

پژوهشی روی بیشترین دمای رخ داده در ساختمان پلاسکو: بررسی خواص فیزیکی، مکانیکی و ساختاری مصالح پس از حریق

سعید بختیاری^{۱*}، مازیار رییس قاسمی^۲، مسعود جمالی آشتیانی^۳

- ۱- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش آتش و ساختمان
- ۲- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش فناوری بتن
- ۳- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش آتش و ساختمان

bakhtiyari@bhrc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۰

چکیده

حریق ساختمان پلاسکو باعث توجه وسیع جامعه مهندسی ایران به موضوع ایمنی در برابر آتش شد و در نوع خود حادثه مهمی در دنیا به شمار می‌رود. حریق در طبقه دهم ساختمان آغاز شد. علت شروع حریق اتصال برق (و احتمالاً همزمان نشت گاز از کپسول پیک‌نیک) بوده است. گسترش شدید آتش‌سوزی ناشی از بار بالای حریق و طراحی ساختمان، در پایان باعث ریزش کامل ساختمان شد که نشان از شدت زیاد حریق و دماهای بالا دارد. در این پژوهش تلاش شده است تا بیشترین دمای آتش‌سوزی با استفاده از ارزیابی مصالح باقیمانده، در حد امکان، تخمین زده شود. برای تخمین دماهای تجربه شده در ساختمان، بررسی تجربی روی مصالح باقیمانده و آوار صورت گرفت. بررسی‌های چشمی، آزمون‌های مقاومت فشاری پسماند، پتروگرافی و XRD/XRF روی تعدادی از نمونه‌های تهیه شده از بتن سقف‌ها انجام شد. همچنین برخی نمونه‌های سالم به وسیله کوره آزمایشگاهی در معرض دمای بالا قرار گرفت تا مبنای بهتری برای مقایسه‌ها به دست آید. نتایج نشان داد که مغزه مصالح بتنی در برخی قسمت‌ها در اثر آتش‌سوزی به دمای حدود ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس رسیده است. با توجه به خواص حرارتی و چگالی بتن، این یافته بدین معنا است که دمای حریق در محیط حریق بالاتر از این مقادیر بوده است. این موضوع از طریق مدل‌سازی کامپیوتری نیز به طور مفصل بحث و بررسی شده است. بررسی نمونه‌های در هم شده نشان داد که دما در زیر آوار به اعداد بسیار بالاتر و حتی حدود ۱۴۰۰ درجه سلسیوس رسیده است. علت این موضوع، ادامه احتراق مواد سوختنی در زیر آوار است که شرایط آن در برخی قسمت‌ها در حالت عایق حرارتی بوده و باعث حفظ حرارت و افزایش بیش از حد دما نسبت به آتش‌سوزی‌های معمولی شده است.

کلید واژه‌ها: پلاسکو، آتش‌سوزی، حرارت، مصالح ساختمانی، آوار، XRD/XRF

۱- مقدمه و دامنه تحقیق

۱-۱ طرح مسأله

در ساعت ۱۱:۳۳ پنجشنبه سی‌ام دی ۱۳۹۵ ساختمان پلاسکو تهران بر اثر حریق فروریخت. آتش‌سوزی و فروریزش ساختمان و تلفات بالایی در آن و زنگ خطری برای جامعه مهندسی ایران و مسئولین بود. بنابراین لازم بود تا با بررسی ابعاد مختلف این موضوع، از درس‌های برگرفته از آن برای کاهش این گونه خسارت‌ها استفاده نمود. حریق در ساختمان پلاسکو با شدت زیادی گسترش پیدا کرد. ریزش کامل ساختمان این سوال را ایجاد نمود که چگونگی گسترش حریق در این ساختمان چگونه بوده و پیش از ریزش ساختمان، به چه دماهایی رسیده است. پیشتر با استفاده از مدل‌سازی کامپیوتری، گسترش حریق در ساختمان و توسعه دما در طبقاتی که درگیر حریق شدند، بررسی شد [1]. در عین شواهدی از دماهای بسیار بالا در آوار پلاسکو مشاهده شد که بررسی دلایل و امکان آن می‌تواند به روشن شدن و رفع ابهامات مختلف در این حوزه کمک نماید. در این مقاله، این موضوع با استفاده از ارزیابی رفتار مصالح بتنی باقی‌مانده در آوار پلاسکو، از دیدگاه رفتار و خواص مصالح بررسی می‌شود.

۱-۲ مروری کوتاه بر ادبیات علمی

در مورد رفتار بتن در برابر آتش و نیز بررسی مشخصات بتن پس از آتش‌سوزی، مراجع علمی متعددی منتشر شده که تعدادی از آنها توسط بختیاری و همکاران [2-5] مرور شده است. خواص بتن به طور گسترده برحسب نوع و مقدار تشکیل‌دهنده‌ها تغییر می‌کند. آندربرگ [6] روش‌هایی برای محاسبه تغییر شکل بتن تحت شرایط دمای بالا پیشنهاد کرده است. هرمتی [7] با استفاده از روش‌های آنالیز حرارتی، واکنش‌های تخریبی در خمیر سیمان را بررسی کرده است. هاندو [8] و راینا [9] استفاده از روش‌های آنالیز حرارتی را برای ارزیابی بتن‌های تخریب‌شده در آتش گزارش کرده‌اند. واکنش‌هایی که با افزایش دما در خمیرسیمان و بتن رخ می‌دهد، توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده [10-13]

که شامل فرار آب آزاد در دمای تا 100°C ، تجزیه گچ و اترینگایت در $(110-170)^{\circ}\text{C}$ ، از دست رفتن آب پیوندی به علت تخریب C-S-H و هیدرات‌های کربوآلومینات، و دهیدروکسی شدن پرتلندیت در $(450-550)^{\circ}\text{C}$ و دکربناتی شدن کربنات کلسیم در $(900-700)^{\circ}\text{C}$ بوده است. روییز [14] با استفاده از تحلیل TGA/DTG اثر حرارت روی خمیر سیمان را بررسی و رفتار خمیرهای سیمان که تحت دماهای بالا بوده‌اند، تحلیل نموده است. افت‌های وزنی شامل از دست رفتن آب آزاد و مویینه، آب شیمیایی اترینگایت، دهیدروکسی شدن پرتلندیت و دکربناسیون کربنات کلسیم ناشی از کلینکر و پرکننده در دماهای مختلف تا 750°C توسط وی گزارش شده است. در دماهای بالاتر برخی واکنش‌ها محو می‌شود که می‌تواند به عنوان شاخصی برای تعیین تاریخچه دمایی بتن پس از حریق استفاده شود. تغییر رنگ بتن و سنگدانه‌ها بر اثر دمای بالا توسط هاجر [15] بررسی شده است و می‌تواند برای تشخیص چشمی و میکروسکوپی نوری برای بتن‌های قرار گرفته در معرض آتش استفاده شود.

