

کد موضوع مقاله: C

The Effect of Elevated Temperatures on Mechanical Properties of Concrete with Fine Refractory Brick Aggregate

Ardalan Baradaran nasiri^{1*}, Mahdi Nematzadeh²

¹Masters Student of Structural Engineering, University of Mazandaran

²Associate Professor of Structural Engineering, University of Mazandaran

Abstract:

Concrete materials in structures are likely in their serviceability age, exposed to high temperatures by fire. Therefore the relative properties of concrete after such an exposure are of great importance in terms of the serviceability of buildings and safety of residents. In this paper a comprehensive experimental program regarding the use of recycled aggregates produced from demolition of refractory brick is presented, in which the effects of elevated temperatures on the physical and mechanical properties of various concrete mixtures prepared by ordinary Portland cement, crushed refractory brick, and river sand and gravel are studied. For this purpose three series of concrete mixes were designed using fine refractory brick aggregate instead of sand at percentages of 0%, 50% and 100%, and loss of weight, compressive strength after exposure to elevated temperatures of 200°C, 400°C, 600°C and 800°C were determined. The results demonstrated that the effect of replacing percentages refractory brick fine on losses in weight was found not to be significant up to 600°C. The results also indicated that the relative strength of concrete decreased as the exposure temperature increased and the effect of high temperatures on the strength of concrete was more considerable for concrete mixtures produced by river gravel aggregate.

Keywords: Refractory brick aggregate; Loss of weight; Elevated temperatures; Compressive strength; Fire resistance

کد موضوع مقاله: C

اثر دمای بالا روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن حاوی ریزدانه‌ی آجر نسوز

اردلان برادران نصیری^{۱*}، مهدی نعمت زاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر

۲- استادیار گروه عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر

چکیده:

مصالح بتن در سازه‌ها به احتمال زیاد طی دوره خدمتشان در اثر آتش سوزی در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند. به همین دلیل خصوصیات مرتبط بتن پس از قرار گرفتن در معرض آتش اهمیت زیادی در سرویس رسانی ساختمان‌ها و ایمنی ساکنین دارد. در این مطالعه یک برنامه آزمایشگاهی جامع در مورد استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی تولید شده از خرد کردن آجر نسوز ارائه شده است که در آن اثرات دمای بالا روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ترکیب‌های مختلف بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی، آجر نسوز خرد شده و شن و ماسه رودخانه‌ای بررسی می‌شود. برای این هدف سه طرح اختلاط با نسبت‌های جایگزینی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ ریزدانه آجر نسوز به جای ماسه طبیعی بکار گرفته شده است و کاهش وزن، مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرار گیری در معرض دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد تعیین شده است. نتایج نشان داد که اثر میزان درصد ریزدانه آجر تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد روی افت وزن قابل توجه نمی‌باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که، مقاومت فشاری بتن با افزایش دما، کاهش می‌یابد و اثر دما روی مقاومت بتن برای بتن‌های ساخته شده با مصالح رودخانه‌ای قابل ملاحظه‌تر بود.

واژه‌های کلیدی: افت وزن، مقاومت فشاری، آجر نسوز، مقاومت در برابر آتش، دماهای بالا

۱. مقدمه:

در طی دو دهه گذشته، تعداد زیادی از ساختمان در جهان به طول عمر طراحی خود رسیده یا بدلیل استفاده از مصالح نامناسب یا اجرای بد معیوب می‌شوند. علاوه براین، حضور ساختمان‌های قدیمی تخریب شده حاصل از نوسازی و شهرسازی ممکن است نقش بزرگی در ایجاد ضایعات بازی کنند. مدیریت ضایعات یکی از مشکلات بزرگ جهانی زمان ما را تشکیل می‌دهد به‌ویژه برای شهرهای بزرگ که فاقد محل دفن زباله هستند. بازیافت ضایعات غیرقابل تجزیه دشوار است و ضایعات سرامیک (آجرها از زیرمجموعه‌های سرامیک می‌باشند) در این گروه طبقه بندی می‌شود که دوره تجزیه آن بسیار طولانی (بیش از ۴۰۰۰ سال) است. اولین مورد استفاده از آجر خرد شده همراه با سیمان پرتلند در آلمان در سال ۱۸۶۰ برای تولید محصولات بتنی ثبت شده است، اما اولین مورد استفاده قابل توجه آجر خرد شده به عنوان سنگدانه در بتن تازه برای بازسازی بعد از جنگ جهانی دوم ثبت شده است [۱].

با توجه به مطالعات انجام شده، از جمله مزایای اصلی استفاده از آجر خرد شده به‌عنوان سنگدانه ی جایگزین؛ کاهش چگالی بتن، کاهش مصرف سنگدانه طبیعی، و درنظر گرفته‌شدن به عنوان یک روش دوستدار محیط زیست می‌باشد. استفاده و عملکرد بتن ساخته شده از آجر خرد شده به عنوان سنگدانه برای بتن معمولی کاملاً گسترده و رضایت بخش بوده است. با این حال، استفاده از سنگدانه‌ی آجری در تولید بتن باعث ایجاد مشکلاتی می‌شود که این مشکلات را می‌توان در این نکات خلاصه کرد: ۱. تخلخل بالا، نرخ جذب آب بالا و تغییرات کیفیت. ۲. کامل نبودن مشخصات در محل. ۳. عدم اطمینان در تأمین مصالح و فقدان تجربه در استفاده از این مصالح.

