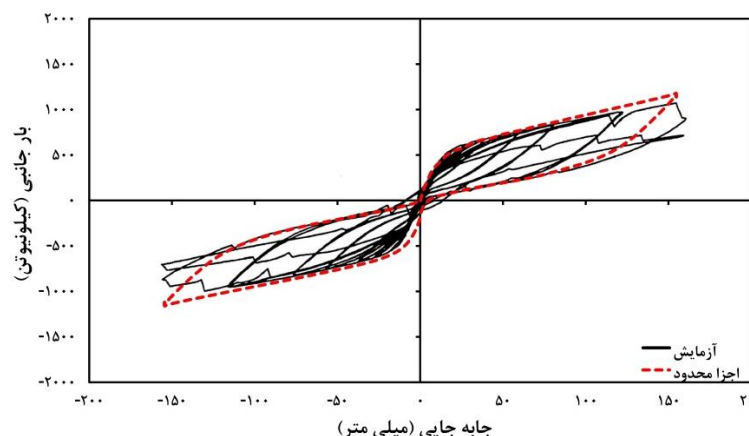
مطابق آزمایش به تیر و ستون به ترتیب تکیه‌گاه غلتکی و مفصلی اختصاص داده شده است. در آزمایش بار چرخه‌ای از طریق دو محرک به بالای بال ستون وارد می‌شود و شامل شش سیکل با جابه‌جایی ۰/۳۷۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵، چهار سیکل با جابه‌جایی ۱٪ و نهایتاً دو سیکل با جابه‌جایی ۱/۵، ۲، ۳ و ۴٪ دریافت می‌باشد [۹]. در مدل اجزاء محدود برای کاستن زمان تحلیل، تنها یک چرخه با دریافت ۴٪ به ستون وارد شده است. پیچ و کابل‌ها مطابق آزمایش پیش‌تنیده شده‌اند [۹]. از پروسه Explicit آباکوس برای تحلیل استفاده شده است [۲۴]. این روش غیرخطی تحلیل برای مدل‌هایی مناسب است که تعداد زیادی سطوح تماس دارند و دچار تغییرشکل‌های بزرگ و افت خصوصیات مصالح می‌شوند [۲۴]. تمامی اعضاء با استفاده از المان سه بعدی C3D8R با انتگرال کاهش یافته مش بندی شده‌اند [۲۴]. مش‌های کوچکتری در اطراف چشمه اتصال که تغییرات بیشتری در تنش و کرنش را تجربه می‌کند تعریف شده است. شکل ۴ جزئیات مش‌بندی چشمه اتصال را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مش‌بندی چشمه اتصال در مدل اجزاء محدود نمونه ۲۰S-۱۸

۲-۲- نتایج تحلیل اجزاء محدود اتصال مرکزگرا

مدل اجزاء محدود نمونه ۲۰S-۱۸ که توسط گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) [۹] آزمایش شده بود ساخته شد. شکل ۵ نمودار بار جانبی-جابه‌جایی به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود را با نمودار متناظر آزمایشگاهی آن مقایسه می‌کند. بار جانبی و جابه‌جایی در نقطه اعمال بار در بالای بال ستون اندازه‌گیری می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل اجزاء محدود به خوبی توانسته است رفتار چرخه‌ای اتصال مرکزگرا را پیش‌بینی کند.