یکی از دلایل مهم شکست اجزای بتنی در برابر آتش، پدیده ترکیدن است. آندربرگ [16] ساز و کارهای اصلی ترکیدن بتن را بررسی کرده است. بختیاری [2] پدیده ترکیدن بتن در شرایط آتش‌سوزی و ساز و کار رطوبت و توسعه فشار حفره را مرور کرده است.

۱-۳ دامنه پژوهش

در این پژوهش به منظور تخمین دماهای حادثه پلاسکو، بررسی‌های میدانی و آزمایش‌های مختلف فیزیکی، مکانیکی، میکروسکوپی و پتروگرافی روی نمونه‌های مصالح و بتنی برداشت شده صورت گرفت. نمونه‌هایی از محل آوار ساختمان پلاسکو و نیز از دپوی آوار برداشت شد. مشخصات کلی ساختمان، مصالح و تأسیسات و شرح مختصر حادثه در [1] ارائه شده است. همچنین پیشتر در مقاله‌ای دیگر، اندازه‌گیری شدت رهائش گرمای پارچه‌ها بر اثر سوختن و مدل‌سازی کامپیوتری گسترش حریق در ساختمان گزارش شده بود [1].

منحنی شدیدتر هیدروکربنی نیز دیده می‌شود.

شکل ۱. دو منحنی استاندارد دما - زمان برای مقاومت در برابر آتش: منحنی‌های سلولزی و هیدروکربنی

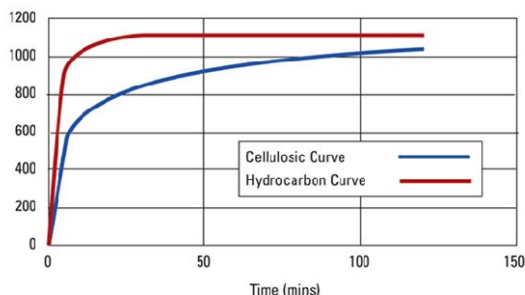


Fig. 1. Standard time-temperature curves for cellulosic and hydrocarbon fire resistance

۳- نتایج و بحث

۳-۱ - ارزیابی میدانی و آزمایشگاهی اثر آتش روی

بتن در ساختمان پلاسکو

به منظور ارزیابی آثار حریق روی اجزای ساختمانی، چند بازدید از محل حادثه و از دیوهای شهرداری در منطقه ۱۲ و سازمان مدیریت پسماند انجام شد. بلافاصله از همان روز بعد از حادثه، از محل حادثه و نیز از محل دیپوی آوار بازدید و بررسی به عمل آمد. نمونه‌های مختلفی در محل ساختمان پلاسکو و نیز در دیوهای آوار بر اساس مشاهدات برداشت شد. از گفت و گو با تمام عوامل برای شناخت بهتر حادثه و تشخیص محل تقریبی نمونه‌ها استفاده شد. با این حال، اطمینان کامل از محل نمونه‌ها با توجه به ابعاد حادثه دشوار بود. برخی از این نمونه‌ها از ظاهر ویژه‌ای برخوردار بودند، که به علت ذوب فلز و بتن و مخلوط شدن مصالح بود و شرح آن در ادامه خواهد آمد. این موضوع به همراه ریزش ساختمان، این سوال را به وجود آورد که بیشینه دماهای تجربه شده در این حادثه چقدر بوده است. برخی از نمونه‌های بتن از سقف طبقه زیرزمین، در مراحل پایانی آواربرداری برداشت شد و تحت ارزیابی‌های چشمی، مغزه‌گیری، مقاومت فشاری پسماند، میکروسکوپی نوری، پتروگرافی و XRD/XRF قرار گرفت. نتایج آزمون‌های ارائه شده در این مقاله، همراه با مدل‌سازی کامپیوتری [1]، به درک بهتر موضوع کمک می‌نماید.

با توجه به اینکه پیش از این چنین حادثه‌ای در این ابعاد در کشور رخ نداده و تجربه علمی چندانی در زمینه بررسی تجربی مشخصات مصالح پس از حریق در کشور وجود ندارد، روش ارائه شده در این مقاله، همراه با توضیحات نواقص و ادبیات علمی آن، کمک شایانی به روش‌شناسی موضوع می‌نماید.

۲- بررسی تجربی

برای بررسی تجربی از روش‌های زیر استفاده شد:

- بازدید از محل حادثه شامل ساختمان پاساژ باقی‌مانده و محل آوار و بررسی‌های میدانی
- شناسایی، تهیه، مطالعه و بررسی مدارک، گزارش‌ها، عکس‌ها و فیلم‌های روز حادثه
- بازدید از محل دیپوی آوارهای ساختمانی، بررسی و نمونه‌برداری برخی مصالح
- مشاهده و بررسی ظاهری قطعات و نمونه‌ها، تهیه مغزه و تعیین مقاومت فشاری بتن از نقاط مختلف سازه شامل بخش‌های به ظاهر سالم و بخش‌هایی که در معرض آتش بوده‌اند، آزمایش‌های آتش، شیمیایی، پتروگرافی، XRD و XRF روی مصالح برداشت شده به منظور بررسی تجربه دمایی مصالح در حادثه صورت گرفت.

