

بررسی عددی تأثیر تنش‌های حرارتی بر رفتار اتصالات تیر عریض - ستون بتن مسلح

امیرحسین باباشاه^۱، سارا میرزاباغری^{۲*}

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران - سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲-استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند

sara_mirzabagheri@yahoo.com

تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۱/۲۵

چکیده

آتش سوزی یکی از خطرهایی است که مطالعه پیرامون آثار آن بر سازه‌های مختلف ضروری است. آتش سوزی می‌تواند باعث وارد آمدن خسارات اجتماعی و اقتصادی وسیع شود. به علاوه اطلاع از میزان خرابی بتن در معرض حرارت نیز می‌تواند در مباحث مقاوم سازی سازه‌ها به طراحان کمک کند. اتصالات یکی از نواحی بسیار حساس در کلیه قاب‌های سازه‌ای اعم از فولادی و بتنی هستند که عملکرد آنها اثر بسیار مهمی روی پاسخ سازه دارد. بدین منظور مطالعه پیرامون رفتار انواع اتصالات تیر-ستون در شرایط محیطی متفاوت قابل اهمیت است. شایان ذکر است، داده‌های آزمایشگاهی و عددی پیرامون رفتار اتصالات تیر-ستون بتن مسلح در حرارت‌های بالا موجود نیست. علاوه بر آن به دلیل ویژگی خاص اتصالات تیر عریض-ستون یعنی عبور بخشی از آرماتورهای طولی تیر عریض از خارج چشمه اتصال، در این پژوهش رفتار اتصالات تیر عریض-ستون بتن مسلح تحت تأثیر تنش‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله ۹ مدل عددی اتصال تیر عریض-ستون تحت آتش سوزی مورد بررسی قرار گرفت. پس از اعتبارسنجی نمونه‌های مدل‌سازی شده، مطالعه پارامتریک روی آنها انجام شد. پارامترهایی از قبیل ارتفاع تیر عریض، مساحت میلگردهای تیر، مقاومت بتن و درصد میلگردهای عبوری از چشمه اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع تیر، مقاومت سازه در برابر حریق بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش مساحت میلگرد و مقاومت بتن، مقاومت سازه در برابر آتش بیشتر می‌شود. به علاوه با کاهش میلگرد عبوری از چشمه اتصال، مقاومت سازه در آتش سوزی کاهش می‌یابد. در تمامی این موضوعات یک ویژگی مشترک وجود دارد؛ تمامی اتصالات در دمای حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد شروع به تشکیل مفصل پلاستیک کرده و این دما در اتصالات، در زمانی حدود ۲۰۰ دقیقه پس از شروع آتش سوزی شکل می‌گیرد.

کلمات کلیدی: اتصال تیر عریض-ستون، اتصال بتن مسلح، تنش‌های حرارتی، آتش سوزی، مدل‌سازی عددی

۱- مقدمه

رشد بی‌رویه جمعیت شهرنشینی ناشی از سیل مهاجرت به شهرها در سال‌های اخیر روند ساختمان سازی را شدت بخشیده به گونه‌ای که گرایش به سمت احداث ساختمان‌های آپارتمانی با طبقات بیشتر را افزایش داده است. از طرفی با توجه به این که بیشتر شهرهای کشور روی شبکه‌ای از لوله کشی گاز قرار دارند، محتمل است که با وقوع یک زلزله نسبتاً شدید، در سیستم این شبکه شکستگی و به دنبال آن انفجار به وجود آید که پیامدهای آن، آتش سوزی‌های وسیع و مهیبی در سطح شهر خواهد بود. ضمن اینکه بسته شدن خیابان‌ها بر اثر تخریب ساختمان‌ها و قطع لوله‌های آب شهری بر اثر زلزله نیز امکان مهار سریع این قبیل آتش سوزی‌ها را بسیار ضعیف خواهد کرد.

سیستم سازه‌ای بتن مسلح در سازه‌های بلند نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد که یکی از مزایای آن، مقاومت در برابر آتش سوزی است که سازنده را از به کار بردن تمهیدات ضد حرارت روی آن بی‌نیاز می‌کند. هرچند به طور کلی بتن قابلیت حفظ ویژگی‌های خود در دماهای بالا را دارد و بیشتر به عنوان یک ماده مقاوم در برابر حریق شناخته می‌شود، اما دماهای بالا تغییرات بسیاری در ساختار بتن و تنش‌های داخلی آن ایجاد می‌کند و ویژگی‌های مکانیکی بتن ساخته شده از سیمان را تغییر می‌دهد و در نتیجه ظرفیت باربری بتن مسلح را کاهش داده و تغییر مکان آن را بیشتر می‌کند. بنابراین عملکرد بهتر بتن نسبت به فولاد در برابر حریق به این معنی نیست که بتن قابلیت مقاومت در برابر هر حریق با هر زمان و شدت را دارد. نمونه‌های بسیاری از ساختمان‌ها دیده شده که حریق، خساراتی جبران ناپذیر به آنها وارد کرده است. از جمله آنها ساختمان‌های دوقلوی تجارت جهانی نیویورک را می‌توان نام برد که حرارت عامل فرو ریختن آن در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ بوده است. به عنوان نمونه دیگر می‌توان به فرو ریختن ساختمان پلاسکو در دی ماه ۱۳۹۵ تهران اشاره کرد. همین امر سبب افزایش توجه پژوهشگران و مهندسين در سراسر دنیا نسبت به تأثیر آتش سوزی بر مقاومت مصالح گوناگون در صنعت ساختمان هست.

اتصالات تیر- ستون در سازه‌های بتن مسلح از نواحی بحرانی هستند که باید از تخریب آنها جلوگیری کرد. چرا که آسیب دیدن این نواحی می‌تواند منجر به فروپاشی کل سازه شود. به این منظور مطالعه رفتار این بخش از سازه‌ها ضروری است. در گذشته، پژوهشگران اثر پارامترهای مختلف بر رفتار اتصالات تیر- ستون بتن مسلح را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار داده‌اند.

