

طرح اختلاط بهینه‌ی بتن سبک سازه‌ی در برابر حرارت بالا

محمد قاسم بناهی (کارشناس ارشد)

حسن استادحسین* (استادیار)

علی میرزایی (استادیار)

امیرحسین باغبانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه کاشان

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۴۰۱ (دوره ۲ - شماره ۱/۱، ص. ۶۹-۷۸، پژوهشی)

در پژوهش حاضر، طرح بهینه‌ی بتن سبک‌دانه‌ی سازه‌ی از نظر چگالی و مقاومت فشاری در دمای محیط به دست آمده و سپس با به کارگیری و تغییر میزان افزودنی‌هایی، نظیر دوده‌ی سیلیس و فوق‌روان‌کننده و همچنین با تغییر نسبت آب به سیمان، مقاومت طرح حاصل از مرحله‌ی قبل در برابر حرارت بهینه شده است. به این منظور، ۹ طرح اختلاط متفاوت که از روش تاگوجی به دست آمده، اجرا شده و برای هر یک، ۹ عدد آزمونه‌ی ساخته شده در هر یک از دماهای محیط، ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۳ نمونه از هر طرح برای حصول مشخصات طرح بهینه آزمایش شده‌اند. از مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر می‌توان به اثر مطلوب کاهش نسبت آب سیمان و افزودن فوق‌روان‌کننده در مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن سبک‌دانه در دماهای ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد اشاره کرد. همچنین طرح اختلاط بهینه‌ی بتن سبک مقاوم برای دمای بالا ارائه شده است.

واژگان کلیدی: طرح اختلاط بتن سبک‌دانه‌ی سازه‌ی، مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن سبک‌دانه، مقاومت بتن سبک‌دانه در برابر حرارت بالا، سبک‌دانه‌ی رس منبسط شده، روش تاگوجی.

۱. مقدمه

که بتن سبک سازه‌ی نسبت به بتن معمولی دارد.^[۱-۳] مرور مطالعاتی که در ارتباط با رفتار بتن سبک سازه‌ی در حرارت بالا انجام شده است، کمک قابل ملاحظه‌ی به موضوع پژوهش حاضر کرده است.

مالهوترا^۱ (۱۹۹۰)، طی پژوهشی به تولید طرح اختلاط بتن سبک با استفاده از سبک‌دانه‌ی رس منبسط شده^۲ با وزن مخصوص ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۷۰ مگاپاسکال در ۳۶۵ روز پرداخته و دریافته است که بهترین نسبت اختلاط، هنگامی حاصل می‌شود که مواد سیمانی به میزان ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، شامل سیمان پرتلند نوع II و جایگزینی درصدی از سیمان با خاکستر بادی و میکروسیلیس استفاده شود.^[۴]

وایت کومب^۳ و همکاران (۱۹۹۱)، با استفاده از سبک‌دانه‌های سیلیسی منبسط شده، بتن سبک‌دانه با مقاومت بالا را ساختند. عیار سیمان استفاده شده در پژوهش مذکور، ۵۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است که ۲٪ وزنی آن با میکروسیلیس جایگزین شده بود. ایشان پس از ۹۰ روز به مقاومت ۷۰/۵ مگاپاسکال دست یافتند که مقاومت مذکور برای بتن سبک‌دانه، مقاومت قابل توجهی است. همچنین چگالی بتن ساخته‌شده در پژوهش اخیر، ۱۸۶ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است.^[۵] مورایسو^۴ و همکاران (۲۰۰۱)، موفق به تولید بتن سبک با وزن مخصوص ۱۹۰۰

آتش‌سوزی یکی از تهدیدهایی است که با تأثیر در خرابی مصالح و از بین بردن مقاومت آن موجب خرابی و حتی فروریزش سازه‌ها می‌شود. حرارت یکی از مهم‌ترین عوامل فرسودگی فیزیکی و شیمیایی مصالح سازه‌ی از جمله بتن است، که زوال مقاومت و دوام سازه‌ی بتنی را در پی دارد و در بعضی از موارد، باعث انهدام سازه نیز می‌شود. اگرچه به‌طور کلی اعتقاد بر این است که بتن یک ماده‌ی مقاوم در برابر آتش است، اما بسیاری از مطالعات اخیر، آسیب‌های گسترده یا حتی خرابی فاجعه‌بار را در دمای بالا، به‌ویژه در بتن‌های با مقاومت بالا نشان داده‌اند.

با وجود اینکه تئوری‌های زیادی وجود دارد که بیانگر مقاومت بالای بتن سبک‌دانه نسبت به بتن معمولی در برابر آتش هستند، اما با توجه به اهمیت مسئله، نیاز جدی به بررسی رفتار بتن سبک‌دانه در برابر حرارت‌های بالا نیز احساس می‌شود. تقاضا برای بتن سبک سازه‌ی در بسیاری از ساخت‌وسازهای مدرن در حال افزایش است. نسبت مقاومت به وزن بالاتر، ظرفیت کرنش کششی بهتر، ضریب انبساط حرارتی کمتر به دلیل وجود تخلخل بیشتر در سنگ‌دانه‌های سبک، از جمله مزایایی است

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۷/۲۵/۱۴۰۰، اصلاحیه ۳۱/۵/۱۴۰۰، پذیرش ۱۰/۷/۱۴۰۰.

DOI:10.24200/J30.2021.57982.2955

m.panahy26@gmail.com
hostad@kashanu.ac.ir
ali.mirzaii@kashanu.ac.ir
amirbaghbani91@gmail.com

کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۵۳/۶ مگاپاسکال با استفاده از سبکدانه‌ی معدنی برزیلی شدند.^[۶]

میرزا^۵ و همکاران (۲۰۰۲)، آثار تقویت‌کننده‌ی الیاف شیشه‌ی مقاوم در برابر قلیا را در مقاومت خمشی و شکل‌پذیری، ترک‌خوردگی ناشی از انقباض بتن و مقاومت در برابر دمای ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در سن ۷ روزگی و به مدت ۱ ساعت در بتن سبک بررسی کردند و دریافتند که استفاده از ۰-۱ و ۲ درصد (کسرهای حجمی ۰/۲۵ - ۰/۵) توده‌ی الیاف شیشه‌ی برای کنترل ترک‌ها و افزایش مقاومت خمشی و مقاومت در دمای بالا در بتن سبک مؤثر است.^[۷]

تانلدیزی^۶ (۲۰۰۷)، در بررسی مقاومت فشاری و کششی پسماند بتن سبک ساخته شده از پومیس تحت اثر دمای بالا، دریافت که نمونه‌های حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس، مقاومت کششی بیشتری دارند و افزایش بیشتر از ۲۰٪ میکروسیلیس به جای سیمان، موجب کاهش مقاومت می‌شود. همچنین در دماهای کمتر از ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، روند کاهش مقاومت کم است؛ ولی با بیشتر شدن دما، از مقاومت به شدت کاسته می‌شود.^[۸]

پهنود و همکاران (۲۰۰۸)، نیز در بررسی تأثیر افزودن دوده‌ی سیلیسی^۷ و نسبت آب به سیمان در خصوصیات بتن پرمقاومت بعد از قرار گرفتن در معرض دمای بالا، دریافتند که مقدار کاهش مقاومت نمونه‌های بتن پرمقاومت با ۶ و ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس در ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، به ترتیب ۶/۷ و ۱۴/۱ درصد بیشتر از نمونه‌های بتن معمولی بوده است. نرخ کاهش مقاومت نیز در نمونه‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی به‌طور قابل ملاحظه‌ی بیشتر از نمونه‌های بتن معمولی بوده است. همچنین دریافتند که کاهش نسبت آب به سیمان در خصوصیات بتن در برابر حرارت بالا، اثر مثبت دارد.^[۹]