آزمون مقاومت در برابر آتش: توانایی یک عنصر ساختمانی برای ادامه وظیفه عملکردی خود وقتی که در معرض حرارت و دماهای بالا قرار می‌گیرد، مقاومت آن در برابر آتش خوانده می‌شود. برای ارزیابی مقاومت در برابر آتش، جزء ساختمانی طبق یک رژیم استاندارد دما - زمان در کوره مناسب آزمایش می‌شود و برحسب نیاز مشخصات پایداری (ادامه باربری)، یکپارچگی و نارسانایی آن اندازه‌گیری می‌شود. منحنی استاندارد دما - زمان سلولزی بر اساس استاندارد ISO 834 در رابطه زیر و در شکل (۱) ارائه شده است:

$$T - T_0 = 345 \cdot \log(8t + 1)$$

که در آن t زمان برحسب دقیقه، T دمای کوره در زمان t و T_0 دمای اولیه کوره، هر دو برحسب درجه سلسیوس است. برای مطالعات بیشتر به [17] مراجعه شود. در همین شکل

۲-۳ شرح و بررسی چشمی آزمون‌ها

شرح نمونه‌ها همراه با تصاویر و نتایج ارزیابی چشمی آنها در این قسمت ارائه شده است.

نمونه F1: یک نمونه بتن برش خورده سالم که سنگدانه‌ها و سیمان در آن دیده می‌شود. شواهد ذوب و مخلوط شدن مصالح شیشه و فولادی در آن دیده می‌شود (شکل ۲). این نشان می‌دهد که برخی قسمت‌ها باید دماهای بالا حدود ۱۴۰۰ درجه سلسیوس را تجربه کرده باشند. اما بر اساس شواهد و نیز مدل‌سازی‌های صورت گرفته [1]، وقوع چنین موضوعی در حین حادثه حریق محل تردید است و در ادامه در خصوص علت آن بحث خواهد شد. همان‌گونه که از منحنی‌های شکل (۱) نیز مشاهده می‌شود، نه در منحنی سلولزی و نه حتی در منحنی هیدروکربنی، دما بالاتر از ۱۱۰۰ درجه سلسیوس افزایش نمی‌یابد (مگر در زمان‌های خیلی طولانی).

نمونه F2: بتن سقف با ظاهر سالم، پوشش روی میلگرد ۴ سانتی‌متر.

نمونه‌های F3 و F4: نمونه بتنی ضخامت ۱۶ سانتی‌متر، دارای ۴ سانتی‌متر پوشش بتن روی آرماتور، سطوح سیاه‌شدگی بدون نفوذ به مغزه بتن مشاهده می‌شود.

نمونه MC1: یک نمونه با ظاهر مخلوط، ضخامت میلگرد سقف ۶ میلی‌متر، با مش‌بندی ۲۰ × ۲۰ میلی‌متر.

نمونه CW1: مربوط به نمونه سقف که روی تیر بتنی (دیوار) نشسته و آثار قرارگیری میلگردهای ضخیم در آن نمایان است. در یک قسمت جانبی سیاه‌شدگی به نظر ناشی از دمای بالای میلگرد دیده می‌شود، اما روی هم رنگ نمونه آتش ندیده است (توجه کنید به بحث‌های مرجع [14]). آثار ریختن آهن گداخته در آن دیده می‌شود. برجستگی‌ها و گودی‌های بتن به وسیله آهن مذاب پر شده است (شکل ۳).

نمونه MC3: با ظاهر مخلوط، ضخامت میلگرد سقف ۶ میلی‌متر، مش‌بندی ۲۰ × ۲۰ میلی‌متر. دارای وزن مخصوص زیاد و با توجه به قابلیت مغناطیسی مشخص است که دارای آهن است. سطح زمخت با تخلخل بسیار زیاد، آثار ذوب‌شدگی را به وضوح نشان می‌دهد. داخل آن قطعات گچ دیده می‌شود. چند قطعه با جلای فلزی به رنگ نقره‌ای (احتمالاً آلومینیوم) در آن

دیده می‌شود. همچنین در چند قسمت آثاری از قسمت‌های سفیدرنگ با سطح به شدت متخلخل وجود دارد که با توجه به عدم خط افتادن با چاقو، احتمالاً شیشه یا سیلیس ذوب شده است. با توجه به مخلوط شدن مصالح، این اتفاقات در زیر آوار باید رخ داده باشد و به دلایل گفته شده در قبل، وقوع آن در حین حادثه حریق (پیش از ریزش) محتمل نیست (بحث در ادامه).

نمونه MC6: با ظاهر مخلوط، ضخامت میلگرد سقف ۶ میلی‌متر، مش‌بندی ۲۰ × ۲۰ میلی‌متر. نمونه ناهمگن که از آهن، گچ، سیمان یا بتن تشکیل شده و سطح زمخت و متخلخل دارد. قسمت‌های روشن روی سطح آن برخی گچ (با توجه به نرم و سست بودن) و برخی سختی بالایی دارند. سطح به شدت متخلخل می‌تواند ناشی از ذوب شیشه یا سیلیس سنگدانه بتن باشد. خاصیت مغناطیسی دارد و آهن‌ریا را جذب می‌کند. این قطعات با توجه به وجود نشانه‌های حرارت‌دیدگی بسیار بالا و همچنین ذوب شدن شیشه، به شدت به هم چسبیده‌اند.

شکل ۲. تصاویری از برخی آزمون‌های بررسی شده (الف) CW1، (ب) F2 و (ج) MC6

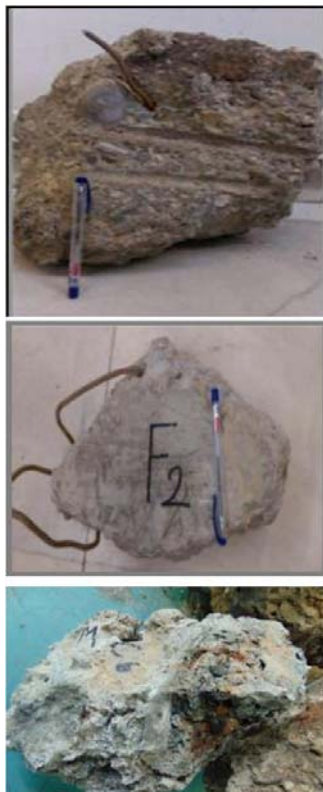


Fig. 2. Pictures of some evaluated samples ((a) CW1, (b) F2, and (c) MC6)