در سال ۲۰۰۹ کلیمنت و همکاران روی اتصالات بیرونی تیر عریض ستون در قاب‌های بتن مسلح موجود در معرض بارهای جانبی آزمایش‌هایی انجام دادند. عملکرد لرزه‌ای اتصال تیر عریض- ستون بتن مسلح با تیرهای کم عمق برای پیچش و مقدار متوسط بارهای گرانشی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه دقیقی با توجه به روش‌های ساخت و ساز روی قاب‌های موجود بیش از ۱۰ سال طراحی شده تحت بار متوسط لرزه‌ای، انجام شده است. سازه از نظر نیرو، جابه‌جایی، انعطاف پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان دادند که نمونه‌ها دارای یک نوع سازوکار خرابی "تیر قوی- ستون ضعیف" بودند [1]. در سال ۲۰۱۶ میرزاباقری و همکاران روی رفتار اتصالات داخلی تیر عریض- ستون بتن مسلح طبقه بام تحت بار چرخه‌ای تحقیق کرده‌اند. عملکرد اتصالات با ستون‌های ناپیوسته به دلیل کمبود پژوهش‌ها یکی از مباحث مورد نیاز توسط آیین‌نامه بتن آمریکا معرفی شده است. نتایج نشان داد که اتصالات تیر عریض- ستون مقاومت برشی کافی را دارد [2]. در سال ۲۰۱۶ فرناندو گومز و همکاران روی عملکرد لرزه‌ای اتصال تیر عریض- ستون آزمایش‌هایی انجام داده‌اند [3]. در سال ۲۰۱۶ میرزاباقری و همکاران اتصالات تیر عریض و معمولی- ستون بتن مسلح تحت بار لرزه‌ای آزمایش‌هایی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که اختلاف قابل توجهی بین ظرفیت استهلاک انرژی نمونه‌ها وجود نداشت. علاوه بر این، نیروی برشی در اتصال تیر عریض- ستون کافی است [4]. مقایسه رفتار اتصالات داخلی تیر عریض- ستون با عرض تیرهای مختلف توسط الهه اعتمادی و همکاران به صورت اجزا محدودی در سال ۱۳۹۶ ارائه شده است. رفتار اتصالات از لحاظ انعطاف پذیری، مقاومت و اتلاف

توجه به اهمیت اتصالات و نیز رفتار متفاوت اتصالات تیر عریض- ستون در سازه‌های بتن مسلح، اثر تنش‌های حرارتی بر این اجزاء سازه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اثر حرارت‌های مختلف بر رفتار این اتصالات در رابطه با درصد آرماتورهای طولی تیر عریض که از خارج هسته ستون عبور کرده‌اند، مشخص شود.

۲- روش تحقیق

با توجه به عدم وجود داده آزمایشگاهی پیرامون رفتار اتصالات تیر عریض-ستون تحت تنش‌های حرارتی، یکی از المان‌های آزمایش شده در کوره به عنوان نمونه اولیه مدلسازی حرارت انتخاب شد. بدین منظور، تحلیل حرارتی و مکانیکی نمونه آزمایشگاهی، ستون آزمایش شده توسط کدور و همکاران [9] در نرم افزار آباکوس بر اساس آزمایش انجام شده ساخته شد و نتایج آن با آزمایش تجربی مقایسه شد. ابتدا تحلیل انتقال حرارت انجام شد. سپس دماهای گره‌ای و نتایج تحلیل حرارتی در قالب یک فایل ورودی به مدل مکانیکی وارد شد و سرانجام پاسخ ستون بتن مسلح تحت بار آتش به دست آمده است.

برای تحلیل حرارتی، به هر چهار وجه ستون بتنی، بارگذاری حرارتی که منطبق بر آتش استاندارد ASTM-E119 [10] است، مطابق با رابطه ۱ اعمال می‌شود که در شکل (۱) نشان داده شده است.

$$\theta_g = 20 + 750[1 - \exp(-3.79553\sqrt{t})] + 170.41\sqrt{t} \quad (1)$$

شکل ۱. منحنی دما- زمان آتش استاندارد ASTM-E119 [۱۰]

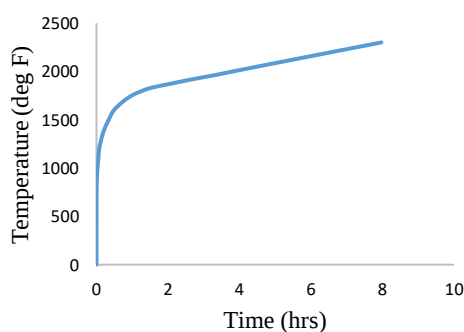


Fig. 1. Standard curve of temperature-time based on ASTM-E119 standard [10]

انرژی به صورت کمی اندازه‌گیری شد [5]. در سال ۲۰۱۸، میرزاباقری و همکاران مطالعه آزمایشگاهی و عددی روی اتصالات داخلی تیر عریض-ستون بتن مسلح تحت بار جانبی را انجام دادند. دو نمونه تیر عریض-ستون بتن مسلح تحت بارهای چرخه‌ای شبه‌استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفت و عملکرد نمونه‌ها به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که تقویت طولی تیر عریض تأثیر قابل توجهی بر رفتار لرزه ای اتصالات دارد [6]. تجزیه و تحلیل پارامتری اجزا محدود اتصالات بتن مسلح تیر عریض-ستون، توسط حمدالله بهنام و همکاران در سال ۲۰۱۸ ارائه شده است. پارامترهای مختلف از جمله ویسکوزیته، اندازه مش، زاویه اتساع، متغیرهای سطح عملکرد، شکست، نیرو و نوع تجزیه و تحلیل مورد بحث قرار گرفت. سرانجام، مطالعه عددی پارامتری برای کشف اثر پارامترهای مختلف ستون از جمله بار محوری، ابعاد تیر و ستون، نسبت لنگر تیر بر عملکرد اتصالات تیر عریض به ستون بیرونی انجام شد [7]. در سال ۲۰۱۸ اجمرا و همکاران اثر درجه حرارت بالا روی اتصالات تیر عریض-ستون بتنی را مورد مطالعه قرار دادند. در این آزمایش‌ها مشاهده شد بتن تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، از نظر کیفیت بدون تغییر باقی مانده است و حداکثر ۱۰٪ از مقاومت خود را از دست می‌دهد. در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، کیفیت بتن کاهش یافت، اما ۲۵٪ یا کمتر مقاومت خود را از دست می‌دهد و همچنان قابل استفاده است؛ اما عامل ایمنی در سازه کاهش می‌یابد. در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد بخش قابل توجهی از مقاومت را از دست می‌دهد و در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، بتن بیشترین مقاومت خود را از دست می‌دهد و نیاز به جایگزینی دارد. مقاومت تیرهای عریض نسبت به تیرهای معمولی تقریباً همیشه بیشتر است [8].

اما مطالعاتی پیرامون اثر حرارت بر اتصالات تیر معمولی-ستون و تیر عریض-ستون بتن مسلح بندرت مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل عبور درصدی از آرماتورهای طولی تیر عریض از خارج چشمه اتصال در اتصالات تیر عریض-ستون، این نواحی باید با ملاحظات دقیقی طراحی شود تا قابلیت استهلاک انرژی در هنگام رخداد آتش را دارا باشند. در این پژوهش با

آتش‌سوزی پس از زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرند که در ادامه مشخصات نمونه‌ها ارائه می‌شود.

