نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال نهم/ شماره سی و دوم/ بهار ۱۴۰۱

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric PowerPlant
9th Year/ No. 32/ June 2022

مطالعه‌ی آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن معمولی تحت حرارت بالا، مصرفی در سازه‌های هیدرولیکی، به همراه صحت‌سنجی توسط آزمون‌های SEM و XRD

محمدحسین منصورقناعی [*1]

چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی یک طرح اختلاط از بتن معمولی نوع ۲ با عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب از سیمان پرتلند ساخته شد. آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای ۲۱ و حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. در ادامه به‌منظور بررسی بیشتر و صحت‌سنجی نتایج، آزمون‌های SEM و XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد. بررسی‌های حاصله از این پژوهش حاکی از این مطلب است که اِعمال حرارت بالا بر نمونه‌های بتنی موجب افت نتایج آزمون‌ها می‌گردد، در این راستا در آزمون مقاومت فشاری بتن، میزان مقاومت از ۶۴/۹۲ به ۳۷/۴۵ مگاپاسکال کاهش یافت که افت ۴۲/۳۱ درصدی را شامل گردید. در آزمون مقاومت کششی بتن، میزان مقاومت از ۵/۲۲ به ۲/۲۷ مگاپاسکال کاهش یافت که افت ۵۶/۵۱ درصدی را شامل گردید، و در آزمون مدول الاستیسیته بتن، میزان مدول الاستیسیته از ۳۳/۷۳ به ۱۲/۲۴ گیگاپاسکال کاهش یافت که افت ۶۳/۷۱ درصدی را به خود اختصاص داد. نتایج حاصل از آزمون‌های SEM و XRD در دمای ۲۱ درجه سلسیوس و تحت حرارت بالا، ضمن هماهنگی با یکدیگر، در همپوشانی با نتایج حاصل از سایر آزمون‌های این مقاله قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی

مقاومت‌فشاری بتن، مقاومت‌کششی بتن، مدول‌الاستیسیته بتن، میکروسکوپ‌الکترونی‌روبشی (SEM)، طیف‌سنجی پراش اشعه‌ایکس (XRD).

[*1] دکتری تخصصی عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران. Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۸

مقدمه

خواص مکانیکی در سازه‌های هیدرولیکی نظیر سدهای بتنی با توجه به همجوار بودن با محیط‌های خورنده، همواره مورد توجه محققین و طراحان در علم مهندسی عمران بوده است. بهبود خواص مکانیکی در سازه‌های هیدرولیکی و ابنیه‌های مرتبط با آن، ضمن افزایش طول عمر مفید در سازه، مقاومت در برابر حریق را نیز افزایش می‌دهد. یکی از راه‌های افزایش خواص مکانیکی در بتن، استفاده از عیار بالای سیمان در ترکیب بتن است. در این راستا تحقیقات خالوئی و همکاران نشان می‌دهد که افزایش عیار سیمان در نسبت آب به سیمان برابر، موجب افت نتایج آزمون مقاومت فشاری در سن ۷ روز عمل‌آوری می‌گردد، اما تاثیری بر روی مقاومت فشاری بتن در سن عمل‌آوری۹۰ روزه ندارد (خالوئی و همکاران، ۲۰۱۹). با افزایش عیار سیمان در بتن معمولی از ۲۷۵ تا ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، چگالی بتن افزایش قابل توجهی می‌یابد (بهراملو و همکاران، ۲۰۱۹). با افزایش عیار سیمان در بتن و پایین نگه‌داشتن نسبت آب به سیمان ترکیب بتن می‌توان خصوصیات مکانیکی را در بتن افزایش داد و ضعف کارایی بتن تحت این شرایط با افزودن فوق روان‌ساز قابل جبران است (تدین و همکاران، ۲۰۱۰). با افزایش عیار سیمان، طی فرایند هیدراتاسیون، حجم زیادی از ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) در ترکیب بتن تولید می‌گردد. این ژل با پر کردن منافذ و ایجاد چسبندگی در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ)، در حدفاصل بین خمیر سیمان و سنگدانه، منجر به استحکام در بتن سخت شده می‌گردد. اما سرعت بالای فرایند شیمیایی ناشی از مصرف عیار بالای سیمان، ممکن است منجر به عدم مشارکت برخی از مواد هیدراته شده سیمانی مانند هیدرواکسیدکلسیم (آهک هیدراته با فرمول شیمیایی $Ca(OH)_2$) گردد، این امر افت خواص مکانیکی را در بتن به‌همراه خواهد داشت. تحقیقات نشان داده است که عیار سیمان مصرفی در ترکیب بتن، اثر مستقیمی بر مدول‌الاستیسیته آن دارد (کاظمیان و غره ۲۰۱۷) و میزان مقاومت‌فشاری بتن با افزایش مدول الاستیسیته، بهبود می‌یابد (مدندوست و دیلمی، ۲۰۲۱).

تاثیر حرارت بالا بر روی خمیر سخت‌شده سیمان هیدراته، بستگی به عوامل مختلفی از جمله درجه هیدراتاسیون و حالت رطوبتی خمیر سیمان دارد. براساس نظریه یرده، ویژگی آتش‌پادی بتن، شاید مهمترین نکته در ایمنی سازه ها باشد و این خاصیتی است که مزایای بتن را در این شرایط کاملاً آشکار می‌سازد (مهتا[1] و مونته ئیرو[2]، ۲۰۰۶). مطالعات ریزساختاری انجام شده بر روی بتن حاوی سیمان پرتلند، نشان می‌دهد که نانوساختار ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته (C-S-H) باعث مقاومت ملات سیمانی می‌گردد و این ساختار می‌تواند در دمای زیاد دچار تغییرات شود. وقتی که بتن در معرض حرارت بالا قرار می‌گیرد، تبخیر آب از حفرات و فضاهای مویینه آن آغاز می‌گردد و با ایجاد تخلخل در بتن، مقاومت بتن در برابر نیروهای وارده کاهش می‌یابد. در این راستا تحقیقات نشان داده است که با اعمال حرارت به نمونه های بتن، فرآیند دی‌هیدراسیون از دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس آغاز شده و تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس ادامه دارد (آدسانیا[3] و همکاران، ۲۰۱۸). در این راستا خروج آب از فضای پیوند شیمیایی C-S-H منجر به خرابی بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌شود (سدکیو[4] و کومار[5]، ۲۰۲۱). هرتز[6] گزارش داده است که ساختار ژل هیدراته C-S-H در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس تجزیه و در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس تخریب می‌گردد (هرتز، ۲۰۰۵). بروز تنش‌های مماسی و تفاوت در انبساط حرارتی بین سنگدانه و خمیر سیمان در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) از عوارض مخرب اِعمال حرارت بالا بر ساختار بتن است. بتن‌های سیمانی برای کاربردهای معمولی، مقاومت مناسبی در برابر آتش دارند اما مقاومت فشاری این نوع از بتن‌ها در دماهای زیاد به علت تغییرات گسترده فیزیکی و شیمیایی متغییر است (کروزیر[7] و سنجیان ۱۹۹۹). افت مقاومت فشاری نمونه‌های بتن معمولی در محدوده حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (امیری و آریانپور، ۲۰۱۹). به‌کارگیری از آزمون‌های

