

بررسی تأثیر شکل مقطع ستونهای بتن آرمه بر میزان افت ظرفیت باربری در هنگام حریق

محمدعلی لطف‌اللهی یقین^{۱*}، پرویز نجفی^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- کارشناسی ارشد عمران-سازه، مهندسین مشاور آبادگران عرصه خاک

lotfollahi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۷/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۱/۱۵

چکیده- در این مقاله، تأثیرات حریق روی مقاومت فشاری محوری ستونهای بتن آرمه بررسی می‌شود پژوهش به صورت آزمایشگاهی است و در جریان آزمایش با اعمال حرارت متغیر در مدت زمانهای متفاوت، مقاومت محوری ستونهای بتن آرمه اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش، ۳۲ نمونه ستون بتن آرمه مقیاس کوچک با مقاطع عرضی مربع و دایره با سطح مقطع کلی ۲۲۵cm^۲ (برای هر دو مقطع) و سطح مقطع آرماتور طولی ۳/۱cm^۲ و ارتفاع کل نمونه ۳۰cm و سایر مشخصات سازه‌ای یکسان $f_y = 300MPa$ ، $f'_c = 25MPa$ در معرض حرارت قرار گرفته؛ به طوری که تغییرات دمایی از ۳۰۰°C تا ۷۰۰°C و در مدت زمانهای ۶۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه اعمال می‌شود و سپس به وسیله جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰ ton تحت بارگذاری محوری قرار گرفته و تعیین مقاومت می‌شود. باید توجه داشت که در مرحله حرارت‌دهی نمونه‌ها برای جلوگیری از کرنش لحظه‌ای در دو سر انتهای نمونه‌ها از کلاهک‌های عایق حرارتی استفاده می‌شود. با انجام آزمایش‌ها مشخص شد که هنگام آتش‌سوزی دو عامل مدت زمان حریق و دمای حریق، موجب افت مقاومت در ستونهای بتن آرمه می‌شود. البته مدت زمان حریق، عامل مؤثرتری خواهد بود. همچنین مشخص شد که ستونهای بتن آرمه با مقطع عرضی دایره‌ای نسبت به ستونهای مقطع مربعی هنگام حریق، سریع‌تر دچار گسیختگی می‌شود. برای قضاوت و ارزیابی نتایج به دست آمده از یک رابطه نسبی تحت عنوان ضریب آتش (Fire Factor) استفاده شد. به کمک این رابطه مشخص شد که میزان افت مقاومت محوری فشاری ناشی از حریق، در ستونهای بتن آرمه دایره‌ای نسبت به ستونهای مربعی با توجه به دما و زمان حریق، تقریباً ۳ تا ۵ درصد بیشتر است.

کلیدواژگان: حریق، افت مقاومت محوری، عایق حرارتی، ضریب آتش، ستونهای مقطع مربعی و دایره‌ای

۱- مقدمه

بدیهی است این پیشرفت‌ها برای پیش‌گیری یا اقدام در زمان حریق مؤثر خواهد بود. ولی در حالت‌هایی که شرایط بالا (استفاده از ابزار هوشمند) مهیا نباشد مقاوم‌سازی بنیادی ساختمان‌ها در برابر چنین رخدادهایی ضروری خواهد بود.

امروزه با پیشرفت‌های ایجادشده در عرصه مهندسی عمران، ساختمان‌هایی با سیستم محافظ هوشمند برای مقابله با حوادث غیرمترقبه از جمله آتش‌سوزی ساخته می‌شود.

برای دستیابی به ضوابط طراحی یا مقاوم‌سازی اصولی در برابر حریق، بررسی تأثیر حرارت در رفتار و عملکرد سازه‌ها اجتناب‌ناپذیر است. در این میان تحقیقات گسترده‌ای در مبحث حریق برای سازه‌ها به ویژه ساختمان‌های بتن‌آرمه انجام گرفت که در ادامه، مطالعات و تحقیقات در زمینه تأثیرات دمای زیاد بر بتن و همچنین مشکلات و معایب سازه‌های بتن‌آرمه هنگام حریق که تاکنون انجام شده است بازبینی شد، که در این بخش به‌طور خلاصه به بیان آن‌ها پرداخته خواهد شد.

آزمایش‌های Abrams [۱] در سال ۱۹۷۱ نشان داد که بتن با افزایش دما مقاومت فشاری خود را از دست خواهد داد؛ اما سرعت این کاهش مقاومت با توجه به نوع مصالح دانه‌ای به‌کاررفته در طرح اختلاط بتن و همچنین تراکم بتن سخت‌شده متفاوت است. مطالعات آزمایشگاهی Malhotra [۲] در سال ۱۹۸۲ نیز به این نتیجه رسید که بتن در حرارت $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ مقداری از مقاومت فشاری خود را از دست می‌دهد. با افزایش دما در محدوده 300°C ترک‌های بتن ایجاد می‌شود. در این حالت بتن تقریباً ۳۰ درصد از مقاومت فشاری خود را از دست داده و نیز با افزایش دما، کاهش مقاومت ادامه خواهد یافت.

به‌طور مشابه، تحقیقات Chandra و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۲ در مورد تأثیر حریق بر بتن با مصالح سنگ‌دانه‌ای سبک نشان داد که در سازه‌های بتن آرمه با احتمال وقوع حریق، استفاده از بتن سبک در پوشش اعضا می‌تواند از پدیده ترکیدگی حرارتی جلوگیری کرده و در نهایت سبب حفظ مقاومت اعضا شود. البته مطالعات Hertz [۴] در سال ۲۰۰۳ در زمینه تأثیرات مخرب ترکیدگی انفجاری لایه پیرامونی اعضای بتن‌آرمه در اثر حریق و لحاظ کردن این پدیده در شرایط طراحی ایمن، بیانگر اهمیت این بحث است. دقت در ریزبافت بتن به‌کمک لوازم الکترواپتیک نیز

بیانگر همین مطلب خواهد بود، به‌طوریکه Georgali و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۴ در تحقیقات خود نشان دادند که با مشاهده تغییرات فیزیکی از جمله رنگ بتن با تغییر از خاکستری به صورتی، کیفیت سطح بتن، ترک‌های ریز و همچنین تغییر در کیفیت سنگ‌دانه‌ها، می‌توان میزان تأثیر حریق بر بتن را ارزیابی کرد.

Zhang & Zhou [۶] در تحقیقات خود در سال ۲۰۰۳ نشان دادند که تمام سازه‌های بتنی در مسئله حریق، در دو دسته (از لحاظ پوشش) قرار می‌گیرند: ۱- غیرسوزا (غیر قابل سوختن)، ۲- سوزا (قابل سوختن). در این دسته‌بندی پوشش‌های سوزا، حالت متداول سازه‌های بتن آرمه است. اما گروه غیرسوزا از ایجاد یک لایه اندود محافظ روی سطوح بتنی برای مستهلک شدن دمای آتش تشکیل می‌شود. آزمایش‌های متعددی نیز در بخش پوشش‌های محافظ به‌عنوان عایق حرارتی در سازه‌های بتنی در هنگام حریق انجام شد که می‌توان به تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۰۸ به‌وسیله‌ی Hodhod و همکارانش [۷] اشاره کرد. در این فعالیت نشان داده شد که پوشش‌های متفاوتی مانند: سیمان/پرلیت، گچ/پرلیت، سیمان/ورمیکولیت و... آثار قابل توجهی در محافظت از ستون‌های بتن‌آرمه در دمای 600°C خواهد داشت.

در ادامه نیز مطالعاتی با موضوع رفتار اعضای بتن‌آرمه پلیمری FRP در مبحث حریق انجام شد، که می‌توان به تحقیقات Saafi [۸] در سال ۲۰۰۲ و نیز فعالیت Ershad و همکارانش [۹]، در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد. در این آزمایش‌ها نشان داده شد که با توجه به حساسیت این نوع الیاف به حرارت، در صورت داشتن پوشش محافظ حریق، این اعضا مقاومت بیشتری در مقایسه با اعضای بتنی متداول خواهند داشت.