کچیم^۱ [۲] خصوصیات مکانیکی بتن با سنگدانه آجری از طریق جایگزینی جزئی سنگدانه طبیعی با سنگدانه آجری را مطالعه نمود و دریافت که تا ۱۵٪ جایگزینی هیچ کاهش مقاومتی بوجود نمی‌آید. دیب و کنای^۲ [۳] نشان دادند که تولید بتن حاوی آجر خرد شده (درشت و ریزدانه) با خصوصیات مشابه با بتن حاوی سنگدانه طبیعی امکان پذیر خواهد بود که با سنگدانه آجری محدود شده به ۲۵٪ تا ۵۰٪ به ترتیب برای درشت‌دانه و ریزدانه ارائه شده بود. علی عبود^۳ و همکاران [۴]، به بررسی استفاده از آجر خرد شده در محصولات بتنی پرداختند. ایشان مقاومت فشاری، تخلخل، مدول الاستیسیته، سرعت پالس التراسونیک نمونه‌های بتنی ساخته شده از ۰٪ تا ۱۰٪ ریزدانه و درشت‌دانه آجری با جایگزینی به جای مصالح طبیعی و همچنین ترکیبی از آن‌ها را بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که با جایگزینی ۱۰٪ درشت دانه با مصالح بازیافتی مقاومت بطور قابل ملاحظه کاهش می‌یابد، اما همچنان برای برای مصارف رایج مناسب است.

ایمنی انسان هنگام آتش سوزی از جمله مواردی است که در طراحی ساختمان‌های مسکونی، عمومی و صنعتی باید مد نظر قرار گیرد و بتن از این نظر سابقه عملکرد و خدمت دهی خوبی دارد. وقتی که بتن در معرض دماهای بالا قرار می‌گیرد، ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی بتن بطور قابل توجهی تغییر می‌کند. از دست دادن آب (dehydration) همچون آزاد شدن آب ترکیب شیمیایی از کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) بصورت قابل توجه در دمای بالاتر از ۱۱۰ درجه اتفاق می‌افتد [۵]. از دست دادن آب سیلیکات کلسیم هیدراته شده و انبساط حرارتی سنگدانه‌ها، تنش‌های داخلی را افزایش داده و از ۳۰۰ درجه ریزترک‌ها بواسطه مصالح حاصل می‌شود [۶]. همچنین برخی تغییرات در رنگ هم ممکن است طی قرار گیری در معرض آتش رخ دهد [۷]. تغییرات ایجاد شده بوسیله درجه حرارت‌های بالا هنگامی که دما از ۵۰۰ درجه عبور می‌کند بیشتر مشهود است و بیشتر این تغییرات تجربه شده توسط بتن در این سطح دما، غیرقابل برگشت می‌باشند [۸]. ژل CSH، که به ترکیب خمیر سیمان مقاومت می‌دهد، در دمای بالای ۶۰۰ درجه تجزیه می‌شود. در ۸۰۰ درجه، بتن معمولاً از هم پاشیده می‌شود و بیش از ۱۱۵۰ درجه فلدسپار ذوب می‌شود و سایر موادمعدنی خمیرسیمان به یک فاز شیشه‌ای تبدیل می‌شوند [۶]. در نتیجه، تغییرات ریزساختاری شدید حاصل شده و بتن مقاومت و دوام خود را از دست می‌دهد.

خصوصیات مکانیکی از قبیل مقاومت، مدول الاستیسیته و ثبات حجمی بتن^۴ بطور قابل ملاحظه‌ای طی قرارگیری در معرض آتش کاهش می‌یابد [۹ و ۱۰]. از جمله مصالح که مقاومت خوبی در برابر حرارت دارند آجر می‌باشد که در این تحقیق مورد استفاده

¹ Cachim

² Debieb & Kenai

³ Aliabdo

⁴ Volume stability of concrete

قرار گرفته است. به غیر از پارامترهای مقاومت در دمای محیط، خلف و دی ونی^۵ [۱۱] خصوصیات گرمایی بتن با سنگدانه آجری را مطالعه نمودند و ایشان دریافتند که بتن با سنگدانه آجری، مشابه و یا حتی بهتر از بتن با سنگدانه گرانیتی در دماهای بالا عمل می کند.

هدف از کار پیش رو، مطالعه خصوصیات نمونه های بتنی تهیه شده با مصالح ریز آجرنسوز که با ماسه طبیعی رودخانه ای جایگزین شده اند در نسبت های متفاوت (۰/۰، ۵۰/۵۰ و ۱۰۰/۰) پس از قرارگیری در معرض دماهای بالای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰°C می باشد. کاهش وزن، مقاومت فشاری نمونه های بتنی قبل و پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا و همچنین میزان تخلخل نمونه های حرارت ندیده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری بتن با افزایش دما، کاهش می یابد و اثر دما روی کاهش مقاومت بتن برای بتن های ساخته شده با مصالح رودخانه ای قابل ملاحظه تر بود.

۲. مطالعات آزمایشگاهی:

۲-۱-۱. مصالح

در این تحقیق مصالح مورد استفاده در طرح های اختلاط بتن شامل پرتلند تیپ I، ریزدانه آجر شاموتی، درشتدانه و ریزدانه طبیعی می باشد که در ادامه هر یک از آنها تشریح می شوند.

۲-۱-۱-۱. سیمان

سیمان پرتلند تیپ I (CEM-I 42.5N) تهیه شده از منبع محلی برای استفاده در اختلاط های این تحقیق بکار رفت. جدول ۱ خصوصیات این سیمان را نشان می دهد.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی سیمان

سیمان پرتلند (CEM-I 42.5N)	خصوصیات شیمیایی (%)
۲۰/۶	سیلیکون دی اکسید (SiO ₂)
۴/۸۶	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃)
۳/۳۷	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)
۶۳/۵۶	اکسید کلسیم (CaO)
۲/۱۸	اکسید منیزیم (MgO)
۲/۳	سولفور تری اکسید (SO ₃)
۲/۲	افت اشتعال (LOI)