۳-۱- مشخصات نمونه آزمایشگاهی

به منظور بررسی عوامل مؤثر بر میزان مقاومت اتصال تیر عریض- ستون بتن مسلح در حرارت، یک نمونه آزمایشگاهی اتصال تیر عریض- ستون که توسط این پژوهشگران و همکاران آزمایش شده است، بصورت عددی در نرم‌افزار اجزای محدودی آباکوس مدل‌سازی شد. بتن دارای مقاومت ۴۰ مگا پاسکال و فولاد دارای مقاومت ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. این نمونه دارای یک اتصال تیر عریض- ستون بتن مسلح است، که ابعاد ستون ۴۵۰×۴۵۰ میلی‌متر و ارتفاع آن ۳۰۰۰ میلی‌متر و تیر دارای ابعاد ۹۰۰×۳۰۰ میلی‌متر و به طول ۳۸۵۰ میلی‌متر است که در انتهای ستون دو عدد صفحه فولادی به ابعاد ۴۵۰×۴۵۰ میلی‌متر به ضخامت ۱۰ میلی‌متر قرار داده شده است. در دو انتهای تیر نیز صفحات فولادی با ابعاد ۹۰۰×۳۰۰ میلی‌متر و به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در بالا و پایین قرار داده شده است. آرماتورگذاری تیر به صورت ۷ عدد میلگرد با قطر ۱۸ میلی‌متر در بالا و ۳ عدد میلگرد با قطر ۱۴ و ۴ عدد میلگرد با قطر ۱۶ میلی‌متر در پایین است. خاموت‌های عرضی با قطر ۸ میلی‌متر آرماتورهای طولی را محصور کرده‌اند. در ستون ۱۲ عدد میلگرد طولی با قطر ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده که با خاموت عرضی ۸ میلی‌متری محصور شده‌اند. کاور بتن در اتصال ۲۵ میلی‌متر است. خاموت گذاری در انتهای تیر با فاصله ۵۰ میلی‌متر از یکدیگر و در وسط تیر به فاصله ۲۰۰ میلی‌متر است. خاموت ستون در انتهای دو سر آن به فاصله ۲۰۰ میلی‌متر بوده و در وسط این فاصله به ۱۲۰ میلی‌متر می‌رسد.

شرایط تکیه‌گاهی دو انتهای تیر به صورت غلطکی بوده و در پایین ستون مفصلی است. بار وارد شده به بالای ستون معادل ۹۳۰ کیلو نیوتن بر مترمربع بوده و مقدار بار مرده و زنده وارد شده به تیر نیز ۵ کیلو نیوتن بر متر مربع است. شکل‌های (۳) و (۴) مشخصات نمونه آزمایش شده را نشان می‌دهند. برای جزئیات بیشتر به مرجع [14] مراجعه شود.

شایان ذکر است برای اعمال حرارت به صورت حقیقی، حرارت از طریق تشعشع و همرفت منتقل می‌شود. به این منظور، تشعشع و همرفت با استفاده از ضریب همرفتی و نیز ضریب تشعشع در سطح تحت حرارت و ثابت استفان-بولتزمن تعریف می‌شود. مقادیر پارامترهای مورد نیاز با استفاده از آیین نامه یوروکد ۴ [11] تعیین می‌شود.

ویژگی‌های مصالح تحت حرارت با توجه به افزایش دما تغییر می‌یابد که مقادیر و روابط در آیین نامه یوروکد ۲ [12] و یوروکد ۳ [13] ارائه شده است. در قسمت step از تحلیل گر Heat transfer استفاده می‌شود. در قسمت Interaction برای انتقال حرارت از بتن به فولاد از surface-to-surface-contact استفاده می‌شود و برای انتقال حرارت به اتصال، cavity radiation و surface radiation مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای صفر مطلق، ۲۷۳- درجه کلوین و ثابت Boltzmann نیز 5.670400×10^{-8} است. پس از انجام مدل‌سازی و انجام تحلیل حرارتی، مطابق شکل (۲) نتایج حاصل از آزمایش با نتایج عددی یکسان است.

شکل ۲. نتایج تحلیل حرارتی ستون بتنی

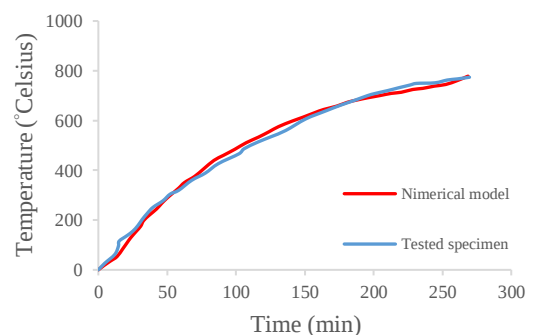


Fig. 2. Results of thermal analysis of a concrete column

۳- بررسی نمونه‌های عددی

در این پژوهش، ۹ اتصال تیر عریض- ستون در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و بعد از اعتبارسنجی مدل‌سازی‌ها، نمونه‌ها برای

۳-۲- چگونگی مدلسازی عددی

ابتدا نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار آباکوس مدلسازی شد. کلیه جزئیات نمونه و شرایط تکیه گاهی بر طبق نمونه آزمایش شده است. بار جانبی به بالای نمونه اعمال شد و دیاگرام بار-جابجایی استخراج شد و با پوش منحنی هیستریزس مقایسه شد. آنالیز حساسیت روی برخی از پارامترها نیز انجام شد تا مناسب ترین مقدار برای پارامتر مربوطه بدست آید که جزئیات آن در بخش بعد ارائه می شود.

پس از انجام اعتبارسنجی مدلسازی انجام شده، مطالعه اثر حرارت روی نمونه ها انجام شد. توزیع حرارت در ارتفاع نمونه های در معرض آتش سوزی در چهار جهت یکنواخت در نظر گرفته شده است. رفتار همه اتصالات تحت آتش سوزی استاندارد ISO 834 مورد بررسی قرار گرفت. این تحلیل شامل دو بخش تحلیل حرارتی و مکانیکی است که در آخر، اثر تحلیل حرارت به تحلیل مکانیکی اضافه می شود. در این مدلسازی تماماً از المان سالیید استفاده شده است تا اثر حرارت روی تک تک المانها قابل دریافت باشد. دو استپ Heat Transfer و Static, General استفاده شده است. اتصالات به مدت ۴۵ دقیقه تحت نیروی استاتیکی قرار گرفته و پس از آن به مدت ۵ ساعت تحت آتش سوزی و نیروی استاتیکی مورد مطالعه قرار می گیرند. در بخش اینترکشن برای تحلیل حرارت از سه اینترکشن Cavity، Surface radiation و radiation Surface-to-surface contact استفاده شده است. در تحلیل استاتیکی برای اتصال بین بتن و فولاد از اینترکشن Embedded region استفاده می شود. اندازه مش ها ۴۰ میلی متر است. مش تیر و ستون از نوع Hex-structured و میلگردها Hex-dominated-sweep است.

۴- پارامترهای حساسیت سنجی

به منظور اعتبارسنجی مدلسازی انجام شده، یک سری پارامترها مورد مطالعه حساسیت سنجی قرار گرفت که در جدول (۱) ارائه شده است.