در بررسی اثر شکل مقطع ستون‌های بتن‌آرمه هنگام

حریق، تحقیقات Bo-wu & Yu-ye [۱۰] در سال ۲۰۰۸ نشان داد که ستون‌های بتن‌آرمه با مقاطع پره‌ای (صلیبی)، که در سازه‌های بتنی چین گستره اجرایی فراوانی دارد؛ از لحاظ جذب حرارت هنگام حریق و بالا بودن سطح مقطع در چنین ستون‌هایی، نیروی محوری ناشی از گیرداری حرارتی بالاتر بوده و سطح مطلوبیت چنین اعضایی را کاهش می‌دهد. در پژوهش دیگری نیز [۱۱] با آزمایش روی ستون‌های بتن‌آرمه مقیاس کامل با مقاطع عرضی مربعی، صلیبی، T و L شکل، با شرایط حرارتی استاندارد ISO834 به صورت حرارت چهارطرفه نشان‌دادند؛ هنگامی که نسبت بار محوری تقریباً 0.55 باشد، مقاومت در برابر حریق در ستون‌های بتنی با چنین مقطعی تقریباً 60-70% ستون‌های بتن‌آرمه با مقطع مربعی است و نیز ترتیب مقاومت فشاری در برابر حریق برای این مقاطع به صورت زیر خواهد بود [مقطع مربعی < مقطع صلیبی < T < L].

دسته دیگری از آزمایش‌ها نیز به بررسی شرایط حرارتی پرداخته است؛ از جمله فعالیت Wen-chen & kuo [۱۲] در سال ۲۰۰۸ روی ستون‌های گوشه در سازه بتنی در معرض حریق که نشان دادند هرچه ابعاد هسته مرکزی ستون‌های بتن‌آرمه بزرگ‌تر باشد مقاومت فشاری ستون بیشتر خواهد بود و در مقابل اگر ضخامت پوشش بتنی در ستون زیادتر از حد مطلوب باشد به علت کوچک بودن هسته مرکزی و تمرکز تنش، پکیدگی در ناحیه هسته مرکزی روی داده و ضعف کلی و تخریب سریع ستون را به دنبال خواهد داشت.

در کل باید توجه داشت که بررسی مسئله حریق در سازه‌های بتنی بنا به وجود پارامترهای مؤثر گوناگون و نیز شرایط مرزی متفاوت، امری پیچیده است و تحقیقات گسترده‌ای را می‌طلبد. این پژوهش در اصل به عنوان گامی کوچک در این مسیر است و تکامل این بحث نیازمند انجام

آزمایش‌ها و تحقیقات در آینده است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی رفتار ستون‌های بتن‌آرمه هنگام حریق است. در این فعالیت سعی بر آن است که ضمن رعایت ضوابط آیین نامه‌های معتبر بین‌المللی از نظر ابعاد و مقاطع، نحوه اجرا و کیفیت مصالح نمونه‌های آزمایش، میزان افت ظرفیت باربری ستون‌های بتن‌آرمه هنگام حریق، حرارت مستقیم یا موارد مشابه بررسی شود [۱۳، ۱۴].

در این پژوهش برای بررسی کارایی دو مقطع عرضی متداول (دایره‌ای و مربعی) در ستون‌های بتنی، از مقاطع با فولاد و بتن یکسان استفاده شده است. بنابراین ۳۲ نمونه ستون بتن‌آرمه مقیاس کوچک، تهیه شده؛ به طوریکه سطح مقطع کلی در تمام نمونه‌ها 225 cm^2 و سطح مقطع آرماتور طولی به کاررفته نیز برابر $3/1 \text{ cm}^2$ است. مرحله ساخت نمونه‌ها از لحاظ نوع مصالح، شرایط عمل‌آوری و ... یکسان بوده است. نمونه‌ها مطابق برنامه آزمایش در ۱۶ سری قرار گرفته و در حرارت و زمان‌های معین طبق برنامه، آزمایش می‌شود. سپس نمونه‌ها به وسیله جک هیدرولیکی تا حد گسیختگی، بارگذاری می‌شود. برای جلوگیری از کرنش لحظه‌ای ناشی از حرارت در دو سر مقاطع هنگام بارگذاری باید قبل از مرحله حرارت دهی، دو سر تمامی نمونه‌ها با کلاهک عایق حرارتی محافظت شود.

۲- اهداف

- ۱- مقایسه میزان افت مقاومت محوری در ستون‌های بتن آرمه هنگام حریق برای مقاطع عرضی مربع و دایره‌ای.
- ۲- ارزیابی و مقایسه میزان افت مقاومت فشاری در اعضای بتن‌آرمه (اثر کاهنده حریق بر مقاومت توأم در فولاد و بتن) نسبت به ضرایب کاهش مقاومت مصالح (به صورت تفکیکی) در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران.
- ۳- محاسبه ضریب افت مقاومت فشاری محوری

ACI-318، طبق شکل ۱ است [۱۵]. همچنین در کل نمونه‌ها جهت رعایت کردن مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران (فصل نوزدهم)، درصد فولاد اصلی به کاررفته در مقاطع به میزان ۱/۴ درصد محدود شده است [۱۶].

جدول (۱) طرح‌های اختلاط پیشنهادی پژوهش

طرح اختلاط الف	
۱۶ میلی متر Dmax =	اسلامپ ۸۰ میلی متر
۲۱۰ kg/m ³ آب	۳۴۵ kg/m ³ سیمان
۹۰۰ kg/m ³ شن	۸۷۵ kg/m ³ ماسه
طرح اختلاط ب	
۱۹ میلی متر Dmax =	اسلامپ ۹۰ میلی متر
۲۵۰ kg/m ³ آب	۴۰۵ kg/m ³ سیمان
۸۷۰ kg/m ³ شن	۸۱۵ kg/m ³ ماسه
طرح اختلاط ج	
۱۹ میلی متر Dmax =	اسلامپ ۹۰ میلی متر
۲۵۰ kg/m ³ آب	۴۱۵ kg/m ³ سیمان
۸۶۰ kg/m ³ شن	۸۱۵ kg/m ³ ماسه

جدول (۲) نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های بتنی

مقاومت مشخصه	بیشینه نیروی وارده (تن)	سن (روز)	اسلامپ (میلی متر)	طرح اختلاط
۱۱۸	۳۳	۷	۸۰	۱- الف
۱۶۷	۴۷	۲۸	۸۰	۲- الف
۱۵۰	۴۲	۷	۹۰	۳- ب
۲۰۲	۵۷	۲۸	۹۰	۴- ب
۱۸۵	۵۲	۷	۹۰	۵- ج
۲۵۵	۶۹	۲۸	۹۰	۶- ج

ستون‌های بتن آرمه ناشی از شکل مقطع در طراحی آتش (Fire Factor).

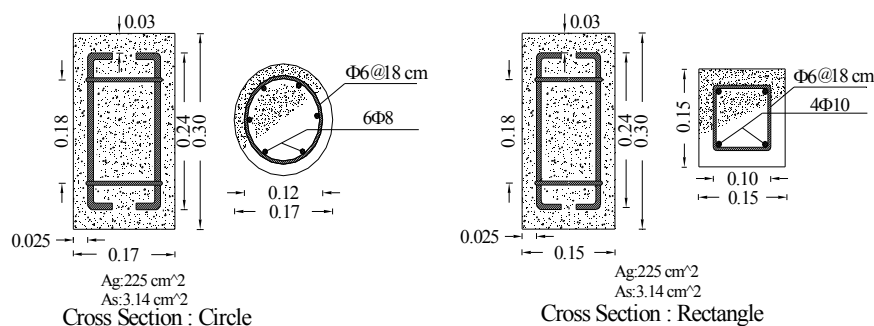
۳- طرح اختلاط بتن و نتایج آزمایشگاهی

در تهیه بتن استفاده شده در ستون‌های بتنی، از روش طرح اختلاط ACI 211-89 استفاده شده است. نسبت اختلاط مصالح طبق جدول ۱ است.

نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی استاندارد ۱۵×۱۵×۱۵ cm با مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه طبق استاندارد BS 1881 و Part 116 به شرح جدول ۲ است. در این پژوهش به علت افت مقاومت فشاری بتن در هنگام آزمایش حرارتی و نیز کوچک بودن ابعاد مقاطع بتن آرمه، طرح اختلاط (ج) به دلیل داشتن مقاومت مشخص بالا برای ساخت ستون‌های بتنی تحت آزمایش انتخاب می‌شود.

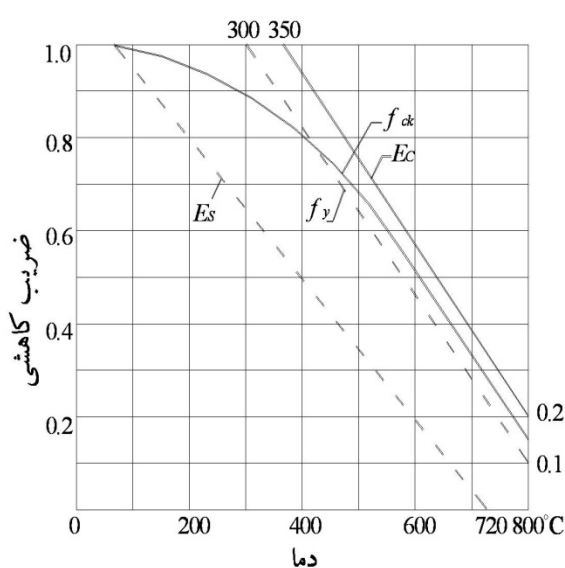
۴- اجرای ستون‌های بتن آرمه مقیاس کوچک

نمونه‌های آزمایشگاهی مطابق با مشخصات سازه‌ای ذکر شده و با ابعاد ۱۵×۱۵×۳۰ cm و ۱۷×۳۰ cm، اسکلت آرماتوری شبکه نمونه‌ها با ارتفاع ۲۴ cm، پوشش بتنی دو انتهای نمونه‌ها به میزان ۳ cm و در طرفین به اندازه ۲/۵ cm سانتی متر است. طول خم آرماتورها و همچنین چیدمان عضو و مشخصات سازه‌ای نمونه‌ها مطابق با ضوابط استاندارد



شکل (۱) جزئیات اجرایی ستون‌های بتن آرمه مقیاس کوچک

برحسب تغییرات دما به طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. یادآوری که در فولادهای ساختمانی در دمای بالاتر از 300°C فرایند تبلور مجدد در فولاد رخ می‌دهد. به بیان دیگر، در دمایی کمتر از نصف دمای ذوب، بلورهای فولاد به علت گرم شدن، هم‌محور می‌شوند که در نتیجه کاهش سختی و استحکام فولاد را در پی خواهد داشت. همچنین در بتن، با بالا رفتن دما، کاهش مقاومت و افزایش تغییر شکل رخ خواهد داد (شکل ۲).



شکل (۲) تأثیر دما بر مقاومت و مدول الاستیسته فولاد و بتن [۱۸]

۲-۶- بررسی تأثیر حرارت بر بتن و فولاد مطابق با

مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران

طبق بند ۹-۱۹-۳ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، مقدار مقاومت فشاری بتن در دمای T درجه سانتی‌گراد نسبت به مقاومت فشاری مینا در دمای 20°C درجه سانتی‌گراد و همچنین مقدار تنش تسلیم فولاد در دمای T درجه سانتی‌گراد نسبت به تنش حد تسلیم مینا در دمای 20°C درجه سانتی‌گراد طبق شکل ۳ خواهد بود.

۵- طراحی اعضای بتنی مقاوم به حریق و عایق‌های حرارتی

طراحی اعضای بتن‌آرمه مقاوم به حریق را می‌توان طبق استانداردهای IS1642(1989) و IS1649(1988) و همچنین طبق سایر آیین‌نامه‌ها از جمله BS8110, part 2 انجام داد. در حال حاضر سه روش ارزیابی برای اندازه‌گیری مقاومت اعضای بتنی در برابر حریق وجود دارد که عبارتند از:

۱- روش اول براساس شرایط حرارتی استاندارد طبق روابط ISO834 است. در این روش، معیار طراحی، مدت زمان قرارگیری عضو تحت حرارت استاندارد ISO 834 و سطح مقاومت عضو در این دما است که این مدت باید با مدت زمان حرارت‌های احتمالی در ساختمان برابر یا بزرگ‌تر باشد [۱۷].

۲- روش دوم یک آزمایش مستقیم روی اعضا یا سازه‌ها براساس نظریه برابری در مدت زمان قرارگیری عضو در معرض حرارت است. به عبارت دیگر، برابر بودن تمامی شرایط از جمله دما، مدت زمان، چگونگی تبادل حرارتی در فضا و نحوه اعمال حرارت بر اعضا در آزمایش، با شرایط واقعی هنگام آتش‌سوزی ضروری است.

۳- روش سوم به وسیله محاسبات مهندسی و براساس نتایج آزمایشگاهی انجام می‌شود. در این حالت، ارزیابی طبق شرایط و نحوه قرارگیری در معرض حرارت و تهویه داخل ساختمان و مشخصات حرارتی اعضا انجام می‌شود. البته روند فعالیت در این پژوهش بر قواعد روش دوم مبتنی خواهد بود.

۱-۶- تأثیر حرارت بر فولاد و بتن

میزان مقاومت و نحوه تغییر شکل‌های مصالح فولادی در دمای بالا به مسائلی از جمله ترکیبات فولاد و چگونگی روند ساخت فولاد بستگی دارد. تغییرات مقاومتی فولاد

صحیح نمونه‌ها تعیین نخواهد شد. بنابراین برای جلوگیری از چنین رخدادی، دو سر نمونه‌های مورد آزمایش باید به کمک مصالح عایق از تأثیر مستقیم حرارت محافظت شوند. پوشش استفاده شده در این آزمایش از سری محصولات شرکت Southwest Fire Proofing Products Co. در کشور کانادا و از نوع 7GP با دانسیته متوسط و از گروه پوشش‌های پایه سیمانی است (جدول ۳ و شکل ۴).

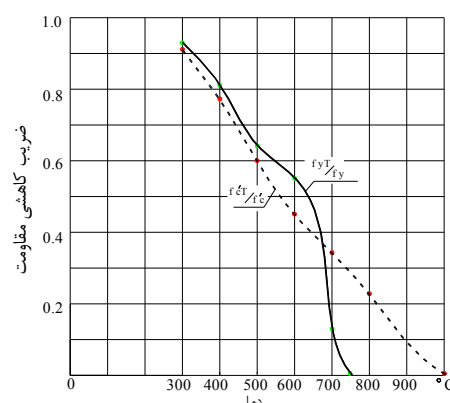


شکل (۴) پودر ضدحریق پایه سیمانی نوع 7GP

در این پژوهش با توجه به استاندارد ASTM E119 و ULI، ضخامت مورد نیاز برای اجرای کلاhek حرارتی محافظ برای نمونه‌ها با توجه به ابعاد مقطع و نیز لایه بتن پوشش و همچنین مدت زمان آزمایش تعیین شده است. لایه عایق ۱/۵ cm برای مدت حریق ۹۰ دقیقه کافی است، اما بنا بر روش اجرا و همچنین اطمینان از نتایج پژوهش ضخامت لایه پوشش برای تمام نمونه‌ها ۲cm انتخاب شده است. همچنین برای جلوگیری از تمرکز حرارت ناشی از تماس نمونه‌ها با کف گرم‌خانه، زیر کلیه نمونه‌ها دو صفحه عایق از جنس مصالح کلاhek‌های عایق ساخته شده که در شکل ۵ آمده است.