[1] Mehta
[2] Monteiro
[3] Adesanya
[4] Siddique
[5] Kaur
[6] Hertz
[7] Crozier

تصویربرداری میکروسکوپ‌الکترونی (SEM) و طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD)، راه‌کاری موثر برای ارزیابی ریزساختاری و میزان تغییرات شیمیایی در ساختار ماتریس سیمان سخت‌شده است. با بررسی نتایج حاصل از این آزمون‌ها می‌توان به درک مطلوبی از عملکرد بتن دست پیدا کرد. بهبود خواص مکانیکی بتن مصرفی در برخی از سازه‌ها در راستای افزایش ظرفیت باربری در سازه، امری ضروری است. در این پژوهش آزمایشگاهی بررسی خواص مکانیکی، ریزساختاری و شیمیایی در بتن معمولی با عیار بالا (۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) از سیمان پرتلند در دمای ۲۱ درجه سلسیوس و تحت حرارت بالا، به‌عنوان طرحی نوآورانه مطرح می‌گردد که می‌تواند به منظور استفاده از آن در سازه‌هایی با نیاز به خواص بالای مکانیکی، به کار گرفته شود.

ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

مصالح مصرفی

در این پژوهش آزمایشگاهی، از سیمان پرتلند نوع ۲ محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان) که تحت استاندارد En 197-1 تولید شده است، استفاده گردید. مشخصات شیمیایی و فیزیکی این نوع از سیمان بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط شرکت مذکور مطابق با جداول (۱) و (۲) است. آب مصرف شده به‌منظور تهیه آب آهک و ساخت طرح اختلاط در تحقیق پیش‌رو از آب شرب شهر لاهیجان می‌باشد، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص kg/m^3 ۱۰۰۰ است.

براساس بند ۹-۱۰-۴-۲ و بند ۹-۱۰-۴-۳ ویرایش چهارم از آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان ایران، آبی که قابل آشامیدن است، مزه و بوی مشخصی ندارد و تمیز و صاف است را می‌توان بدون آزمون در بتن استفاده کرد، مگر آن‌که سوابق قبلی نشان‌دهنده‌ی نامناسب بودن این آب برای بتن باشد (مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران ۱۳۹۲). منحنی دانه‌بندی سنگدانه مصرفی مطابق با شکل (۱) در محدوده استاندارد ASTM C33 می‌باشد، سنگدانه‌های مصرفی، تأمین شده از کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده و به لحاظ حذف ناخالصی‌های آلی، پاک شده است. برخی از خصوصیات ریزدانه و درشت‌دانه مصرفی در این تحقیق براساس استاندارد ASTM C33 در جدول (۳) تعیین گردیده است. دانه‌بندی ایده‌آل سنگدانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا سنگدانه‌ها با بیشترین چگالی، با حداقل میزان منافذ، مقرون به صرفه‌ترین مصالح مصرفی در ساخت بتن هستند که در صورت کیفیت مناسب به حداقل مقدار خمیر سیمان نیاز خواهند داشت (مهتا و مونته ئیرو، ۲۰۰۶). ابرروان‌کننده مصرفی در این تحقیق از نسل چهارم بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌نرمال بوده و محصولی از شرکت دوروچم خاورمیانه با نام تجاری Flowcem R700 است. این ماده جهت جبران ضعف کارایی و حفظ روانی ترکیب ملات با توجه به مصرف عیار بالای سیمان پرتلند در بتن استفاده می‌گردد. برخی از مشخصات ابرروان‌کننده مصرفی پلی‌کربوکسیلات‌نرمال در این پژوهش براساس اطلاعات ارائه شده از شرکت تولیدکننده به شرح جدول (۴) ارائه گردیده است.

طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این پژوهش آزمایشگاهی برای ساخت بتن معمولی از طرح اختلاط تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 استفاده گردید. در این راستا طرح اختلاط نمونه‌های بتنی براساس جدول (۵) تهیه و تنظیم شد. به‌منظور ساخت نمونه‌های بتنی، در ابتدا مصالح خشک (سنگدانه و سیمان)، به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب به مدت ۲ دقیقه به طول انجامید، سپس آب و ابرروان‌کننده به مخلوط اضافه گردید و ترکیب مصالح ۲ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. در پایان، مخلوط بتن تازه تهیه شده در قالب‌های از پیش روغن‌کاری شده در سه مرحله ریخته شد و بتن تازه در هر مرحله، با ۲۵ ضربه میله متراکم گردید. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت اولیه از زمان بتن‌ریزی نمونه‌ها و نگهداری در محیط خشک و دمای اتاق (۲۱ درجه سلسیوس)، نمونه‌ها از قالب جداسازی شدند و تا زمان انجام آزمون در داخل آب آهک در دمای اتاق نگهداری شدند.

روش‌های آزمایش و استانداردها

در این پژوهش به منظور صحت و افزایش دقت در نتایج حاصل از آزمون‌ها و بر طرف کردن خطاهای دستگاه‌های آزمایشگاهی، قبل از انجام هرگونه آزمون، دستگاه‌های