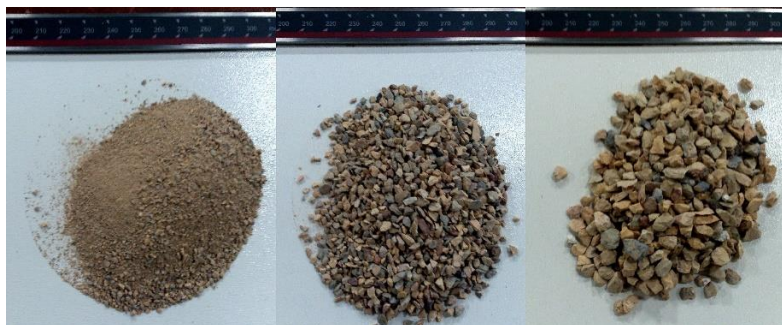
۲-۱-۲. سنگدانه ها

ماسه طبیعی در وضعیت اشباع با سطح خشک^۶ به عنوان ریزدانه با مدول نرمی ۲/۶۰ و جذب آب ۱/۷۳٪ و چگالی ۲/۶۳ و حداکثر اندازه ۴/۷۵ در این تحقیق استفاده شد. درشت دانه طبیعی با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی متر در وضعیت SSD، با چگالی ۲/۶۸ و جذب آب ۰/۴۷٪ مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق ماسه آجری نیز بکار گرفته شد که در رده های مختلف از ۴/۷۵ میلی متر تا ۰/۱۵ میلی متر طبق استاندارد ASTM C33 [۱۲] مورد استفاده قرار گرفتند. باتوجه به آزمایشات انجام شده روی آجر های خرد شده، مقدار چگالی ۲/۶۱ و میزان جذب آب ۲/۱۸٪ بدست آمد. شکل ۱ رده های مختلف ماسه آجری را نمایش می دهد.

⁵ Khalaf & DeVenny

⁶ Saturated surface dry

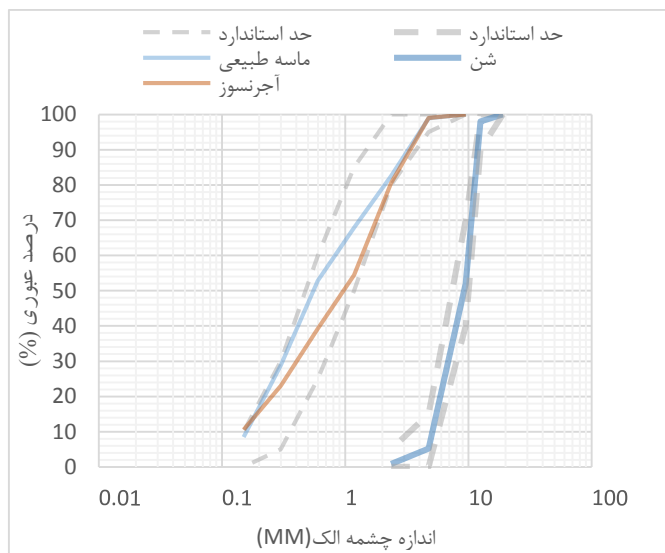
همچنین، شکل ۲ نمودار دانه بندی شن و ماسه و ماسه آجری را نشان می‌دهد. همچنین، جدول ۲ خصوصیات ماسه آجری را ارائه می‌دهد.



شکل ۱. اندازه های مختلف سنگدانه آجر نسوز

جدول ۲. خصوصیات آجر نسوز

خصوصیات کلی	
شاموت	ماده خام پایه
۰/۶-۰/۷	انبساط حرارتی بازگشت پذیر در 1000°C
آنالیز شیمیایی (%)	
۵۲	سیلیکون دی اکسید (SiO_2)
۴۰	اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)
۱/۵	اکسید آهن (Fe_2O_3)
۰/۵	اکسید کلسیم (CaO)
۳,۰	اکسید منیزیم (MgO)
۵	TiO_2
خصوصیات فیزیکی و حرارتی	
۲/۱۵-۲/۳	چگالی بالک (gr/cm^3)
۱۷-۲۱	تخلخل ظاهری (%)
۳۵۰-۴۵۰	مقاومت خردشدن سرد (kg/cm^2)
۱۷۰۰	نسوزی ($^{\circ}\text{C}$)
۱۳۲۰-۱۳۴۰	نسوزی تحت بار ($^{\circ}\text{C}$)
۱۵-۲۰	شوک حرارتی در 1000°C

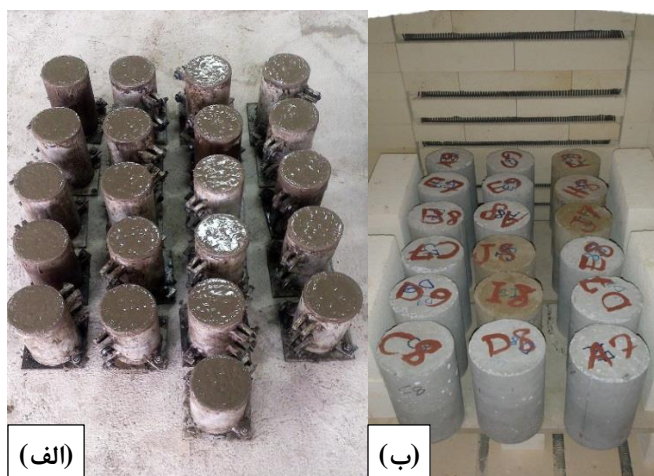


شکل ۲. نمودار دانه بندی شن و ماسه طبیعی^۷ و آجر نسوز

۲-۲. تعیین نسبت های طرح اختلاط:

در این تحقیق در مجموع ۵۴ نمونه در سه مخلوط بتن آماده شد که با نسبت های مختلف جایگزینی حجمی ریزدانه آجر نسوز به جای ریزدانه طبیعی با استفاده از سیمان پرتلند معمولی نوع ساخته شد. نسبت های جایگزینی حجمی ریزدانه آجر نسوز بصورت ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ در نظر گرفته شد. نسبت آب به سیمان برای کلیه طرح ها ثابت و برابر ۰/۳۸ در نظر گرفته شد. طرح های اختلاط براساس استاندارد ACI 318 [۱۳] مورد انتخاب قرار گرفت. نمونه های ساخته شده در این مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.