شکل ۳. قطعات مذاب در هنگام برداشت آوار



Fig. 3. Melted pieces during debris removal

شکل ۵. نمونه F3 پس از آزمون مقاومت در برابر آتش



الف



ب

Fig. 5. Sample F3 after fire resistance test in the furnace

نتایج بررسی ظاهری نمونه‌ها پس از آزمون کوره، به شرح زیر بود: وجهی از نمونه‌ها که در برابر شعله بوده، دارای تغییر رنگ مشهود و مایل به قهوه‌ای هستند. برخی از سنگدانه‌ها (یا مواد دیگر) به شکل مذاب درآمده‌اند. وجه پشت به شعله به رنگ صورتی روشن مشاهده می‌شود. سطح نمونه‌ها دارای ترک‌های ریز فراوان است، با این وجود نمونه‌ها انسجام خود را حفظ کرده‌اند، اگرچه به نظر می‌رسد دچار افت مقاومت زیادی شده‌اند. در عمل نیز تهیه نمونه مغزه سالم از آنها میسر نشد. با کمی تراشیدن سطحی نمونه‌ها، رنگ صورتی از بین رفته و خمیر سیمان به رنگ طوسی مشاهده می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، هدف از این آزمایش، بررسی تغییرات ظاهری و ساختاری بتن مطالعه شده در برابر آتش با دماهای مختلف و مقایسه آن با قطعاتی بود که از قسمت‌های مختلف ساختمان پلاسکو بدست آمد و به نظر می‌رسید تا دماهای زیاد در معرض آتش قرار گرفته باشند. بر این اساس مشخص شد که هیچ یک از قطعات بتنی برداشت شده، دارای ظاهری مشابه آنچه که در این آزمون و تا دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت، نبودند. به عبارت دیگر براساس شواهد بدست آمده و مقایسه آن با نتایج این آزمون، احتمال رسیدن نمونه‌های بتنی سازه‌ای تا دمای بیش از ۱۰۰۰ درجه سلسیوس بسیار کم است. در مورد علت تأکید چند باره دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس در این مقاله، منحنی شکل (۱) را

۳-۳ آزمون تعدادی از نمونه‌های سالم دال بتنی در کوره مقاومت در برابر آتش

برای مقایسه وضعیت نمونه‌های بتنی برداشت شده با یک بتن مشابه که در معرض آتش قرار گیرد، دو نمونه نسبتاً سالم F3 و F4 در کوره، برای ۳ ساعت در معرض آزمون مقاومت در برابر آتش قرار گرفتند. زمان ۳ ساعت به علت مدت تقریبی حادثه در نظر گرفته شد و از سویی برابر با بیشینه الزامات مقاومت در برابر آتش برای سازه‌های بلند مرتبه مطابق بسیاری از مقررات ملی و بین‌المللی است. نمونه‌ها قبل و پس از آزمون در شکل‌های (۴ و ۵) دیده می‌شود. در شکل (۵)، عکس بالا مربوط به روی نمونه است که به شکل مستقیم حرارت دیده، و عکس پایین مربوط به زیر آن بوده که مستقیماً در معرض آتش نبوده است.

شکل ۴. نمونه بتنی قبل از آزمون مقاومت در برابر آتش



Fig. 4. A concrete sample taken from Plasco debris before fire resistance test.

۳-۴-۳ تحلیل نتایج پتروگرافی

نمونه‌های مطالعه شده را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود: الف) نمونه‌هایی که مصالح مختلف با هم مخلوط شده و ترکیب ناهماهنگی از مصالح مختلف که بیشتر نیز به شکل مذاب درآمده بودند، ب) نمونه‌هایی که به دلیل حرارت ناشی از آتش تا حدی خواص خود را از دست داده‌اند و پ) نمونه‌های به ظاهر سالم.

در شکل (۶) نمونه‌ای از مصالح مخلوط دیده می‌شود. با توجه به نتایج پتروگرافی، این قطعات شامل ذغال، شیشه، آهن، سفال، سیمان و سنگدانه بودند.

شکل ۶. تصویر میکروسکوپی شامل خمیر سیمان، انیدرید و کلسیت از یک نمونه با مصالح مختلف مخلوط



Fig. 6. The microscopic image showing cement paste, anhydride and calcite from a mixed sample with various materials

با توجه به تغییر ماهیتی که در مصالح موجود در این نوع قطعات مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد دمای کمتر از ۱۰۰۰ درجه سلسیوس را تجربه کرده‌اند. مراجع [19, 20] در موافقت با این نتیجه‌گیری است. قسمت‌های بتنی در این قطعات دچار تغییر رنگ و فروپاشی قابل ملاحظه‌ای نبود. در تائید باید به مقایسه با وضعیت نمونه‌ای از بتن ساختمان، که در معرض آزمون مقاومت در برابر آتش قرار گرفت (بخش ۳-۳) توجه نمود. همان‌گونه که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود، خمیر سیمان در نمونه‌های آزمایشگاهی به طور کامل دی‌هیدراته شده و حتی برخی سنگدانه‌ها به صورت مذاب درآمده است، ولی چنین وضعیتی در نمونه‌های مطالعه شده از بقایای آوار پلاسکو مشاهده نشد. بنابراین با توجه به بحث‌های ارائه شده در بخش ۳-۳ درباره نمونه‌های قرار گرفته در معرض کوره، احتمال افزایش دما در

ببینید. همچنین در مراجع متعدد، نشان داده شده است که بیشینه دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس در ساختمان‌های مسکونی، اداری، تجاری و نظایر آن در یک حادثه حریق گسترش یافته قابل انتظار است، از جمله مراجعه شود به گزارش بازسازی یک حادثه حریق در استکهلم که در گزارش مؤسسه ملی تحقیقات سوئد ارائه شده است [18].

