

بررسی تغییرات مقاومت فشاری و تخلخل در هسته‌ی سازه‌های بتنی حجیم با مقاومت زیاد

محمود نبلی* (دانشیار)

امیرمسعود صالحی (کارشناس ارشد سازه)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

موضوع تحقیق حاضر، بررسی عمل‌آوری حرارتی (مدلی از عمل‌آوری مرکز ستون‌های حجیم) و عمل‌آوری استاندارد، و مقایسه‌ی تأثیر هر یک از آن‌ها بر مقاومت فشاری اولیه و درازمدت، و حجم منافذ داخلی بتن‌های مختلف است. بدین منظور هشت طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۳ ساخته شد. علاوه بر طرح شاهد، جایگزینی پوزولان طبیعی به مقدار ۱۵٪ و ۳۰٪، خاکستر بادی به میزان ۱۵٪ و ۲۵٪ و میکروسیلیس به میزان ۵٪، ۸٪ و ۱۱٪ وزنی سیمان انجام شد. از هر طرح مخلوط بتن دو سری نمونه تهیه شده است: نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های حرارتی. نمونه‌ها را پس از قالب‌گیری داخل محفظه‌ی پراز آب قرار داده و سپس تاریخچه‌ی دمای هیدراسیون بر آن‌ها اعمال می‌شود. مشاهده شد عمل‌آوری حرارتی تأثیر منفی بیشتری بر مقاومت فشاری درازمدت نمونه‌های حاوی میکروسیلیس دارد. اما جایگزینی انواع پوزولان‌ها (پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس) در بتن، باعث کاهش میزان جذب آب در نمونه‌های عمل‌آوری شده در حرارت (نسبت به بتن شاهد) می‌شود.

واژگان کلیدی: بتن حجیم، حرارت هیدراسیون، پوزولان، مقاومت فشاری، جذب آب.

۱. مقدمه

بتن‌های حجیم به‌علت هیدراسیون (آب‌پوشی) سیمان، در سنین اولیه به منبع تولید حرارت تبدیل می‌شوند. افزایش دما در هسته و کم‌بودن ضریب انتقال حرارت بتن باعث می‌شود که عموماً بتن‌های حجیم در سنین اولیه تحت شرایطی کاملاً متفاوت با شرایط استاندارد قرار گیرند. محققین می‌کوشند تا روش‌هایی برای مدل‌سازی شرایط واقعی هسته‌ی بتن‌های حجیم بیابند، و مقاومت فشاری و سایر خواص بتن را در این شرایط ویژه ارزیابی کنند. این مسئله در بتن‌های پر مقاومت که مقدار سیمان مصرفی در آن‌ها زیاد است اهمیت بیشتری می‌یابد. زیرا در چنین شرایطی، دمای هسته‌ی بتن گاهی به ۶۰ درجه سلسیوس و بالاتر نیز خواهد رسید و در چنین شرایطی، از یک سو بتن با دمایی غیرمتعارف مواجه می‌شود و از سوی دیگر گرادبان حرارتی بزرگی بین هسته و سطح بتن ایجاد خواهد شد.^[۱-۴]

اگرچه دمای زیاد در حین بتن‌ریزی منجر به افزایش مقاومت اولیه می‌شود، ممکن است تأثیر نامطلوبی بر مقاومت درازمدت داشته باشد. چرا که به نظر می‌رسد هیدراسیون سریع مراحل اولیه که به‌علت دمای اولیه زیاد رخ می‌دهد، باعث تشکیل ژل نسبتاً متراکمی در سطح دانه‌های سیمان می‌شود که در روند هیدراسیون مانع ورود رطوبت به بخش‌های داخلی دانه‌های سیمان می‌شود؛ در واقع محصول نهایی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۲/۷/۱۳۸۸، اصلاحیه ۲۱/۷/۱۳۸۹، پذیرش ۱۶/۹/۱۳۸۹.

nili36@yahoo.co.uk
ams.salehi@yahoo.com

خمیر سیمان -- در مقایسه با حالتی که دمای اولیه کم است -- دارای تخلخل بیشتری می‌شود.^[۵،۶]

در توجیه اثرات نامساعد بالا بودن دمای اولیه بر مقاومت بعدی،^[۷] محققین معتقد بودند که روند سریع هیدراسیون اولیه در دمای زیاد باعث کندشدن هیدراسیون بعدی می‌شود، و نتیجتاً توزیع محصولات هیدراسیون در داخل خمیر غیریکنواخت خواهد بود. استدلال آن‌ها این بود که با روند سریع هیدراسیون اولیه، زمان کافی برای نفوذ محصولات هیدراسیون به دور ذرات سیمان و رسوب کردن یکنواخت در فضای بین ذرات وجود نخواهد داشت؛ در نتیجه محصولات هیدراسیون در حوالی ذراتی که هیدراته می‌شوند به‌شدت انباشته خواهند شد. این امر به‌کندی هیدراسیون بعدی می‌انجامد و بر مقاومت درازمدت تأثیری نامطلوب خواهد داشت. افزون بر این، توزیع غیریکنواخت محصولات هیدراسیون نیز بر مقاومت و حجم منافذ تأثیر نامطلوبی خواهد داشت؛ زیرا نسبت ژل به فضای بین ذرات، کم‌تر از حالت توزیع یکنواخت و با درجه‌ی هیدراسیون یکسان خواهد بود و نقاط موضعی ضعیف‌تر، باعث کاهش مقاومت و پایداری خمیر هیدراته‌ی سیمان می‌شود.^[۸]

عامل مهم دیگر در کاهش خواص طولانی‌مدت بتن وقتی تحت دمای اولیه‌ی زیاد قرار گیرد، تأخیر در تشکیل سولفوآلومینات کلسیم (اترینگایت) است. خسارت ناشی از این پدیده معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که بتن در سنین اولیه در معرض دمای بیش از ۷۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد.^[۸-۱۰]

در بررسی حاضر سعی شده با کمک سیستم مدل سازی حرارتی -- که در آزمایشگاه تحقیقاتی بتن دانشگاه بوعلی سینا طراحی شده است -- ضمن تولید رژیم حرارتی بتن های حجیم، روند کسب مقاومت و نیز جذب آب بتن های حاوی پوزولان و بدون پوزولان ارزیابی و با شرایط مراقبت نمونه ها (تحت شرایط استاندارد) مقایسه شود.