شکل (۵) نمای کلی نمونه‌ها با کلاhek عایق و صفحات عایق



شکل (۳) تأثیر دما بر میزان مقاومت مشخصه بتن و تنش تسلیم فولاد [۱۶]

۳-۶- تأثیر حریق بر ستون‌های بتن آرمه

در اعضای باربر قائم مانند ستون‌های بتن آرمه، هنگام حریق ظرفیت باربری فولاد به کاررفته در نواحی پیرامونی مقطع عضو به سرعت کاهش می‌یابد و منجر به گسیختگی سریع عضو می‌شود. ستون‌های بلند و لاغر نسبت به ستون‌های کوتاه سریع‌تر دچار گسیختگی می‌شود، که این امر عموماً در نتیجه افزایش میزان لاغری عضو است. عمدتاً ستون‌ها در نواحی بالایی و پایینی به طور یکپارچه به تیرها متصل است و به علت بزرگ‌تر بودن جرم در اتصالات، سرعت بالا رفتن دما در این نواحی کمتر خواهد بود؛ بنابراین کاهش سختی انتهایی در اعضا کمتر است و باعث تأثیر مثبت بر ظرفیت باربری نهایی در نقاط انتهایی گیردار عضو می‌شود. با این وصف بررسی رفتار در طول ناحیه میانی ارتفاع ستون‌های بتن آرمه در مسئله حریق اهمیت دارد.

۴-۶- عایق‌بندی و حرارت‌دهی نمونه‌ها

طبق توضیحات داده شده، در اثر وارد شدن حرارت به نمونه‌های مورد آزمایش، دو ناحیه انتهایی نمونه‌ها همراه با سایر قسمت‌های داخل گرم‌خانه دچار افت مقاومت فشاری می‌شود؛ سپس در مرحله بارگذاری، پدیده کرنش لحظه‌ای در دو سر نمونه‌ها رخ داده و مقاومت فشاری

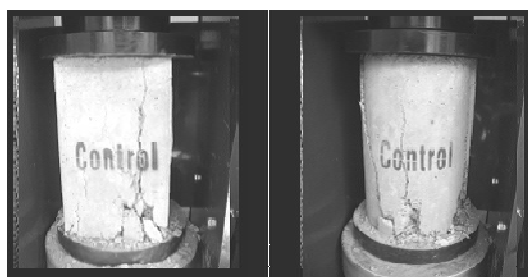
جدول (۳) مشخصات و ویژگی‌های عایق حرارتی نوع 7GP [۱۹]

Physical Characteristics Of Type 7GP	
Type 7GP Tested Values	Property and Test Method
22pcf (350 kg/m ³) nominal	Density, ASTM E-605
17,136 lbf/ft ² (817 kPa)	Compressive Strength, ASTM 761
>2,000 lbf/ft ² (>95.8 kPa)	Cohesion/Adhesion, ASTM E-736
Passed, no cracking or delamination	Effect of impact ASTM E-760
Passed, no spalling or delamination	Effect of Deflection ASTM E-759
Passed, 0.000 g/ft ² (0.00 g/m ²)	Erosion by Air, ASTM E-859
Flame Spread 0, Smoke 0	Surface Burning, ASTM E-84

برنامه همه‌ی نمونه‌ها نام‌گذاری شده و در دوره‌های مختلف آزمایش خواهد شد. بعد از حرارت‌دهی نمونه‌ها، مرحله بارگذاری ستون‌های بتنی انجام می‌شود.

۸- بارگذاری نمونه‌های بتن آرمه و ارزیابی نتایج

بعد از مرحله ساخت و حرارت‌دهی نمونه‌های آزمایش‌شده، نوبت به مرحله تعیین مقاومت فشاری اعضا می‌رسد. این مرحله در آزمایشگاه مقاومت مصالح مهندسين مشاور سازه‌آزمون انجام می‌شود. در این قسمت پژوهش، نمونه‌ها تحت آزمایش تعیین مقاومت محوری قرار می‌گیرد. بارگذاری نمونه‌ها به‌وسیله یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰ton تا مرحله گسیختگی کامل نمونه‌ها ادامه می‌یابد (شکل ۷، ۸). در این مرحله برای یکسان‌سازی نیروی وارد شده، سرعت بارگذاری برای هر دو مقطع $0.4 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ در نظر گرفته شده است. مطابق شکل‌های ۹ الی ۱۱، همه‌ی ۳۲ نمونه ساخته‌شده تعیین مقاومت شده و تغییرات مقاومت آن‌ها در نمودارهای مربوط نشان داده شده است.



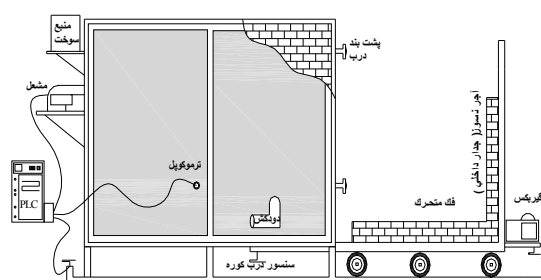
شکل (۷) بارگذاری نمونه‌های کنترل



شکل (۸) چگونگی گسیختگی در نمونه‌های دایره‌ای و مربعی

۵-۶- حرارت‌دهی نمونه‌های بتنی

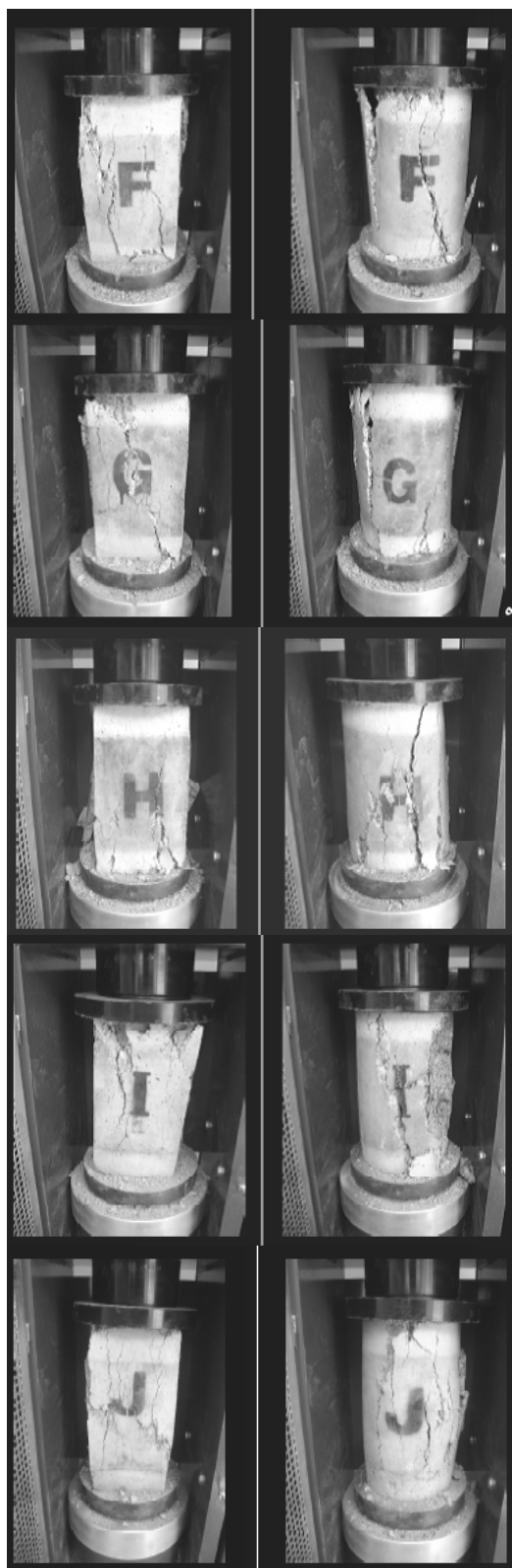
در این پژوهش، برای انجام مرحله حرارت‌دهی نمونه‌ها از یک کوره عملیات حرارتی با توان حرارتی تا 1100°C با زمان صعودی ۱۲۰ دقیقه استفاده شده است (شکل ۶). به بیان دیگر، مدت زمان رسیدن دمای فضای ۶ متر مکعبی داخلی کوره به 1100°C حدود ۱۲۰ دقیقه است. همچنین برنامه کوره به‌وسیله مرکز کنترل (دستگاه PLC) تعیین می‌شود. به‌طوری‌که از زمان نمونه‌گذاری در داخل کوره تا پایان سیکل حرارتی، تمامی شرایط برای مدل‌سازی یک حریق واقعی، به‌وسیله سیستم کامپیوتری کوره هماهنگ می‌شود. پوشش بدنه ثابت و متحرک آن از جنس فولاد آلیاژی CK45 (فولاد کربنی با درصد منگنز بالا) است. جنس جداره داخلی کف و دیواره کوره از آجر نسوز آلومینا و ملات شاموت همراه سیمان نسوز RFcast است.