۳-۴ پتروگرافی

۳-۴-۱ نمونه‌های حرارت ندیده CW1 و F2

نمونه‌های بتن CW1 و F2 با ظاهری یکسان، مورد مطالعه پتروگرافی قرار گرفتند. با توجه به شواهد، این نمونه‌ها تحت تاثیر مستقیم حرارت نبوده، یا کمتر حرارت دیده بودند. سطح بتن همگن و مصالح استفاده شده از نوع رودخانه‌ای بود. قطر سنگدانه‌ها از ۱ تا ۳۰ میلی‌متر متغیر و دارای رنگ‌های خاکستری تیره و روشن، آجری، سبز و کرم هستند. خمیر سیمان حالت پوک شدگی داشته و دارای مقاوم زیادی به نظر نمی‌رسد. نتایج مطالعه استریومیکروسکپی نشان داد که شکل سنگدانه‌ها نیمه گرد تا تقریباً گرد شده است.

۳-۴-۲ چگونگی تاثیر آتش روی نمونه‌های

F4 و MC1,MC3,MC6

مشاهدات ماکروسکپی و مطالعات نظری بیانگر این مطلب بود که، نمونه‌های بتنی MC1، MC3، MC6 تحت تاثیر حرارت بوده‌اند. شواهد حاکی از ناهماهنگ بودن بافت بتن است. سیمان اولیه بتن‌ها از بین رفته و ترکیب جدیدی جایگزین شده است که به رنگ خاکستری مشاهده می‌شود. برخی از سنگدانه‌ها و در مواردی تمام سنگدانه‌ها ترکیب و مینرالوژی اولیه خود را از دست داده، ترکیب جدیدی بدست آمده است. از دیگر شواهد قرار گرفتن بتن در معرض دمای بالا، وجود درزه و ترک‌های بسیار وسیع در سنگدانه‌ها و همچنین سطح بتن است. بررسی‌های استریومیکروسکپ و میکروسکپ پلاریزان و نمونه‌برداری برای بررسی XRD نیز صورت گرفت.

امکان جابه‌جایی و هدر رفتن حرارت را بسیار کاهش داده و شرایط کم و بیش عایق را ایجاد کرده است که این پیشینه دمای قابل وقوع در زیر آوار را نسبت به آتش‌سوزی‌های معمولی افزایش داده است. برای تئوری علمی این موضوع به کتب فنی مربوط به احتراق یا مهندسی آتش مراجعه شود. برای نمونه، در [22] محاسبه پیشینه دماهای آتش‌سوزی، بر اساس معادلات ترمودینامیکی، توضیح داده شده است که به عنوان نمونه، برای سوخت سبکی مانند پروپان، می‌تواند به بالاتر از 2100°C برسد. بدیهی است که در شرایط واقعی حریق، با توجه به سوختن ناقص مصالح، خنک شدن محیط به علت انتقال حرارت به اطراف، وجود پنجره‌ها، بازشوها و نظایر آن، دمای حریق بسیار کمتر و در حدود بیان شده در بخش‌های قبلی این مقاله است. برای پلاسکو، دماهای قابل انتظار به وسیله مدل‌سازی بررسی و ارائه شد [1].

شکل ۷. الف) مقطعی از نمونه‌های قرار گرفته در معرض کوره که در آن تغییر ماهیت خمیر سیمان، تغییر رنگ سنگدانه‌ها و جداسدن سنگدانه از خمیر دیده می‌شود، ب) قطعه فلزی بر روی خمیره دیده می‌شود.

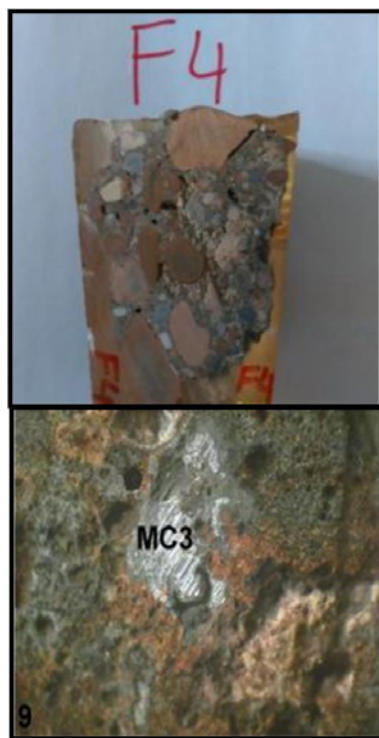


Fig. 7. (A) a section of samples exposed to fire in the furnace in which the change in the nature of the cement paste color of the aggregate and removal of aggregate from the paste is seen; (b) the metal piece is visible on the paste

قطعات بتن مورد بررسی را می‌توان کمتر از حدود 800°C درجه سلسیوس ارزیابی کرد.

از آنجایی که با افزایش دما، مشخصات فیزیکی و شیمیایی بتن و اجزای تشکیل دهنده آن تغییرات عمده‌ای می‌کند، با بررسی دقیق این موضوع می‌توان دماهایی که به قسمت‌های مختلف سازه بتنی رسیده است، تخمین زد. بر اساس نتایج ارائه شده در مرجع [21]، با افزایش دما به حدود 300°C درجه سلسیوس خمیر سیمان تغییر رنگ پیدا کرده و صورتی تا قرمز رنگ می‌شود و با افزایش دما تغییرات مختلفی در خمیر سیمان و سنگدانه رخ می‌دهد، تا در نهایت از حدود 800°C تا 1200°C درجه سلسیوس به طور کامل ساختار بتن (شامل چسباننده و سنگدانه‌ها) متلاشی می‌شود. بنابراین با توجه به شواهدی که از ساختمان پلاسکو بدست آمد، با وجود مشاهده مواد ذوب شده، مثل شیشه و برخی فلزات، تخریب ساختار بتن مشاهده نشد که این موضوع نشان می‌دهد نمونه‌های بتن بررسی شده دماهای بیش از 800°C درجه را تحمل نکرده‌اند.

در عین حال در مناطقی که حرارت زیادتر بوده، مصالح همچون شیشه و فلزات ذوب شده و مذاب به مصالح موجود در آوار نفوذ کرده، با آنها در هم آمیخته شده است که در بررسی پتروگرافی مشاهده شدند (شکل‌های ۹ و ۱۰). اما به نظر می‌آید که این اتفاق باید پس از ریزش ساختمان، در زیر آوار رخ داده باشد.