۲. طراحی آزمایش

۱.۲. مصالح مصرفی

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع ۲ (هگمتان) با نرمی $3570 \text{ cm}^2/\text{g}$ استفاده شده است. پوزولان طبیعی (پومیس قروه) که از گروه توف های آتشفشانی بوده به صورت پودر شده مورد استفاده قرار گرفته است. دوده سیلیسی مصرفی، محصول کارخانه ی فروسیپس ایران و خاکستر بادی آفریقای جنوبی (نوع F) نیز در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

در این تحقیق سنگدانه ها به صورت اشباع با سطح خشک (SSD)^۱ مورد استفاده قرار گرفته اند. بیشینه اندازه ی شن مصرفی 19.5 mm و در دو محدوده ی 4.75 تا 12.5 میلی متر و 19 تا 12.5 میلی متر بوده است. دانه های نیمه شکسته و آهکی با چگالی 2.76 ، و ماسه ی مصرفی ترکیبی از ماسه ی طبیعی و ماسه ی آهکی با چگالی 2.67 و مدول نرمی 2.91 بوده است. همچنین برای رسیدن به کارایی مطلوب و همگنی مخلوط، از نوعی فوق روان کننده با نام تجاری (GLENIUM $110M$) استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی مصرفی.

ترکیبات و مشخصات	سیمان	پوزولان طبیعی	خاکستر بادی	میکروسیلیس
SiO ₂	۲۱٫۴۴	۵۳٫۶۸	۸۸٫۲۵	۸۵-۹۵
Al ₂ O ₃	۴٫۵۲	۱۲٫۱۳	-	۰٫۵-۱٫۷
Fe ₂ O ₃	۳٫۶۹	۷٫۰۴	-	۰٫۴-۲
CaO	۶۳٫۵۴	۹٫۴۳	۴-۱۰	-
MgO	۱٫۴۸	۹٫۰۲	۱-۲٫۵	-
SO ₃	۲٫۲۶	۲٫۵۲	-	-
Na ₂ O	۰٫۵۲	-	-	۰٫۲۵
K ₂ O	۰٫۷۲	۳٫۰۵	-	۰٫۱۵-۱
LOI (%) ^۱	-	۰٫۴۸	۱٫۲۸	-
SS (cm ² /g) ^۲	۳۵۷۰	۴۵۰۰	-	۱۴۰۰۰
SG (g/cm ³) ^۳	۳٫۱	۲٫۹۱	۲٫۴۳	۲٫۲۱

^۱ افت سرج شدن: (LOI) loss on ignition

^۲ سطح مخصوص: (SS) specific surface

^۳ چگالی نسبی: (SG) specific gravity

۲.۲. طرح اختلاط

در این تحقیق هشت طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان 0.3 ، شامل طرح شاهد و طرح جایگزینی پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس با مقادیر مشخص (برحسب درصدی از وزن سیمان) ساخته شده است. در تمامی طرح ها مقدار فوق روان کننده ی مورد استفاده یکسان و برابر 0.6 درصد وزنی سیمان است. بلافاصله بعد از فرایند ساخت و اختلاط بتن، آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM C ۱۴۳ انجام شد. جزئیات طرح اختلاط و نسبت های مواد و مصالح به کار رفته در ساخت بتن ها در جدول ۲ آمده است.

۳.۲. شرح دستگاه

هسته ی بتن های حجیم تحت رژیم حرارتی ناشی از هیدراسیون سیمان قرار می گیرد. برای مدل سازی هسته و تهیه ی نمونه هایی که تحت شرایط حرارتی هسته ی بتن حجیم عمل آوری شده باشند، از سیستم عمل آوری حرارتی بتن (TMCS)^۲ استفاده شده است. این سیستم که در آزمایشگاه تحقیقاتی بتن و مواد سازه یی دانشگاه بوعلی سینا طراحی و اجرا شده، قادر است رژیم حرارتی تولید شده ناشی از حرارت هیدراسیون نمونه ی بتنی را در شرایط نیمه آدیاباتیکی و با فاصله ی زمانی 1 دقیقه به یک دستگاه ثبت مدل CR ۱۰ X انتقال داده و پس از پردازش در حافظه ی رایانه ثبت کند. از سوی دیگر رژیم حرارتی مذکور به TMCS اعمال می شود تا بدین وسیله نمونه های نگهداری شده در محفظه تحت رژیم حرارتی معادل هسته ی بتن حجیم قرار گیرد. جزئیات این روند با ذکر تجهیزات مورد استفاده، در شکل ۱ نشان داده شده است.

۴.۲. نحوه ی تهیه و عمل آوری نمونه ها و آزمایش مقاومت فشاری

پس از ساخت هر سری بتن، یک نمونه ی استوانه یی 15×30 سانتی متری (در قالب مخصوص فشاری) مطابق استاندارد تهیه و درون محفظه ی نیمه آدیاباتیکی قرار داده می شود. این محفظه شامل یک مخزن ایزوله ی مناسب است که نمونه ی بتن در آن قرار می گیرد. در این روش اجازه ی عبور مقدار کمی گرما -- کم تر از $10 \text{ J}/(\text{h.K})$ -- از بدنه عایق وجود دارد.