شکل ۳. جزئیات اتصال بتنی و سطح مقطع نمونه مورد آزمایش توسط عیسی و همکاران [۱۴]

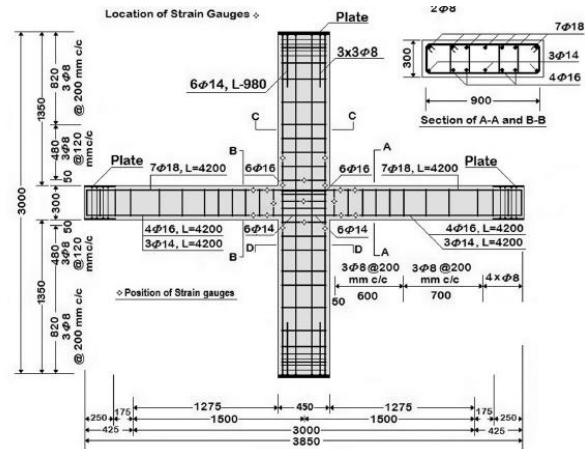


Fig. 3. Details of concrete connection and cross section of the tested specimen by Issa et al. [14]

شکل ۴. جزئیات سطح مقطع

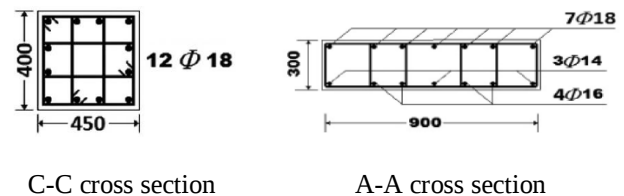


Fig. 4. Details of cross sections

پس از اعمال بار سایکلیک جانبی به نمونه عنوان شده، منحنی هیستریزس این نمونه بدست آمد که پوش این منحنی در شکل ۵ نشان داده شده است.

شکل ۵. پوش منحنی هیستریزس دیاگرام بار-جابجایی

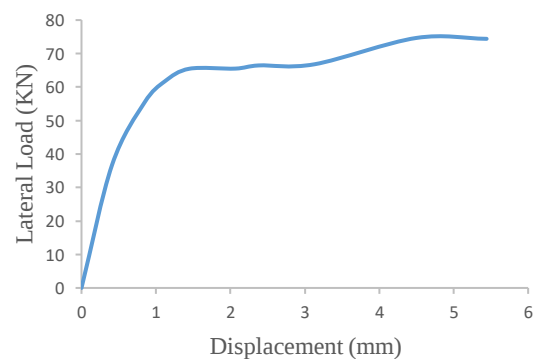


Fig. 5. Push of load-displacement hysteresis diagram

شکل ۶. اثر سخت شدگی کششی بتن بر رفتار کلی نمونه

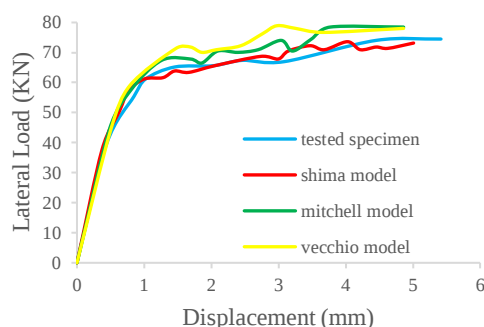


Fig. 6. Effect of tension stiffening of concrete on the overall behavior of the specimen

۲-۴-۱ اثر رابطه تنش کرنش تک محوری فشاری بتن

تحلیل حساسیت روی رفتار فشاری بتن صورت گرفته است که نشان دهنده حساسیت اندک پاسخ‌ها به رفتار فشاری تک محوره بتن است. از هر سه مدل رفتاری تک محوری فشاری بتن که در تحلیل حساسیت استفاده شده‌اند، پاسخ‌هایی نزدیک به مدل آزمایشگاهی بدست آمده است و دلیل آن می‌تواند این باشد که این مدل‌های رفتاری برای مدلسازی نمونه‌های بتنی با مقاومت فشاری معمولی مناسب هستند. نتایج در شکل (۷) ارائه شده است.

شکل ۷. اثر مقاومت فشاری مختلف بر رفتار کلی نمونه

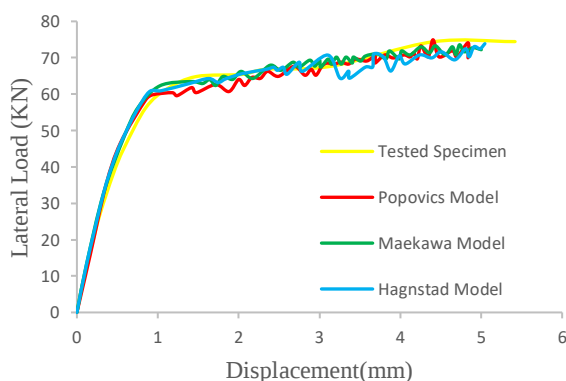


Fig. 7. Effect of different compressive strength on the overall behavior of the specimen

جدول ۱. پارامترهای مورد بررسی در آنالیز حساسیت و درستی‌آزمایی

Parameter	Values or parameter models
Tension stiffening of concrete	Vecchio - Michelle - Shima
Uniaxial compressive stress-strain of concrete	Hagenstad-Popovich-Mikawa
Relative stress-strain relationship of rebar	Blarby-Mikawa
Dilation angle	۳۰-۳۷-۴۵degrees
Mesh size	۳۰'۴۰'۵۰mm
Eccentricity parameter	۰ - ۰/۱ - ۰/۲
Yield parameter (K_C)	۱ - ۰/۸ - ۰/۶۶۷
The ratio of biaxial compressive strength of concrete to uniaxial compressive strength	۱ - ۱/۱۳ - ۱/۱۶

Table 1. Parameters studied in sensitivity analysis and validation

۱-۴-۱ اثر رابطه سخت شدگی کششی بتن

برای تعیین میزان حساسیت نمونه و مقایسه نتایج آن با مدل آزمایشگاهی، سه مدل شیم، میتچل و ویکو مورد بررسی قرار گرفت و پس از مقایسه نتایج عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی آن، از سخت شدگی کششی شیم و همکاران استفاده شد. همچنین از مدل‌های سخت‌شدگی کششی ویکو- کالینز- میشل برای بررسی حساسیت مدل اجزای محدود به روابط سخت‌شدگی کششی مختلف استفاده شد. رابطه سخت‌شدگی کششی شیم حاصل از آزمایش‌هایی در شرایط بارگذاری تک محوری و آرایش میلگردها برای بارگذاری است. طبق نتایج حاصل، این رابطه حتی برای شرایطی که در سازه بتن مسلح آرایش میلگردها دو جهت باشد به شرط اینکه درصد میلگرد در مقطع بین ۰/۱ تا ۲ درصد باشد جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد که در شکل (۶) نتایج نشان شده است.