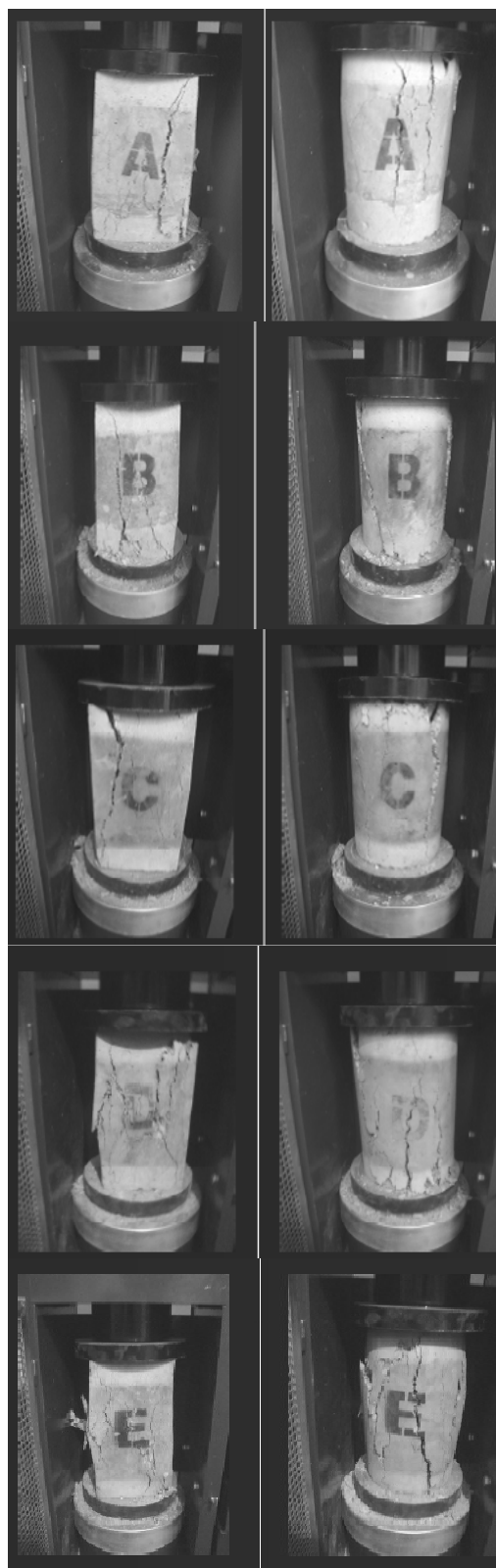
شکل (۶) شمای کلی گرم‌خانه عملیات حرارتی

۷- برنامه آزمایش

برای انجام این پژوهش، یک برنامه آزمایش با توجه به دو پارامتر زمان و دما، تهیه شده است (جدول ۴). در این



شکل (۱۰) بارگذاری نمونه‌های گروه F,G,H,I,J



شکل (۹) بارگذاری نمونه‌های گروه A,B,C,D,E

جدول (۴) برنامه آزمایش

گروه	تعداد نمونه	حرارت °C	مدت (دقیقه)
کنترل	۲ (مقطع دایره و مربع)	۲۰ (دمای محیط)	-
A	۲ (مقطع دایره و مربع)	۳۰۰	۳۰
B	۲ (مقطع دایره و مربع)	۴۰۰	۳۰
C	۲ (مقطع دایره و مربع)	۵۰۰	۳۰
D	۲ (مقطع دایره و مربع)	۶۰۰	۳۰
E	۲ (مقطع دایره و مربع)	۷۰۰	۳۰
F	۲ (مقطع دایره و مربع)	۳۰۰	۶۰
G	۲ (مقطع دایره و مربع)	۴۰۰	۶۰
H	۲ (مقطع دایره و مربع)	۵۰۰	۶۰
I	۲ (مقطع دایره و مربع)	۶۰۰	۶۰
J	۲ (مقطع دایره و مربع)	۷۰۰	۶۰
K	۲ (مقطع دایره و مربع)	۳۰۰	۹۰
L	۲ (مقطع دایره و مربع)	۴۰۰	۹۰
M	۲ (مقطع دایره و مربع)	۵۰۰	۹۰
N	۲ (مقطع دایره و مربع)	۶۰۰	۹۰
O	۲ (مقطع دایره و مربع)	۷۰۰	۹۰

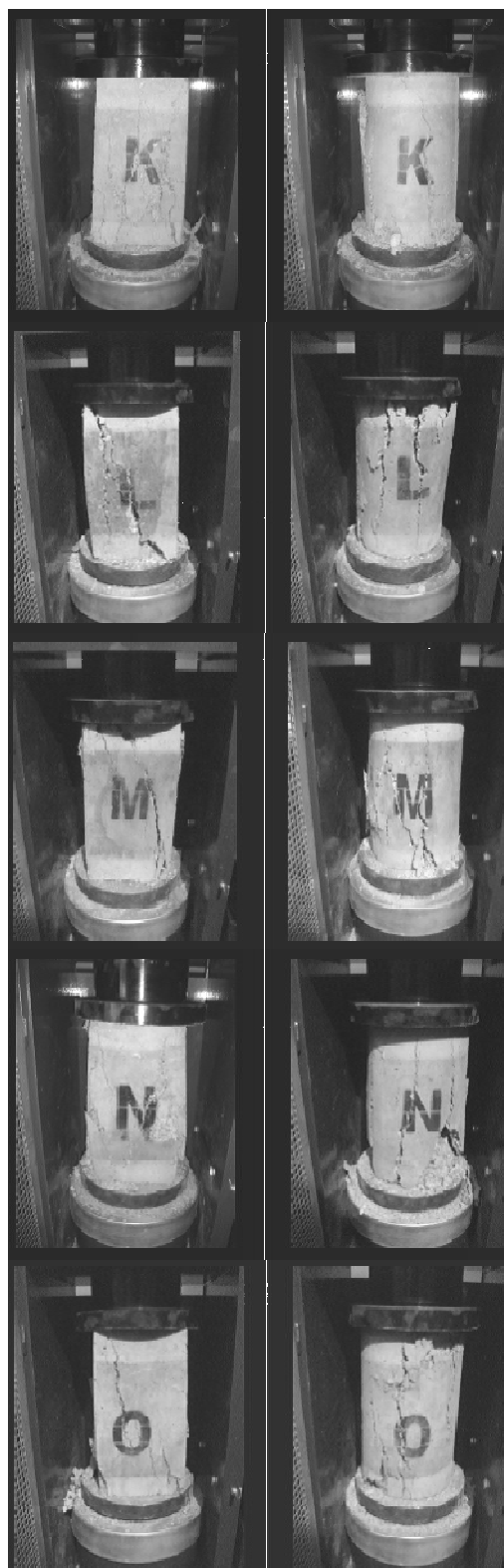
۹- نتایج آزمایشگاه مقاومت مصالح

با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از مرحله بارگذاری نمونه‌ها، می‌توان برای درک رفتار آن‌ها، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقابل تغییرات حرارت را در حالت نموداری، مانند شکل‌های ۱۲ الی ۱۴، نشان داد.