از آنجا که یکی از زوایای پژوهش حاضر به تأثیر دوده‌ی سیلیسی در مقاومت بتن سبک در دمای بالا معطوف است، برای مقایسه‌ی اثر دوده‌ی سیلیسی در حالت‌های مختلف، سابقه‌ی پژوهش در مورد اثر آن در ملات ماسه‌ی سیمان نیز بررسی شده است. مرسی^۸ و همکاران (۲۰۰۸)، به بررسی تأثیر دمای بالا در مقاومت فشاری مخلوط ملات ماسه‌ی سیمان پرداختند. مخلوط سیمان استفاده شده در پژوهش ایشان، سیمان پرتلند معمولی، متاکاژولن و دوده‌ی سیلیسی بوده است. آن‌ها دمای نمونه‌های ساخته‌شده را به تدریج تا ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش دادند و دریافتند که متاکاژولن و دوده‌ی سیلیسی، اثر مثبتی در مقاومت فشاری قبل و بعد از گذاشتن در معرض حرارت دارد.^[۱۰]

کتخدان^۹ و همکاران (۲۰۰۹)، در بررسی آثار استفاده از دوده‌ی سیلیسی در ترکیب بتن سبک دریافتند که افزایش جایگزینی دوده‌ی سیلیسی با سیمان، منجر به افزایش مقاومت‌های کششی، فشاری و خمشی در بتن می‌شود، البته میزان افزایش مقاومت‌های ذکرشده، تابع مقدار آب به سیمان است. درصد پهنه‌ی دوده‌ی سیلیسی در پژوهش ایشان ۱۵ تا ۲۵ درصد تشخیص داده شد.^[۱۱] این در حالی است که در پژوهش انجام شده توسط فتحی و همکاران (۱۳۹۷)، مقادیر بیش از ۱۵٪ میکروسیلیس، به عنوان کاهنده‌ی مقاومت بتن سبک در دمای محیط گزارش شده است.^[۱۲]

دمیرل^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۰)، اثر دماهای بالا در خصوصیات مکانیکی بتن حاوی پومیس ریز شده و دوده‌ی سیلیسی را ارزیابی کردند و نشان دادند که جایگزین کردن افزودنی‌های معدنی مذکور با سیمان، منجر به کاهش چگالی و مقاومت فشاری می‌شود. به طوری که افزایش دما به بیش از ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، در مقاومت فشاری بتن تأثیر قابل ملاحظه‌ی دارد. طبق پژوهش ایشان، کاهش چگالی بتن برای

مخلوط‌های حاوی پومیس ریز شده و دوده‌ی سیلیسی در دماهای بالاتر از ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، نسبت به مخلوط‌های شاهد بیشتر بوده است.^[۱۳]

مرتضوی و مجلسی (۲۰۱۲)، اثر دوده‌ی سیلیس در مقاومت فشاری بتن سبکدانه‌ی سازه‌ی ساخته‌شده با سبکدانه‌ی لیکا را بررسی کردند و دریافتند که افزایش دوده‌ی سیلیسی در بتن سبکدانه، منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت فشاری می‌شود. اما نرخ افزایش مقاومت در درصد‌های بالای جایگزینی دوده‌ی سیلیسی با سیمان کاهش می‌یابد. ایشان نتیجه گرفتند که درصد مناسب استفاده از دوده‌ی سیلیسی از نظر مقاومت فشاری بالا و چگالی کمتر، ۸ تا ۱۲ درصد است. علاوه بر این، ایشان دریافتند که افزودن دوده‌ی سیلیسی در بتن باعث می‌شود که درصد بیشتر مقاومت فشاری آن در زمان کمتری حاصل شود.^[۱۴]

تانلدیزی (۲۰۱۳)، در بررسی خصوصیات ترک بتن سبکدانه‌ی سازه‌ی حاوی دوده‌ی سیلیسی در معرض حرارت دریافتند که جایگزینی مقدار ۲۰٪ وزنی دوده‌ی سیلیسی با سیمان، هم در درجه‌های پایین و هم در درجه‌های بالای حرارت، مقدار پهنه‌ی جایگزینی است. همچنین مشاهده شد که کوچک‌ترین طول و عرض ترک‌های ایجاد شده در دماهای ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مربوط به نمونه‌های بتن سبک حاوی ۲۰٪ دوده‌ی سیلیسی است.^[۱۵]

آکچوزاغلو^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۷)، در مقایسه‌ی بتن سبک ساخته شده با سبکدانه‌ی رس منبسط شده با بتن معمولی تحت حرارت‌های بالا دریافتند که افزایش حرارت، تأثیر معکوسی در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی هر دو نوع بتن دارد. با این حال، نمونه‌های بتن سبکدانه، رفتار مناسب‌تری در مقایسه با بتن معمولی در حرارت بالا نشان دادند و دریافتند که روش سرد کردن نمونه‌ها نسبت به روش سرد کردن کند، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در کاهش مقاومت دارد.^[۱۶]

هوانگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸)، رفتار مکانیکی و ریزساختار نوع جدیدی از کامپوزیت سیمانی فوق سبک (ULCC)^{۱۳} را با استفاده از سنسفر^{۱۴} به عنوان سنگ‌دانه‌های سبک در معرض دمای بالا تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کردند و دریافتند که به‌طور کلی، مقاومت فشاری باقیمانده و مقاومت خمشی تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر قابل ملاحظه‌ی نمی‌کنند. همچنین نمونه‌های بتنی بررسی شده به‌طور متوسط ۱۰۰، ۸۵/۶، ۶۷/۳ و ۲۴/۵ درصد از مقاومت فشاری و همچنین ۹۵/۸، ۷۳/۷، ۸۷/۷ و ۲۰/۱ درصد از مقاومت خمشی خود را به ترتیب پس از قرار گرفتن در معرض دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حفظ می‌کنند.^[۱۷]

ریاض احمد^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۹)، خواص مکانیکی، حرارتی، رطوبتی، و مقاومت در برابر دمای بالای بتن سبک حاوی دوده‌ی سیلیس و سبکدانه‌ی رس منبسط شده را با استفاده از روش‌های مختلف تجربی بررسی کردند و دریافتند که افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی، علی‌رغم اینکه موجب کاهش مقاومت فشاری بتن سبک می‌شود، به‌طور قابل توجهی باعث بهبود خواص عایق حرارتی مخلوط بتن سبک می‌شود. همچنین اثر درجه‌ی حرارت بالا در چگالی در مقایسه با مقاومت فشاری مشهودتر است.^[۱۸]

سراویا^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر درجه حرارت عمل‌آوری روی بتن سبکدانه‌ی ساخته شده با رس منبسط شده و همچنین تأثیر درصد‌های مختلف افزودنی‌های معدنی، به منظور بهبود مقاومت فشاری بتن سبکدانه را بررسی کردند و دریافتند که مستقل از مواد افزودنی معدنی، مدت زمان مطلوب برای عمل‌آوری با دما در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ۶ ساعت است.^[۱۹] روفائل^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر سنگ‌دانه‌های سبک در خصوصیات باقیمانده‌ی فیزیکی و مکانیکی بتن در معرض دمای بالا را بررسی کردند و دریافتند که مقاومت کششی بتن سبک و ملات سبک در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد. ضریب پواسون

در پژوهش حاضر سعی شده است که دانه بندی ریزدانه و درشت دانه‌ی سبکدانه از محدوده‌ی پیشنهادی مبحث نهم مقررات ملی ایران تبعیت کند. آب استفاده شده به منظور ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها در پروژه‌ی حاضر از نوع آب شرب شهری بوده است. همچنین در طرح اختلاط، فوق روان‌کننده از نوع نفتالین فرمالدئید سولفونات استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. دوده‌ی سیلیسی استفاده شده در پژوهش حاضر، محصول کارخانه‌ی فروآلیاژ ایران بوده است که آنالیز فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. ساخت، عمل‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش

قبل از اجرای عملیات طرح اختلاط، مطابق با نتایج حاصل از آزمایش‌های جذب آب سبکدانه‌ها، که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به دلیل قابلیت جذب آب بالا در نیم ساعت اول، ابتدا سبکدانه‌های لیکا به مدت نیم ساعت در آب قرار گرفتند و سپس از آب خارج و به منظور رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک در هوای آزاد و زیر آفتاب پهن شدند. سبکدانه‌ها و بعد از آن ماسه‌ی طبیعی به همراه مقدار آب اضافی جذب آب ماسه، داخل مخلوط‌کن ریخته شدند و به مدت دو دقیقه اختلاط انجام شد تا سبکدانه‌ها و ماسه کاملاً مخلوط شوند. سپس سیمان مصرفی به مخلوط اضافه و حدود ۱ دقیقه‌ی دیگر سیمان با سنگ‌دانه‌های سبک و ماسه مخلوط شد. در انتها، آب مؤثر بتن به آن اضافه و حدود ۵ الی ۷ دقیقه با دیگر اجزاء بتن مخلوط شد. در طرح‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی، قبل از ریختن سیمان به داخل مخلوط‌کن، ابتدا دوده‌ی سیلیسی با سیمان به صورت خشک مخلوط می‌شد. همچنین در طرح‌هایی که از فوق روان‌کننده استفاده می‌شده است، قبل از اضافه کردن آب اختلاط به داخل مخلوط‌کن، مقداری از آن با مایع فوق روان‌کننده مخلوط و ابتدا مخلوط فوق روان‌کننده و آب، و سپس آب باقیمانده به مخلوط‌کن اضافه می‌شده است. به منظور عمل‌آوری، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت زیر گونی‌های مرطوب نگهداری شدند و بعد از آن قالب برداری صورت گرفت. سپس نمونه‌ها داخل

جدول ۱. مشخصات فنی فوق روان‌کننده‌ی استفاده شده.

وزن مخصوص	مقدار PH	رنگ	شکل ظاهری
۱/۱۸ ± ۰/۰۲	۷/۵ ± ۱	قهوه‌یی تیره	مایع

جدول ۲. آنالیز فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیسی مورد استفاده.

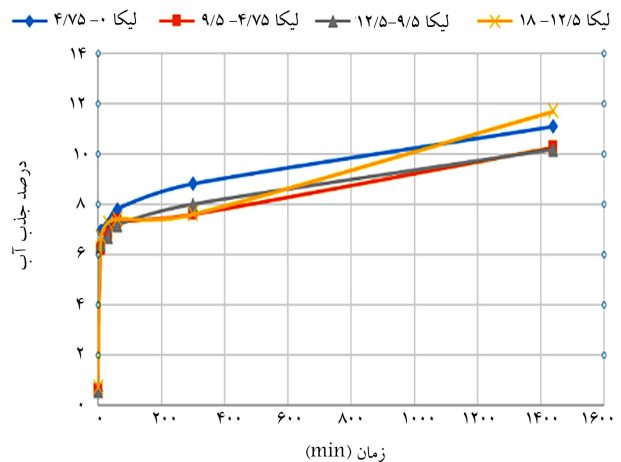
ماده پودری	میکروسیلیکا	نوع ماده	مقدار (%)
رنگ	خاکستری روشن	SiO ₂	۹۰-۹۵
		Al ₂ O ₃	۰/۶ - ۱/۲
		Fe ₂ O ₃	۱/۲ - ۱/۸
سطح ویژه		Cl	۰/۰۴ - ۰/۰۷
اندازه ذرات	< ۱ μm	C	۰/۸ - ۲/۰
		Na ₂ O	۰/۳ - ۰/۶
		K ₂ O	۰/۴ - ۰/۸
		MGO	۰/۶ - ۱/۲
چگالی ویژه	۲/۲	S	۰/۰۴ - ۰/۰۸
		CaO	۰/۵ - ۱/۰
چگالی انبوهی	۳۱۰ - ۳۵۰	P	۰/۰۴ - ۰/۰۶
		LOI	۱/۵ - ۲/۵

پس از ۳۰° درجه سانتی‌گراد برای بتن با سنگ‌دانه‌ی رس منبسط شده افت قابل توجهی می‌کند، در حالی که ضریب در بتن با وزن طبیعی و بتن با سبکدانه‌ی شیل منبسط شده خیلی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.^[۲۰]

با عنایت به مطالعات انجام شده‌ی پیشین مشاهده می‌شود که مطالعات بسیار معدودی بر روی خصوصیات رفتاری ترمومکانیکی بتن‌های سبک سازه‌ی انجام شده است و در بعضی موارد، اجماع وجود ندارد. این در حالی است که به نظر می‌رسد با در اختیار داشتن مشخصات مکانیکی دقیق‌تری از بتن سبک سازه‌ی خصوصاً در برابر دمای بالا، به‌کارگیری آن در بسیاری از موارد کار بردی میسر خواهد شد. در پژوهش حاضر، طرح اختلاط بهینه‌ی بتن سبکدانه‌ی سازه‌ی ساخته شده با رس منبسط شده (لیکا) از لحاظ چگالی و مقاومت فشاری به دست آمده است، سپس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن سبکدانه، شامل: مقاومت فشاری، مدول کشسانی دینامیکی، افت وزنی و اثر حرارت در ظاهر بتن سبکدانه در دماهای محیط، ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده و در نهایت، طرح اختلاط با تغییر میزان اجزاء طرح برای مقاومت در برابر حرارت بالا بهینه شده است.

۲. مشخصات اجزاء بتن سبک

در بخش کنونی، مشخصات اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بتن سبک سازه‌ی به‌کار رفته در طرح اختلاط بتن بیان شده است. سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند ۴۲۵-۱ محصول کارخانه‌ی سیمان دلیجان بوده است. ماسه‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر، ماسه‌ی ۲ بار شسته شده‌ی منطقه شورآب با چگالی دانه‌ی ۲۶۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار جذب آب آن ۳/۷٪ بوده است. دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده، در محدوده‌ی پیشنهادی مبحث نهم مقررات ملی بوده و مدول نرمی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده، ۳/۰۲ در نظر گرفته شده است. سبکدانه‌ی استفاده شده از نوع رس منبسط شده یا لیکا بوده است. چگالی سبکدانه‌ی استفاده شده، تابع ابعاد آن و از حدود ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای بازه‌ی ۱۲/۵ - ۱۹ میلی‌متر تا حدود ۱۳۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای بازه‌ی ۴/۷۵ میلی‌متر متغیر بوده است. مطابق شکل ۱، جذب آب سبکدانه‌ی استفاده شده وابسته به زمان بوده است. همچنین براساس آزمایش جذب آبی که بر روی اندازه‌های مختلف لیکا در بازه‌های زمانی ۱۰ و ۳۰ دقیقه و همچنین ۱، ۵ و ۲۴ ساعت انجام شده است، نمودار شکل ۱ ترسیم شده است.



شکل ۱. درصد جذب آب اندازه‌های مختلف سبکدانه‌ی لیکا نسبت به زمان.

حوضچه‌ی عمل‌آوری قرار گرفتند. دمای آب حوضچه بین ۲۳ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد کنترل شد، تا عمل‌آوری به‌خوبی انجام شود. لازم به ذکر است نمونه‌های طرح‌های دسته‌ی اول، که به‌منظور دست‌یابی به چگالی و مقاومت فشاری بهینه اجرا شده‌اند، به مدت ۷ روز عمل‌آوری شدند و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. اما طرح‌های دسته دوم، که با هدف دست‌یابی به طرح بهینه در برابر حرارت اجرا شده‌اند، قبل از انجام آزمایش‌ها به مدت ۲۸ روز داخل حوضچه، عمل‌آوری شدند. همچنین لازم به ذکر است نمونه‌ها قبل از گذاشتن در کوره تا رسیدن به وزن ثابت، در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد داخل آن گذاشته شدند.