۳-۴- اثر زاویه اتساع

زاویه اتساع پارامتری در تابع پتانسیل خمیری است که اثر تغییرات حجمی بتن را در نظر می‌گیرد. تأثیر این پارامتر در نتایج حاصل از تحلیل عددی قابل توجه است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه اتساع، سختی و مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. در مطالعات عددی بر سازه‌های بتن مسلح مقدار زاویه اتساع معمولاً بین ۳۰ تا ۴۱ در نظر گرفته می‌شود [14]. با توجه به اینکه با در نظر گرفتن زاویه اتساع ۳۵ درجه جواب‌های حاصل از مدل عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است، در ادامه پژوهش مقدار زاویه اتساع برابر ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. نتایج در شکل (۸) ارائه شده است.

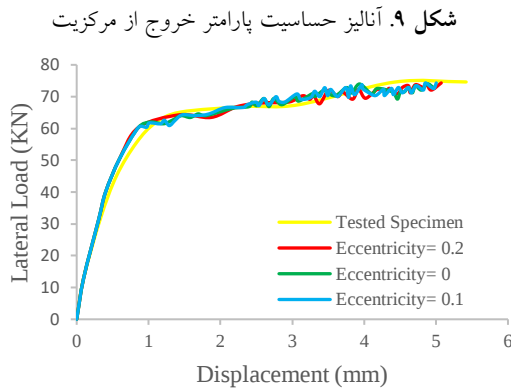


Fig. 9. Sensitivity analysis of eccentricity parameter

۵-۴- اثر پارامتر سطح تسلیم (K_c)

این پارامتر مشخص کننده نسبت مقاومت برشی معادل بتن تحت تنش دو محوری به مقدار آن تحت تنش سه محوری، و مشخص کننده شکل سطح تسلیم در صفحات انحرافی است، که می‌تواند مقداری بین ۰/۵ تا ۱ داشته باشد و وقتی مقدار آن به ۱ نزدیک باشد باعث می‌شود شکل سطح تسلیم در صفحات انحرافی به سمت دایره سوق کند. در مدل خسارت خمیری توصیه شده که مقدار این پارامتر برابر دو سوم در نظر گرفته شود [14]. مطابق شکل (۱۰) تغییر این پارامتر تأثیر زیادی بر پاسخ‌های حاصل از تحلیل عددی نخواهد داشت و با توجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، مقدار ۰/۶۶۷ برای آن در نظر گرفته شده است.

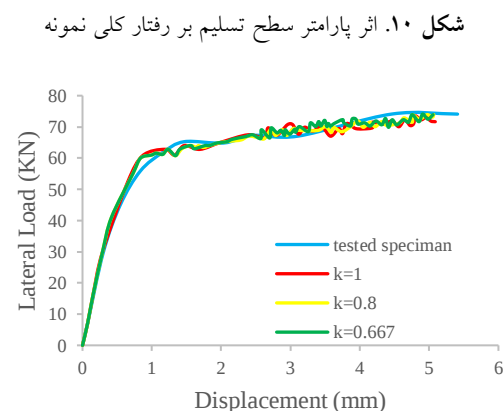


Fig. 10. Effect of yield level parameter on the overall behavior of the specimen

شکل ۸. اثر زاویه اتساع بر رفتار کلی نمونه

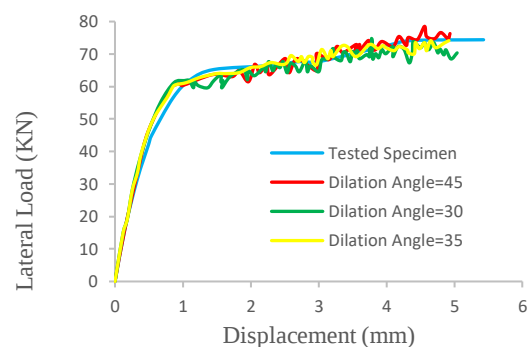


Fig. 8. Effect of dilation angle on the overall behavior of the specimen

۴-۴- اثر پارامتر خروج از مرکزیت

پارامتر خروج از مرکزیت مشخص کننده شکل تابع پتانسیل در فشار هیدرواستاتیکی منفی و نزدیک به صفر است، که بر حسب نوع ماده می‌تواند مقداری بین صفر و ۰/۳ داشته باشد. خروج از مرکزیت عدد مثبت کوچکی است که اگر مقدار آن صفر باشد مریدین تبدیل به خط می‌شود و معمولاً مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود [14]. با توجه به تحلیل حساسیت در شکل (۹) و عدم حساسیت مدل به این پارامتر مقدار ۰/۱ برای آن در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۲. اثر مدل رفتاری میلگرد بر رفتار کلی نمونه

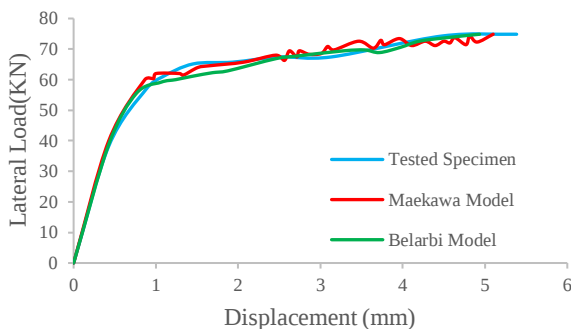


Fig. 12. Effect of rebar behavioral model on the overall behavior of the specimen

۸-۴- حساسیت به اندازه مش

برای بررسی وابستگی نتایج حاصل از مدلسازی به اندازه المان، از المان‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متری در مدلسازی استفاده شد. حساسیت به اندازه المان‌ها از آغاز ترک‌خوردگی در رفتار سازه تأثیر گذار است. یکی از دلایل وابستگی پایین پاسخ‌ها به اندازه المان، استفاده از مدل‌های رفتاری است که مستقل از اندازه المان هستند. با توجه به مفاهیم همگن سازی استفاده از المان‌های کوچکتر از ۴۰ میلی‌متر که حدوداً دو برابر اندازه بزرگترین سنگدانه است مفهوم فیزیکی نخواهد داشت [14]. در شکل (۱۳) نتایج ارائه شده است.

شکل ۱۳. اثر اندازه مش‌های مختلف بر پاسخ نمونه

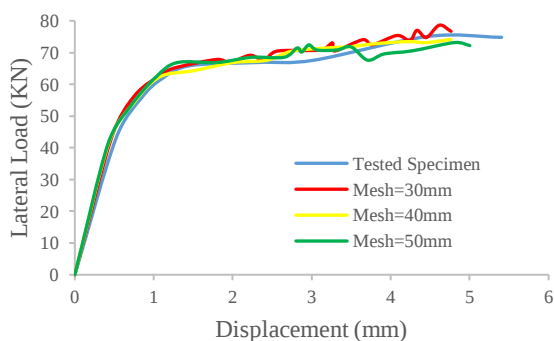


Fig. 13. Effect of different mesh sizes on specimen response

۶-۴- نسبت مقاومت فشاری دو محوری بتن به مقاومت فشاری تک محوری

یکی از پارامترهایی که در کالیبراسیون سطح تسلیم بتن در نرم افزار آباکوس مورد نیاز است، نسبت مقاومت فشاری دو محوری بتن به مقاومت فشاری تک محوری آن است. این پارامتر نقطه‌ای که در آن بتن دچار شکست دو محوری می‌شود را مشخص می‌کند. در نرم‌افزار آباکوس مقدار پیش فرض آن برابر ۱/۱۶ است [14]. این پارامتر می‌تواند مقداری بین ۱/۱ تا ۱/۱۶ داشته باشد و با توجه به تحلیل حساسیت این پارامتر تأثیر اندکی بر پاسخ نمونه دارد و در ادامه برای این پارامتر مقدار ۱/۱۶ در نظر گرفته شده که در شکل (۱۱) ارائه شده است.