در تحلیل این موضوع لازم به ذکر است که حجم زیاد مصالح ساختمانی به صورت حجیم در آوار پلاسکو وجود داشته است. همزمان چندین تن مصالح قابل اشتعال (بیشتر پارچه) در تمام طبقات قبل از ریزش وجود داشته که سپس در زیر آوار محبوس شده و بی شک باعث اشتعال مصالح زیرین (در طبقات پایین که قبل از ریزش ساختمان هنوز مشتعل نشده بودند) شده است. به علت وجود مصالح خطی و صفحه‌ای بزرگ با ابعاد چندین متر، فضاهای تخللی قابل توجهی در آوار وجود داشته که جریان هوا در آنجا را امکان‌پذیر کرده است. بنابراین مجموعاً چندین روز مصالح قابل اشتعال در زیر آوار در حال سوختن بوده‌اند. مشاهدات چند روز بعد از حادثه این موضوع را تأیید می‌کند. از طرف دیگر، انباشت بسیار حجیم این مصالح روی یکدیگر،

شکل ۹. طیف XRD بتن حرارت‌دیده (تهیه شده توسط کمیته سازه)

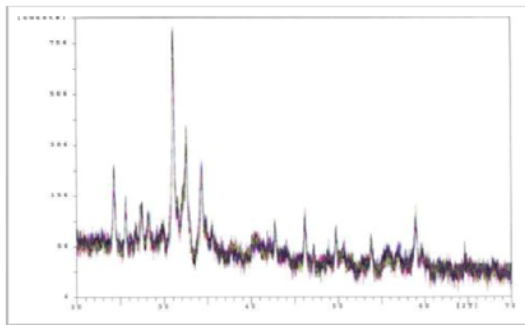


Fig. 9. X ray diffraction (XRD) of heated concrete (prepared by the structure Committee).

در مورد مطالعه خمیر سیمان و بتن تخریب شده بر اثر حریق به وسیله تکنیک XRD/XRF، در [23 و 24] پژوهش شده است. همچنین بختیاری [4] نتایج پژوهش خود در مورد آثار حریق روی خمیر سیمان را به وسیله XRD/XRF ارائه نموده است. در مورد تشخیص ژل CSH در نمودارهای XRD بسیار دشوار است و فناوری‌های خاصی مورد نیاز است، اما با بررسی پیک‌های C_nS و $Ca(OH)_2$ می‌توان تا حدودی تجربه دمایی بتن را تحلیل کرد. در غیاب ژل CSH، بیشترین فاز مورد انتظار باید پرتلندایت باشد که در زاویه 2θ حدود 34° دیده می‌شود. واکنش دهیدراتاسیون پرتلندایت تا حدودی برگشت پذیر است. با توجه به کوتاه بودن پیک آن نسبت به زوایای 30° تا 32° ، نمونه بی شک حرارت دیده و دمای بالای 500° درجه را تجربه کرده است، اما پیک پرتلندایت هنوز وجود دارد. از طرف دیگر، ارتفاع پیک‌های حول و حوش 32° نسبت به پرتلندایت بیشتر است که باید مربوط به فازهای کلینکر ($C2S$ و $C3S$) باشد. با توجه به عمر طولانی این بتن، باید انتظار داشت که این فازها بیشتر به علت دمای بالا رخ داده باشد (اگرچه مقداری نیز ممکن است باقی‌مانده از ابتدا باشد). از آن جایی که مقدار کربنات کلسیم در نمونه حرارت ندیده در اختیار نبود، نمی‌توان با قاطعیت در خصوص تغییرات آن اظهار نظر کرد، اما حضور آن را حول و حوش زاویه 2θ برابر با 29° می‌توان قبول کرد. نتایج پتروگرافی نیز رخداد کربناتاسیون را نشان داده بود. به طور کلی پیک مربوط به کربنات کلسیم باید به طور کامل پس از

شکل ۸. تصویر میکروسکوپی نمونه MC6، زمینه از ترکیب سیلیسی یا شیشه است که با نتایج XRF تائید می‌شود.

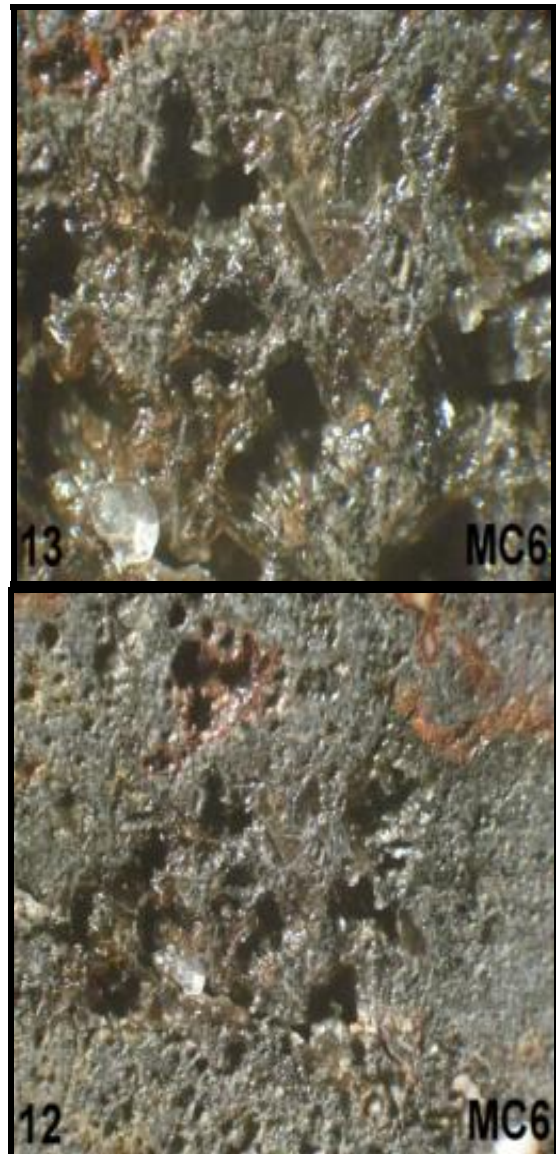


Fig. 8. Scanning electron microscopy (SEM) image of MC6 sample, the cementitious material is from glass or a silica compound that is in confirm with XRF results.