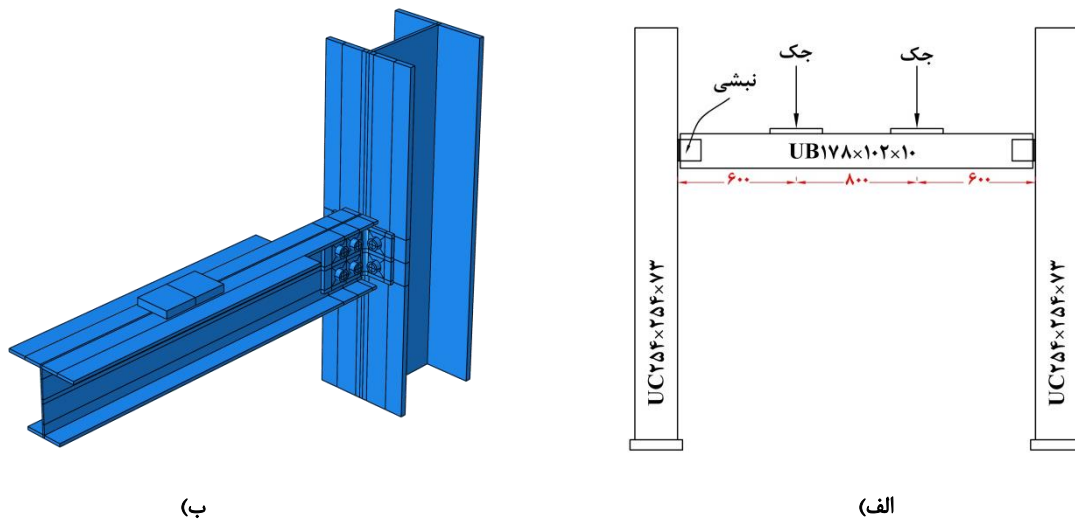


شکل ۵: مقایسه نمودار بار جانبی-جابه‌جایی مدل اجزاء با محدود با نمونه آزمایشگاهی [۲۶]

۳- مدل‌سازی اجزاء محدود اتصال با نبشی جان تحت اثر بارگذاری آتش

۳-۱- مدل‌سازی هندسه

در این قسمت یک اتصال تیر به ستون دارای نبشی جان با استفاده از تحلیل اجزاء محدود مدل شده است [۲۴]. این اتصال در کنار اتصالات دیگر نیمه صلب و مفصلی تیر به ستون توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱] تحت اثر بارگذاری آتش مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق ده نمونه آزمایش شد که برای بررسی اثر نیروی مهارکننده محوری در تیر از دو ستون با اندازه‌های مختلف استفاده گردید. در این آزمایش رفتار سازه‌ای در آتش مانند مدهای گسیختگی و جابه‌جایی وسط دهانه برای نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش مشخص کرد که اتصالات دارای نبشی جان رفتار بهتری را نسبت به سایر نمونه اتصالات نشان می‌دهند. شکل ۶ (الف) پیکربندی نمونه‌ها را در آزمایش وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱] نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده است پیکربندی از یک تیر و دو ستون با اتصالات مشابه تشکیل شده است. نمونه تست شماره ۴ برای مدل‌سازی در این مقاله انتخاب شده است. این نمونه از ستون‌هایی با مقطع $UC254 \times 254 \times 72$ و تیر با مقطع $UB178 \times 102 \times 10$ تشکیل شده است. نبشی‌هایی با مقطع $90 \times 150 \times 10$ و عرض 130 میلی‌متر در هر دو طرف جان تیر قرار داده شده‌اند. یک دریف دوتایی و دو دریف دوتایی پیچ $M20$ از نوع 8.8 نبشی‌ها را به ترتیب به بال ستون و جان تیر وصل می‌کنند. در مدل‌سازی اجزاء محدود تنها نیمی از نمونه با توجه به تقارن در پیکربندی آن شبیه‌سازی شده است. شکل ۶ (ب) نمای سه بعدی مدل را نشان می‌دهد. تمامی اجزاء با استفاده از المان‌های سه بعدی شکل‌پذیر جامد مدل شده‌اند.

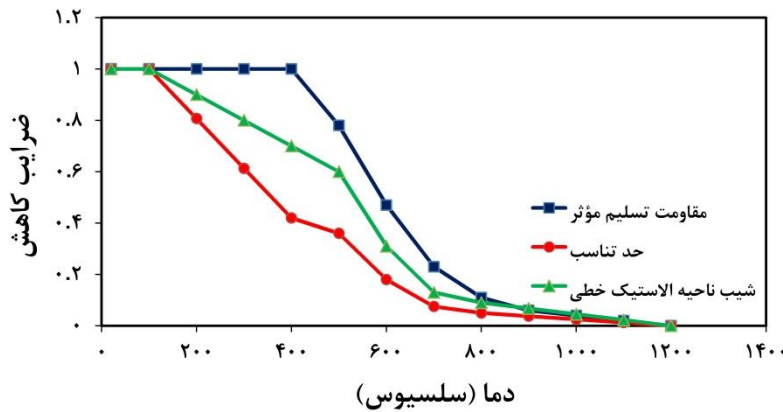


شکل ۶: الف) پیکربندی آزمایشگاهی در مدل وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱]، ب) پیکربندی در مدل اجزاء محدود

ستون‌ها و نبشی به ترتیب از فولاد $S355$ و $S275$ ساخته شده‌اند. خصوصیات مصالح از آزمایش کشش در دمای محیط به دست آمده‌اند [۲۱]. جدول ۲ مدول الاستیسیته، مقاومت تسلیم، مقاومت حداکثر و کرنش نهایی را که برای مدل‌سازی مصالح مورد نیاز هستند، ارائه می‌دهد. جدول ۲: خصوصیات مصالح (دای و همکاران (۲۰۱۰) [۱۹])