شکل ۱۱. اثر نسبت مقاومت فشاری دو محوری بتن به مقاومت فشاری تک محوری بر رفتار کلی نمونه

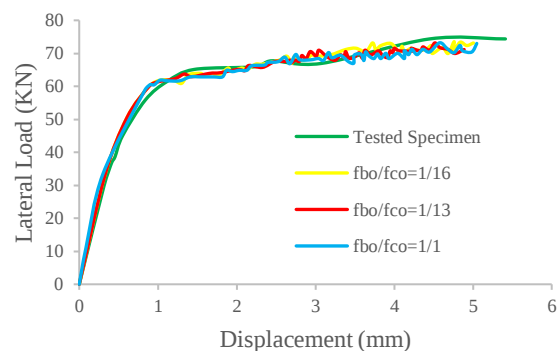


Fig. 11. Effect of the ratio of biaxial compressive strength of concrete to uniaxial compressive strength on the overall behavior of the specimen

۷-۴- تأثیر مدل رفتاری میلگرد

با توجه به اینکه در مدلسازی اثر لغزش بین میلگرد و بتن مواد در نظر گرفته شده است، از مدل‌های رفتاری بلاری و مدل رفتاری مایکاو که برای میلگرد مدفون هستند، در تحلیل حساسیت این قسمت استفاده شده است. از هر دو مدل پاسخ‌های مناسبی در تحلیل عددی بدست آمد و پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل عددی با مدل رفتاری مایکاو جواب‌های نزدیکتری به نتایج حاصل از آزمایش داشت. در ادامه این پژوهش از مدل رفتاری میلگرد مایکاو در مدلسازی عددی استفاده شده است. نتایج در شکل (۱۲) نشان داده شده است

۵- مطالعه پارامتریک

۵-۱- تأثیر درصد میلگرد طولی عبوری تیر از داخل چشمه اتصال تیر عریض-ستون بتن مسلح در معرض آتش

به منظور بررسی تأثیر مقدار میلگرد طولی عبوری تیر از داخل چشمه اتصال تیر عریض-ستون بتن مسلح، درصدهای ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ مورد مطالعه قرار گرفت و نمونه‌ها تحت بار ثابت و مدت زمان مشخص در آتش مدلسازی شدند که نتایج تحلیل مکانیکی پس از تحلیل حرارت در شکل (۱۴) ارائه شده است.

شکل ۱۴. تأثیر درصد میلگرد طولی عبوری تیر از داخل چشمه اتصال تیر عریض-ستون بتن مسلح در معرض آتش

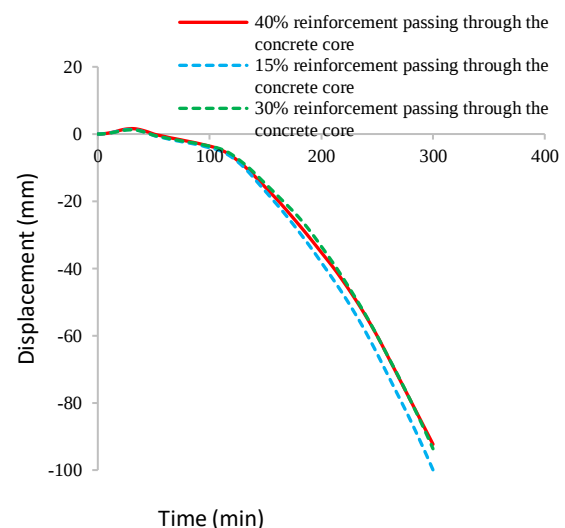


Fig. 14. Effect of the percentage of beam longitudinal rebar passing through the column core exposed to fire

همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌شود با کاهش درصد میلگرد عبوری از چشمه اتصال، زمان مقاومت آن در برابر آتش کاهش می‌یابد.

۵-۲ تأثیر مساحت میلگرد

در خصوص تأثیر مساحت میلگردها، تعداد آرماتورهای موجود در اتصال تیر عریض-ستون بتنی ثابت است ولی ساینز میلگردها تغییر می‌کند. مساحت میلگرد نیز که به صورت نسبت مساحت

میلگردها به مساحت مقطع بتنی تعریف می‌شود با توجه به آیین نامه نباید بیشتر از ۲٫۵ درصد باشد. یکی از عوامل مؤثر بر مقاومت اتصال تیر عریض-ستون بتن مسلح در برابر آتش، شماره اسمی میلگردها است. از طرفی با توجه به آیین‌نامه مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، در اعضای فشاری سطح مقطع آرماتور فولادی نباید کمتر از ۰٫۰۱ و بیشتر از ۰٫۰۶ سطح مقطع کل باشد که در صورت استفاده از فولاد S400 در آرماتور طولی این مقدار به ۰٫۴۵ سطح مقطع کل محدود می‌شود. بنابراین به منظور بررسی این پارامتر، میزان میلگردهای موجود در اتصال تیر عریض-ستون بتن مسلح مدلسازی شده با توجه به آیین‌نامه مذکور، مقادیر ۱٫۵٪، ۲ و ۲٫۵ درصد را به خود اختصاص داده‌اند که در شکل (۱۵) ارائه شده است.

شکل ۱۵. نمودار تغییر نسبت مساحت میلگرد به مساحت بتن

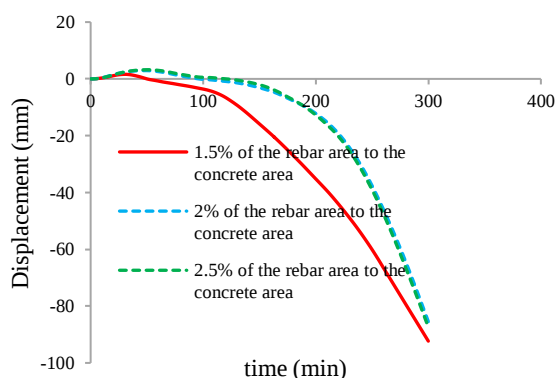


Fig. 15. Diagram of the change in the ratio of rebar area to concrete area

با توجه به نمودار بالا می‌توان دریافت با افزایش درصد مساحت میلگرد تیر عریض-ستون، مقاومت در برابر آتش افزایش داشته است. زمانی که بتن در اثر حرارت وارد شده مقاومت خود را از دست می‌دهد، نقش مقاومت میلگردها در مقاومت اتصال تیر عریض-ستون در برابر آتش تعیین کننده خواهد بود. با افزایش درصد میلگردها، اتصال زمان بیشتری در فاز تغییر شکل انبساطی ناشی از حرارت باقی مانده و دیرتر وارد مرحله گسیختگی می‌شود. اما همانطور که مشاهده می‌شود، شیب افزایش زمان مقاومت با افزایش نسبت میلگرد در اتصال تحت بار فشاری وارد شده بسیار کم است. علت این امر را می‌توان به سطح مقطع کم و ضریب هدایت گرمایی بالاتر در