از آنجا که کارایی نمونه های بتنی ساخته شده از آجر تحت تاثیر میزان جذب آب سنگدانه آجر نسوز خرد شده قرار می گیرند، سنگدانه های آجر نسوز در طی این تحقیق قبل از اجرای طرح اختلاط به میزان درصد جذب آبشان مرطوب شده و در شرایط SSD به مدت ۲۴ ساعت قبل از ساخت بتن قرار گرفتند. همچنین، به علت این که نمی توان ریزدانه را همانند درشت دانه مرطوب و سپس سطح آن را خشک نمود، ریزدانه آجر نسوز در ورق های پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت نگاه داشته شدند. این روش قبلا بوسیله خلف و همکاران [۱۴ و ۱۵] رایج شد.



شکل ۴. الف) سطح تمام شده ی نمونه های بتنی ب) کوره الکتریکی

⁷ Natural sand

جدول ۳ نسبت‌های طرح اختلاط بتن را نمایش می‌دهد. در این جدول نام گذاری هر گروه از طرح‌های اختلاط در سه بخش انجام می‌شود، RB معرف آجر نسوز بوده و عددهای موجود در کنار آن میزان درصد جایگزینی ریزدانه آجر نسوز را نشان می‌دهد و بدین ترتیب RB50 به معنی نمونه حاوی ۵۰٪ ریزدانه آجر نسوز می‌باشد.

۲-۳. آماده سازی نمونه‌ها

برای هر ترکیب و نوع دمای مورد اعمال بر نمونه‌های بتنی، سه نمونه استوانه‌ای به ترتیب با ارتفاع و قطر ۲۰۰ و ۱۰۰ میلیمتر ساخته شدند. پس از ۲۴ ساعت از بتن ریزی، نمونه‌ها قالب برداری شده و در یک مخزن آب با دمای 23°C و رطوبت ۱۰۰٪ به مدت ۲۸ روز طبق استاندارد ASTM C192 [۱۶] عمل آوری شد. پس از آن نمونه‌ها برای قرار گیری در کوره به مدت ۶ روز در محیط آزمایشگاه نگه داری شدند تا در هوای آزاد خشک^۸ شوند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در اون در دمای 110°C قرار داده شدند. سرانجام نمونه‌ها تحت دماهای بالا از 200°C تا 800°C قرار گرفتند و پس از خنک شدن و رسیدن به دمای محیط تحت آزمایش بارگذاری جهت تعیین مقاومت فشاری قرار گرفتند.

۲-۴. عملیات حرارتی

هر گروه از نمونه‌های بتنی در ۶ دسته ی حرارتی شامل 23°C ، 110°C ، 200°C ، 400°C ، 600°C و 800°C مورد بررسی قرار گرفتند. دمای 23°C به عنوان دمای محیط (دمای مرجع)، دمای 110°C به عنوان دمای اون و سایر دماها به عنوان حرارت های بالا در نظر گرفته شدند. نمونه‌های تحت دماهای بالا در یک کوره الکتریکی قائم با ابعاد $800 \times 800 \times 800$ میلی متر قرار گرفتند (ببینید شکل ۴ را) و تمام گروه‌ها (از هر گروه ۳ نمونه جهت میانگین گیری) پس از رسیدن به دمای هدف در کوره الکتریکی به مدت ۲ ساعت [۸] و [۱۷] در آن دما باقی ماندند. دمای داخل کوره توسط ترموکوپل‌های داخلی قرائت شده و قابل تنظیم بود که نرخ سرعت بارگذاری حرارتی در این تحقیق $5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ بوده و نمونه‌ها پس از اتمام بارگذاری تا رسیدن به دمای محیط در کوره باقی ماندند. بلافاصله پس از رسیدن نمونه‌ها به دمای محیط عملیات بارگذاری در دمای محیط اعمال شد. باید توجه داشت که کلیه نمونه‌ها تحت دماهای بالا (200°C الی 800°C) دماهای 23°C و 110°C را پیش از آن تجربه کرده اند.

جدول ۳. خصوصیات مخلوط‌های بتنی

شماره طرح	نام مشخصه نمونه	سطح جایگزینی سنگدانه بازیافتی %	W/C	نسبت های اختلاط (kg/m ³)				
				سیمان	آب	درشت دانه (SSD)	ریزدانه (SSD)	
							طبیعی	بازیافتی
۱	RB0	۰%	۰/۳۸	۵۶۶	۲۱۵	۹۱۸	۶۴۶	۰
۲	RB50	۵۰%	۰/۳۸	۵۶۶	۲۱۵	۹۱۸	۳۲۳	۳۱۳
۳	RB100	۱۰۰%	۰/۳۸	۵۶۶	۲۱۵	۹۱۸	۰	۶۲۶

۲-۵. آزمایشات انجام شده روی بتن سخت شده

به منظور ارزیابی و مقایسه نمونه‌های بتنی پس از آتش، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و کاهش وزن نمونه‌ها در دماهای مختلف تعیین شد. همچنین، جذب آب، تخلخل و چگالی بتن سخت شده قبل از قرارگیری در کوره و اعمال دماهای بالا بدست آورده شد.