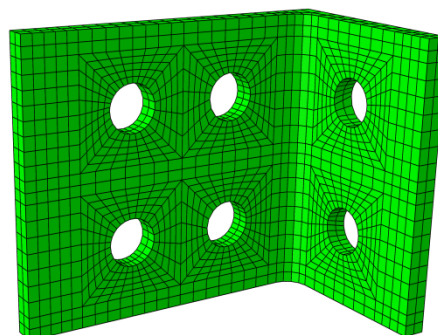
عضو	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	مقاومت حداکثر (مگاپاسکال)	کرنش نهایی (%)
تیر	۲۲۶۵۸۰	۳۴۴	۵۱۴	۲۸/۲
ستون	۲۰۰۰۰۰	۳۹۰	۵۵۳	۲۵
نبشی جان	۲۲۸۱۷۰	۳۴۲	۴۹۳	۳۲/۶

مدول الاستیسیته و مقاومت تسلیم اسمی پیچ ها مطابق مطالعه عددی دای و همکاران (۲۰۱۰) [۱۹] به ترتیب برابر ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال و ۶۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. چگالی و نسبت پواسون برای تمام اعضاء به ترتیب ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۳ تعریف شده است. برای تعریف خصوصیات مصالح در دماهای بالا از ضرایب کاهش یوروکد ۳ [۲۷] برای فولاد کربن دار استفاده گردیده است. شکل ۷ این ضرایب را برای رابطه تنش- کرنش فولاد در دماهای بالا نشان می دهد.



شکل ۷: ضرایب کاهش برای رابطه تنش-کرنش فولاد کربن دار در دماهای بالا [۲۷]

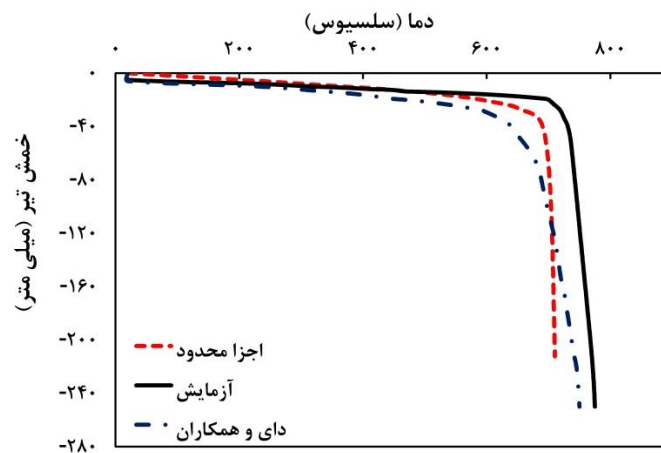
مانند قسمت قبل، قطعات جوشی با استفاده از قید tie شبیه سازی شده اند. اندرکنش میان سطوح تماسی نیز با استفاده از الگوریتم general contact تعریف شده است. مطابق با پیکربندی آزمایش، به پایین ستون تکیه گاه مفصلی اختصاص داده شده است. جابه جایی بالای ستون در دو جهت مقید شده اما در جهت محوری آزاد می باشد. به علت شرایط تقارنی که در مدل سازی اعمال شده است، جابه جایی تیر در جهت محوری آن بسته شده است. در مطالعه آزمایشگاهی، خرپایی به بال بالایی تیر پیچ شده بود تا اثرات دال بتنی در محدود کردن حرکات جانبی تیر شبیه سازی شود. در مدل سازی انجام شده توسط دای و همکاران (۲۰۱۰) [۱۹] این خرپا با دو ورق با ابعاد ۷۵۰×۵۰×۸ جایگزین شده است. ابعاد ورق ها به گونه ای حساب شده است که همان نیروی بازدارنده جانبی را برای تیر ایجاد کند. در مقاله حاضر نیز از ورق های با ابعاد ذکر شده برای مدل سازی استفاده شده است. همان طور که در شکل ۶ (الف) نشان داده است در آزمایش دو جک هیدرولیکی در دمای محیط هرکدام بار ۴۰ کیلو نیوتنی را به دو نقطه مشخص شده در تیر وارد می کنند. این بار در تمام مدت حرارت دهی به اتصال حفظ می شود. در مدل سازی اجزاء محدود نیز، ابتدا در یک گام جداگانه، بار ثابت از طریق یک ورق بارگذاری به تیر اعمال می شود و این بارگذاری در گام بعدی که دما افزایش می یابد، بر روی تیر نگه داشته می شود. مطابق آنچه در آزمایش ذکر شده است، تمامی اجزاء به جز بال بالایی تیر و خرپا در کوره در معرض آتش قرار می گیرند تا اثر وجود دال بتنی شبیه سازی شود. در مدل سازی شرایط مشابهی اعمال شده و از پروسه Explicit آباکوس برای تحلیل استفاده است. تمامی اعضاء به وسیله المان C۳D۸R و C۳D۸T با انتگرال کاهش یافته مش بندی شده اند. شکل ۸ جزئیات مش بندی نیشی جان را نشان می دهد.