آزمایشگاهی کالیبره گردید. در ادامه، آزمون مقاومت فشاری بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد BS 12390-3 بر روی ۶ عدد از نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر انجام گرفت. در این راستا، نمونه‌ها به نحوی در دستگاه جک بتن‌شکن قرار داده شدند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن‌ریزی در مجاور قالب بود، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه باشد و پس از محکم شدن نمونه‌ها، بارگذاری نیرو در محدوده استاندارد با سرعت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه (۵۴ مگاپاسکال بر دقیقه) به‌صورت ثابت، یکنواخت، بدون تغییرات ناگهانی و عمود بر جهت بتن‌ریزی تا لحظه شکست، بر نمونه اِعمال گردید. میزان حداکثر بار وارده، تعیین‌کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده است. آزمون مقاومت کششی بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد ASTM C496 بر روی ۶ عدد از نمونه استوانه‌ای با ابعاد۳۰×۱۵ سانتی‌متر انجام گرفت. در این راستا نمونه‌ها از وجه طولی در زیر دستگاه جک بتن‌شکن قرار داده شدند و نیرو مطابق با استاندارد تا لحظه‌ی شکست نمونه‌ی بتنی اِعمال گردید. میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه‌ی بتنی در برابر فشار وارده است. آزمون مدول‌الاستیسیته‌ی بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد ASTM C469 بر روی ۶ عدد از نمونه‌ی استوانه-ای با ابعاد۳۰×۱۵ سانتی‌متر انجام گرفت. در این راستا نمونه مورد نظر داخل قاب آزمون مدول‌الاستیسیته بتن جانمایی شد، سپس نمونه بتنی از مقطع ۱۵ سانتی‌متر به‌طور عمود بین دو صفحه دستگاه جک بتن‌شکن قرار گرفت. در ادامه بار اِعمالی با سرعت بین ۰/۵ الی ۰/۹ کیلونیوتن بر ثانیه تا زمان تغییر شکل نمونه بر محور عمودی آن وارد شد، سپس تغییر شکل طولی نمونه‌ی بتنی با استفاده از گیج یا کرنش سنج متصل به قاب، اندازه‌گیری شد. آزمون XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت بالا، توسط دستگاه طیف‌سنج پراش اشعه ایکس با مدل Philips PW1730 بر روی ۲ عدد از نمونه‌ی بتنی انجام گرفت. در این راستا نمونه‌های خرد شده برگرفته از مرکز نمونه بتنی در داخل دستگاه قرار داده شد و طی انجام آزمون، نمودار پراش کریستال‌های بتن تهیه گردید. داده‌های حاصل از تفرق اشعه ایکس، به‌صورت شدت فوتون بر حسب زاویه آشکارساز[1] 2θ است که به‌صورت لیستی از محل پیک و شدت آنها بر روی گراف‌ها آورده می‌شود. آزمون SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت بالا، توسط دستگاه میکروسکوپ‌الکترونی‌روبشی با مدل FEI Quanta200 بر روی ۲ عدد از نمونه بتنی انجام گرفت. در این راستا نمونه بتنی خرد شده در دستگاه قرار داده شد و تصاویر با بزرگ‌نمایی موردنظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت. قبل از انجام آزمون‌های تحت حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس) که در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام شد، براساس استاندارد ISO834، نمونه‌های بتنی به مدت ۱ ساعت در کوره تحت دمای۶۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت، در ادامه نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا تحت تاثیر شوک دمایی قرار نگیرند. پس از خروج نمونه‌ها از کوره، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند تا به تعادل دمایی برسند. استفاده از این استاندارد در سایر تحقیقات پیرامون آزمون-های تحت حرارت بالا در بتن، گزارش شده است (کنگ[2] و سنجیان، ۲۰۱۰).

جدول (۱): مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع II

L.O.I	C_3A	I.R	$Na_2O+0.658K_2O$	SO_3	MgO	Cao	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Cl
MAX 1.5	۷/۵- ۵/۵	MAX 0.7	MAX 0.6	۲/۳- ۲	Max1.45	۴۳- ۴۲	۳/۸- ۳/۵	۴/۸- ۴/۵	۲۱- ۲۲	Max 0.003

جدول (۲): مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی سیمان پرتلند نوع II

وزن مخصوص (kg/m^3)	سطح مخصوص (Cm^2/gr)	گیرش اولیه (min)	گیرش ثانویه (min)
۲۳۵۰	۳۲۰۰-۳۰۰۰	۱۱۵< <۱۳۰	۱۹۰< <۲۰۵

[1] Detector

[2] Kong

جدول (۳): مشخصات سنگدانه‌ها

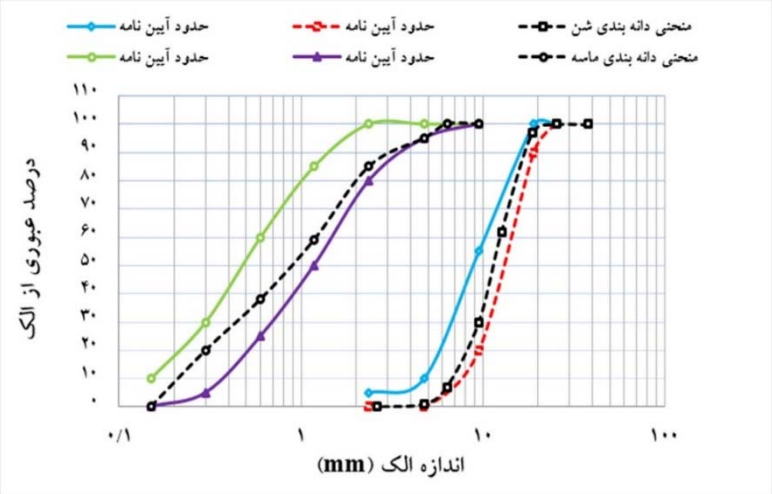
مصالح دانه‌ای بتن	حداقل قطر	حداکثر قطر (mm)	مدول نرمی (mm)	وزن مخصوص (kg/m^3)	درصد جذب آب
شن	۴/۷۵(mm)	۱۹	۵/۷	۲۷۵۰	۲/۲
ماسه	۷۵(µm)	۴/۷۵	۲/۸۵	۲۶۵۰	۲/۹

جدول (۴): مشخصات ابرروان‌کننده پلی‌کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	وزن مخصوص (kg/m^3)	استاندارد صرف	PH	میزان یون کلر	نقطه اشتعال
پلی کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود۷	ندارد	ندارد

جدول (۵): مشخصات طرح اختلاط بتن

	مصالح مصرفی					شرایط عمل‌آوری پس از قالب برداری	وزن مخصوص مخلوط بتن (kg/m^3)	درصد W/C
	سیمان	آب	شن	ماسه	ابرروان کننده			
kg/m^3	۵۰۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷۶۵	۷	در آب	۲۴۹۷	۴۵
٪	۲۰/۰۲	۹/۰۱	۴۰/۰۴	۳۰/۶۳	۰/۰۰۲۸			



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی شن و ماسه

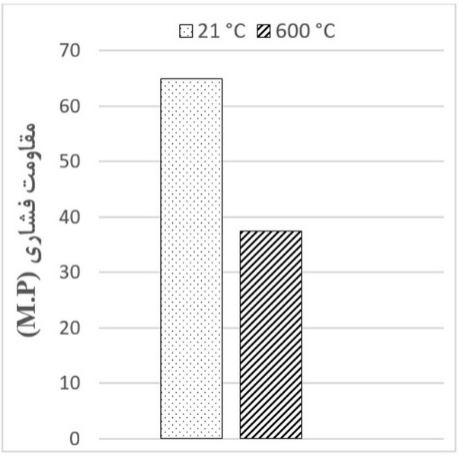
آزمایش‌ها و تفسیر نتایج

نتایج آزمون مقاومت فشاری بتن

در این بخش، نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و پس از حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۳) نمونه بتنی در حال انجام آزمون مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. پیرو این نتایج، میزان مقاومت فشاری بتن در دمای اتاق از ۶۴/۹۲ مگاپاسکال به ۳۸/۴۵ مگاپاسکال در دمای بالا رسیده که ۴۲/۳۱ درصد افت کرده است. کاهش مقاومت، عمدتاً به تجزیه هیدروکسیدکلسیم نسبت داده می‌شود و این پدیده معمولاً در محدوده‌ی دمایی ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد (بنتز[1]، ۲۰۰۰ و ژانگ[2] و بیکانیک[3]، ۲۰۰۰). تحقیقات نشان داده است که حرارت تا دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس موجب تبخیر آب از حفرات و فضاهای مویینه در ساختار بتن می‌گردد و تخلخل در بتن را تشدید می‌کند. در دمای فراتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس به علت خروج آب از ساختارهای بتن (به‌صورت بخار) و شروع فرآیند هیدراتاسیون، بر اثر خشک‌شدن ناشی از خروج آب، نمونه دچار انقباض شده و در نمونه بتنی ترک ایجاد می‌شود. براساس مطالعه سایر محققین، هنگامی‌که فشار بخار به