۴۰۰ درجه سانتیگراد به بعد، تنش‌های تسلیم فولاد و بتن به طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود، بنابراین می‌توان گفت از زمانی که دمای فولاد به دمای بحرانی برسد، ستون به سمت شکست پیش خواهد رفت و هرچه پوشش بتن روی میلگردهای فولادی بیشتر بوده، دیرتر دچار تخریب شده و افزایش زمان مقاومت اتصال را در پی خواهد داشت. لازم به ذکر است اگرچه در این اتصال، افزایش پوشش بتنی و نزدیک شدن میلگردها به مرکز سطح مقطع، موجب کم شدن کارایی آرماتورها می‌شود اما با این وجود تأثیری منفی در رفتار آنها در برابر آتش سوزی نداشته است.

۴-۵ تغییر مقاومت بتن

با تغییر مقاومت بتن انتظار می‌رود رود نزولی شدن نمودار تا گسیختگی آن متفاوت باشد از این رو ۳ نوع مقاومت ۴۰، ۳۰ و ۲۰ مگاپاسگال نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج در شکل (۱۷) ارائه شده است.

شکل ۱۷. نمودار تغییر مقاومت بتن

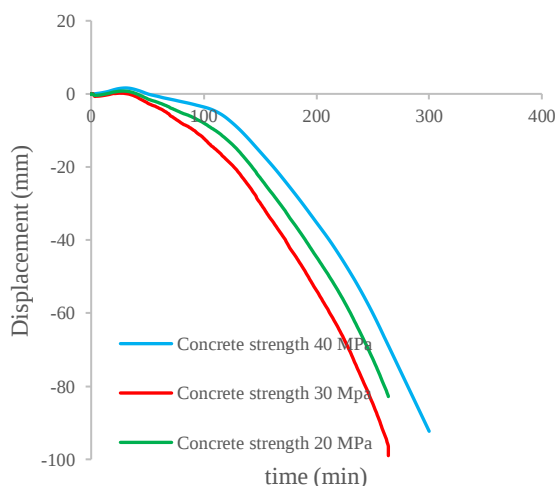


Fig. 17. Diagram of change in concrete grade

باتوجه به نمودار بالا مشاهده می‌شود هرچه مقاومت فشاری بتن بیشتر باشد، اتصال می‌تواند مدت زمان بیشتری را در مقابل آتش مقاومت نماید و دیرتر دچار گسیختگی شود.

میلگردهای فولادی نسبت داد که انتظار می‌رود در دماهای بالا، دمای میلگردهای طولی و خاموت‌ها بیشتر از المان‌های بتنی مجاور با آن باشد و میلگردهای فولادی سریعتر از بتن به دمای بحرانی رسیده و خواص مکانیکی آن به شدت تخریب شود. به همین دلیل تأثیر کم، حتی مشاهده شده که در بعضی تحقیقات مربوط به بحث آتش روی اعضای سازه‌ای از وجود آرماتورها صرف‌نظر شده است.

۳-۵ تأثیر افزایش ارتفاع تیر

ارتفاع تیرها به ترتیب به ۳۰۰، ۳۷۵ و ۴۵۰ میلی‌متر افزایش داده شد و نمونه تحت حرارت قرار گرفت. مشاهده می‌شود که دمای هسته بتن، میلگردها و خاموت‌ها به کندی بالا می‌رود. بنابراین انتظار داریم با افزایش پوشش بتنی، میزان مقاومت اتصال تیر عریض-ستون در برابر حرارت افزایش یابد. نتایج به صورت شکل (۱۶) به دست آمده است.

شکل ۱۶. نمودار تأثیر افزایش ارتفاع تیر

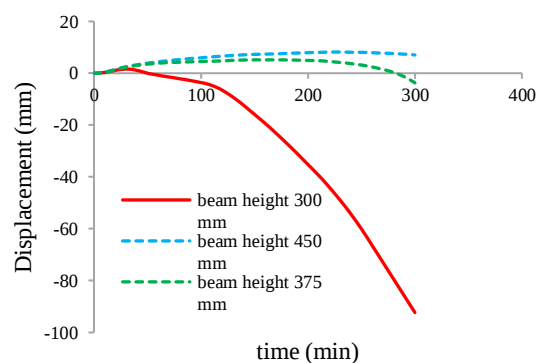


Fig. 16. Diagram of the effect of increasing the height of the beam

مشاهده می‌شود که پوشش بتنی روی مقاومت اتصال در برابر آتش تأثیرگذار باشد. هنگامی که پوشش بتنی کم است، دمای میلگردهای بتنی و هسته اتصال به شدت بالا رفته و موجب اختلال در عملکرد آرماتورها و بتن می‌شود. تغییرات ساختار تنش-کرنش فولاد تا دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ناچیز است و تنها کرنش‌های غیرخطی فولاد افزایش می‌یابد، اما از

۶- نتیجه گیری

با توجه به عدم وجود داده‌ای پیرامون رفتار اتصالات تیر عریض- ستون تحت تنش‌های حرارتی، بعد از انجام اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده و انجام آنالیزهای حساسیت، مطالعه پارامتریک روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده به صورت زیر است:

با افزایش ابعاد مقطع تیر عریض، در حالت افزایش ارتفاع تیر (۴۵۰ میلی‌متر) به حالت اولیه (۳۰۰ میلی‌متر) زمان مقاومت آن در برابر آتش به علت ضریب هدایت گرمایی پایین بتن و تأخیر در گرم شدن قسمت‌هایی از هسته اتصال بتنی ۱۳/۰۶ برابر افزایش یافته و گسیختگی اتصال تیر عریض-ستون دیرتر رخ می‌دهد.

زمانی که بتن در اثر حرارت وارد شده مقاومت خود را از دست می‌دهد، نقش مقاومت میلگردها در مقاومت اتصال تیر عریض-ستون در برابر آتش تعیین کننده خواهد بود. با افزایش درصد میلگردها (مقدار مساحت میلگرد به بتن ۲/۵ در صد) به حالت اولیه (۱/۵ در صد) اتصال زمانی حدود ۱/۱ برابر بیشتر در فاز تغییر شکل انبساطی ناشی از حرارت باقی مانده و دیرتر وارد مرحله گسیختگی می‌شود و موجب افزایش زمان مقاومت اتصال در آتش سوزی خواهد شد. با افزایش مقاومت فشاری بتن (نسبت مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسگال به مقاومت ۲۰ مگاپاسگال) زمان پایداری اتصال در برابر آتش به علت افزایش مقاومت فشاری بتن به ۱/۰۸ برابر افزایش یافته و گسیختگی اتصال تیر عریض-ستون دیرتر رخ می‌دهد.