۴-۵-۳- نتایج XRD/XRF

بررسی‌های XRD/XRF روی قسمت‌های مختلف صورت گرفت که روشنگر بحث‌های صورت گرفته در بالا بود. قطعاتی از بتن حرارت خورده نیز توسط کمیته تخصصی سازه برداشت و طیف پراش اشعه X (XRD) گرفته شد که با توجه به هماهنگی نتایج آن با بحث‌های بالا و ارائه بخشی از روش‌شناسی کار، نتایج آن XRD در اینجا تحلیل و ارائه می‌شود.

کاهش دما می‌شود، اما در اینجا حجم زیاد مصالح ساختمانی به صورت حجیم در آوار ساختمان وجود داشته است. همزمان چندین تن مصالح قابل اشتعال (عمدتاً پارچه) در تمام طبقات وجود داشته که پس از ریزش در زیر آوار محبوس شده و باعث افروزش و سوختن مقادیر زیادی از آنها شده است. نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد که شدت رهایش گرمای حاصل از این پارچه‌ها بسیار زیاد بوده است [1]. به علت انبوه آوار مصالح، فضاهاى تخللى قابل توجهی در زیر آوار وجود داشته که جریان هوا در آنجا را امکان‌پذیر کرده است. بنابراین در مجموع چندین روز مصالح قابل اشتعال در زیر آوار در حال سوختن بوده‌اند. از طرف دیگر، انباشت بسیار حجیم این مصالح روی یکدیگر، امکان جابه‌جایی و هدر رفتن حرارت را بسیار کاهش داده، شرایط کم و بیش عایق را ایجاد کرده که بیشینه دمای قابل وقوع را نسبت به آتش‌سوزی‌های معمولی افزایش داده است. بنابراین دماهای حاصل شده در زیر آوار بسیار بالاتر از حد معمول حریق‌های ساختمانی بوده و باعث ذوب شدن مصالح مانند سیمان، شیشه و فلزات شده است.

تشکر و قدردانی

از هیأت ویژه ریاست جمهوری حادثه پلاسکو، به ویژه رییس محترم هیأت جناب آقای دکتر محمد تقی احمدی برای ایجاد امکان این پژوهش تشکر می‌شود. همچنین از حمایت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و همکاری بخش‌های آتش و بتن این مرکز و نیز همکاری علمی خانم‌ها زهرا درودیانی و الهام قوچی اصل و آقای فرهاد انصاری مقدم تقدیر می‌شود.

مراجع

- [1] Bakhtiyari, S., Jamali Ashtiani, M. "Heat release rate of materials and fire modelling of Plasco building's incident". J. of Omran Modares, Vol. 19, Issue 1, 1398, pp. 41-51. (in Persian).
- [2] Bakhtiyari et.al. "Investigation on fire behavior of normal and self-compacting concretes and sensitive parameters".

۸۰۰°C ناپدید شود [3]، بنابراین دما در اینجا کمتر از این مقدار است. پیک مربوط به دهیدرکسی شدن پرتلنایدت حتی در ۸۰۰°C ناپدید نمی‌شود که علت آن تبلور مجدد CaO در حین سرد شدن است، اما مقدار آن در اینجا به نظر بیشتر از آن است که فقط ناشی از تبلور مجدد باشد. با توجه به توضیحات فوق، در مجموع به نظر می‌آید نمونه باید دمایی کمتر از ۷۰۰ و بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس را تجربه کرده باشد که با نتایج مدل‌سازی حریق [1] سازگار است. از طرف دیگر با فرضیه ذوب شدن برخی مصالح در زیر آوار و پس از ریزش ساختمان همخوانی دارد. توجه شود که تجربه دمایی بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس برای نمونه‌های مغزه بتن، با توجه به هدایت حرارتی و گرمای ویژه بتن که باعث تأخیر افزایش دما در مغزه می‌شود، نشان از دمای بسیار بالاتر (بیش از ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) در آتش‌سوزی دارد، که با نتایج مدل‌سازی [1] تائید می‌شود.

نتیجه‌گیری

به منظور تحلیل دماهای رخ داده در آتش‌سوزی پلاسکو، نمونه برداری از محل دپوی آوار صورت گرفت. آزمون‌های مکانیکی، میکروسکوپی نوری، پتروگرافی و آزمایش‌های آتش روی نمونه‌ها صورت گرفت و نتایج نشان داد که دمای بتن سقف ساختمان پلاسکو در برخی طبقات دچار آتش‌سوزی به حدود ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس رسیده است. از آن جایی که آزمون‌ها روی مغزه بتن صورت گرفته و بتن دارای هدایت حرارتی نسبتاً پایین است، این نشان از دماهای بالاتر حریق دارد. مدل‌سازی‌های کامپیوتری [1] این موضوع را تائید کرده و وجود دماهای ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سلسیوس را نشان داده است.

مقادیر زیادی مصالح مخلوط در ارزیابی‌ها مشاهده شد که نشان از دمای حتی بیش از ۱۴۰۰ درجه سلسیوس دارد. این دماها باید در زیر آوار و پس از ریزش ساختمان رخ داده باشد. دماهای اینچنینی در آتش‌سوزی‌های معمولی قابل انتظار نیست [18] و مراجع متعدد دیگر و عواملی مانند سوختن ناقص، جابه‌جایی هوا و هدر رفتن انرژی حرارتی باعث