۴. طرح اختلاط بتن سبک‌دانه‌ی سازه‌ی

در فرایند طرح اختلاط بتن سبک سازه‌ی، علاوه بر پارامترهایی، نظیر: مقاومت، کارپذیری و پایداری، توجه ویژه‌ی به عامل چگالی شده است. روش وزنی ACI، روش طرح مخلوط دوفازی و روش طرح مخلوط بر مبنای ظرفیت مقاومتی، متداول‌ترین روش‌های طرح اختلاط میان مهندسان است. در روش وزنی ACI طرح اختلاط بتن سبک مبتنی بر روابط تجربی و براساس خلاصه‌ی داده‌های جدول‌ها و نمودارها صورت می‌گیرد. بنابراین فقط در صورتی که ویژگی‌های سبک‌دانه‌های استفاده شده در محدوده‌ی تجربیات آزمایشگاهی قبلی باشند، نتایج به‌دست آمده می‌تواند دقت کافی داشته باشند. روش طرح مخلوط دوفازی عمدتاً بر مبنای تئوری استوار است و در صورتی که داده‌های اولیه‌ی لازم برای این روش موجود باشند، نتایج حاصل معمولاً دقت مناسبی دارند. روش طرح مخلوط بر مبنای ظرفیت مقاومتی، بر مبنای ترکیبی از روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی استوار است. از مزایای روش مذکور، در نظر گرفتن هم‌زمان چگالی، مقاومت و کارپذیری موردانتظار بتن است.^[۲۱] به همین جهت در پژوهش حاضر از روش طرح اختلاط بر مبنای ظرفیت مقاومتی برای ساخت یک طرح اختلاط اولیه‌ی بتن سبک استفاده شده است. هدف از اجرای طرح اولیه، به‌دست‌آوردن مقاومت فشاری ۲۸ روزه، ۲۷ مگاپاسکال و چگالی بتن تازه، ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. اندازه‌ی اسمی بیشینه‌ی درشت‌دانه‌ی سبک استفاده شده در طرح اخیر، ۱۲/۵ میلی‌متر و چگالی دانه‌ی آن‌ها با توجه به دانه‌بندی انجام شده ۱۲۲۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. ماسه‌ی استفاده شده دارای مدول نرمی ۳/۳ و چگالی دانه‌ی ۲۵۴۳ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. مقدار اسلامی که کارپذیری موردنظر را در طرح مذکور به دست دهد، ۷ سانتی‌متر بوده است. طرح مخلوط اولیه‌ی بتن سبک در جدول ۳ ارائه شده است.

طرح‌های اختلاط آزمایشگاهی در پژوهش حاضر، به ۲ دسته تقسیم شده‌اند. طرح‌های دسته‌ی اول، با هدف دستیابی به طرح بهینه از نظر چگالی و مقاومت فشاری و طرح‌های دسته‌ی دوم، به‌منظور دستیابی به طرح بهینه در درجه حرارت‌های بالا در آزمایشگاه و با تغییر منطقی نسبت اجزاء بتن در طرح اولیه ساخته شده‌اند.

۱.۴. بهینه‌سازی طرح اختلاط برای مقاومت در دمای محیط

پس از اجرای طرح اولیه‌ی M_۱، طرح‌های ارائه شده در جدول ۴ به ترتیب اجرا شده‌اند.

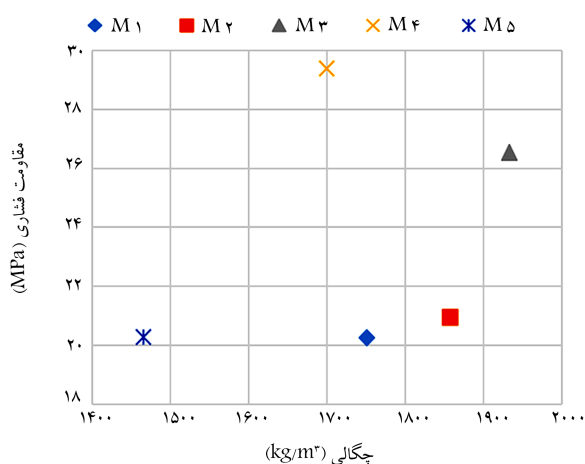
عامل مهمی که موجب چگالی کمتر در بتن سبک‌دانه می‌شود، میزان سبک‌دانه‌ی درشت است. از سوی دیگر، عامل اخیر، ضعف مقاومت برای بتن سبک را در پی دارد. برای بررسی اثر مقدار و نوع سنگ‌دانه، طرح‌های آزمایشگاهی دسته‌ی اول با اعمال تغییراتی در طرح اختلاط مبنای M_۱ ایجاد شدند تا براساس نتایج آزمایشگاهی،

جدول ۳. مقادیر طرح اولیه‌ی مخلوط بتن سبک به روش مبتنی بر ظرفیت مقاومتی.

کد طرح	مقدار مصالح (Kg/m ^۳)			
	آب	سیمان	درشت‌دانه‌ی لیکا	ماسه‌ی طبیعی
M _۱	۱۸۹/۲	۴۷۳	۴۷۶	۶۱۲

جدول ۴. مقادیر طرح اختلاط دسته اول.

کد طرح	مقدار مصالح (Kg/m ^۳)			
	آب	سیمان	درشت‌دانه‌ی لیکا	ریزدانه‌ی لیکا
M _۲	۱۸۹/۲	۴۷۳	۴۲۷/۴	۰
M _۳	۱۸۹/۲	۴۷۳	۳۶۶/۴	۰
M _۴	۱۸۹/۲	۴۷۳	۳۶۶/۴	۲۱۸/۳
M _۵	۱۸۹/۲	۴۷۳	۳۶۶/۴	۰



شکل ۲. مقاومت فشاری در برابر چگالی طرح‌های دسته‌ی اول.

طرح بهینه حاصل شود. در طرح M_۲، حجم سبک‌دانه‌ی درشت اصلاح شد و از ۳۹٪ در طرح M_۱ به ۳۵٪ کاهش یافت و مقدار کاهش‌یافته‌ی درشت‌دانه‌ها با ماسه‌ی طبیعی جایگزین شد. در طرح M_۳، مقدار حجم سبک‌دانه‌ی درشت از ۳۵٪ در طرح M_۲ به ۳۰٪ کاهش یافت. در طرح M_۲ نیز مقدار کاهش‌یافته‌ی درشت‌دانه‌ها با ماسه‌ی طبیعی جایگزین شد. در طرح M_۴ ماسه‌ی طبیعی به اندازه‌ی نصف حجم آن در طرح M_۲ در نظر گرفته شد و به جای آن به همان حجم، ماسه‌ی سبک اضافه شد. در طرح M_۵، تمام ماسه‌ی طبیعی با ماسه‌ی سبک جایگزین شد.

مقاومت فشاری بتن براساس استاندارد ASTM C۳۹^[۲۲] آزمایش شده است. آزمایش مقاومت فشاری بتن، مهم‌ترین معیار برای مرغوبیت بتن به حساب می‌آید. برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه، از هر یک از طرح‌های دسته‌ی اول، ۳ نمونه‌ی استاندارد در دمای محیط ساخته شده و طرح بهینه از نظر چگالی و مقاومت فشاری طرحی بوده است که بیشترین میانگین مقاومت فشاری را داشته باشد. نتایج آزمایش‌های مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است. طرح M_۴، با چگالی بتن تازه‌ی ۱۶۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۹/۳۸ مگاپاسکال، به عنوان طرح بهینه شناخته شد. در بخش حاضر، نقش تأثیرگذار جایگزینی بخشی از سبک‌دانه‌ی درشت و ریزدانه‌ی طبیعی با سبک‌دانه‌ی ریز در بهینه‌سازی طرح اختلاط کاملاً مشهود است.