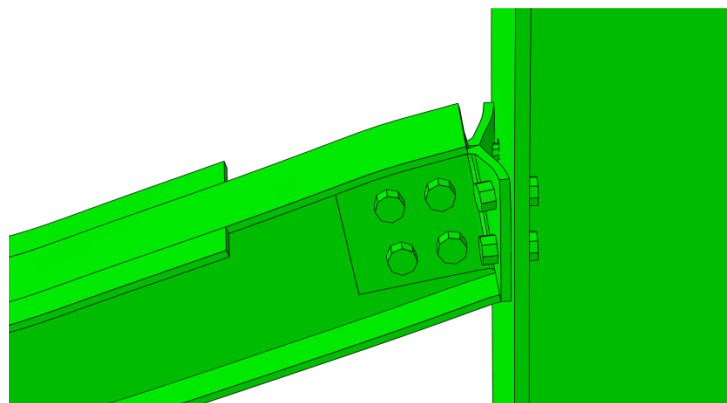
شکل ۸: جزئیات مش بندی نیشی جان در مدل اجزاء محدود نمونه شماره ۴

۳-۲- نتایج تحلیل اجزاء محدود اتصال با نبشی جان تحت اثر بارگذاری آتش

برای ارزیابی دقت مدل سازی رفتار یک اتصال دارای نبشی در دماهای بالا، مدل اجزاء محدود نمونه شماره ۴ در مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱] ساخته شد. در شکل ۹ نمودار خیز تیر-دما به دست آمده از مدل سازی اجزاء محدود با نمودار متنظر آزمایشگاهی آن در مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱] و نمودار شبیه سازی اجزاء محدود آن در مطالعه عددی دای و همکاران (۲۰۱۰) [۱۹] مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج به دست آمده انطباق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند. مطابق آن چه وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱] ذکر کرده اند تفاوت های موجود میان نتیجه آزمایشگاهی و اجزاء محدود می تواند به علت عدم یکنواختی حرارت دهی در کوره باشد. تغییر شکل مدل اجزاء محدود اتصال با نبشی جان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ارائه شده از این نمونه در انتهای آزمایش در مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱]، مدل سازی اجزاء محدود به خوبی توانسته است رفتار این اتصال را در دماهای بالا شبیه سازی کند.



شکل ۹: مقایسه نمودار خیز تیر-دما در مدل اجزاء محدود و آزمایشگاهی نمونه شماره ۴ [۱۹، ۲۱]