بیست و دو نمونه ی مکعبی 100 میلی متری در قالب های ویژه (عایق در مقابل نفوذ آب) تهیه و پس از تراکم مناسب توسط میز لرزان، به داخل محفظه ی TMCS منتقل شد. نمونه ها در سنین مقرر از محفظه خارج و پس از قالب برداری تحت آزمایش قرار می گیرند. بعد از 5 روز -- که دمای نمونه ی نیمه آدیاباتیکی تقریباً به دمای محیط رسید -- تمامی نمونه ها از محفظه و قالب خارج، و در پلاستیک و در دمای محیط عمل آوری می شوند تا در سنین طولانی تحت آزمایش قرار گیرند.

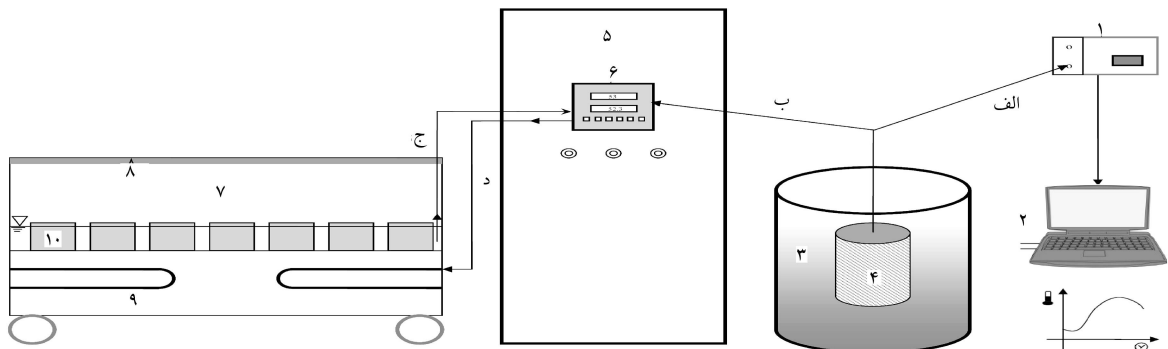
همچنین 15 نمونه ی مکعبی در شرایط استاندارد قالب گیری می شوند. این نمونه ها به اتاق با دمای 23 ± 2 و رطوبت 90% منتقل می شوند. پس از 24 ساعت نمونه ها از قالب خارج و تا زمان انجام آزمایش در آب با دمای 20 ± 2 عمل آوری می شوند.

نمونه های عمل آوری شده در سنین 1 ، 2 ، 3 ، 7 ، 28 و 91 روزه توسط جک هیدرولیکی 2000 KN ADR و با سرعت 3 کیلو نیوتن بر ثانیه تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. در نهایت مقاومت فشاری بتن در سن مقرر از میانگین مقاومت فشاری دو نمونه به دست آمد.

آزمایش جذب آب مطابق دستورالعمل ۱۲۲-Part ۱۸۸۱-BS انجام شد.^[۱۷] براین اساس، در سن 28 روز از هر طرح سه نمونه ی استاندارد و دو نمونه ی TMCS،

جدول ۲. مقادیر طرح اختلاط بتن (وزن مصالح سنگی در حالت اشباع با سطح خشک است).

بتن	نسبت آب به مواد سیمانی	آب	سیمان	پوزولان طبیعی	خاکستر بادی kg/cm^3	میکروسیلیس	ماسه (SSD)	شن (SSD)	فوق روان کننده (%)	اسلامپ (cm)
۸۰	۰٫۳	۱۶۴٫۷	۵۴۰	-	-	-	۸۶۵	۸۲۹	۰٫۶	۱۵
۸۰ P۱۵	۰٫۳	۱۶۴٫۷	۴۵۹	۸۱	-	-	۸۶۱	۸۲۸	۰٫۶	۲۱
۸۰ P۳۰	۰٫۳	۱۶۴٫۷	۳۷۸	۱۶۲	-	-	۸۵۹	۸۲۵	۰٫۶	۲۲٫۵
۸۰ FA۱۵	۰٫۳	۱۶۴٫۷	۴۵۹	-	۸۱	-	۸۵۴	۸۲۰	۰٫۶	-
۸۰ FA۲۵	۰٫۳	۱۶۴٫۷	۴۰۵	-	۱۳۵	-	۸۴۷	۸۱۳	۰٫۶	-
۸۰ SF۵	۰٫۳	۱۶۴٫۷	۵۱۳	-	-	۲۷	۸۵۹	۸۲۵	۰٫۶	۱۰٫۵
۸۰ SFA	۰٫۳	۱۶۴٫۷	۴۹۶٫۸	-	-	۴۳٫۲	۸۵۶	۸۲۲	۰٫۶	۱۶٫۵
۸۰ SF۱۱	۰٫۳	۱۶۴٫۷	۴۸۰٫۶	-	-	۵۹٫۴	۸۵۳	۸۲۰	۰٫۶	۱۲



۱. دستگاه ذخیره سازی اطلاعات (Data logger)