۹-۱- تفسیر نتایج آزمایشگاهی

۹-۱-۱- سیکل حرارتی ۳۰ دقیقه (F30)

در این سیکل حرارتی با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که آهنگ کاهش مقاومت در ستون‌های با مقطع عرضی مربعی به صورت مایل و نرم اتفاق می‌افتد و در مقایسه با مسیر کاهش مقاومت ستون‌های با مقطع دایره‌ای می‌توان دریافت که در این نوع مقطع، تغییرات حرارتی در بازه $400-600^{\circ}\text{C}$ تأثیرات چشم‌گیری در مقاومت محوری فشاری خواهد داشت. همچنین با دقت در بازه حرارتی $20-400^{\circ}\text{C}$ موازی بودن خطوط نمودار، نشانگر هم‌رفتاری اولیه در دو نوع مقطع است.



شکل (۱۱) بارگذاری نمونه‌های گروه K,L,M,N,O

حرارتی $400-700^{\circ}\text{C}$ تأثیر بیشتری در کاهش مقاومت محوری ستونها در مقاطع عرضی دایره‌ای خواهد داشت.

۹-۱-۳- سیکل حرارتی ۹۰ دقیقه (F90)

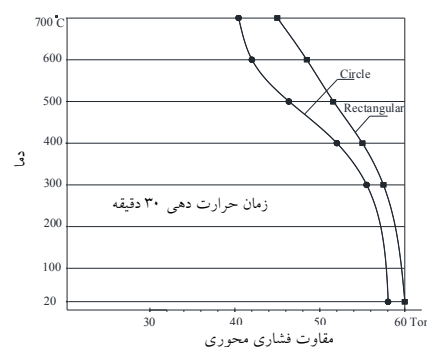
با دقت در شکل ۱۴ و با مقایسه خطوط مربوط به تغییرات مقاومت محوری در ستونهای با مقطع عرضی دایره و مربعی می‌توان گفت در حالتی که مدت زمان حرارت (حریق) ۹۰ دقیقه باشد بازه حرارتی $500-700^{\circ}\text{C}$ تأثیر بیشتری در کاهش مقاومت محوری ستونها با مقاطع عرضی دایره‌ای خواهد داشت.

با مقایسه خطوط نموداری مقاطع در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴، می‌توان به این نتیجه رسید که تأثیر مدت زمان حرارت بر مقاومت فشاری ستونها، بیش از تأثیر دمای حرارت است. با مقایسه سه نمودار بالا، مشخص می‌شود که آهنگ کاهش مقاومت در دو مقطع برای سه مدت زمان حرارتی در بازه حرارتی $20-400^{\circ}\text{C}$ تقریباً یک میزان بوده و بیشترین تأثیر در بازه حرارتی $500-700^{\circ}\text{C}$ و برای مقاطع دایره‌ای است.

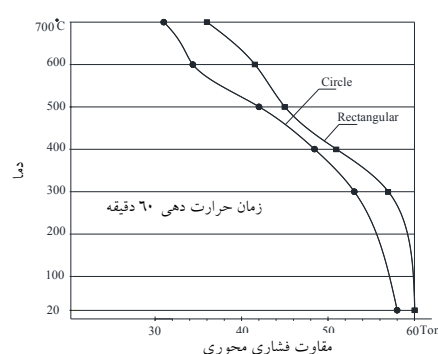
۱۰- محاسبه ضریب افت مقاومت ستونهای

بتن آرمه (Fire Factor)

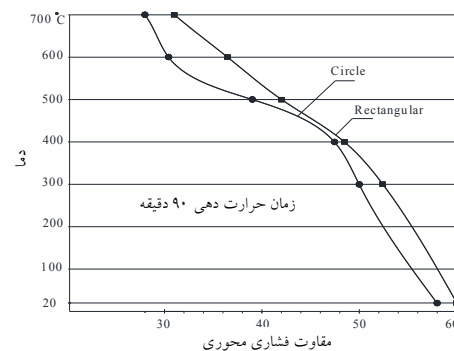
یکی از دستاوردهای مهم و قابل توجه این پژوهش، مقایسه نتایج به دست آمده از بخش تعیین مقاومت فشاری اعضا و حاصل شدن ضریبی کمتر از ۱ است که میزان افت مقاومت فشاری ناشی از حرارت را برای اعضای بتن آرمه نشان می‌دهد. با استفاده از این ضریب و میزان مقاومت مورد نظر سازه در معرض حریق، می‌توان یک حاشیه ایمنی را برای انواع سازه‌های بتن آرمه در هنگام حریق تعریف کرد. البته تعیین سطح حاشیه امنیت سازه مستلزم آزمایش‌ها و تحقیقات گسترده‌تری خواهد بود و می‌تواند به عنوان پیشنهادهای آینده پژوهش عنوان شود. ضریب افت مقاومت



شکل (۱۲) تغییرات مقاومت فشاری محوری نمونه‌ها در مدت زمان حرارت دهی ۳۰ دقیقه



شکل (۱۳) تغییرات مقاومت فشاری محوری نمونه‌ها در مدت زمان حرارت دهی ۶۰ دقیقه



شکل (۱۴) تغییرات مقاومت فشاری محوری نمونه هادر مدت زمان حرارت دهی ۹۰ دقیقه

۹-۱-۲- سیکل حرارتی ۶۰ دقیقه (F60)

با تأمل در شکل ۱۳ و با مقایسه خطوط مربوط به تغییرات مقاومتی در مقاطع عرضی مربعی و دایره‌ای، می‌توان به این نتیجه رسید که در حالتی که مدت زمان حرارت ۶۰ دقیقه می‌باشد، بازه

فشاری ستون‌های بتن‌آرمه با عنوان اختصاری ضریب آتش (Fire Factor)، برای مشخص کردن درصد مقاومت کاهش‌یافته عضو است و این ضریب از تقسیم مقاومت محوری ستون‌های بتنی در معرض حریق بر مقاومت نمونه کنترلی حاصل می‌شود:

$$F.F_T = P_T / P_{20} \quad (1)$$

که در آن P_{20} مقاومت فشاری ستون‌های بتنی در دمای 20C آزمایشگاه و P_T مقاومت فشاری ستون‌های بتنی در معرض حرارت با دمای T (درجه سانتی‌گراد)، است.

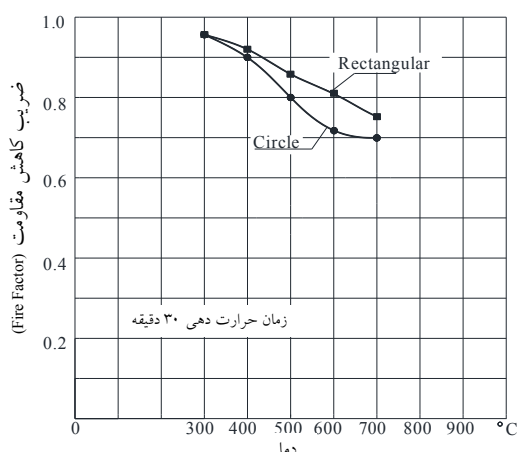
نتایج مربوط به تعیین ضریب آتش برای نمونه‌های تحت آزمایش در جدول ۵ آمده است. با محاسبه مقادیر ضریب آتش که به مفهوم میزان مقاومت باقی‌مانده عضو است، نمودار تغییرات مقاومت محوری فشاری باقی‌مانده در اعضا در مدت‌زمان‌های حرارت‌دهی متفاوت، طبق شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ خواهد بود. در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود که شیب خطوط نموداری در این تصویر کمتر از حالات زمانی دیگر است و این بیانگر تأثیرپذیری کم بتن نسبت به مدت‌زمان حریق ۳۰ دقیقه است.