[1] Bentz
[2] Zhang
[3] Bicanic

حداکثر خود می‌رسد، ساختار متراکم بتن با نفوذپذیری کم، قادر به کنترل تنش‌های حرارتی نبوده و این امر موجب بروز ترک‌های حرارتی بر روی سطح نمونه به‌علت انقباض می‌شود. در بتن به این موضوع پدیده اثر بخار[1] می‌گویند (هو[2] و همکاران، ۲۰۰۹). تحقیقات نشان داده است که در بتن، میزان کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه به سرعت افزایش می‌یابد (ادالاتی[3]، ۲۰۱۴؛ کیم[4] و همکاران، ۱۹۹۸؛ مدندوست و همکاران، ۲۰۱۲؛ پیرمحمدعلی شاه و محمودزاده، ۲۰۲۰). در این پژوهش با توجه به گذشت زمان ۹۰ روز از سن عمل‌آوری بتن، بخش اعظمی از فرایند هیدراتاسیون در ترکیب بتن انجام گرفته است و میزان مشارکت ذرات چسبنده و پرکننده هیدراته‌شده نظیر هیدرواکسیدکلسیم موجود در سیمان، تحت این شرایط به حداکثر میزان خود رسیده است. در این راستا و با تولید حداکثری ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته (C-S-H) که به‌عنوان عامل اصلی ایجاد استحکام در بتن سخت‌شده شناخته می‌شود، اغلب منافذ و حفرات موجود در ساختار خمیر بتن توسط این ژل پر می‌گردد و پیوند در نواحی انتقال بین‌سطحی (ITZ) در حدفاصل بین خمیر و سنگدانه توسط این ژل مستحکم می‌گردد و از این طریق تراکم در ریزساختار بتن بالا رفته و استحکام فشاری بتن در دمای اتاق و تحت حرارت بالا را به دنبال دارد. تصاویر SEM و نتایج آزمون XRD، تفسیری از این فرایند را نشان می‌دهد.



شکل(۲): نتایج آزمون مقاومت فشاری

شکل (۳): بتن در حال انجام آزمون مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت کششی بتن

نتایج آزمون مقاومت کششی بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در نمودار شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۵) نمونه بتنی پس از انجام آزمون مقاومت کششی را نشان می‌دهد. براساس این نتایج، مقاومت‌کششی بتن در دمای ۲۱ درجه سلسیوس و پس از حرارت بالا به ترتیب به میزان ۵/۲۲ و ۲/۲۷ گیگاپاسکال کسب گردید که افت ۵۶/۵۱ درصدی مدول الاستیسیته تحت حرارت را به همراه داشت. تحقیقات نشان داده است که مقاومت بتن در مواجهه با حرارت بالا، به ترکیب شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده بتن و همچنین دما و نحوه عمل‌آوری بستگی دارد (ترک‌من[5] و همکاران، ۲۰۱۳). حرارت زیاد موجب تبخیر آب از منافذ و حفرات موجود در بتن می‌گردد و ضمن تضعیف فرایند هیدراتاسیون و تخریب در ساختار ژل C-S-H، افزایش تخلخل در بتن را به‌همراه خواهد داشت. وجود هرگونه تخلخل و ترک در بتن منجر به افت مقاومت کششی در بتن می‌گردد. با گذشت سن عمل‌آوری (تا ۹۰ روز) در بتن، ذرات سیمانی فرصت مشارکت بیشتری در فرایند بسپارش خواهند داشت و با تولید حداکثری ژل C-S-H و مشارکت این ژل‌ها در ایجاد پیوند در ITZ و پرکردن ترک‌ها و منافذ، بتن به حداکثر استحکام در برابر بار کششی نائل می‌گردد. این مزیت، مقاومت بتن را در برابر حرارت وارده بالا نیز بهبود می‌بخشد. تحقیقات نشان داده است که مقاومت کششی بتن در حدود

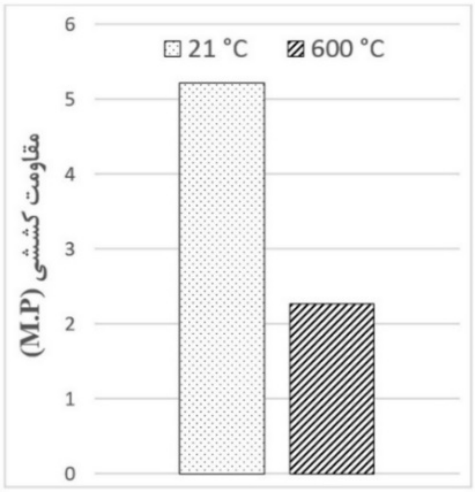
---

[1] Steam effect
[2] Hu
[3] Abd Elaty
[4] Kim
[5] Türkmen

۰/۱ مقاومت فشاری آن است، بنابراین اکثر ترک‌ها در بتن تحت تنش‌های کششی ایجاد می‌شود (سنجیان و مراگیوس[1]، ۱۹۹۷). شکل (۶) ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی را در این تحقیق نشان می‌دهد که با توجه به نمودار حاصل گردیده است. در این راستا، براساس توصیه کمیته ACI363R-92 در بتن معمولی، ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی با توجه به رابطه (۱) قابل محاسبه است (ACI ۱۹۸۴). همچنین ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی بتن در این تحقیق بر اساس رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد. اختلاف بین رابطه (۱) و (۲)، حدود ۱۲ درصد است. نتایج حاصل از آزمون SEM و XRD تفسیری بر نتایج حاصله در این بخش از مقاله است.