۲. رایانه جهت ثبت اطلاعات

۳. محفظه نیمه آدیاباتیک (Hay Box) که توسط مواد عایق ساخته شده

۴. نمونه بتنی استوانه ای ۱۵x۳۰

۵. تابلو برق

۶. دستگاه کنترل کننده دما محصول شرکت JUMO

۷. محفظه پر از آب جهت نگهداری نمونه های بتنی

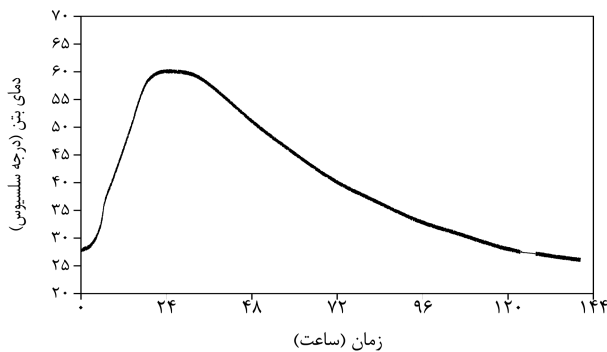
۸. درب شیشه ای

۹. هیتر

۱۰. نمونه های بتنی ۱۰۰ میلیمتری در قالب های آب بندی شده

الف) انتقال تاریخچه دمای بتن به دیتالوگر
 ب) انتقال دمای نمونه ی بتنی (رژیم حرارت هیدراسیون) به دستگاه کنترل توسط ترمومتر
 ج) انتقال دمای آب محفظه به دستگاه کنترل توسط ترمومتر
 د) صدور و انتقال دستور خاموش و روشن، به هیترها توسط دستگاه کنترل

شکل ۱. محفظه ی طراحی شده برای اعمال شرایط رژیم دمایی به نمونه های بتنی (TMCS).



شکل ۲. منحنی تاریخچه دمای نیمه آدیاباتیک بتن ۸۰.

درون گرم خانه با دمای ۴۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۴ روز خشک می شوند. پس از خروج نمونه ها از گرم خانه، جرم نمونه ها در وضعیت خشک توزین شده و سپس در ظرف آب قرار داده می شوند.

نمونه ها مدت ۰٫۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴ ساعت درون آب باقی می مانند و سپس از آب خارج می شوند، و در وضعیت اشباع با سطح خشک توزین می شوند. این عمل به گونه ای انجام می شود که ارتفاع آب روی نمونه ها 25 ± 5 میلی متر باشد. نتایج جذب آب اندازه گیری شده برای هر نمونه به عنوان افزایش جرم نمونه بر اثر غرق شدن در آب و برحسب درصدی از وزن خشک نمونه ارائه می شود.

۵.۲. تاریخچه دمای اعمال شده بر نمونه های بتنی

چنان که اشاره شد هر نمونه بتن تحت تاریخچه دمای نیمه آدیاباتیک خود عمل آوری می شود. نمونه ای از تاریخچه دمای اعمال شده (بتن ۸۰) در شکل ۲ ملاحظه می شود. مشخصات این منحنی برای تمامی بتن های ساخته شده -- شامل دمای اولیه، دمای بیشینه و زمان دمای بیشینه -- در جدول ۳ آورده شده است. چنان که در جدول ۳ مشاهده می شود، در بتن شاهد بیشینه دمای ناشی از

جدول ۳. مشخصات تاریخچه‌ی دمای نیمه‌آدیباتیک.

بتن	دمای اولیه (درجه سلسیوس)	بیشینه‌ی دما (درجه سلسیوس)	زمان وقوع بیشینه‌ی دما (ساعت)
۸°	۲۷٫۵	۶۱	۲۳
۸° P ۱۵	۲۷٫۵	۵۶	۲۹٫۲۵
۸° P ۳۰	۲۷٫۵	۵۰	۲۹٫۵
۸° FA ۱۵	۲۷	۵۶	۳۵٫۷۵
۸° FA ۲۵	۲۶٫۵	۴۹٫۵	۴۳
۸° SF ۵	۲۷	۵۹	۲۸٫۵
۸° SF ۸	۲۶٫۵	۶۰	۲۸
۸° SF ۱۱	۲۸	۶۰	۲۴٫۷۵

شده است. در شکل ۳ الف نمودار توسعه‌ی مقاومت فشاری در دو شرایط استاندارد (R) و عمل‌آوری تحت رژیم هیدراسیون (C) ارائه شده است.

در شکل ۳ ب، نموداری برای تشخیص بهتر اختلاف مقاومت در دو شرایط عمل‌آوری، نسبت مقاومت بتن در شرایط عمل‌آوری حرارتی به استاندارد نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود نمونه‌های C که مدلی از هسته‌ی مقطع بتن حجیم است، در سنین اولیه مقاومت زیادتری نسبت به نمونه‌های استاندارد (R) دارند. اما بین سن ۲ تا ۳ روز روند کسب مقاومت نمونه‌های استاندارد سریع‌تر است و بعد از ۳ روز مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های هسته کسب کرده‌اند.

نسبت مقاومت نمونه‌های C به R در روز اول حدود ۱٫۲۵ است. این نسبت با افزایش سن بتن کاهش یافته و در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب به ۱٫۰۹۴، ۰٫۹۶ و ۰٫۹۶ می‌رسد. ملاحظه می‌شود که بعد از ۷ روز، روند کسب مقاومت نمونه‌های هسته افزایش یافته و باعث کاهش اختلاف مقاومت در دو شرایط عمل‌آوری می‌شود. در طولانی‌مدت (۹۱ روز) نسبت فوق به حدود ۰٫۹۸ می‌رسد.

۲.۱.۳. مقاومت فشاری بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی

در بتن حاوی ۱۵٪ پوزولان طبیعی در سن ۱ روز، کسب مقاومت نمونه‌های هسته حدود ۱٫۵ برابر بیشتر از نمونه‌های استاندارد است. اما روند سریع‌کسب مقاومت نمونه‌های استاندارد باعث کاهش اختلاف مقاومتی شده و در سن ۳ روز مقاومت نمونه‌ها برابر می‌شود (شکل ۴).