- [15] Hager, I. "Colour change in heated concrete". *Fire Tech.* 50, 945–958, 2014.
- [16] Anderberg. "Spalling phenomenon of HPC and OC". In Phan, L. T. (editor), *Proceedings of Int. workshop on fire performance of high strength concrete*, NIST, MD, 1997.
- [17] Bakhtiyari, Akbari, Jamali Ashtiani, Askari. "Fire resistance test and evaluation methods for building elements". BHRC publications, Research report No. R-679. 1392.
- [18] Brand posten, news from SP fire technology, *Reconstruction of the Rinkeby fire*, No 43, 2011.
- [19] Green, J. K. "Reinstatement of Concrete Structures after Fire, (Part 1)". *The Architects' Journal (England)*, July 14, 1971, pp. 93-99.
- [20] Smith, P. "Investigation of Repair of Damage to Concrete Caused by Formwork and Falsework Fire." *ACI Journal, Proceedings V. 60, No. 11, November 1963*, pp. 1535-1566.
- [21] Nijland and Larbi. "Unraveling the temperature distribution in fire-damaged concrete by means of PFM microscopy: Outline of the approach and review of potentially useful reactions", *Heron*, Vol. 46, No. 4.
- [22] Drysdale, D. "An introduction to fire dynamics". John Wiley and sons.
- [23] Piasta, J., et. al. "Changes in the structure of hardened cement paste due to high temperature". *Materials and Structures*, Vol. 17, 1984, pp 291-296.
- [24] Ukrainczyk, N., et. al. "XRD AND TGA investigation of hardened cement paste degradation, 11. Conference on Materials, Processes, Friction and Wear, MATRIB'06, Vela Luka, 22-24.06.2006. BHRC publications, Research report No. R-633. 1391.
- [3] Bakhtiyari, et. al., "Compressive strength and resistance to elevated temperature (500 °c) of self-compacting concretes containing limestone and quartz fillers". *Int. Civil Eng. J.*, 9, 2011. 216-222.
- [4] Bakhtiyari, et. al., "Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures; mechanical properties and changes in the phase composition of the paste". *Thermochemica Acta* 514, 2011, 74–81.
- [5] Bakhtiyari, et.al., A review on fire behavior of traditional and dense concretes, *Iranian Chemical Eng. J.*, Vol. 10, No. 55, 2011.
- [6] Anderberg, Y., Thelandersson, S., *Bulltin* 54, Lund Institute of technology, Lund, Sweden, 1976.
- [7] Harmathy, T. Z. "Properties of building materials". In: *SFPE handbook of Fire protection engineering*, Society of Fire Protection Engineers, Boston, USA, 1995.
- [8] Handoo, S. K., et.al., "Effect of temperature on the physico-chemical characteristics of hardened concrete". in: H. Justnes (Ed.), *10th Int. Cong. of Chem. of Cement*, Gothenburg, Sweden, June 2 –6, 1997.
- [9] Raina, S. J., et.al., "Instrumental techniques for investigation of damaged concrete". *Indian Concr. J.*, 52, 1978, 147– 149.
- [10] Zhou, Q., Glasser, F. P. "Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120 °C., *Cem. and Conc. Res.* 31, 2001, 1333–1339.
- [11] Nonnet, E., et.al., "Elastic properties of high alumina cement castables from room temperature to 1600 °C". *J. Eur. Ceram. Soc.*, 19, 1999, 1575–1583.
- [12] Khoury, G. A. "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Mag. Concr. Res.*, 44, 1992, 291– 309.
- [13] Grattan-Bellew, P. E. "Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes". *Constr. Build. Mat.*, 10, 1996, 3 – 16.
- [14] Ruiz, L. A., et.al., "The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste". *Cem. and Conc. Res.*, 35, 2005, 609-613.

Investigation on fire temperatures in Plasco incident through assessment of physical, mechanical and microstructural properties of materials

Saeed Bakhtiyari, Fire Research Department, Building
Maziar Rais Ghasemi, concrete technology department, BHRC, Tehran, Iran
Masoud Jamali Ashtiani, Fire department, BHRC, Tehran, Iran

bakhtiyari@bhrc.ac.ir

Abstract

At about 8.00 am of 20th December 2015, a fire started in a shop in Plasco building, located in center of Tehran, which resulted in tragic collapse of the building and claimed the lives of 22 fire fighters and other people. According to the findings of the investigations, the main reason of ignition was non-permitted extension of cablings in the shop of origin of fire; for use of electrical heating devices. This incident took the attention of Iranian society, Engineers and authorities to the need of improvement of fire safety of buildings. Plasco was collapsed after about three and a half hours of the ignition. Therefore the question was arisen how the scenario of the fire growth and temperature rise in the building was. The place of the building and depot of debris were visited and examined by special teams. Steel, concrete and other materials, which some of them were molten due to high temperature, was taken from the debris for further experimental works. Different tests were carried out on the samples. Heat release rate of textiles was discussed in another article. In this paper; the results of physical, mechanical and XRD/XRF tests and mineralogy/petrography examinations have been presented. The most tests carried out on the concrete samples taken from the ceiling system of the building. For comparison purposes, samples were also taken from the apparently non exposed ceilings. A number of these un-exposed samples were tested in a fire resistance furnace and their changes were utilized as a reference for comparison with samples of burnt sections of the building. The results revealed that the concrete cores taken from the fire exposed ceilings had experienced temperatures between 500-700 °C. Taking the thermal and physical properties of concrete into account; this revealed that the gas temperature of fire in Plasco was much higher than these amounts. This was in agreement with findings of FDS modeling, which was presented in another paper and showed temperatures of about 1000-1100 °C occurred in some parts of the building in fire. On the other hand, molten blends of different materials were seen in the debris, comprising molten metal, glass and cementitious materials. It showed that temperatures about 1400 °C could be occurred in the incident. But these temperatures are not usually seen in enclosure fires; rather it must be happened under the debris. Fifteen stories were collapsed at the end of tragedy. In that time, the massive amounts of textiles and other combustibles were burning in five upper stories, while there were still large quantities of textiles and clothes in the lower stories. So, after the collapse of the building, all combustible materials and even gasoil fuel stored in tanks in the basement could be burnt under the debris, approved by observations in next days during the operation of extinguishment and removal of debris. The failed construction systems comprised large panels and steel elements; therefore air flow was possible under the debris for supporting the combustion. On the other hand, large amounts of debris made a relative thermally insulated condition, especially in lower parts, which could produce a temperature rise considerably higher than recorded in enclosure fires. The observation of molten blends of cementitious materials supported this assumption and it was also in agreement with possible maximum temperatures in adiabatic combustions of hydrocarbons, which are far higher than these figures.

Keywords: Fire, Plasco, building materials, debris, XRD/XRF