جدول (۵) نتایج ضریب افت مقاومت ناشی از شکل مقطع و شرایط

حرارت‌دهی (Fire Factor)

گروه	مدت‌زمان حریق (دقیقه)	مقطع عرضی دایره‌ای	مقطع عرضی مربعی
Control	—	FF ₂₀ =1.0	FF ₂₀ =1.0
A	۳۰	FF ₃₀₀ =0.96	FF ₃₀₀ =0.96
B		FF ₄₀₀ =0.90	FF ₄₀₀ =0.92
C		FF ₅₀₀ =0.80	FF ₅₀₀ =0.86
D		FF ₆₀₀ =0.72	FF ₆₀₀ =0.81
E		FF ₇₀₀ =0.70	FF ₇₀₀ =0.75
F	۶۰	FF ₃₀₀ =0.91	FF ₃₀₀ =0.95
G		FF ₄₀₀ =0.83	FF ₄₀₀ =0.85
H		FF ₅₀₀ =0.72	FF ₅₀₀ =0.75
I		FF ₆₀₀ =0.60	FF ₆₀₀ =0.69
J		FF ₇₀₀ =0.53	FF ₇₀₀ =0.60
K	۹۰	FF ₃₀₀ =0.86	FF ₃₀₀ =0.88
L		FF ₄₀₀ =0.81	FF ₄₀₀ =0.81
M		FF ₅₀₀ =0.67	FF ₅₀₀ =0.70
N		FF ₆₀₀ =0.53	FF ₆₀₀ =0.61
O		FF ₇₀₀ =0.48	FF ₇₀₀ =0.52

تأثیرات این دوره زمانی و نیز سیکل‌های حرارتی متعدد بر مقاطع دایره‌ای بیشتر از مقاطع عرضی مربعی خواهد بود. به‌طور مشابه، با دقت در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مربوط به میزان کاهش مقاومت در مدت‌زمان‌های ۶۰ و ۹۰ دقیقه، ملاحظه می‌شود که شیب نمودار در این دو حالت نسبت به شکل ۱۵ افزایش یافته است که این مطلب بیانگر تأثیر بیشتر مدت‌زمان حریق نسبت به دمای حریق است. با دقت در نتایج مربوط به حرارت‌های پایانی در هر دوره زمانی می‌توان به این نتیجه رسید که در حرارت‌های بالاتر امکان یکسان شدن مقاومت در هر دو مقطع وجود دارد؛ با این توجیه که در سیکل حرارتی 700°C برای هر دو بازه زمانی ۶۰ و ۹۰ دقیقه و مقایسه آن با دیگر سیکل‌های حرارتی می‌توان دریافت که، در این درجه حرارت و با زمان حرارت‌دهی ۳۰ دقیقه، تفاوت ۵ درصدی در نتایج دو مقطع وجود دارد. با ورود به زمان حرارت‌دهی ۶۰ دقیقه، این تفاوت به ۷ درصد خواهد رسید و دوباره با مدت‌زمان حرارت‌دهی ۹۰ دقیقه، این نتیجه به ۴ درصد کاهش پیدا خواهد کرد و از این نظر امکان کاهش مجدد مقاومت باقی‌مانده در دماهای بالاتر وجود دارد.



شکل (۱۵) نمودار کاهش مقاومت فشاری محوری نمونه‌ها در مدت‌زمان حرارت‌دهی ۳۰ دقیقه

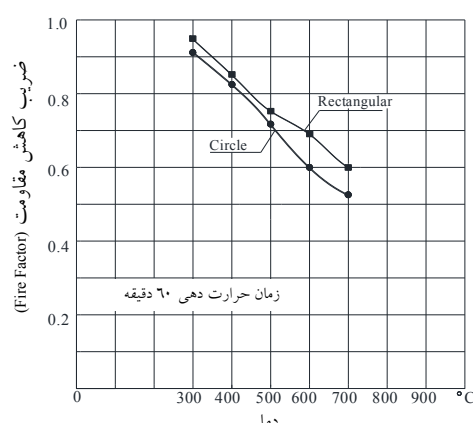
ساختمان خصوصی ۲ تا ۵ طبقه، این زمان به مدت ۶۰ دقیقه و برای ساختمان، ۶ تا ۱۰ طبقه، ۹۰ دقیقه لحاظ شده است و در ساختمان‌های عمومی با بیش از ۳۰۰ نفر ساکن به میزان ۱۵۰ دقیقه اشاره شده است [۱۷].

توجه به نتایج بخش نهایی پژوهش، در قسمت ضریب آتش برای نمونه‌های سری دوم و سوم (مدت زمان حرارت ۶۰ و ۹۰ دقیقه) می‌توان گفت، با فرض ستون بتن‌آرمه با مقطع عرضی مربع در ساختمان ۲ تا ۵ طبقه و مدت زمان مقاومت مطلوب ۶۰ دقیقه و با حرارت ناشی از حریق $600\sim700^{\circ}\text{C}$ ، افتی به مقدار ۳۰ الی ۴۰ درصد در زمان طراحی سازه لحاظ شود و به‌طور مشابه برای ساختمان‌های ۶ تا ۱۰ طبقه با همین دمای حرارتی، به میزان ۴۰ الی ۵۰ درصد در زمان طراحی سازه مذکور برای مقابله با چنین رخدادهایی پیش‌بینی می‌شود. بطور مشابه برای سازه‌های بتنی با ستون‌های گرد در مدت زمان حرارت ۶۰ دقیقه و ساختمان‌های ۲ تا ۵ طبقه با دمای حرارتی $600\sim700^{\circ}\text{C}$ ، این کسر مقاومت به میزان ۴۰ الی ۴۵ درصد و در ساختمان‌های ۶ الی ۱۰ طبقه با زمان مقاومت حرارتی ۹۰ دقیقه این میزان به ۴۵ الی ۵۰ درصد خواهد رسید.

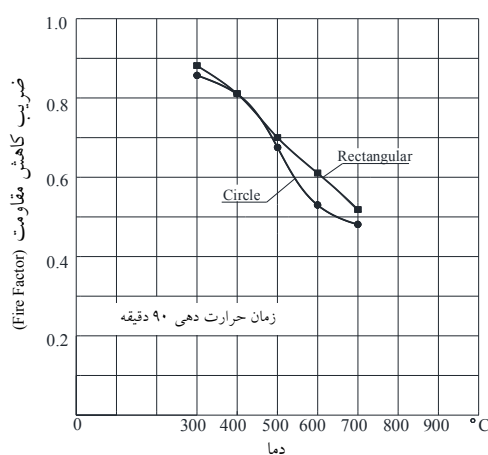
۱۱- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، تعیین میزان افت ظرفیت باربری ستون‌های بتن‌آرمه مقیاس کوچک هنگام حریق است. بنابراین، با به‌کارگیری مصالح ساختمانی و ابزار متداول آزمایشگاهی نتایجی حاصل شد که دربردارنده مواردی به شرح زیر است:

۱- ستون‌های بتن‌آرمه با مقطع عرضی دایره‌ای در مقایسه با ستون‌های با مقطع عرضی مربعی، هنگام حریق تقریباً ۳ تا ۵ درصد، سریع‌تر دچار افت مقاومت و در نهایت، مرحله گسیختگی می‌شوند. البته سرعت این