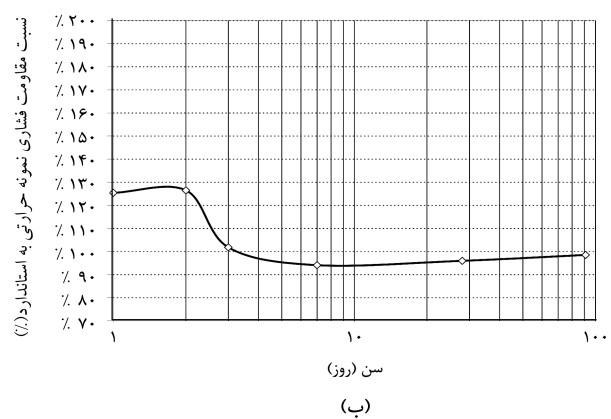
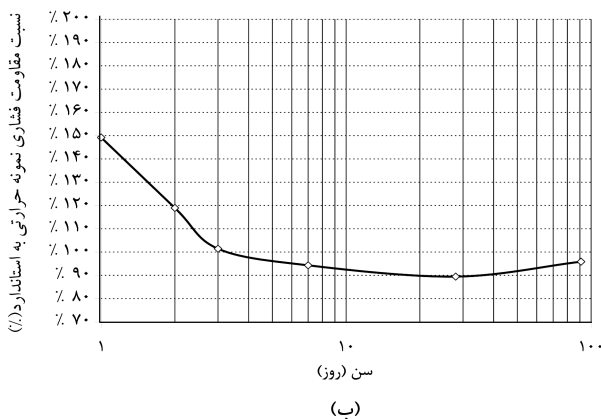
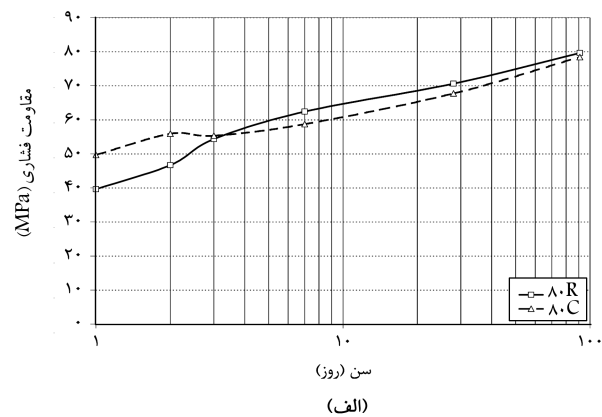
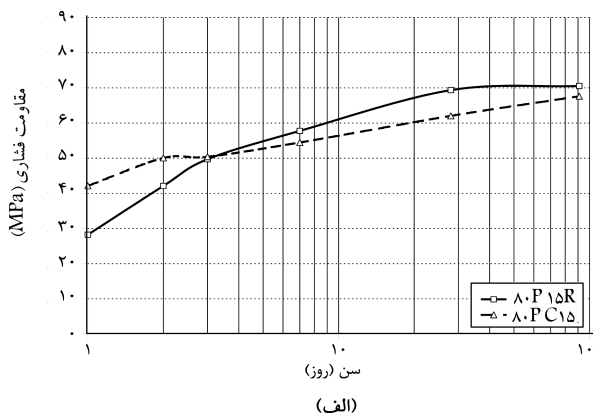
۳. نتایج و تحلیل آن‌ها

۱.۳. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌هایی که در دو شرایط عمل‌آوری حرارتی (C) و استاندارد (R) مراقبت شده‌اند، در سنین مقرر تعیین، و نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

۱.۱.۳. مقاومت فشاری بتن بدون افزودنی معدنی

در شکل ۳ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن ۸° در دو نمودار مجزا نشان داده



شکل ۴. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸° P ۱۵ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