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی براساس استاندارد ASTM C39 [۱۸] انجام شد که در آن، بار محوری قائم توسط یک جک هیدرولیکی ۲۰۰ تنی به روی نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در آتش و بلافاصله پس از رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای محیط

⁸ Air-dry

اعمال می‌شود. نرخ بارگذاری فشاری برای کلیه نمونه‌ها ثابت و برابر با ۲۰۰ کیلوگرم بر ثانیه معادل ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه طبق محدوده استاندارد مربوطه ($0/05 \pm 0/25$ مگاپاسکال بر ثانیه) در نظر گرفته شد. علاوه بر این، جذب آب، تخلخل و چگالی بتن سخت شده براساس روش استاندارد ASTM C642 [۱۹] تعیین شد. بدین ترتیب پس از ۲۸ روز از قالب برداری و قبل از عملیات آتش، مقادیر جرم خشک شده در اون، جرم اشباع با سطح خشک پس از غوطه‌وری، و جرم ظاهری پس از غوطه‌وری و جوشاندن برای کلیه نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری شد و مطابق با روابط موجود در استاندارد، پارامترهای مذکور بدست آورده شد.

۳. نتایج و بحث

هدف از انجام این تحقیق ارزیابی میزان تاثیر استفاده از ریزدانه آجر نسوز بر روی خصوصیات بتن تازه و نیز خصوصیات بتن سخت شده پس از قرار گیری در معرض آتش می‌باشد. برای این منظور سه طرح بتن که قبلاً اشاره شده‌بود ساخته شد و افت وزن و مقاومت فشاری برای همه نمونه‌ها در دماهای ۲۳ تا $800^{\circ}C$ همراه با جذب آب، تخلخل و چگالی بتن ندیده تعیین شد که نتایج آن در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق، نمونه‌های بتنی با داشتن دمای $23^{\circ}C$ در هر گروه از گروه‌های سه‌گانه، به عنوان نمونه‌های مرجع انتخاب شد و نتایج بدست آمده برای سایر نمونه‌ها با نمونه مرجع هم‌رده مقایسه شدند.

۳-۱. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن، از عناصر اصلی طراحی سازه، بدون شک به عنوان یکی از مهمترین خواص مکانیکی بتن در نظر گرفته می‌شود که کیفیت بتن را مشخص می‌کند. بسیاری از خواص دیگر بتن مانند مدول الاستیسیته، چگالی و کرنش در تنش حداکثر به مقاومت فشاری مربوط می‌شود. مقدار میانگین مقاومت فشاری مربوط به سه نمونه از هر یک از گروه‌های بتنی ساخته شده با درصد‌های مختلف آجر نسوز بدست آمده است و در شکل ۵ ارائه شده‌است. همچنین، درصد تغییرات مقاومت فشاری کلیه نمونه‌ها نسبت به بتن مرجع هر گروه در جداول ۴ آورده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در دمای محیط (دمای مرجع)، جایگزینی درصد‌های مختلف ریزدانه طبیعی با آجر نسوز منجر به کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه بدون ریزدانه آجری شده است؛ با این حال، کمترین مقدار کاهش در مقاومت فشاری در سطح جایگزینی^۹ ۱۰۰٪ ریزدانه با مصالح آجر نسوز به میزان ۶٪ حاصل شده است (شکل ۵ و جدول ۴ را ببینید).

جدول ۴. درصد تغییرات در خصوصیات بتن

خصوصیت	نام مشخصه نمونه	$\Delta P110/P23^a$ (%)	$\Delta P200/P23^a$ (%)	$\Delta P400/P23^a$ (%)	$\Delta P600/P23^a$ (%)	$\Delta P800/P23^a$ (%)	$\Delta P1000/P23^a$ (%)
مقاومت فشاری (MPa)	RB0	۴۸/۵(۰/۰)	-۷/۶(۰/۰)	-۱۶/۷(۰/۰)	-۲۵/۹(۰/۰)	-۵۷/۸(۰/۰)	-۸۳/۳(۰/۰)
	RB50	۴۴/۳(-۸/۶)	-۱۵/۲(-۱۶/۱)	-۲۰/۹(-۱۳/۳)	-۲۴/۹(-۷/۴)	-۵۷/۴(-۷/۶)	-۸۲/۰(-۱/۹)
	RB100	۴۵/۵(-۶/۱)	-۶/۶(-۵/۰)	-۱۱/۰(+۰/۲)	-۲۰/۲(+۱/۲)	-۶۳/۴(-۱۸/۵)	-۸۰/۱(+۱۱/۷)
افت وزن (%)	RB0	۰/۰	۴/۵	۵/۳	۸/۷	۱۰/۸	۱۳/۹
	RB50	۰/۰	۵/۰	۴/۷	۸/۸	۱۱/۰	۱۱/۲
	RB100	۰/۰	۴/۹	۵/۶	۹/۰	۱۱/۲	۱۴/۹
کل نمونه های گروه	۵۴	۹	۹	۹	۹	۹	۹

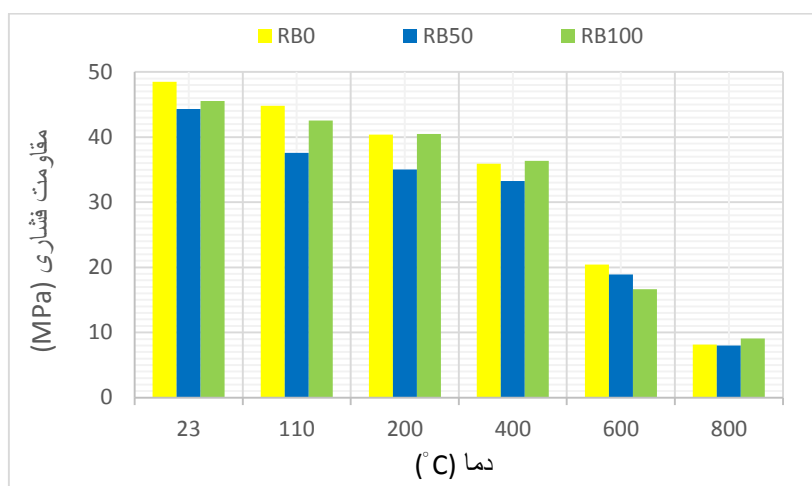
* نماد P؛ بیانگر خصوصیت بتن است یعنی مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و تخلخل
 * نماد ΔP ؛ بیانگر تفاضل مقدار خصوصیت از مقدار خصوصیت مرجع می‌باشد به عنوان مثال $\Delta P600$ بیانگر $P23^a - P600$ می‌باشد.
 نماد $P23^a$ ؛ بیانگر بتن مرجع می‌باشد. به عنوان مثال $\Delta P200/P23^a$ بیانگر نسبت خصوصیت بتن مثلاً مقاومت فشاری در دمای $200^{\circ}C$ به همان خصوصیت بتن برای بتن مرجع می‌باشد.
 * اعداد داخل پرانتز بیانگر میزان درصد تغییرات خصوصیت نمونه‌ها نسبت به بتن RB0 در همان دما می‌باشد.