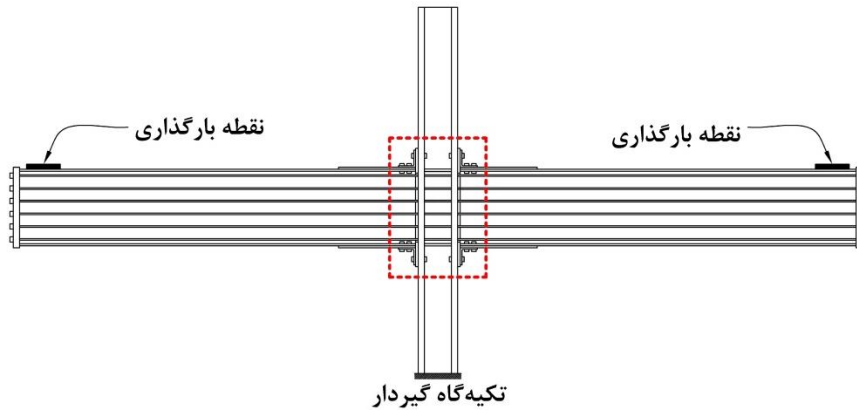


شکل ۱۰: تغییر شکل مدل اجزاء محدود نمونه شماره ۴ در انتهای تحلیل

۴- مدل سازی اجزاء محدود اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش

۴-۱- مدل سازی هندسه

برای شبیه سازی رفتار اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش، مدل اجزاء محدود نمونه ۱۸-۲۰S که تحت اثر بار چرخه ای صحت سنجی شده است باید تغییر یابد. برای شبیه سازی رفتار مصالح در دماهای بالا ضرایب کاهش یوروکد ۳ [۲۷] به کار گرفته شده است. تغییرات اندکی در پیکربندی و شرایط مرزی نمونه داده شده است. به جای وارد کردن بار چرخه ای به بالای بال ستون، بارهای نقطه ای ثابتی به نقاط مشخص شده در شکل ۱۱ روی تیر وارد شده اند. همچنین تکیه گاه های تیر حذف شده اند و تکیه گاه ستون از حالت مفصلی به گیردار تغییر یافته است.

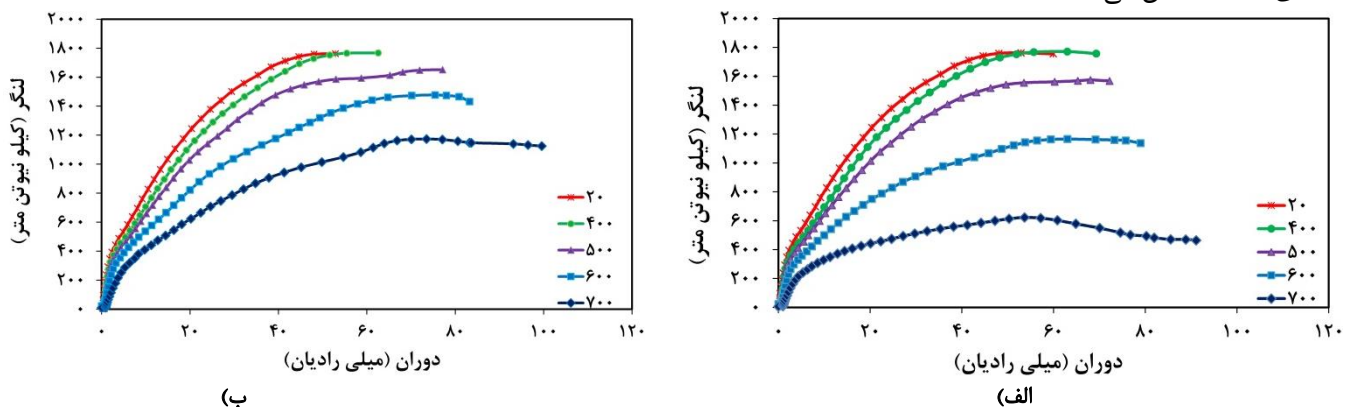


شکل ۱۱: پیکربندی مدل اجزاء محدود اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش

از پروسه Explicit آباکوس برای تحلیل استفاده شده است. تحلیل در سه گام انجام شده است. در گام اول، کابلها و پیچها پیش تنیده شده اند. در گام دوم، دمای ناحیه اتصال تا مقدار مشخصی افزایش یافته است. در گام سوم، در حالی که دمای ناحیه اتصال حفظ شده است بارهای نقطه‌ای متمرکز به صورت جابه‌جایی به تیرها وارد شده است. مش ناحیه اتصال به المان C3D8T تغییر یافته است. برای ارزیابی دقیق عملکرد کابلها بر روی رفتار اتصال مرکزگرا، دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول کابلها بدون محافظت فرض شده‌اند و به قسمتی از آنها که در ناحیه اتصال قرار گرفته است بار حرارتی اعمال شده است. در حالت دوم فرض شده است که کابلها دارای پوشش محافظ در برابر آتش هستند. تحلیل هر دو حالت در دماهای ۲۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس انجام شده است و در نهایت ظرفیت لنگر اتصال برای تمامی دماها مقایسه شده است.

۲-۴- نتایج تحلیل اجزاء محدود اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش

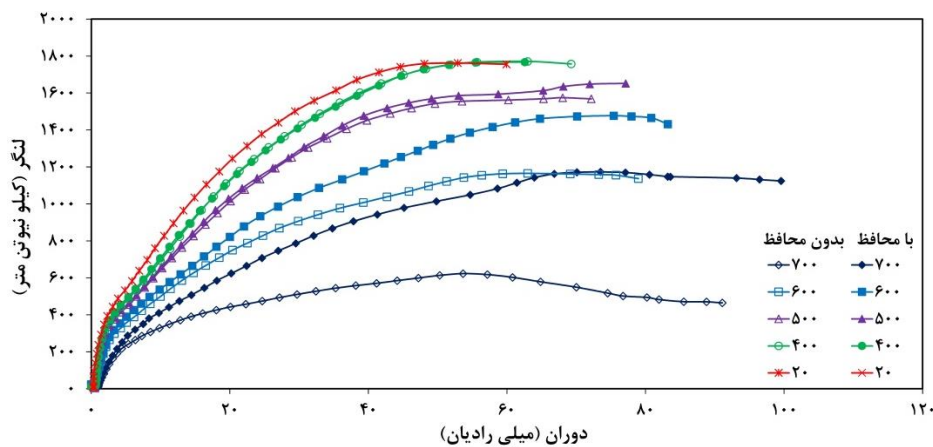
برای بررسی اثر کابل بر روی رفتار اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش، دو حالت مطابق آنچه در قسمت قبل توضیح داده شد در نظر گرفته شده است. مدل مربوط به هر حالت تحت اثر دماهای ۲۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفته است و نمودارهای لنگر-دوران آن به دست آمده‌اند. شکل ۱۲ منحنی‌های لنگر-دوران را برای دو مدل اجزاء محدود با کابل بدون محافظ و دارای محافظ در برابر آتش در دماهای مختلف نشان می‌دهد.



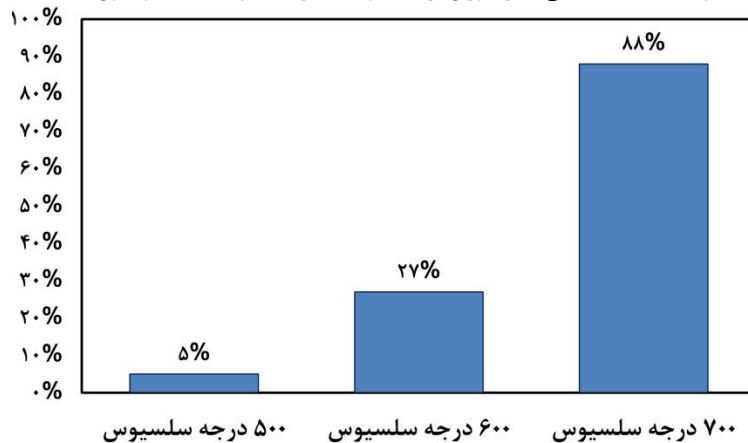
شکل ۱۲: منحنی‌های لنگر-دوران در دماهای مختلف، الف) با کابل بدون محافظ، ب) با کابل دارای محافظ

همان طور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس کاهش زیادی در ظرفیت لنگر اتصال مشاهده نمی‌شود. این مسأله به این علت می‌باشد که تا این دما تغییر قابل توجهی در خصوصیات مصالح فولادی به وجود نمی‌آید. اما در ادامه با افزایش دما، افت بیشتری در ظرفیت لنگر به وجود می‌آید که این وضعیت در نمونه با کابل بدون محافظ شدیدتر است. همچنین مشاهده می‌شود که مدل دارای کابل حفاظت شده، مقاومت خمشی بیشتری در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس نسبت به مدل با کابل بدون محافظ دارد و دیرتر دچار تسلیم می‌گردد.

شکل ۱۳ منحنی های لنگر-دوران را برای دو حالت کابل بدون محافظ و دارای محافظ با یکدیگر در دماهای مختلف مقایسه می کند. همان طور که نشان داده شده است در دمای ۲۰ درجه و ۴۰۰ درجه سلسیوس، منحنی های دو مدل کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند. این مسأله نشان می دهد که تا دمایی که افت محسوسی در خصوصیات مصالح فولادی به وجود نیامده است، کابل های بدون محافظ و دارای محافظ اثر کاملاً مشابهی بر روی رفتار اتصال مرکزگرا دارند. اما با افزایش دما، مدل دارای کابل حفاظت شده ظرفیت لنگر بسیار بیشتری را از خود نشان می دهد. در شکل ۱۴ تفاوت میان ظرفیت لنگر ماکزیمم اتصال در دماهای ۲۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس نشان داده شده است (همان طور که پیش تر ذکر شد هیچ تفاوتی در ظرفیت لنگر این مدل ها در دماهای ۲۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس وجود ندارد و از این رو در این نمودار ارائه نشده اند). مشاهده می شود که با افزایش دما تفاوت میان ظرفیت لنگر ماکزیمم دو مدل بیشتر می گردد. برای به دست آوردن تفاوت لنگر ماکزیمم، حداکثر لنگر به دست آمده از نمودار لنگر-دوران مدل با کابل حفاظت شده تقسیم بر متناظر آن از مدل با کابل بدون محافظ شده است.