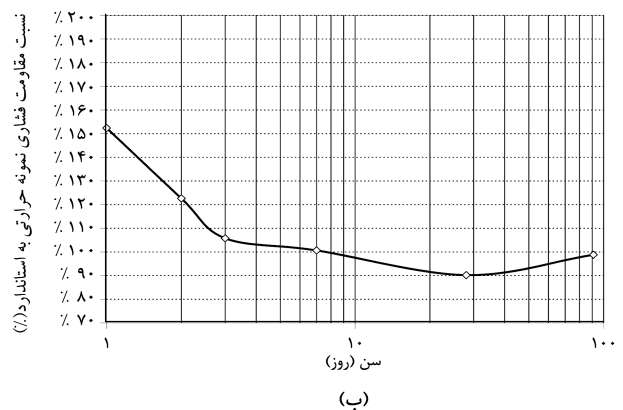
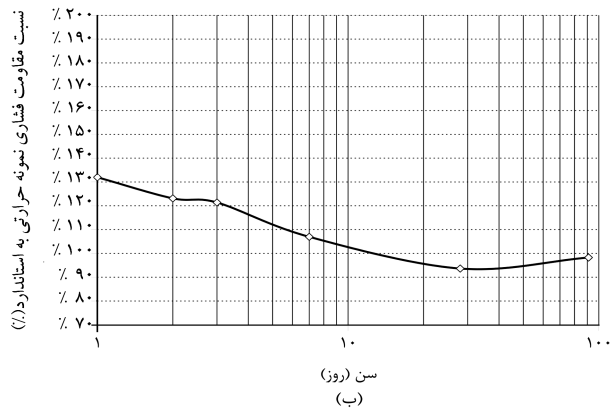
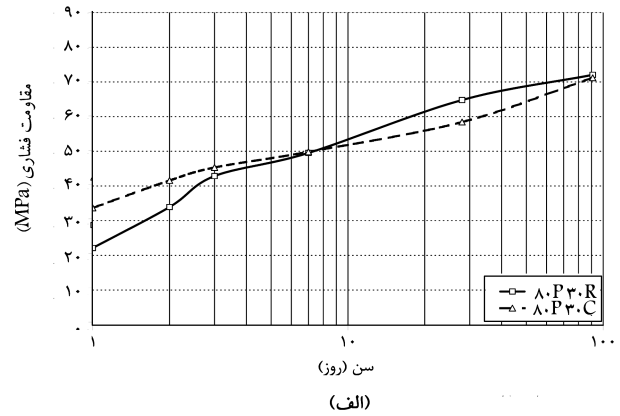
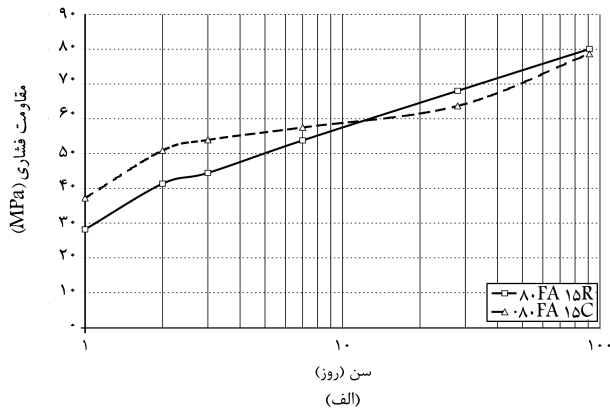
شکل ۳. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸° در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

با توجه به نتایج به دست آمده، جایگزینی پوزولان طبیعی باعث کاهش بیشتر مقاومت نمونه‌های هسته در ۲۸ روز (نسبت به نتایج بتن شاهد) می‌شود. اما در سن ۹۱ روز، مقاومت در دو شرایط عمل‌آوری بسیار به هم نزدیک می‌شود.

۳.۱.۳. مقاومت فشاری بتن‌های حاوی خاکستر بادی

در بتن حاوی ۱۵٪ خاکستر بادی، نسبت مقاومت نمونه‌های هسته به استاندارد در سن ۱، ۲۸ و ۹۱ روز برابر ۱٫۱/۳۲، ۰٫۹۳/۰ و ۰٫۹۸/۰ است (شکل ۶). نکته‌ی

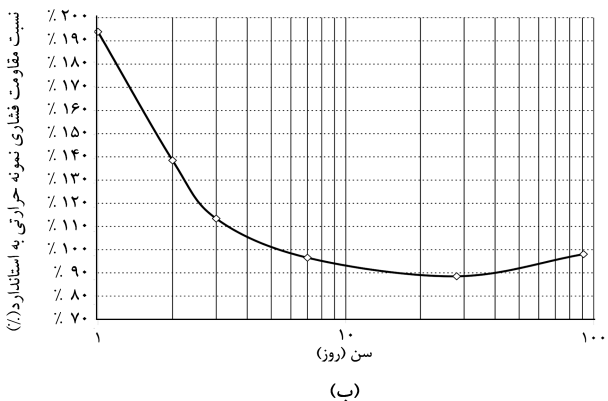
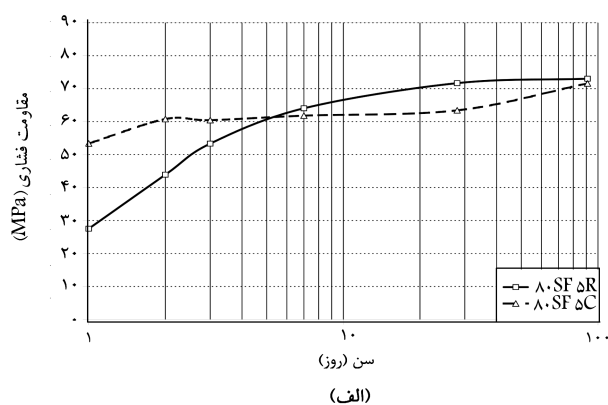
این روند تا ۲۸ روز تداوم دارد و باعث اختلاف مقاومتی حدود ۱۰٪ می‌شود. اما بعد از ۲۸ روز، روند کسب مقاومت نمونه‌های هسته نسبت به نمونه‌های استاندارد بیشتر است و باعث کاهش اختلاف مقاومت به حدود ۴٪ می‌شود. نتایج حاصله برای بتن حاوی ۳۰٪ پوزولان طبیعی، حکایت از روندی تقریباً یکسان با بتن‌های قبلی دارد. این روند شامل کسب مقاومت زیاد نمونه‌های هسته در سن ۱ و ۲۸ و بالعکس، و افزایش مقاومت نمونه‌های استاندارد در درازمدت است (شکل ۵).