⁹ Replacement level

در دمای 110°C ، وقتی که بتن در معرض دماهای بالاتر از حدود 110°C قرار می‌گیرد، ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی بتن بطور قابل توجهی تغییر می‌کند. در دمای 110°C نمونه‌های حاوی ۲۵٪ و ۷۵٪ آجر نسوز (RB25 و RB75) به ترتیب ۷٪ و ۳٪ کاهش در مقاومت فشاری نتیجه داده‌اند. در مجموع در دمای 110°C جایگزینی مصالح طبیعی با ریزدانه آجر نسوز بر روند کاهش مقاومت تأثیر گذار بوده و این تأثیر برای نمونه‌های با درصد‌های بالای جایگزینی رو به بهبود است.

در دمای 200°C کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به دمای 110°C نزدیک به ۱۰٪ می‌باشد (ببینید جداول ۴ و ۵ را). علاوه بر این، بعد از دمای 110°C تا 600°C ، نرخ افت مقاومت در نمونه‌ها بسیار شدید می‌باشد بطوریکه افت مقاومت در دمای 600°C نسبت به دمای 400°C بیش از ۳۰٪ می‌باشد. همچنین، بیشترین نرخ افت مقاومت برای نمونه‌ها در دمای 600°C رخ می‌دهد.

در دمای 800°C و با شروع تدریجی تشکیل پیوند های سرامیکی در آجر نسوز، عملکرد حرارتی مناسبی در نمونه‌های حاوی آنها مشاهده می‌شود. مبتنی بر جداول ۴ و ۵ (اعداد داخل پرانتز)، با افزایش میزان سطح جایگزینی روند افت مقاومت فشاری برای تمام گروه‌ها کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در این دما با جایگزینی ۱۰٪ آجر نسوز برای نمونه‌ها (RB100) ۱۲٪ مقاومت بالاتری نسبت به نمونه با ۱۰٪ ریزدانه طبیعی (RB0) از خود نشان داده است که این افزایش در حالی است که نمونه RB100 در دمای مرجع، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه RB0 داشته‌است.



شکل ۵. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها در حرارت

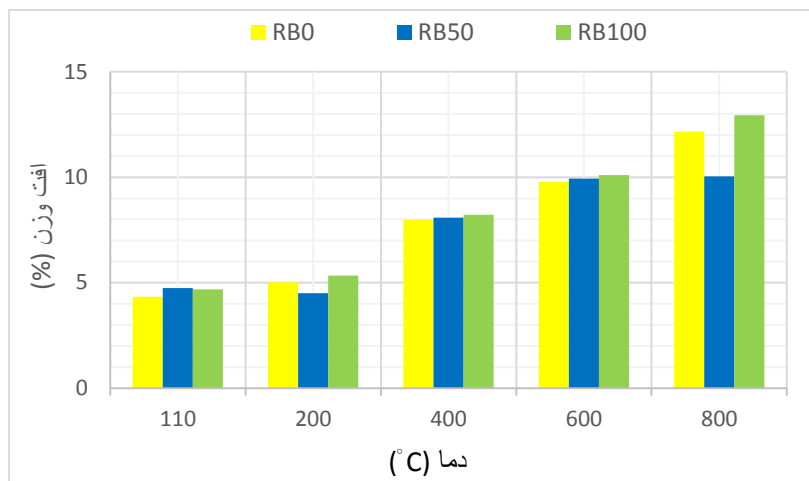
۳-۲. افت وزن

وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرار گرفتن در معرض حرارت به منظور ارزیابی افت وزن^{۱۰} برای هر گروه از نمونه‌های بتنی اندازه گیری شد. شکل ۶ به ترتیب میزان افت وزن نمونه‌های حاوی سیمان معمولی را نسبت به بتن مرجع در دماهای مختلف نشان می‌دهد. درصد افت وزن با افزایش دما در تمام گروه‌ها افزایش می‌یابد و یکپارچگی ساختاری نمونه‌های بتنی، در حرارت‌های بالا رو به زوال می‌گذارد که این موضوع از طریق مشاهده گسترش ترک‌ها مورد تایید قرار می‌گیرد.

نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان می‌دهد که افت وزن نمونه‌های حرارت دیده در هر گروه حرارتی با توجه به اینکه جذب آب ریزدانه ماسه طبیعی و ریزدانه آجر نسوز نزدیک به هم می‌باشند تقریباً مشابه بوده و تنها در دمای 800°C بدلیل مقاومت و سختی بیشتر سنگدانه‌های آجری و شاخص نسوزی آن‌ها در برابر حرارت‌های بالا باعث ایجاد تفاوت گردیده‌است. این رفتار به نظر می‌رسد ناشی از بین رفتن کل پیوندهای شیمیایی بتن و همچنین تغییر در ماهیت و ساختار دانه‌ها^{۱۱} باشد.