$$f_t = 0.59\sqrt{f_c} \qquad (۱)$$

$$f_t = 0.2172\left(f_c\right)^{0.7158} \qquad (۲)$$



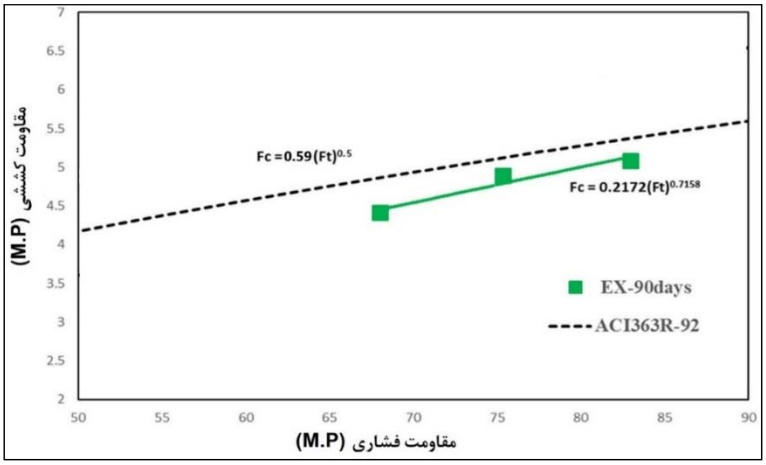
شکل (۴): نتایج آزمون مقاومت کششی

نتایج آزمون مدول الاستیسیته بتن

نتایج حاصل از آزمون مدول‌الاستیسیته بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای ۲۱ درجه سلسیوس و پس از حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس در نمودار شکل (۷) نشان داده شده است. براساس این نتایج، میزان مدول‌الاستیسیته بتن در دمای ۲۱ درجه سلسیوس و حرارت بالا، به ترتیب به مقدار ۳۳/۷۳ و ۱۲/۲۴ گیگاپاسکال کسب شده است که افت ۶۳/۷۱ درصدی مدول‌الاستیسیته را پس از اعمال حرارت بالا در بتن نشان می‌دهد. حرارت زیاد موجب تبخیر آب از منافذ و حفرات موجود در بخش ریزساختار بتن می‌گردد و با افزایش تخلخل و ایجاد ریزترک در بتن، میزان مدول الاستیسیته در بتن افت خواهد داشت. تبخیر آب از ساختار بتن همواره با افت وزن همراه است که می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های حرارتی به علت انقباض گردد. تحقیقات نشان داده است که در بتن، میزان کسب مدول‌الاستیسیته در سنین اولیه به‌سرعت افزایش می‌یابد (ادالاتی، ۲۰۱۴؛ کیم و همکاران، ۱۹۹۸؛ مدندوست و همکاران، ۲۰۱۲؛ پیرمحمدعلی شاه و محمودزاده، ۲۰۲۰). افزایش سن عمل‌آوری (در این مقاله تا ۹۰ روز) بتن، موجب بهبود نتیجه مدول‌الاستیسیته تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس و پس از اعمال حرارت بالا شده است. این امر به دلیل پیشرفت فرایند هیدراتاسیون با افزایش سن عمل‌آوری می‌باشد. تحت این شرایط، با مشارکت بیشتر ذرات سیمانی در فرایند بسپارش، به حجم ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته شده (C-S-H) که محصول نهایی فرایند شیمیایی بین آب و مواد سیمانی است، افزوده می‌شود. نقش اصلی این ژل در ترکیب بتن، پر کردن حفرات و ترک‌ها در ساختار ماتریس سیمان است، از طرفی اتصال در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) در حدفاصل سنگدانه‌ها را پوشش می‌دهد. شکل (۹) حاصل آنالیز XRD و شکل (۱۰) حاصل آزمون SEM در این تحقیق، تفسیری بر نقش ژل C-S-H در فرایند هیدراتاسیون و تغییرات بتن تحت حرارت بالا است. همواره مدول‌الاستیسته بتن با افزایش مقاومت فشاری، افزایش می‌یابد. شکل (۸) رابطه بین مقاومت فشاری و مدول‌الاستیسیته بتن را نشان می‌دهد.

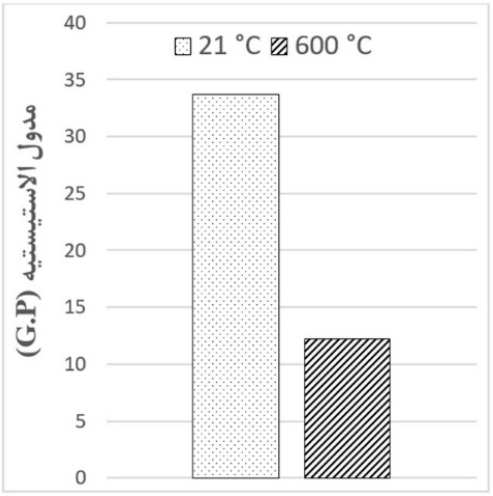
شکل (۵): بتن در حال انجام آزمون مقاومت کششی

[1] Moragues



شکل (۶): رابطه بین مقاومت فشاری و کششی بتن

ارتباط بین مقاومت فشاری و مدول‌الاستیسیته در بتن معمولی با توجه به توصیه کمیته ACI 363 براساس رابطه (۳) به‌دست آمده است (ACI 363 ۱۹۹۳). ارتباط بین مقاومت فشاری و مدول‌الاستیسیته در این پژوهش بر اساس رابطه (۴) قابل محاسبه است.



شکل (۷): نتایج آزمون مدول الاستیسیته

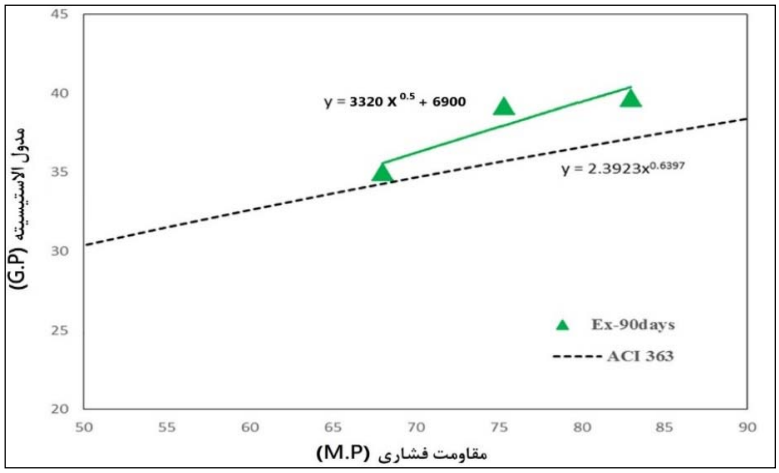
رابطه (۳) تطابق خوبی با رابطه حاصل از پژوهش حاضر داشته است و مقدار میانگین خطای آن برابر با ۷ درصد است.

$$E_c = 3320\left(f'_c\right)^{0.5} + 6900 \qquad (۳)$$

$$E_c = 2.3923\left(f_c\right)^{0.6397} \qquad (۴)$$

نتایج آزمون XRD و SEM

نتایج حاصل از آزمون XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۹) نشان داده شده است. براساس این نتایج مشاهده می‌گردد که در دمای ۲۱ درجه سلسیوس، ترکیبات آلومینیوم‌فسفات با حداکثر ارتفاع قله ۲۶۷۰ در زاویه ۵۹/۸۵ درجه و بعد از آن هیدرواکسیدکلسیم با حداکثر ارتفاع قله ۲۴۵۲ در زاویه ۲۴/۴۱ درجه، اکسیدتیتانیم با حداکثر ارتفاع قله ۱۷۹۴ در زاویه ۲۹/۲۴ درجه، کلسیت با حداکثر ارتفاع قله ۱۶۰۰ در زاویه ۲۶/۴۵ درجه و دولومیت با حداکثر ارتفاع قله ۶۷۱ در زاویه ۱۷/۹۲ درجه، دارای بیشترین پراکندگی هستند.