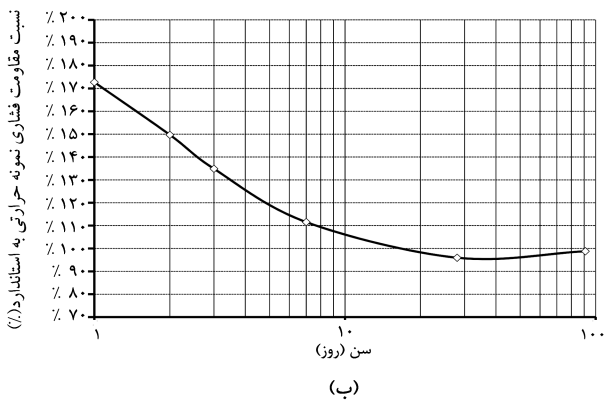
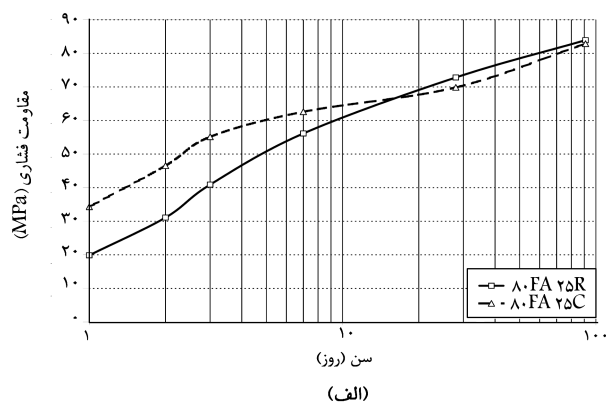
شکل ۵. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۳۰P۸۰ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).
شکل ۶. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۱۵FA۸۰ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

جدول ۴. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

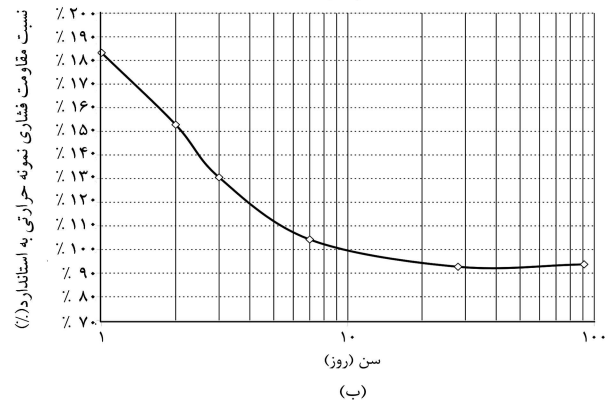
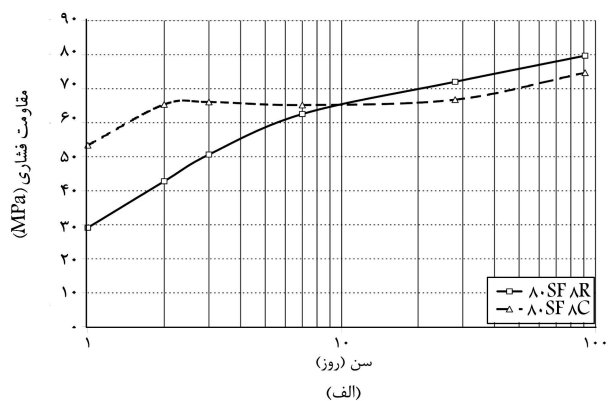
مقاومت فشاری (مگاپاسگال)												بتن
روز ۹۱		روز ۲۸		روز ۷		روز ۳		روز ۲		روز ۱		
C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	
۷۸٫۴۲	۷۹٫۶۱	۶۷٫۷۷	۷۰٫۶۱	۵۸٫۷۳	۶۲٫۴۲	۵۵٫۳۳	۵۴٫۳۶	۵۵٫۹۱	۴۴٫۲۱	۴۹٫۶۸	۳۹٫۶۱	۸۰
۶۷٫۶۲	۷۰٫۵۴	۶۲٫۰۵	۶۹٫۳۶	۵۴٫۴۷	۵۷٫۷۷	۵۰٫۴۱	۴۹٫۷۰	۵۰٫۰۸	۴۲٫۱۰	۴۲٫۱۳	۲۸٫۲۳	۸۰P۱۵
۷۱٫۱۹	۷۲٫۰۵	۵۸٫۴۴	۶۴٫۷۸	۴۹٫۸۴	۴۹٫۵۳	۴۵٫۳۳	۴۲٫۸۵	۴۱٫۶۰	۳۳٫۹۳	۳۳٫۶۸	۲۲٫۱۱	۸۰P۳۰
۷۸٫۶۶	۸۰٫۰۵	۶۳٫۶۹	۶۸٫۰۲	۵۷٫۵۰	۵۳٫۷۷	۵۳٫۹۱	۴۴٫۴۲	۵۰٫۸۸	۴۱٫۳۳	۳۷٫۱۸	۲۸٫۱۸	۸۰FA۱۵
۸۲٫۸۸	۸۳٫۹۲	۶۹٫۸۶	۷۲٫۸۱	۶۲٫۶۱	۵۶٫۱۳	۵۵٫۱۵	۴۰٫۸۹	۴۶٫۵۵	۳۱٫۰۹	۳۴٫۲۹	۱۹٫۸۵	۸۰FA۲۵
۷۱٫۵۸	۷۳٫۰۲	۶۳٫۴۳	۷۱٫۶۷	۶۱٫۸۲	۶۴٫۰۵	۶۰٫۴۶	۵۳٫۳۲	۶۰٫۷۹	۴۳٫۹۰	۵۳٫۳۷	۲۷٫۵۲	۸۰SF۵
۷۴٫۷۰	۷۹٫۷۱	۶۶٫۷۹	۷۲٫۰۵	۶۵٫۲۱	۶۲٫۵۶	۶۶٫۱۱	۵۰٫۶۵	۶۵٫۳۸	۴۲٫۷۹	۵۳٫۳۹	۲۹٫۱۴	۸۰SF۸
۷۶٫۸۸	۸۴٫۹۰	۶۷٫۹۳	۷۷٫۹۴	۶۸٫۸۱	۶۶٫۰۱	۶۸٫۴۲	۵۳٫۱۱	۶۵٫۰۲	۴۳٫۴۸	۵۸٫۵۶	۳۰٫۸۱	۸۰SF۱۱



شکل ۸. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰ SF5 در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).