¹⁰ Loss of Weight

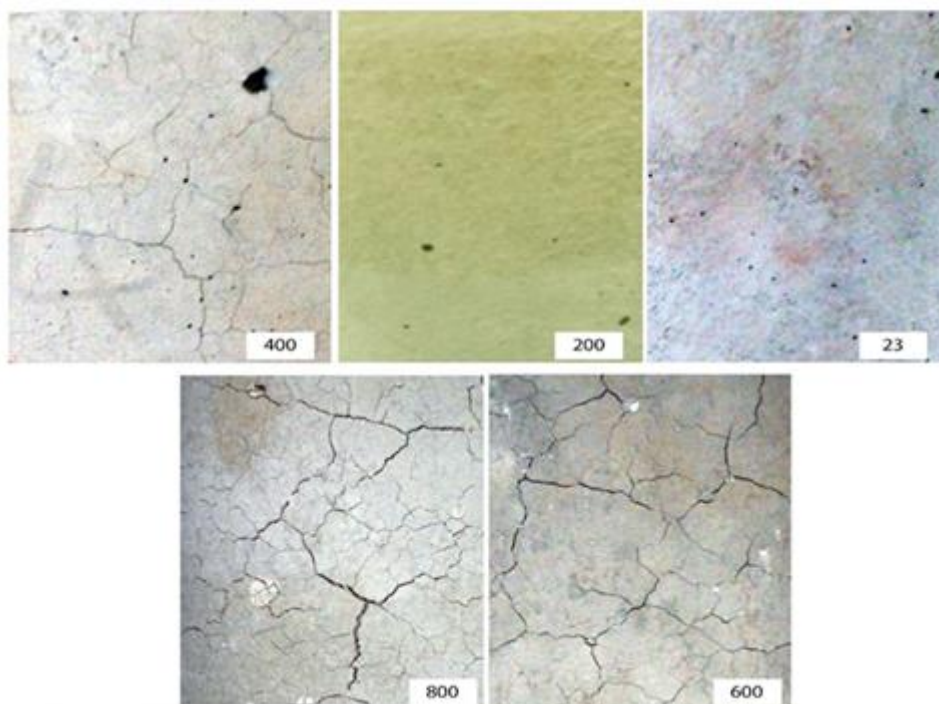
¹¹ aggregates



شکل ۶. کاهش وزن نمونه‌ها

۳-۳. مشاهدات بصری نمونه‌ها پس از قرار گیری در معرض حرارت

آسیب بتن پس از قرار گیری در معرض دماهای بالا را می‌توان با مشاهده سطح بتن شناسایی کرد. مشاهدات بصری در ارزیابی آسیب بتن تحت آتش معمولاً به صورت تغییر رنگ، ترک و پوسته شدن سطح بتن می‌باشد. در این تحقیق، نمونه‌های بتن پس از بیرون آمدن از کوره الکتریکی بلافاصله تحت مشاهدات عینی قرار گرفت و نتایج بصورت پیش رو (در ادامه) بیان می‌شود. شکل ۷ سطوح بتن پس از رفتار حرارتی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، تا 200°C هیچ اثر قابل توجهی بجز تغییر رنگ روی سطوح بتن مشاهده نمی‌شود. وقتی که دما از 400°C عبور کند بتن شروع به ترک خوردن می‌کند بطوریکه در دمای 600°C ، ترکها گسترش قابل ملاحظه ای می‌یابند. در دمای 800°C ترکها کاملاً مشهود بوده و تغییر رنگ در سنگدانه‌های نمونه‌ها مشاهده می‌شود. ترکهای سطحی بتن در معرض آتش می‌تواند ناشی از فشار منفذی بتن می‌باشد که منجر به پدیده پوسته پوسته شدن می‌شود و کاهش ظرفیت باربری ستون‌ها را به دنبال دارد [۲۰]. این پدیده در حین آزمایش نمونه‌های بتنی تحت حرارت های 800°C مشاهده شد.



شکل ۷. مشاهدات بصری سطح بتن پس از حرارت

۳-۴. چگالی، جذب آب و تخلخل بتن سخت شده

چگالی، جذب آب و تخلخل نمونه‌های بتنی ساخته شده از سنگدانه‌های آجری از مهمترین خصوصیات های این نوع از بتن‌ها محسوب می شوند که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار می گیرند. برای این منظور از هر گروه نمونه‌های بتنی ساخته شده، ۱۵ نمونه جهت انجام آزمایش انتخاب شدند و مقادیر چگالی، جذب آب و تخلخل قبل از قرارگیری نمونه ها در معرض آتش تعیین شدند. مقادیر بدست آمده برای هر گروه از نمونه ها و همچنین میزان تغییرات این پارامترها نسبت به بتن حاوی ۱۰۰٪ ماسه طبیعی (RB0) در جدول ۵ داده شده است.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که کلیه نمونه‌ها دارای تخلخل و جذب آب کمتری نسبت به نمونه RB0 می‌باشند که این می‌تواند به دلیل کیفیت بالای مصالح بکار رفته در ساخت این نوع آجر نسوز باشد. با توجه به نتایج آزمایشات، کمترین میزان تخلخل و جذب آب مربوط به نمونه RB50 به ترتیب به میزان ۱۰/۹۴٪ و ۴/۷۳٪ می‌باشد. همچنین، بیشترین مقدار تخلخل و جذب آب مربوط به نمونه RB0 می باشد که به ترتیب به میزان ۱۱/۹۳٪ و ۵/۱۷٪ است. نتایج مربوط به چگالی بتن آجری به عنوان یکی از معیارهای مهم ارزیابی این نوع بتن در جدول ۵ ارائه شده است. از نتایج می توان دریافت که کیفیت این نوع بتن تا حد قابل قبولی نزدیک به بتن معمولی است. مطابق جدول ۵، بیشترین میزان چگالی مربوط به نمونه RB100 با میزان ۲۴۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و کمترین میزان چگالی مربوط به نمونه RB50 با میزان ۲۴۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