شکل ۱۳: مقایسه منحنی لنگر-دوران برای مدل های دارای کابل با محافظ و بدون محافظ



شکل ۱۴: تفاوت میزان لنگر ماکزیمم در مدل با کابل با محافظ نسبت به مدل دارای کابل بدون محافظ

۵- نتیجه گیری

اتصالات مرکزگرا سیستم هایی هستند که برای استفاده در ساختمان هایی که در مناطق لرزه خیز قرار گرفته اند، طراحی شده اند. به دلیل آن که آتش سوزی از محتمل ترین اتفاقاتی است که ممکن است در حین یا بعد از وقوع زلزله رخ دهد، ارزیابی عملکرد اتصالات مرکزگرا که بیشترین کاربرد آن ها در مناطق لرزه خیز می باشد اهمیت ویژه ای پیدا می کند. در این راستا مطالعه عددی بر روی یک اتصال مرکزگرای دارای نبشی نشیمن و بالایی پیچی تحت اثر بارگذاری آتش انجام شده است. این اتصال مرکزگرا با استفاده از مدل سازی اجزاء محدود شبیه سازی شده و رفتار چرخه ای آن بر پایه نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی گردیده است. از آنجا که مطالعه آزمایشگاهی در زمینه رفتار اتصال مرکزگرا تحت اثر بارگذاری آتش وجود ندارد، یک اتصال تیر به ستون دیگر با نبشی جان مدل سازی و صحت سنجی شده است تا از دقت مدل سازی رفتار یک اتصال دارای نبشی در دماهای بالا اطمینان حاصل گردد. تفاوت عمده این اتصال مرکزگرا با یک اتصال نیمه صلب معمولی، وجود کابل های پس کشیده می باشد و به همین دلیل، بررسی اثر این کابل ها بر رفتار اتصال از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا دو حالت برای



اولین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف



کابل های اتصال شامل بدون محافظ و دارای پوشش محافظ در برابر آتش فرض شده است. برای هر دو حالت، نمودارهای لنگر-دوران اتصال به دست آمده و مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از تحلیل نشان می دهد که در دماهای ۲۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس که خصوصیات مصالح فولادی دچار تغییر زیادی نمی شود منحنی های هر دو مدل کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند. اما با افزایش دما و افت خصوصیات مصالح فولادی، مدل دارای کابل حفاظت شده رفتار بسیار بهتری نسبت به مدل دارای کابل بدون محافظ نشان می دهد. به طوری که در دماهای ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس، ظرفیت لنگر ماکزیمم اتصال دارای کابل حفاظت شده به ترتیب ۰.۵٪، ۰.۲۷٪ و ۰.۸۸٪ نسبت به مدل با کابل بدون محافظ بیشتر می باشد. این تفاوت چشم گیر در ظرفیت اتصال نشان می دهد که استفاده از پوشش محافظ برای کابل ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد اتصال مرکزگرا می گذارد و آن را بهبود می بخشد