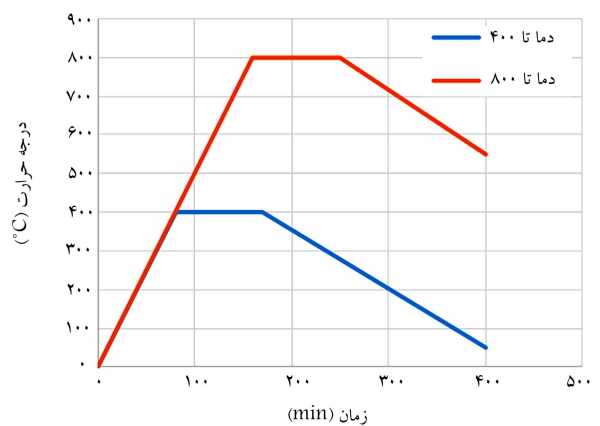
۲.۴. اصلاح طرح اختلاط برای مقاومت در برابر حرارت

در طرح های اختلاط دسته دوم که به منظور دستیابی به طرح بهینه در دمای بالا اجرا شدند، طرح M_2 که از لحاظ چگالی و مقاومت فشاری طرح بهینه بود، به منظور دستیابی به طرح بهینه در دمای بالا به عنوان طرح مبنا استفاده شد. منحنی تاریخیجهی دما در بارگذاری حرارتی در شکل ۳ مشاهده می شود. الگوی بارگذاری نشان داده شده در این شکل اخیر، برای افزایش دما تا دماهای ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است.

براساس سابقه پژوهش که در بخش مقدمه ذکر شد، نسبت آب به سیمان، دوده سیلیسی و فوق روان کننده می توانند عوامل مؤثر در مقاومت بتن سبک در برابر حرارت باشند.^{[۱۱]، [۹]} بنابراین سه عامل مذکور هر کدام در سه سطح در طرح های اختلاط این دسته به عنوان متغیر در نظر گرفته شدند که جزئیات آن در جدول ۵ ارائه شده است. پس از ساخت و آزمایش طرح های دسته دوم برای رسیدن به طرح اختلاط بهینه در حرارت بالا از روش تاگوجی استفاده شده است. لازم به ذکر است منظور از مقاومت فشاری طرح مورد بررسی، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه از طرح مورد نظر است.

با توجه به تعداد عوامل و سطوح در نظر گرفته شده، ۹ عدد طرح اختلاط پیشنهادی به عنوان ورودی برای نرم افزار مینی تب^{۱۸} تعریف شده است.^[۲۳] طرح های پیشنهادی برای ورودی نرم افزار در جدول ۶ ارائه شده است. در طرح های T_2 تا T_9 ، که نسبت آب به مواد سیمانی نسبت به طرح مبنا کم شده است، حجم آب کم شده به دو قسمت مساوی تقسیم و هر قسمت توسط ماسه طبیعی و ماسه سبک پر شده است.

در شکل ۴، باقیماندهی مقاومت فشاری طرح های دسته دوم پس از اعمال بار حرارتی در دماهای مختلف مشاهده می شود. بر این اساس، مقاومت فشاری طرح های T_8 و T_9 به ترتیب در دماهای ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد نسبت به سایر طرح ها در دسته دوم بیشتر است. همان گونه که از تغییرات مقادیر مقاومت



شکل ۳. تاریخیجهی دمای اعمال شده به نمونه ها.

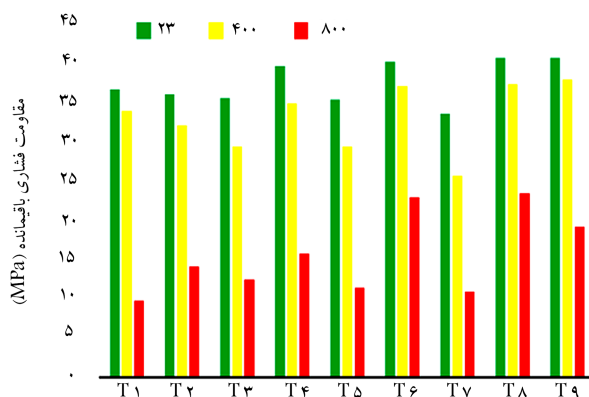
جدول ۵. عوامل و سطوح آن ها برای طراحی آزمایش ها به روش تاگوجی.

سطوح	نسبت آب به سیمان	
	درصد وزنی سیمان	فوق روان کننده دوده سیلیسی
۱	۰/۴	۰
۲	۰/۳۵	۱/۱۵
۳	۰/۳	۱/۵

فشاری در شکل ۴ برداشت می شود، مقاومت فشاری بتن سبک در دمای بالا در مقایسه با دمای محیط نسبت به تغییرات پارامترهایی، نظیر: نسبت آب به سیمان، مقدار روان کننده، و مقدار دوده سیلیسی از خود حساسیت بیشتری نشان می دهد. کاهش مقدار نسبت آب به سیمان هم زمان با افزایش مقدار روان کننده موجب بهبود مقاومت فشاری در دمای زیاد شده است. همچنین در نسبت آب به سیمان های بیشتر، عملکرد جایگزینی سیمان با ۷/۵٪ دوده سیلیسی نسبت به ۱۵٪ دوده سیلیسی بهتر بوده است. نکته ی دیگری که می توان از شکل ۴ برداشت کرد، این است که در طرح های مختلف تا دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد، کاهش قابل ملاحظه یی در مقاومت فشاری رخ نداده و درصد عمده ی کاهش مقاومت فشاری از دمای ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد بوده است.

از مجموعه ی نتایج آزمایش ها نتیجه می شود که در طرح های ارائه شده، تغییر دوده سیلیسی از صفر تا ۱۵ درصد، تأثیری در بهبود مقاومت نداشته است. این موضوع با نتایج مندرج در نوشتارهای کتخدا (۲۰۰۹)،^[۱۱] و ریاض احمد و همکارش (۲۰۱۹)،^[۱۸] نیز قابل انطباق است. توجیه پدیده ی مذکور به این ترتیب انجام شدنی است که وجود دوده سیلیسی باعث متراکم تر شدن توده ی بتن شود و حفره های مویینه ی بتن که در خروج بخار آب در دماهای بالا نقش مؤثر دارند، مسدود و سبب افزایش فشار داخلی ناشی از بخار آب شود. این فشار در دماهای بالاتر معمولاً از حد مقاومت کششی بتن فراتر رفته و باعث ایجاد ترک های عمقی در آن شده و در نتیجه باعث کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. پدیده ی مذکور حتی ممکن است موجب انفجار نمونه ی بتن شود. در میان طرح های اختلاط موجود در پژوهش حاضر طرح اختلاط T_6 در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد دچار پدیده ی انفجار شده است.

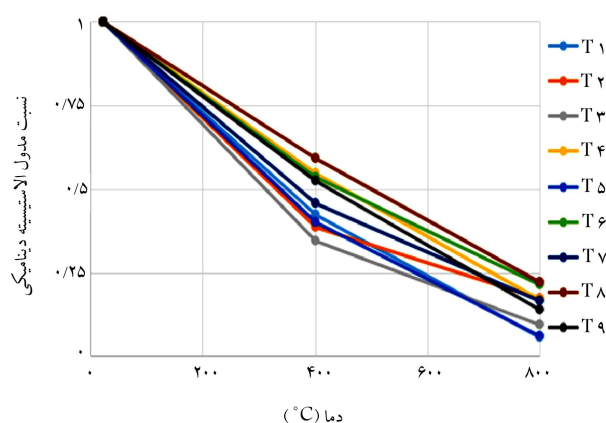
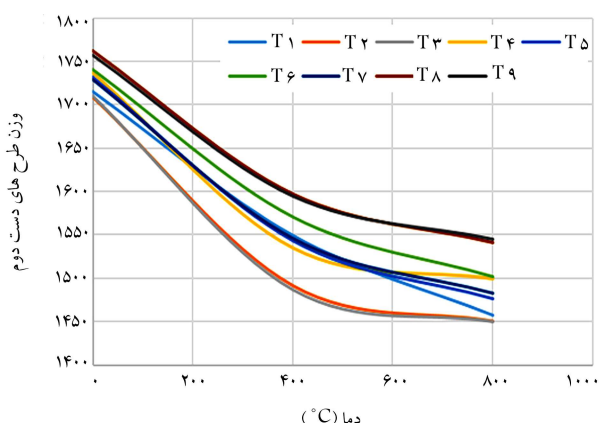
علت دیگر کاهش مقاومت فشاری بتن حاوی دوده سیلیسی در دماهای بالا، می تواند انبساط ذرات دوده سیلیسی باشد، که موجب ایجاد ترک و در نتیجه سبب کاهش مقاومت فشاری می شود. نکته ی دیگر حاصل از انجام آزمایش های دسته ی دوم این است که کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش فوق روان کننده (در حد بهینه) موجب شده است بتن سبک، عملکرد بهتری در دماهای بالا داشته باشد. کاهش مقدار آب اختلاط بتن در واقع به معنای کاهش میزان تبخیر در دمای زیاد است و از میزان احتمال ایجاد ترک های ناشی از فشار حاصل از فرایند تبخیر نیز کاسته می شود که در نتیجه می تواند تأثیر مثبتی در مقاومت بتن در دماهای بالا داشته باشد. نکته ی مهم این است که در شرایط ذکر شده، برای حفظ کارایی بتن در شرایط کاهش نسبت آب به سیمان، استفاده از فوق روان کننده، اجتناب ناپذیر است.