شکل (۸): رابطه بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن

حضور هیدرواکسیدکلسیم با بیشترین پراکندگی در طیف‌سنجی پراش اشعه‌ایکس نشانه این موضوع است که بخش عمده‌ای از این ماده هیدراته شده نتوانسته است در فرایند شیمیایی مشارکت کامل داشته باشد و این موضوع می‌تواند ناشی از مصرف بالای عیار سیمان در بتن باشد که سرعت بسپارش را بالا برده و فرصت را برای مشارکت شیمیایی برخی از مواد سیمانی نداده است. پس از خروج برخی از عناصر در فرایند کلسیناسیون در دمای بالا، ترکیباتی مانند کربنات‌کلسیم منگنز با حداکثر ارتفاع قله ۲۰۹۲ در زاویه ۲۹/۴۷ درجه، کربن با حداکثر ارتفاع قله ۱۸۶۵ در زاویه ۲۷/۹ درجه، سیلیکات آلومینیوم منگنز آهن پتاسیم هیدراته با حداکثر ارتفاع قله ۱۷۱۲ در زاویه ۲۸/۱۳ درجه و سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته با حداکثر ارتفاع قله ۷۲۶ و در زاویه ۲۶/۴۲ درجه، دارای بیشترین پراکندگی هستند.

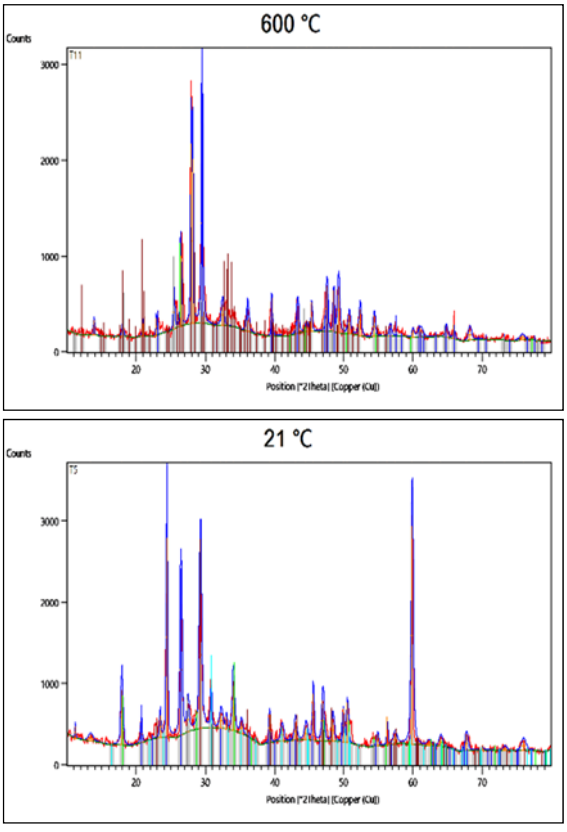
بر اساس نتایج حاصل از آزمون XRD مشاهده می‌گردد که اِعمال حرارت بالا، از ارتفاع قله‌ها ناشی از حضور ترکیبات کاسته است. در این راستا اختلاف اوج قله در نمودار گراف XRD در دمای ۲۱ درجه سلسیوس (با ارتفاع ۲۰۹۲)، نسبت به دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس (با ارتفاع ۲۶۷۰) به مقدار ۲۱/۶۴ درصد می‌باشد. در دمای بالا، ژل CH تبدیل به کلسیم کربنات‌هایی مانند Calcite نمی‌گردد و همان‌طور که از نتایج مشخص است در دمای بالا، CH ناپدید شده و در واقع به Carbon و C-A تبدیل شده است و این امر علت اصلی ضعف بتن در دمای بالا می‌باشد (راشاد[1]، ۲۰۱۹ و مورسی[2] و همکاران، ۲۰۱۲). تحقیقات نشان داده است که پس از ترکیب مصالح مصرفی در تهیه و ساخت بتن، فرایند واکنش شیمیایی (هیدراتاسیون) بین مواد سیمانی و آب در ترکیب آغاز می‌گردد. سرعت و میزان تشکیل ژل هیدراته سیلیکات‌کلسیم (C-S-H) که محصول نهایی حاصل از ترکیب شیمیایی است، عمدتاً به خصوصیات و نسبت‌های مواد سیمانی و آب بستگی دارد.

نتیجه حاصل از آزمون SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در مقیاس ۱۰ میکرومتر با بزرگ‌نمایی ۷۰۰۰ برابر در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۱۰) نشان داده شده است. براساس این تصاویر، ریزساختار بتن در تمامی طرح های اختلاط را می‌توان در سه فاز اساسی به شرح ذیل خلاصه نمود:

۱- فاز اول شامل محصولات هیدراتاسیون شامل ژل‌های هیدراته که در تصاویر عمدتاً به رنگ تیره هستند، است. این ژل‌ها پس از تشکیل و در ترکیب با سایر اجزای بتن، عامل اصلی در تقویت ریزساختار بتن به‌واسطه پرکردن منافذ و حفرات، همچنین بهبود پیوند در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) و بین‌لایه‌ای (در خود ژل‌های هیدراته) شناخته می شود.

۲- فاز دوم شامل بلورهای واکنش نکرده‌ای است که در نتیجه ناخالصی‌های موجود در مواد اولیه و یا ذرات واکنش نکرده در فرایند هیدراتاسیون تشکیل شده‌اند و در تصاویر عمدتاً به رنگ سفید می‌باشد.

۳- فاز سوم شامل نحوه پیوندهای خمیر سیمان با سنگدانه در ناحیه انتقال بین سطحی، همچنین نحوه پیوندهای بین لایه‌ای در ساختار ژل‌های هیدراته شده می‌باشد.