جدول ۵. جذب آب، تخلخل و چگالی بتن

شماره طرح	نام مشخصه نمونه	تعداد نمونه‌ها	جذب آب (%)	تخلخل (%)	چگالی اشباع (kg/m ³)
۱	RB0	۱۵	۵/۱۷(۰/۱۰۰)	۱۱/۹۳(۰/۱۰۰)	۲۴۲۷/۸(۰/۱۰۰)
۲	RB50	۱۵	۴/۷۳(-۸/۵۹)	۱۰/۹۴(-۸/۳۰)	۲۴۲۵/۲(-۰/۱۱)
۳	RB100	۱۵	۵/۰۷(-۱/۹۹)	۱۱/۷۶(-۱/۴۲)	۲۴۴۰/۱(+۰/۵۱)

* اعداد داخل پرانتز بیانگر درصد تغییرات پارامتر مربوطه نسبت به بتن RB0 می باشد.

۴. نتیجه گیری

این مقاله یک برنامه آزمایشگاهی برای استفاده مجدد از ریزدانه آجر نسوز در سه گروه سیمان پرتلند معمولی ارائه کرد. در مجموع ۵۴ نمونه بتن در طول این برنامه استفاده شد و پارامترهای کاهش وزن و مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض دماهای ۱۱۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰°C ارزیابی شد. نتایج اصلی بدست آمده از این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

۱. مقاومت فشاری کلیه نمونه‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد بطوریکه افت مقاومت فشاری در نمونه‌ها بعد از گذر از دمای ۴۰۰°C نسبت به سایر دماها شدیدتر است.

۲. نمونه‌های حاوی آجر نسوز در دمای ۸۰۰°C با شروع تشکیل باند سرامیکی و با توجه به درصد جایگزینی ریزدانه آجری مقاومت فشاری بالاتری را در مقایسه با نمونه بتن معمولی نشان دادند به طوری که مقاومت نمونه حاوی ۱۰۰٪ آجر نسوز در حدود ۱۲٪ بیشتر از مقاومت نمونه بتن معمولی بدست آمد.

۳. افت وزن بتن حرارت دیده در نمونه‌های هر گروه حرارتی تقریباً مشابه بوده و تنها در دمای ۸۰۰°C بدلیل مقاومت و سختی بیشتر سنگدانه‌های آجری و شاخص نسوزی آن‌ها در برابر حرارت‌های بالا، تفاوت در مقادیر افت وزن مشاهده شد.

۴. با مشاهده بصری سطوح بتن پس از قرارگیری در معرض حرارت، یک تغییر رنگ در دمای ۲۰۰°C مشاهده شد و پس از آن با افزایش حرارت، سطح بتن به تدریج ترک خورده و در دماهای بالاتر، عرض و عمق ترک‌ها گسترش یافت.

۷. تخلخل و جذب آب کلیه نمونه‌های آجری مقدار کمتری نسبت به نمونه معمولی (RB0) داشت که نشان می‌دهد درصد‌های مختلف جایگزینی آجر نسوز منجر به افزایش تخلخل و جذب آب بتن نشده است. با توجه به نتایج آزمایشات، کمترین میزان تخلخل و جذب آب مربوط به نمونه RB50 و بیشترین آنها مربوط به نمونه RB0 می‌باشد.

۶. مراجع

- [1] Hansen TC, editor. Recycling of demolished concrete and masonry. CRC Press; 2004 Jun 2.
- [2] Cachim PB. Mechanical properties of brick aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2009 Mar 31;23(3):1292-7.
- [3] Debieb F, Kenai S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. Construction and building materials. 2008 May 31;22(5):886-93.
- [4] Aliabdo AA, Abd-Elmoaty AE, Hassan HH. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. Alexandria Engineering Journal. 2014 Mar 31;53(1):151-68.
- [5] Khoury GA, Majorana CE, Pesavento F, Schrefler BA. Modelling of heated concrete. Magazine of Concrete Research. 2002 Apr;54(2):77-101.
- [6] Hertz KD. Concrete strength for fire safety design. Magazine of Concrete Research. 2005 Oct;57(8):445-53.
- [7] Yüzer N, Aköz F, Öztürk LD. Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature. Cement and Concrete Research. 2004 Oct 31;34(10):1803-7.
- [8] Arioz O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. Fire Safety Journal. 2007 Nov 30;42(8):516-22.
- [9] Janotka I, Nürnbergerová T. Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. Nuclear Engineering and design. 2005 Aug 31;235(17):2019-32.
- [10] Georgali B, Tsakiridis PE. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. Cement and Concrete Composites. 2005 Feb 28;27(2):255-9.
- [11] Khalaf FM, DeVenny AS. Performance of brick aggregate concrete at high temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering. 2004 Dec;16(6):556-65.
- [12] ASTM C33. Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual book of ASTM standard 04; 2003.
- [13] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills Mich. American Concrete Institute; 2008. 471P.
- [14] Khalaf FM, DeVenny AS. Properties of new and recycled clay brick aggregates for use in concrete. Journal of materials in civil engineering. 2005 Aug;17(4):456-64.
- [15] F.M. Khalaf, A.S. DeVenny, Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review, J. Mater. CivEng. 16 (2004) 331–340.
- [16] ASTM C192/C192M. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. Annual book of ASTM standard 04; 2002.
- [17] Dey G, Pal J. Use of Brick Aggregate in Standard Concrete and Its Performance in Elevated Temperature. International Journal of Engineering and Technology. 2013 Aug 1;5(4):523.
- [18] ASTM C39/C39M. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Annual Book of ASTM Standard 04; 2002.
- [19] ASTM C642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Annual book of ASTM standard 04; 2002.
- [20] Hertz KD. Limits of spalling of fire-exposed concrete. Fire safety journal. 2003 Mar 31;38(2):103-16.