شکل ۴. مقاومت فشاری باقیمانده ی طرح های دسته ی دوم در دمای محیط، ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد.

جدول ۶. مقادیر مصالح طرح‌های اختلاط مبنای بهینه‌سازی برحسب کیلوگرم در مترمکعب بتن.

کد طرح	آب	سیمان	لیکا		ماسه‌ی طبیعی	فوق روان‌کننده	دوده‌ی سیلیسی
			درشت‌دانه	ریزدانه			
$M_{\text{ف}} = T_1$	۱۸۹/۲	۴۷۳	۳۶۶/۴	۲۱۸/۳	۴۵۲/۶	۰	۰
T_2	۱۸۳/۷۶	۴۳۷/۵	۳۶۶/۴	۲۱۸/۳	۴۵۲/۶	۵/۴۳۹	۳۵/۴۷
T_3	۱۸۲/۰۱	۴۰۲/۰۵	۳۶۶/۴	۲۱۸/۳	۴۵۲/۶	۷/۰۹۵	۷۰/۹۵
T_4	۱۶۵/۵۵	۴۳۷/۵	۳۶۶/۴	۲۳۳/۹	۴۸۶/۵۵	۰	۳۵/۴۷
T_5	۱۶۰/۱۱	۴۰۲/۰۵	۳۶۶/۴	۲۳۳/۹	۴۸۶/۵۵	۵/۴۳۹	۷۰/۹۵
T_6	۱۵۸/۴۶	۴۷۳	۳۶۶/۴	۲۳۳/۹	۴۸۶/۵۵	۷/۰۹۵	۰
T_7	۱۴۱/۹	۴۰۲/۰۵	۳۶۶/۴	۲۴۹/۶	۵۱۹/۰۳	۰	۷۰/۹۵
T_8	۱۳۶/۴۶	۴۷۳	۳۶۶/۴	۲۴۹/۶	۵۱۹/۰۳	۵/۴۳۹	۰
T_9	۱۳۴/۸	۴۳۷/۵	۳۶۶/۴	۲۴۹/۶	۵۱۹/۰۳	۷/۰۹۵	۳۵/۴۷



شکل ۶. نسبت مدول کشسانی دینامیکی در دماهای مختلف برای طرح‌های T_1 تا T_9 .

شکل ۵. چگالی طرح‌های دسته‌ی دوم در دماهای مختلف.

در شکل ۶ نشان می‌دهد طرح‌هایی که در آن‌ها نسبت آب به سیمان بیشتر بوده است، در دمای بالا، مدول کشسانی دینامیکی باقیمانده‌ی کمتری داشته‌اند. همین‌طور می‌توان گفت طرح‌هایی که دوده‌ی سیلیسی در آن‌ها وجود داشته است، تقریباً به نسبت مقدار دوده‌ی سیلیسی، از مدول کشسانی دینامیکی آن‌ها در دمای 800°C درجه کاسته شده است.

۵. نتایج آزمایش افت وزنی

مهم‌ترین عامل افت وزنی بتن در دماهای بالا، تبخیر آب آزاد بین‌لایه‌ی بتن است. در آزمایش افت وزنی، وزن نمونه در شرایط عادی و پس از قرار گرفتن در معرض دما مقایسه می‌شود. در شکل ۵، وزن ۱ مترمکعب بتن از هر طرح در دماهای محیط، 400°C و 800°C درجه‌ی سانتی‌گراد ارائه شده است. مطابق با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که بیشترین درصد افت وزنی بتن تا دمای 400°C درجه‌ی سانتی‌گراد اتفاق افتاده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که مؤثرترین عامل در میزان افت وزنی بتن، مقدار نسبت آب به سیمان است. به این معنی که هر قدر نسبت آب به سیمان کمتر باشد، درصد افت وزنی در دماهای بالا کمتر خواهد بود. همچنین مطابق نتایج مشابهی که در نوشتار دمیرل و همکارش (۲۰۱۰)، [۱۳] ثبت شده است، با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی، از چگالی بتن تحت دمای بالا بیشتر کاسته می‌شود.

۷. نتایج اثر حرارت در ظاهر بتن سبک‌دانه

حرارت‌های بالا، علاوه بر تغییر در مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن منجر به تغییر خصوصیات ظاهری بتن نیز می‌شود. تغییر رنگ سطح بتن و بروز ترک‌های سطحی، مهم‌ترین آثار دماهای بالا در خواص ظاهری در بتن است. پدیده‌ی تغییر رنگ در بتن در دمای 800°C درجه‌ی سانتی‌گراد به خوبی مشهود بوده است. در پژوهش حاضر، رنگ بتن‌های بررسی شده در دمای 800°C درجه سانتی‌گراد اغلب به خاکستری مایل به زرد تبدیل شده است. با ازدیاد حرارت، حجم آب موجود در بتن کاسته و باعث ترک خوردن آن می‌شود. نرخ ایجاد ترک‌های سطحی در بتن در دماهای بالا به دلیل تبخیر آب بین‌لایه‌ی و آب مویینه‌ی بتن افزایش می‌یابد. در بعضی از حالت‌ها، فشار داخلی ناشی از بخارهای آب می‌تواند به انفجار ناگهانی بتن نیز منجر شود. یکی از عوامل تأثیرگذار در چگونگی و مقدار ایجاد ترک، نسبت آب به سیمان است.

۶. نتایج آزمایش سرعت پالس فراصوت

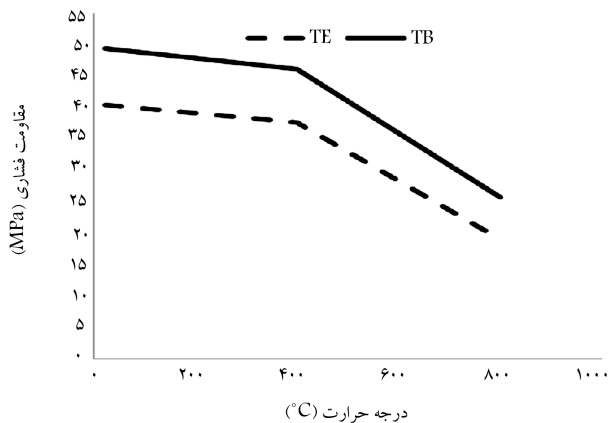
از آزمایش سرعت پالس فراصوت برای اندازه‌گیری مدول کشسانی دینامیکی بتن استفاده می‌شود، که یکی از معیارهای مهم برای تشخیص مرغوبیت و تراکم مصالح به شمار می‌رود. نتایج حاصل از آزمایش سرعت پالس فراصوت در دماهای مختلف

روان‌کننده) سطح سوم (۱/۵٪) و عامل سوم (دوده سیلیسی) در دو سطح اول (۰ و ۷/۵ درصد) بوده است.

آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان داد که طرح TB، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به طرح‌های ۹ گانه‌ی پیشنهادی تاگوجی دارد. مقادیر مصالح در طرح اختلاط TB به استثناء مقدار فوق روان‌کننده، مشابه طرح اختلاط T_۸ بوده است. به نظر می‌رسد علت بیشتر شدن مقاومت فشاری طرح TB نسبت به طرح T_۸، یکنواختی بیشتر به علت مصرف فوق روان‌کننده‌ی بیشتر بوده است. طرح TE که در آن ۷/۵٪ وزنی سیمان با دوده سیلیسی جایگزین شده بود، مقاومت فشاری کمتری نسبت به طرح TB هم در دمای محیط و هم در دماهای بالا داشته است. مقادیر مصالح در طرح‌های TB و TE به استثناء جایگزینی مقدار دوده سیلیسی یکسان بوده است. در شکل ۹، مقدار مقاومت فشاری باقیمانده‌ی طرح‌های بهینه‌ی پیشنهادی نرم‌افزار در دماهای ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش سرعت پالس فراصوت برای طرح‌های TB و TE که به منظور محاسبه‌ی مدول کشسانی دینامیکی انجام شده است، در جدول ۸ ارائه شده است.

همان‌گونه که وجود دوده سیلیسی در دماهای بالا موجب کاهش بیشتر مقاومت فشاری می‌شود، سبب کاهش مدول کشسانی دینامیکی نیز می‌شود. براساس مشاهده‌های انجام‌شده، در نمونه‌ی حاوی دوده سیلیس کاهش مدول کشسانی دینامیکی نسبت به نمونه‌ی بدون میکروسیلیس بیشتر بوده است. در ادامه، نتایج حاصل از آزمایش افت وزنی طرح‌های TB و TE در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مطابق آن، نمونه‌ی دارای میکروسیلیس در دماهای بالاتر، افت وزنی بیشتری را نشان می‌دهد که با نتایج سایر پژوهش‌ها هم‌خوانی دارد. [۱۳]

مهم‌ترین عامل افت وزنی بتن در دماهای بالا، تبخیر آب آزاد بین لایه‌ی بتن است. آب آزاد بین لایه‌ی بتن آبی است که در واکنش شیمیایی با سیمان شرکت نکرده است. در ادامه، شکل ظاهری نمونه‌های حرارت‌دیده بررسی شده است. همان‌گونه در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ مشاهده می‌شود، حرارت بالا موجب ایجاد ترک‌های سطحی هم در دمای ۴۰۰ و هم در دمای ۸۰۰ درجه‌ی



شکل ۹. مقاومت فشاری طرح‌های بهینه در دماهای مختلف.

جدول ۸. نتایج آزمایش سرعت پالس فراصوت برای طرح‌های TB و TE.

کد طرح	مدول کشسانی دینامیکی (GPa)	
	دمای محیط	۴۰۰ درجه سانتی‌گراد
TB	۲۴/۱۵۹	۱۳/۳۵۵
TE	۲۴/۸۶۸	۱۲/۹۴۶

بتن‌هایی که نسبت آب به سیمان کمتری دارند، ترک‌های ایجاد شده در آن‌ها نیز کمتر به نظر می‌رسد. در شکل‌های ۷ و ۸، سطوح بتن‌ها پس از حرارت‌دهی در دماهای ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شوند.

۸. طرح اختلاط بهینه

پس از وارد کردن نتایج طرح‌های پیشنهادی ۹ گانه به نرم‌افزار و انجام عملیات لازم، خروجی نرم‌افزار برای طرح‌های اختلاط بهینه از نظر مقاومت فشاری استخراج شدند. نتایج طرح‌های اختلاط بهینه‌ی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب، نزدیک به طرح‌های اختلاط T_۸ و T_۹ بوده است. طرح‌های اختلاط بهینه‌ی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب، با شرایطی که طرح‌های ۹ گانه‌ی دسته‌ی دوم اجرا شدند، ساخته و عمل‌آوری شدند. دو طرح اختلاط بهینه که برای آزمایش‌های نهایی به دست آمدند، کاملاً مشابه بودند و فقط در مقدار دوده سیلیسی جایگزین سیمان تفاوت داشتند. مقادیر اجزاء بتن در طرح‌های بهینه در جدول ۷ ارائه شده است. در طرح‌های اختلاط بهینه، عامل اول (نسبت آب به سیمان) سطح سوم (۰/۳)، عامل دوم (فوق



شکل ۷. پدیده‌ی تغییر رنگ و ترک‌های سطحی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.



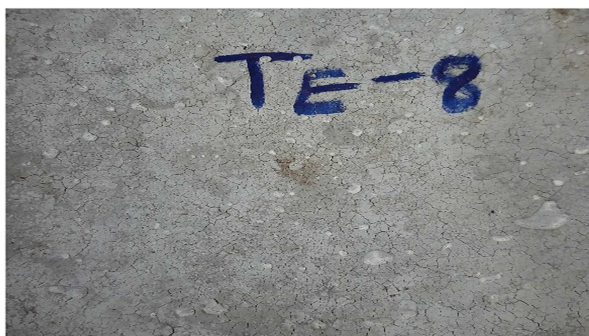
شکل ۸. پدیده‌ی تغییر رنگ و ترک‌های سطحی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۷. مقادیر مصالح برای طرح اختلاط بهینه از نظر مقاومت فشاری در دمای ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد.

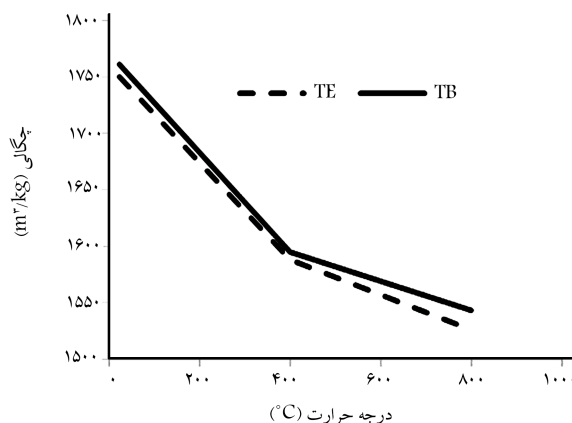
کد طرح	مقدار مصالح (Kg/m ^۳)	
	TE = T _۹	TB
آب	۱۳۴/۸	۱۳۴/۸
سیمان	۴۷۳/۵	۴۷۳
درشت‌دانه‌ی لیکا	۳۶۶/۴	۳۶۶/۴
ریزدانه‌ی لیکا	۲۴۹/۶	۲۴۹/۶
ماسه‌ی طبیعی	۵۱۹/۰۳	۵۱۹/۰۳
فوق روان‌کننده	۷/۰۹۵	۷/۰۹۵
دوده سیلیس	۳۵/۴۷	۰



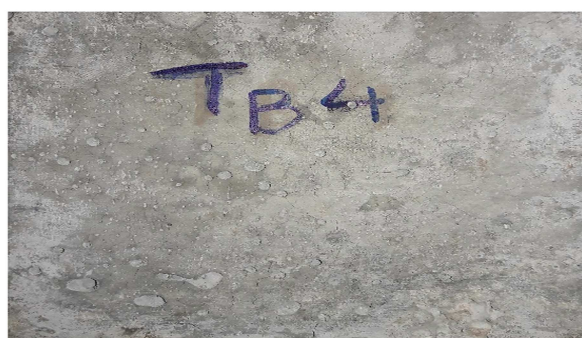
شکل ۱۳. سطح نمونه‌های طرح TE بعد از حرارت‌دهی در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۴. سطح نمونه‌های طرح TE بعد از حرارت‌دهی در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۰. افت وزنی طرح‌های TB و TE در دماهای مختلف.



شکل ۱۱. سطح نمونه‌های طرح TB بعد از حرارت‌دهی در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۲. سطح نمونه‌های طرح TB بعد از حرارت‌دهی در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد.

و ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به دست آمده است:

۱. براساس مشاهده‌های دوده‌ی سیلیسی تا میزان ۱۵٪ جایگزینی با سیمان، بهبود مقاومت بتن سبک‌دانه را در دمای محیط و در دماهای بالاتر در پی نداشته است.
۲. کاهش نسبت آب به سیمان، اثر مطلوب در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن سبک‌دانه، هم در دمای محیط و هم در دماهای بالا داشته است. البته کاهش مذکور باید در حد بهینه باشد، در غیر این صورت منجر به تولید بتن ناهمگن خواهد شد.
۳. استفاده‌ی مقدار بهینه‌ی فوق روان‌کننده موجب تولید بتن سبک‌دانه‌ی همگن با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بهتر، هم در دمای محیط و هم در دماهای بالا می‌شود. مقدار بهینه‌ی فوق روان‌کننده باید متناسب با مقدار کاهش نسبت آب به سیمان باشد.
۴. یکی از تهدیدها در مواقع آتش‌سوزی در سازه‌های ساخته‌شده با بتن سبک‌دانه، انفجار بتن و انهدام ناگهانی سازه است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که کاهش نسبت آب به سیمان اختلاط، احتمال وقوع این رخداد را کاهش می‌دهد.
۵. سرعت افت وزنی بتن سبک‌دانه تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر است. در صورتی که در مورد مقاومت فشاری بیشتر، افت مقاومت در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد.
۶. دماهای بالا به دلیل تبخیر آب بین لایه‌ی و آب موینه باعث ایجاد ترک‌های سطحی در بتن می‌شود. همچنین مهم‌ترین عامل تغییر رنگ بتن سبک‌دانه در دماهای بالا، وجود دوده‌ی سیلیسی در ترکیب آن بوده است.
۷. به عنوان جمع‌بندی، در طرح اختلاط بهینه در برابر دمای بالا، میزان نسبت آب به سیمان به کمک فوق روان‌کننده ۳/۰ به دست آمد. درشت‌دانه از لیکای

شکل‌گرا شده است. تعداد و عرض و طول ترک‌ها در دمای ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، بزرگ‌تر و بیشتر نسبت به دمای ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. همچنین پدیده‌ی تغییر رنگ نیز در دمای ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای هر دو طرح TE و TB قابل مشاهده است. البته تغییر رنگ مذکور برای طرح TE به علت وجود دوده‌ی سیلیسی در ترکیب آن به صورت واضح‌تر مشاهده شده است.

۹. نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه‌ی حاضر، حصول طرح اختلاط بهینه برای بتن سبک‌دانه‌ی سازه‌ی در برابر حرارت بالا به منظور کاهش میزان افت مقاومت بوده است. در این خصوص، نتایجی که در ادامه بیان شده است، از آزمایش‌های صورت‌گرفته در دماهای محیط

مگاپاسکال و با افزایش دما تا 800° درجه‌ی سانتی‌گراد، به ۲۵ مگاپاسکال رسیده است.

۸. افزایش دما از دمای محیط تا 800° درجه‌ی سانتی‌گراد، کاهش چگالی طرح همیشه برابر با ۱۲٪، کاهش مقاومت فشاری برابر با ۴۹٪ و کاهش مدول کشسانی دینامیکی برابر با ۶۴٪ را در پی داشته است.

سازه‌ی در محدوده‌ی دانه‌بندی پیشنهادی می‌باید مقررات ملی حدود ۳۲٪ از وزن سنگ‌دانه‌ها، ریزدانه‌ی لیکا حدود ۲۲٪ وزنی سنگ‌دانه‌ها، و ریزدانه‌ی ماسه حدود ۴۶٪ وزنی سنگ‌دانه‌ها، همچنین میزان سیمان مصرفی ۴۷۳ کیلوگرم به‌دست آمد. چگالی بتن تازه‌ی طرح همیشه، ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی آن در دمای محیط، ۴۹

پانویس‌ها

1. Malhotra
2. lightweight expanded clay
3. Whitcomb
4. Morais
5. Mirza
6. Tanyildizi
7. Silica fume
8. Morsy
9. Katkhuda
10. Demirel
11. Akcaozoglu
12. Huang
13. ultra-lightweight cement composite
14. cenosphere
15. Riaz Ahmad
16. Sravya
17. Roufael
18. Minitab

منابع (References)

8. Tanyildizi, H. and Coskun, A. "Performance of Lightweight Concrete with silica fume after high temperature", *Construction and Building Materials*, **22**(10), pp. 2124-2129 (2008).
9. Behnood, A. and Ziari, H. "Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures", *Cement and Concrete Composites*, **30**(2), pp. 106-112 (2008).
10. Morsy, M.S., Rashad, A.M. and Shebl S.S. "Effect of elevated temperature on compressive strength of blended cement mortar", *Building Research Journal*, **56**(2), pp. 173-185 (2008).
11. Katkhuda, H., Hanayneh, B. and Shatarat, N. "Influence of silica fume on high strength lightweight concrete", *Civil and Environmental Engineering*, **10**(3), pp. 407-414 (2009).
12. Fathi, M., Yousefipour, A. and Hematpouy Farokhy, E. "Mechanical and physical properties of expanded polystyrene structural concretes containing micro-silica and nano-silica", *Sharif Journal Civil Engineering*, **34-2**(1,2), pp. 123-132 (1397).
13. Demirel, B. and Keleshtemur, O. "Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume", *Fire Safety Journal*, **45**(6-8), pp. 385-391 (2010).
14. Mortazavi, M. and Majlessi, M. "Evaluation of silica fume effect on compressive strength of structural Lightweight Concrete containing LECA as lightweight aggregate", *Advanced Materials Research*, **626**, pp. 344-349 (2013).
15. Tanyildizi, H. "Variance analysis of crack characteristics of structural lightweight concrete containing silica fume exposed to high temperature", *Construction and Building Materials*, **47**, pp. 1154-1159 (2013).
16. Akcaozoglu, K. and Akcaozoglu, S. "The effect of elevated temperature on the lightweight concrete produced by expanded clay aggregate and calcium aluminate cement", *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, **1**(2), pp. 59-70 (2017).
17. Huang, Z., Padmaja, K., Li, S. and et al. "Mechanical properties and microstructure of ultra-lightweight cement composites with fly ash cenospheres after exposure to high temperatures", *Construction and Building Materials*, **164**, pp. 760-774 (2018).
1. Phan, L.T. "Fire performance of high strength concrete: a report of the state-of-the-art", Building and Fire Research Laboratory, Maryland: National Institute of Standards and Technology (1996).
2. Yasar, E., Atis, C.D., Kilic, A. and et al. "Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash", *Mater. Lett*, **57**(15), pp. 2267-2270 (2003).
3. Topcu, I.B. "Semi-lightweight concretes produced by volcanic slags", *CemeRent Concrete Res*, **27**(1), pp. 15-21 (1997).
4. Malhotra, V.M. "Properties of High-Strength Lightweight Concrete Incorporating Fly Ash and Silica Fume", *Special Publication*, **121**, pp. 645-666 (1990).
5. Novokshchenov, V. and Whitcomb, W. "How to Obtain High-Strength Concrete Using Low-Density Aggregate", *Special Publication*, **121**, pp. 683-700 (1991).
6. Rossignolo, J.A., Agnesinin, M.V.C. and Morais, J.A. "Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregate", *Cement and Concrete Composites*, **25**(1), pp. 77-82 (2003).
7. Mirza, F.A. and Soroushian, P. "Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete", *Cement and Concrete Composites*, **24**(2), pp. 223-227 (2002).

18. Riaz Ahmad, M. and Chen, B. "Experimental research on the performance of lightweight concrete containing foam and expanded clay aggregate", *Composites Part B*, **171**, pp. 46-60 (2019).

19. Sravya, L., Manoj, T. and Rao, S. "Effect of temperature curing on lightweight expanded clay aggregate concrete", *Materials Today: Proceedings*, **38**, pp.3386-3391 (2021).

20. Roufael, G., Beaucour, A., Eslami, J. and et al. "Influence of lightweight aggregates on the physical and mechanical residual properties of concrete subjected to high temperatures", *Construction and Building Materials*, **268**, pp. 121221 (2020).

21. Shekarchizade, M., Libre, N.A. and Jalili, M. "Guideline for structural lightweight aggregate concrete", Elm-o-Adab Publication, 1st Edn. (1393).

22. ASTM C39 / C39M-21, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", ASTM International (2015).

23. Minitab 18, Statistical Software (2017).