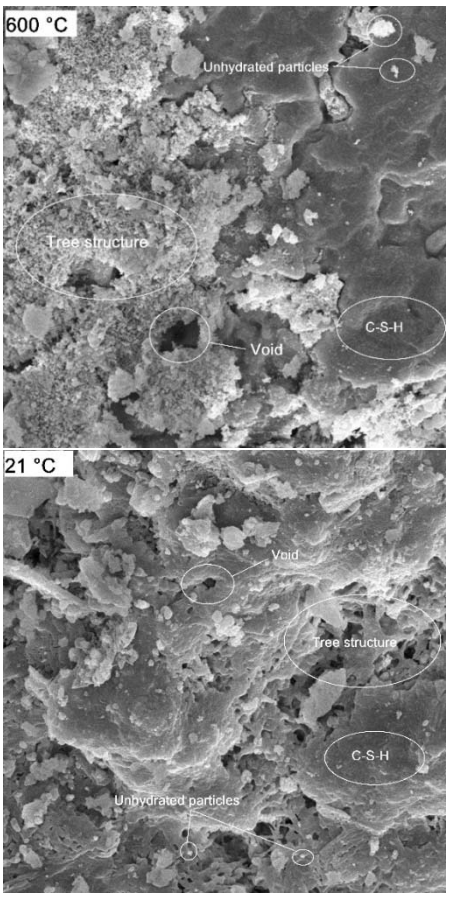


شکل (۹): نتایج آزمون XRD

[1] Rashad

[2] Morsy

در بخش ریزساختار بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند، سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته (C-S-H) موسوم به ژل توبرمورایتی[1] به مقدار ۵۰ الی ۶۰ درصد، هیدرواکسیدکلسیم ($Ca(OH)_2$) یا پُرتلندایت[2] به مقدار ۲۰ الی ۲۵ درصد و سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته (C-A-S-H) یا ژل اترینگایت[3] به مقدار ۱۵ الی ۲۰ درصد حجم خمیر سیمان را تشکیل می‌دهد، مابقی حجم نیز متعلق به دانه‌های کلینکری هیدراته نشده است (مهتا و مونته ئیرو، ۲۰۰۶). وجود ذرات هیدراته نشده در تصاویر SEM ناشی از سرعت بالای فرایند هیدراتاسیون به دلیل عیار بالای سیمان پرتلند (۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب) در ترکیب بتن می‌باشد و گرمای حاصل از فرایند بسپارش به ایجاد ترک در بتن منجر گردیده است. در این راستا آب موجود درون فضاهای کوچک بین لایه‌ای در ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته (C-S-H) می تواند توسط پیوند هیدروژنی نگه‌داشته شود و خروج آن تحت شرایط خاص می‌تواند موجب ایجاد جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و خزش در خمیر سیمان گردد. با سپری شدن از زمان عمل‌آوری و تکمیل فرایند هیدراتاسیون در ساختار بتن، این نقیصه‌ها برطرف می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که در قسمت توده خمیر سیمان پرتلند، یون‌هایی مانند کلسیم، سولفات و هیدرواکسید و آلومینات که از طریق هوازی (حل) شدن به سیلیکات‌کلسیم و آلومینات‌کلسیم ناشی شده‌اند، با هم ترکیب می‌شوند و تشکیل ژل اترینگایت و هیدرواکسیدکلسیم می‌دهند، بدین مفهوم که در اثر واکنش کلسیم آلومینات با کلسیم سولفات اترینگایت ایجاد می‌شود و با پیشرفت در مرحله هیدراسیون، بلورهای ضعیف C-S-H و نسل دوم کریستال‌ها که از هیدرواکسیدکلسیم و ژل اترینگایت شکل گرفته است شروع به پر کردن فضاهای خالی در شبکه اترینگایت و هیدرواکسیدکلسیم می‌کنند و با این عملیات تراکم و سختی و مقاومت ITZ (ناحیه انتقال بین سطحی) بتن زیاد می‌گردد (مهتا و مونته ئیرو، ۲۰۰۶). اِعمال حرارت بالا (□۶۰۰) در نمونه بتنی، ریزساختار بتن را تحت تاثیر قرار داده است، با توجه به تصویر SEM در دمای □۶۰۰، ایجاد ساختار درختی، وجود منافذ مویینه متعدد ناشی از تبخیر آب بین فضاهای مویینه در ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته (C-S-H) و کاهش میزان ژل C-S-H (نواحی تیره رنگ) در نمونه بتنی مشهود است که مبین ضعف در ریزساختار بتن پس از اِعمال حرارت بالا است. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ژل C-S-H در ریزساختار بتن حاوی سیمان پرتلند، از دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به بعد، بیشترین تخریب را در ریزساختار بتن به دنبال خواهد داشت. در شکل (۸)، افزایش حجم و میزان حفرات در بخش ریزساختار بتن را می‌توان به خروج آب تحت حرارت از حفرات مویینه در ریزساختار بتن نسبت داد. همچنین این مقدار با افزایش نسبت آب به سیمان در تهیه طرح اختلاط بتن، می‌تواند افزایش یابد و به تخلخل و ترد شدن ساختار بتن کمک کند. بر اساس تصاویر SEM، ساختار شش‌ضلعی پرتلندایت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس تغییر ظاهر می‌دهد و همچنین نانوساختار ژل C-S-H تجزیه می‌شود (امیری و آریانپور، ۲۰۱۹).



شکل (۱۰): نتایج آزمون SEM

[1] Tobermorite Gel (C-S-H)
[2] Portlandite ($Ca(OH)_2$)
[3] Ettringite Gel (C-A-S-H)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، میزان مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول‌الاستیسیته بتن در سن ۹۰ روزه در دمای ۲۱ درجه سلسیوس و حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس)، در بتن معمولی با عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب حاوی سیمان پرتلند مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاصله براساس انجام آزمون‌های XRD و SEM مورد ارزیابی قرار گرفت. اهم نتایج حاصل از این تحقیق آزمایشگاهی به شرح ذیل ارایه می‌گردد:

۱) در آزمون مقاومت فشاری بتن، میزان مقاومت از ۶۴/۹۲ به ۳۷/۴۵ مگاپاسکال کاهش یافت که ۴۲/۳۱ درصد افت داشته است. اِعمال حرارت بالا به نمونه‌های بتنی موجب افت نتایج حاصله در این آزمون شد. حرارت زیاد با آسیب رساندن به بخش ریزساختار بتن و گسستگی پیوندها در این بخش، موجب افت شدید مقاومت نمونه بتنی در برابر بارهای وارده فشاری شده است.

۲) در آزمون مقاومت کششی بتن، میزان مقاومت از ۵/۲۲ به ۲/۲۷ مگاپاسکال کاهش یافت که ۵۶/۵۱ درصد افت داشته است. اِعمال حرارت بالا به نمونه‌های بتنی موجب افت نتایج حاصله در این آزمون شد. در این راستا حرارت باعث تضعیف ساختار ژل‌های هیدراته (که عامل اصلی مقاومت در بتن سخت‌شده می‌باشد)، شده است. با تضعیف ساختار ژل‌های هیدراته‌شده، مقاومت بتن در برابر بارهای وارده کششی به کمترین میزان خود می‌رسد.

۳) در آزمون مدول‌الاستیسیته بتن، میزان مدول‌الاستیسیته از ۳۳/۷۳ به ۱۲/۲۴ گیگاپاسکال کاهش یافت که افت ۶۳/۷۱ درصدی را به خود اختصاص داد. اِعمال حرارت به نمونه‌های بتنی موجب افت نتایج حاصل در این آزمون گردید. تضعیف پیوند در نواحی انتقال بین سطحی (در حدفاصل بین سنگدانه و خمیر سیمان) و تضعیف پیوند بین لایه‌ای (در ساختار ژل‌های هیدراته‌شده) از عوارض اِعمال حرارت بالا در بتن و کاهش میزان مدول‌الاستیسیته بتن است.

۳) در آزمون XRD، در دمای۲۱ درجه سلسیوس، اکثر قله های بزرگ در نواحی ۱۶ تا ۲۹ و همچنین ۶۰ درجه اتفاق افتاده است و ترکیبات آلومینیوم‌فسفات و بعد از آن هیدرواکسیدکلسیم، اکسیدتیتانیم، کلسیت و دولومیت بیشترین پراکندگی را در بتن دارند. اما اِعمال حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس موجب افت ارتفاع قله‌ها در گراف حاصله شده است. در این راستا اکثر قله‌های بزرگ در نواحی ۲۶ تا ۲۹ درجه اتفاق افتاده است و ترکیباتی مانند کربنات کلسیم منگنز، کربن، سیلیکات آلومینیوم منگنز آهن فسفات هیدراته و سیلیکات آلومنیوم کلسیم هیدراته دارای بیشترین پراکندگی هستند.