مراجع

- [۱] Christopoulos C., Filiatrault, A., Uang, C.-M. and Folz, B.; "Posttensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames"; *Journal of Structural Engineering*, No. ۱۲۸, (۲۰۰۲), ۱۱۱۱-۲۰
- [۲] Venture S. J.; "Recommended design criteria for new steel moment frame structures"; ۲۰۰۰
- [۳] Miller D. K.; "Lessons learned from the Northridge earthquake"; *Engineering Structures*, No. ۲۰, (۱۹۹۸), ۲۴۹-۶۰
- [۴] Tremblay R. and Filiatrault, A.; "Seismic performance of steel moment resisting frames retrofitted with a locally reduced beam section connection"; *Canadian Journal of Civil Engineering*, No. ۲۴, (۱۹۹۷), ۷۸-۸۹
- [۵] Engelhardt M. D. and Sabol, T. A.; "Reinforcing of steel moment connections with cover plates: benefits and limitations"; *Engineering Structures*, No. ۲۰, (۱۹۹۸), ۵۱۰-۲۰
- [۶] Shiravand M. and Deylami, A.; "Technical papers: application of full depth side plate to moment connection of I-beam to double-I column"; *Advances in Structural Engineering*, No. ۱۳, (۲۰۱۰), ۱۰۴۷-۶۲
- [۷] Kurama Y., Sause, R., Pessiki, S. and Lu, L.-W.; "Lateral load behavior and seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls"; *Structural Journal*, No. ۹۶, (۱۹۹۹), ۶۲۲-۳۲
- [۸] Ricles J. M., Sause, R., Garlock, M. M. and Zhao, C.; "Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames"; *Journal of Structural Engineering*, No. ۱۲۷, (۲۰۰۱), ۱۱۳-۲۱
- [۹] Garlock M. M., Ricles, J. M. and Sause, R.; "Experimental studies of full-scale posttensioned steel connections"; *Journal of Structural Engineering*, No. ۱۳۱, (۲۰۰۵), ۴۳۸-۴۸
- [۱۰] Ricles J., Sause, R., Peng, S. and Lu, L.; "Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections"; *Journal of Structural Engineering*, No. ۱۲۸, (۲۰۰۲), ۸۵۰-۹
- [۱۱] Garlock M. M., Ricles, J. M. and Sause, R.; "Cyclic load tests and analysis of bolted top-and-seat angle connections"; *Journal of Structural Engineering*, No. ۱۲۹, (۲۰۰۳), ۱۶۱۵-۲۵
- [۱۲] Chou C. C., Chen, J. H., Chen, Y. C. and Tsai, K. C.; "Evaluating performance of post-tensioned steel connections with strands and reduced flange plates"; *Earthquake engineering & structural dynamics*, No. ۳۵, (۲۰۰۶), ۱۱۶۷-۸۵
- [۱۳] Chou C.-C. and Lai, Y.-J.; "Post-tensioned self-centering moment connections with beam bottom flange energy dissipators"; *Journal of Constructional Steel Research*, No. ۶۵, (۲۰۰۹), ۱۹۳۱-۴۱
- [۱۴] Vasdravellis G., Karavasilis, T. L. and Uy, B.; "Large-scale experimental validation of steel posttensioned connections with web hourglass pins"; *Journal of Structural Engineering*, No. ۱۳۹, (۲۰۱۲), ۱۰۲۳-۴۲
- [۱۵] Rojas P., Ricles, J. and Sause, R.; "Seismic performance of post-tensioned steel moment resisting frames with friction devices"; *Journal of Structural Engineering*, No. ۱۳۱, (۲۰۰۵), ۵۲۹-۴۰
- [۱۶] Iyama J., Seo, C., Ricles, J. and Sause, R.; "Self-centering MRFs with bottom flange friction devices under earthquake loading"; *Journal of Constructional Steel Research*, No. ۶۵, (۲۰۰۹), ۳۱۴-۲۵
- [۱۷] Tsai K. C., Chou, C. C., Lin, C. L., Chen, P. C. and Jhang, S. J.; "Seismic self-centering steel beam-to-column moment connections using bolted friction devices"; *Earthquake engineering & structural dynamics*, No. ۳۷, (۲۰۰۸), ۶۲۷-۴۵
- [۱۸] Jones S., Kirby, P. and Nethercot, D.; "The analysis of frames with semirigid joints: A state-of-the-art report"; *UK: Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield*, (۱۹۸۱)
- [۱۹] Dai X., Wang, Y. and Bailey, C.; "Numerical modelling of structural fire behaviour of restrained steel beam-column assemblies using typical joint types"; *Engineering Structures*, No. ۳۲, (۲۰۱۰), ۲۳۳۷-۵۱
- [۲۰] Yu H., Burgess, J., Davison, J. and Plank, R.; "Tying capacity of web cleat connections in fire, Part ۱: Test and finite element simulation"; *Engineering Structures*, No. ۳۱, (۲۰۰۹), ۶۵۱-۶۳
- [۲۱] Wang Y., Dai, X. and Bailey, C.; "An experimental study of relative structural fire behaviour and robustness of different types of steel joint in restrained steel frames"; *Journal of Constructional Steel Research*, No. ۶۷, (۲۰۱۱), ۱۱۴۹-۶۳
- [۲۲] Qiang X., Bijlaard, F. S., Kolstein, H. and Jiang, X.; "Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions-Part ۱: Experimental study"; *Engineering Structures*, No. ۶۴, (۲۰۱۴), ۲۳-۳۸
- [۲۳] Qiang X., Bijlaard, F. S., Kolstein, H. and Jiang, X.; "Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions-Part ۲: Numerical study"; *Engineering Structures*, No. ۶۴, (۲۰۱۴), ۳۹-۵۱
- [۲۴] Hibbit H., Karlsson, B. and Sorensen, E.; "ABAQUS User Manual, Version ۶.۱۲"; Simulia, (۲۰۱۲)