شکل (۱۶) نمودار کاهش مقاومت فشاری محوری نمونه‌ها در مدت زمان حرارت‌دهی ۶۰ دقیقه



شکل (۱۷) نمودار کاهش مقاومت فشاری محوری نمونه‌ها در مدت زمان حرارت‌دهی ۹۰ دقیقه

با توجه به بند ۹-۱۹-۲ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، کمترین زمان لازم برای تخلیه افراد و اشیاء مهم (مدت زمان مقاومت) بسته به عواملی مانند نوع کاربری ساختمان، مشخصات هندسی ساختمان مثل تعداد طبقات و مساحت هر طبقه، جمعیت ساکنین در ساختمان، مصالح به‌کاررفته در بخش سازه و نیز تجهیزات و سیستم‌های اعلام و اطفاء حریق بکار رفته در ساختمان، بین ۳۰ تا ۲۴۰ دقیقه انتخاب می‌شود. البته در بین شرایط بالا تعداد طبقات ساختمان، پارامتر تعیین‌کننده خواهد بود؛ با این تفسیر برای

- of light weight Aggregate Concrete”, *Lightweight Aggregate Concrete*, Vol. 54, 2002, pp291-319.
- [4] Hertz, K.D.; “Limits of spalling of fire-exposed concrete”, *Fire Safety Journal*, Vol. 38, 2003, pp103-116.
- [5] Georgali, B., Tsakiridis, P.E.; “Microstructure of fire damaged concrete, A Case Study”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, 2004, pp255-259.
- [6] Zhou, X., Zhang, J.; “A Theoretical study the effect of coating on concrete members under fire”, *Mag Concr Res* (55), 2003, pp143-149.
- [7] Hodhod, O.A., et al.; “Coating protection of loaded RC columns to resist elevated temperature”, *Fire Safety Journal*, 2008, pp1-8.
- [8] Saafi, M.; “Effect of fire on FRP reinforced concrete members”, *Composite Structures*, Vol. 58, 2002, pp11-20.
- [9] Ershad, U.C., Luke, A.B., Mark, F.G., Venkatesh, K., Kodur, R.; “Investigation of insulated FRP-Wrapped reinforced concrete columns in fire”, *Fire Safety Journal*, Vol. 42, 2007, pp452-460.
- [10] Bo-Wu, L., Yu-ye, X.; “Behavior of axially – and – rotationally restrained concrete columns with ‘+’ – shaped cross section and subjected to fire”, *Fire Safety Journal*, 2008, pp1-7.
- [11] Yu-ye, X., & Bo-Wu, L.; “Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with L-, T-, and +, – Shaped Cross-Section”, *Fire Safety Journal*, Vol. 44, 2009, pp869-880.
- [12] Wen-chen, J., Kuo, L.; “A Study of reinforced concrete corner columns after fire”, *Cement & Concrete composite* 30, 2008, pp622-638.
- [۱۳] مستوفی نژاد، داوود، «تکنولوژی و طرح اختلاط بتن»، انتشارات ارکان دانش، ۱۳۸۵، صص ۱ – ۴۳، صص ۷۶ – ۸۷.
- [۱۴] کی نیا، امیر مسعود، «آنالیز و طراحی سازه‌های بتن آرمه»، جهاد دانشگاهی اصفهان، ۱۳۸۳، صص ۲۶۱ – ۲۷۳.
- [15] ACI Commite 318; “Building code requirements
- گسیختگی متأثر از مدت‌زمان حرارت و نیز درجه حرارت خواهد بود.
- ۲- هنگام آتش‌سوزی، دو عامل اصلی دمای حریق و مدت زمان حریق، در میزان آثار مخرب مؤثر است که در این میان عامل مدت‌زمان حریق، غالب خواهد بود.
- ۳- ستون‌های بتن‌آرمه در بازه حرارتی °C 20-400 در مقاطع عرضی دایره‌ای و مربعی تقریباً حالت هم‌رفتاری از خود نشان می‌دهند؛ اما بازه حرارتی 500-700C بر مقطع عرضی دایره‌ای تأثیر بیشتری خواهد داشت.
- ۴- در بخش طراحی و محاسبات ساختمان‌های بتن‌آرمه با کاربری صنعتی و تجاری، لحاظ کردن مقاومت محوری کاهش‌یافته ناشی از حریق برای ستون‌های بتن‌آرمه با مقاطع عرضی مربعی و دایره‌ای به ترتیب به میزان ۲۵ و ۳۰ درصد برای مدت‌زمان مقاومت ۳۰ دقیقه‌ای در سازه و همچنین کاهش مقاومتی به ترتیب ۴۰ و ۴۵ درصد برای مقاومت حرارتی سازه در مدت زمان ۶۰ دقیقه، امری ضروری است.

۱۲- سپاسگزاری

در پایان لازم است از همکاری صمیمانه مهندسین مشاور سازه‌آزمون کردستان بخش آزمایشگاه مقاومت مصالح و نیز مدیریت محترم کارخانه روژ پولاد، واحد ذوب و حرارت، تشکر و قدردانی فراوان شود.

۱۳- مراجع

- [1] Abrams, M.S.; “Compressive Strength of concrete at temperature to 1600°F”, SP-25, American Concrete Institute, Detroit, 1971, pp33-58.
- [2] Malhotra, H.L.; “Design of Fire Resisting Structure”, Chapman and Hall, New York, 1982.
- [3] Chandra, S., & Berntsson, L.; “Fire Resistance

- [18] Varghese, P.C., "Advanced Reinforced Concrete Design", Second edition, Prentice Hall of India, New Delhi, 2006, pp281-293. [19] Underwriters Laboratories Inc., Fire Resistance Rating-ANSI/UL263, 2006, USA.
- for reinforced concrete", (ACI 318-02), American Concrete Institute Detroit, 2002.
- [۱۶] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، «مبحث نهم- طرح و اجرای ساختمانهای بتن آرمه»، نشر توسعه ایران، ۱۳۸۶، صص ۱۵۱-۱۵۵.
- [17] ISO 834-1975; "Fire resistance tests- elements of building construction", International Organization for Standardization, 1975.

A Study on the Effect of Section Shape of RC Columns on the Loss of Load-Carrying Capacity in Fire

M.A. Lotfollahi Yaghin^{1*}, P. Najafi²

1- Associate Professor, Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Iran

2- M.Sc. in Structural Engineering, Consulting Engineers Abadgaran A. Kh.

lotfollahi@tabrizu.ac.ir

Abstract:

In the present article, the effect of fire on the axial compressive strength of reinforced concrete (RC) columns was studied. Method of research was laboratory investigation. The axial compressive strength of RC columns was measured by applying variable heat in different time intervals in the process of experiment.

Thirty two samples of fine-scale RC columns with square and circular cross sections, the gross cross section area of 225 cm² (for both sections), longitudinal reinforcement area of 3.1 cm², general height of 30 cm for all samples and other uniform structural characteristics ($f'_c = 25\text{MPa}$, $f_y = 300\text{MPa}$) were exposed to fire and different temperatures (300°C to 700°C) were applied in the time intervals of 30, 60 and 90 minutes. Then they were exposed to axial loading by hydraulic jack with 200 ton capacity, and their strengths were measured. It is worth noting that, in the heating stage of samples, caps with thermal insulation were used in order to prevent instantaneous strain at the two ends of the samples. By carrying out the experiments, it became clear that at the time of fire, two factors, i.e., the "period of fire" and "temperature of fire" resulted in the loss of strength in RC columns. Of course, the "period of fire" factor was more effective than temperature of fire. It also became clear that RC columns with circular cross section fail faster in comparison with the columns with square cross sections at the time of fire. In order to evaluate and measure the results obtained, a relative factor called "**Fire Factor**" was utilized. The results indicated that the amount of axial compressive strength loss resulting from fire is approximately 3-5% greater in circular RC columns in comparison with square columns.

Keywords: Fire, Axial strength loss, Thermal insulation, Fire factor, Square and Circular cross section columns.