۴) در آزمون SEM، در دمای ۲۱ درجه سلسیوس، ساختار درختی، حفرات و ذرات هیدراته نشده در حداقل مقدار خود دیده می‌شود، اما پس از اِعمال حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس به نمونه بتنی، به حجم و تعداد این مقادیر افزوده شده است. از طرفی اِعمال حرارت زیاد به نمونه‌ی بتنی، آثار مخربی بر ژل هیدراته‌شده C-S-H وارد کرده و گسستگی ساختار در این ژل‌ها از روی نتایج آزمون‌ها مشهود است.

۵) در پایان این تحقیق، نتایج حاصل از آزمون‌های SEM و XRD در دمای ۲۱ درجه سلسیوس و تحت حرارت بالا، ضمن هماهنگی با یکدیگر، در همپوشانی با نتایج حاصل از سایر آزمون‌ها قرار گرفت.

References

1- A.C., State of the art of high strength concrete. American Concrete Institut (1993).

2- Abd Elaty, M. A. A. (2014). Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model. HBRC journal, 10(2), 145-155.

3- Adesanya, E., Ohenoja, K., Luukkonen, T., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part geopolymer cement from slag and pretreated paper sludge. Journal of Cleaner Production, 185, 168-175.

4- Amiri, M., Aryanpoor, M. (2019). The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). Concrete Research, 12(4), 69-80. doi: 10.22124/jcr.2019.12883.1354.

5- Bahramloo, R., Gohari, S. (2019). Investigating the effect of cement and air entrained admixture (AEA) on the capillary water absorption in concrete lining of water conveyance canals. Concrete Research, 12(4), 123-133. doi: 10.22124/jcr.2019.12654.1344.

6- Bentz, D. P. (2000). Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete. Materials Journal, 97(3), 351-359.

7- Commitee, A. C. I. (1984). State-of-the-Air Report on High-Strength Concrete. ACI Journal, 81(4), 364-411.

8- Crozier, D. A., & Sanjayan, J. G. (1999). Chemical and physical degradation of concrete at elevated temperatures. Concrete in Australia, 18-20 .

9- Hertz, K. D. (2005). Concrete strength for fire safety design. Magazine of concrete research, 57(8), 445-453 .

10- Hu, S. G., Wu, J., Yang, W., He, Y. J., Wang, F. Z., & Ding, Q. J. (2009). Preparation and properties of geopolymer-lightweight aggregate refractory concrete. Journal of Central South University of Technology, 16(6), 914-918 .

11- Khalooee, S., Ahmadi, B., Askarinejad, A., & Nekooei, M. (2019). The effect of cementitious materials paste volume and use of zeolite on the properties of self-compacting concrete. Journal of Concrete Structures and Materials, 4(1), 100-109 .

12- Kazemian, S., & Ghareh, S. (2017). Effects of cement, different bentonite, and aggregates on plastic concrete in Besh-Ghardash Dam, Iran. Journal of Testing and Evaluation, 45(1), 242-248 .

13- Kim, J. K., Moon, Y. H., & Eo, S. H. (1998). Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature. Cement and Concrete Research, 28(12), 1761-1773 .

14- Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. Cement and concrete research, 40(2), 334-339.

15- Madandoust, R., Bungey, J. H., & Ghavidel, R. (2012). Prediction of the concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models. Computational Materials Science, 51(1), 261-272 .

16- Madandoust, R., & Deilami Poshtjouei, S. (2021). A study on compressive strength, static and dynamic elastic modulus of self-compacted concrete contained nanomaterials. Journal of Structural and Construction Engineering, 8(1), 256-270 .

17- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill Education.

18- Ministry of Roads and Urban Development, Theme 9 of the National Building Regulations Design and Execution of Reinforced Concrete Buildings (4 Edition), Tehran, Iran: Iran Development Publishing, 2013 .

19- Morsy, M. S., Al-Salloum, Y. A., Abbas, H., & Alsayed, S. H. (2012). Behavior of blended cement mortars containing nano-metakaolin at elevated temperatures. Construction and Building materials, 35, 900-905.

20- Pirmohammadi Alishah, F., & Mahmoudzadeh, N. (2020). Investigation of the effect of bentonite paste index on modulus of elasticity, compressive strength and performance of plastic concrete. Civil and Project Journal, 2(5), 87-109 .

21- Rashad, A. M. (2019). The effect of polypropylene, polyvinyl-alcohol, carbon and glass fibres on geopolymers properties. Materials Science and Technology, 35(2), 127-146 .

22- Sanjuán, M. A., & Moragues, A. (1997). Polypropylene-fibre-reinforced mortar mixes: Optimization to control plastic shrinkage. Composites Science and Technology, 57(6), 655-660.

23- Siddique, R., & Kaur, D. (2012). Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. Journal of Advanced Research, 3(1), 45-51 .

24- Tadaion, M., Honarmand, H., & Kalhori, M. (2010). Impact of Plasticizers on The Quality of Concrete and The Reduction of the Cement Content. Concrete Research, 3(2), 49-57 .

25- Türkmen, İ., Maraş, M. M., Karakoç, M. B., Demi□rboğa, R., & Kantarci, F. (2013, October). Fire resistance of geopolymer concrete produced from Ferrochrome slag by alkali activation method. In 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) (pp. 58-63). IEEE.

26- Zhang, B., & Bicanic, N. (2002). Residual fracture toughness of normal-and high-strength gravel concrete after heating to 600 C. Materials Journal, 99(3), 217-226.

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال نهم/ شماره سی و دوم/ بهار ۱۴۰۱

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric PowerPlant
9th Year/ No. 32/ June 2022

Laboratory study of mechanical properties of ordinary concrete under high heat consumption in hydraulic structures, along with validation by SEM and XRD tests

Mohammadhossein Mansourghanaei*[1]

Abstract

In this laboratory research, a mixing plan was made of ordinary concrete containing Portland cement type 2 with a grade of 500 kg/m^3. Compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity tests of concrete were performed on concrete samples at 90 days of processing age at 21 °C and 600 ° C. In order to further evaluate and validate the results, SEM and XRD tests were performed on concrete samples at 90 days of processing age. Application of heat in concrete samples caused a decrease in test results in this study. In this regard, in the concrete compressive strength test, the strength decreased from 64.92 to 37.45 MPa, which included a decrease of 42.31%. In the concrete tensile strength test, the strength decreased from 5.22 to 2.27 MPa, which included a decrease of 56.51%, and in the concrete modulus of elasticity test, the modulus of elasticity decreased from 33.73 to 12.24 GPa Which decreased by 63.71 percent. The results of SEM and XRD tests at 21 °C and high temperature, while coordinating with each other, overlapped with the results of other tests in this article.

Keywords

Compressive strength of concrete, Tensile strength of concrete, Modulus of elasticity of concrete, Scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD).

[1]* Ph.D in Civil, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran. Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir

Received: 2021/12/16 Accepted: 2022/07/19