با افزایش درصد آرماتور عبوری از هسته اتصال (۴۰٪ آرماتور عبوری از هسته اتصال نسبت به مدل ۱۵٪)، مقاومت اتصال در برابر آتش ۱/۰۸ برابر بیشتر می‌شود که این امر می‌تواند به علت ضریب هدایت گرمایی پایین بتن و تأخیر در گرم شدن قسمت‌هایی از هسته اتصال بتنی باشد که گسیختگی اتصال تیر عریض-ستون دیرتر رخ می‌دهد.

۷- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

۸- سپاسگزاری از حمایت مالی

این پژوهش هیچ کمک هزینه خاصی از هیچ مؤسسه سرمایه‌گذار در بخش عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

۹- مراجع

References

- 1- A.Benavent-Climent , X.Cahis,R.Zahran , (2009), Exterior wide beam – column connections in existing RC frames subjected to lateral earthquake loads. Journal Engineering Structures Volume 31, Issue 7, July 2009, Pages 1414-1424
- 2- S.Mirzabagheri, A.A.Tasnimi, M.S.Mohammadi, (2016), Behavior of interior RC wide and conventional beam-column roof joints under cyclic load, Behavior of interior RC wide and conventional beam-column roof joints under cyclic load. Journal Engineering Structures Volume 111, 15 March 2016, Pages 333-344
- 3- F.Gomez-Martinez,A.Alonso-Dura,F.De Luca,and G.M.Verdermae. (2016), Seismic performances and behaviour factor of wide-beam and deep-beam RC frames. Journal Engineering Structures Volume 125, 15 October 2016, Pages 107-123
- 4- S.Mirzabagheri ,A.A.Tasnimi, (2016), Reinforced concrete roof exterior wide and conventional beam-column joints under lateral load, Article in The Structural Design of Tall and Special Buildings, Bulletin of Earthquake Engineering volume 14, pages1545–1569(2016)Cite this article
- 5- E.Etemadi, A.Kheyroddin,(1396), Comparison of RC interior wide beam-column joints' behavior with various beams width (a finite element study), International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Contemporary Iran, Tehran.
- 6- S.Mirzabagheri, A.A.Tasnimi, F.Issa, (2018), Experimental and numerical study of reinforced concrete interior wide beam-column joints subjected to lateral load, Canadian Journal Of Civil Engineering, Volume 45, Number 11
- 7- H.Behnam, J.S.Kuang. B.Samali, (2018), Parametric finite element analysis of RC wide beam-column connections, Journal Computers & Structures. Volume 205, 1 August 2018, Pages 28-44

- 12- EN 1992-1-2 (2004) Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: general rules—structural fire design, Eurocode 2, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium” ,
- 13- EN 1993-1-2 (2005) Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- 14- Issa, F., Tasnimi, A.A., Eilouch, N., and Mirzabagheri, S. (2014), Reinforced concrete wide and conventional beam–column connections subjected to lateral load. Engineering Structures, 76, 34-48.
- 8- C.R.Ajmera, A.R.Mundhada, (2018), Effect of High Temperatures on Concrete/ RCC: A Review, International Journal of Engineering Research & Technology. Vol. 7 Issue 03, March-2018 Pages 17-22
- 9- V.K.R.Kodur, F.P.Cheng, T.C.Wang, M.A.Sultan, (2003), Effect of strength and fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns, Journal of Structural Engineering ,vol. 129, no. 2, pp. 253–259
- 10- ASTM-E119: Standard test methods for fire tests of building construction and materials, American Society for testing
- 11- EN 1994-1-1 (2004) Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings

Numerical investigation of the effect of thermal stresses on the behavior of reinforced concrete wide beam-column connections

Amir Hosein Babashah¹, Sara Mirzabagheri²

1. Graduate Islamic Azad University, Science and Research Branch

2. PhD Assistant Professor, Islamic Azad University, Parand Branch

Abstract:

Fire is one of the hazards necessary to study its effects on various structures. In addition, cities with a pressurized natural gas distribution network or air force distribution network are more prone to post-earthquake fires. Post-earthquake fires involve a large number of simultaneous fires that occur as a result of earthquakes and can cause widespread social and economic damage. This phenomenon may cause more damage to the structure compared to earthquakes. In addition, knowing the extent of heat damage to concrete can help designers in the field of structural reinforcement.

Joints are one of the most sensitive areas in all structural frames, including steel and concrete, which are affected by high forces during earthquakes and their performance has a very important effect on the response of the structure. For this purpose, it is important to study the behavior of different types of beam and column joints in different environmental conditions.

Extensive studies have been performed on the behavior of steel joints at high temperatures. Also, the behavior of concrete under the influence of thermal stresses has been studied. However, laboratory and numerical data on the behavior of reinforced concrete beam and column joints at high temperatures are not available. In addition, due to the special feature of beam and column joints, ie the passage of part of the longitudinal reinforcement of the beam outside the connection core, in this study the behavior of concrete beam column beams under the influence of thermal stresses is investigated.

Beam-column joints in reinforced concrete structures are critical areas that must be prevented from being destroyed. Because damage to these areas can lead to the collapse of the entire structure. Therefore, it is necessary to study the behavior of this part of the structures. In the past, researchers have studied the effect of different parameters on the behavior of reinforced concrete beam-column joints in experiments and numerically.

Due to the percentage of wide-beam reinforcements passing through the connection core at the beam-column joints, these areas must be carefully designed to be able to dissipate energy during a fire event. In this study, considering the importance of joints and the different behavior of wide-column joints in reinforced concrete structures, the effect of thermal stresses on these structural components is investigated to determine the effect of different temperatures on the behavior of these joints in relation to the percentage of longitudinal reinforcement. Identify the wide beams that have passed through the outside of the column core.

In this dissertation, 9 numerical models of connecting beams and wide columns under fire are investigated. In each of these samples, specific characteristics such as (height of wide beam, surface of beam rebars, strength of concrete and percentage of passers through concrete core) have been investigated. In this dissertation, it was found that with increasing the height of the beam, the fire resistance of the structure increases. Also, with increasing the level of rebar, the strength of the structure increases. As the strength of concrete increases, the structure becomes stronger. Also, by reducing the rebar passing through the concrete core, the strength of the structure is reduced. There is a common feature in all of these issues, and this feature is that all joints begin to form plastic joints at a temperature of about 450 degrees Celsius, and this temperature occurs about 200 minutes after the fire starts in the joints.

Keywords: Wide beam-column joint, Reinforced concrete joint, Thermal stresses, Fire, Numerical simulation