شکل ۷. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰ FA25 در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).



شکل ۹. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰ SF8 در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

جالب در این بتن، مقاومت بیشتر نمونه‌های هسته نسبت به استاندارد، حتی بعد از ۷ روز است. این مسئله نشان‌گر تأثیرپذیری زیاد بتن حاوی خاکستر بادی از عمل‌آوری حرارتی است. این در حالی است که نتایج مقاومت در درازمدت تقریباً مشابه بتن‌های قبلی است.

با افزایش مقدار جایگزینی خاکستر بادی از ۱۵ به ۲۵ درصد، نسبت مقاومت در سنین ۱، ۲۸ و ۹۱ روز افزایش و برابر ۱،۲۷، ۰،۹۶ و ۰،۹۹ می‌شود (شکل ۷). چنان‌که مشاهده می‌شود عمل‌آوری حرارتی در نمونه‌های حاوی خاکستر بادی باعث بهبود مقاومت در کوتاه‌مدت شده، و در طولانی‌مدت نیز تأثیری منفی بر مقاومت نداشته است. بدین ترتیب نتایج حاصله نشان می‌دهد که مصرف پوزولان طبیعی و خاکستر بادی در بتن‌های حجیم نه تنها از دیدگاه زیست‌محیطی و اقتصادی بهینه است، بلکه در کاهش ریسک ترک‌خوردگی در مقاطع حجیم نیز مؤثرند. نتایج این بخش از تحقیق حاکی از این است که آزاد شدن حرارت ناشی از هیدراسیون سیمان در مقاطع حجیم بتنی نه تنها عاملی منفی محسوب نخواهد شد، بلکه باعث بهبود هیدراسیون پوزولان‌ها می‌شود.

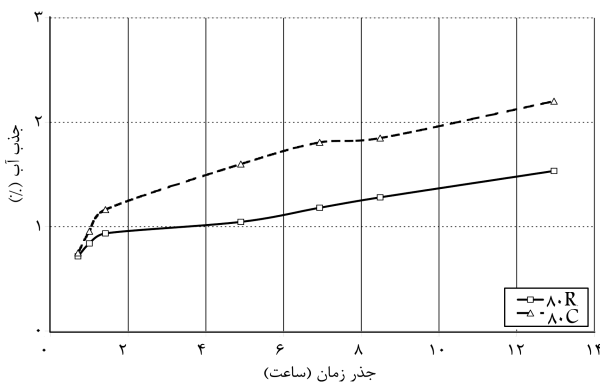
۴.۱.۳. مقاومت فشاری بتن‌های حاوی میکروسیلیس

نتایج مقاومت فشاری یک‌روزه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نشان می‌دهد که مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در حرارت، از ۱،۸۳ تا حدود ۱،۹۳ برابر نمونه‌های استاندارد است. اما در طولانی‌مدت، بتن‌های تحت عمل‌آوری حرارتی دچار کاهش مقاومت نسبتاً زیادی شده‌اند (شکل‌های ۸ تا ۱۰).

افزایش مقدار میکروسیلیس باعث کاهش بیشتر مقاومت درازمدت نمونه‌های هسته نسبت به استاندارد می‌شود. به‌نحوی که این نسبت در سن ۹۱ روز برای بتن‌های حاوی ۵، ۸ و ۱۱ درصد میکروسیلیس به ترتیب حدود ۰،۸۹، ۰،۹۳ و

جدول ۵. جذب آب بتن‌ها در شرایط استاندارد و TMCC.

جذب آب نهایی (۷ روز)		جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه)		بتن
C	R	C	R	
۲٫۲	۱٫۵۳	۰٫۷۵	۰٫۷۲	۸°
۱٫۷۵	۱٫۷۹	۰٫۹۱	۱٫۰۴	۸°P۱۵
۱٫۴۵	۱٫۵۴	۰٫۷۵	۰٫۸۵	۸°P۳۰
۱٫۲۲	۱٫۳۸	۰٫۶۳	۰٫۷۸	۸°FA۱۵
۱٫۸	۱٫۷۱	۰٫۸۱	۰٫۷۶	۸°FA۲۵
۱٫۱۷	۱٫۰۸	۰٫۵۸	۰٫۶۵	۸°SF۵
۱٫۱	۱٫۲۵	۰٫۵۹	۰٫۸	۸°SF۸
۱٫۳۹	۱٫۴۱	۰٫۵۱	۰٫۷۹	۸°SF۱۱



شکل ۱۱. آهنگ جذب آب بتن ۸° در شرایط استاندارد و TMCC.

۱.۲.۳. جذب آب بتن بدون افزودنی معدنی

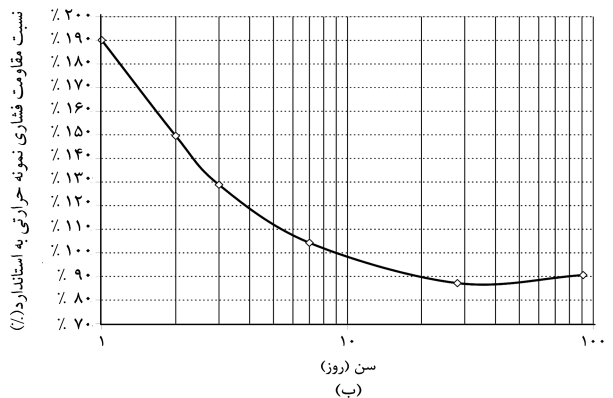
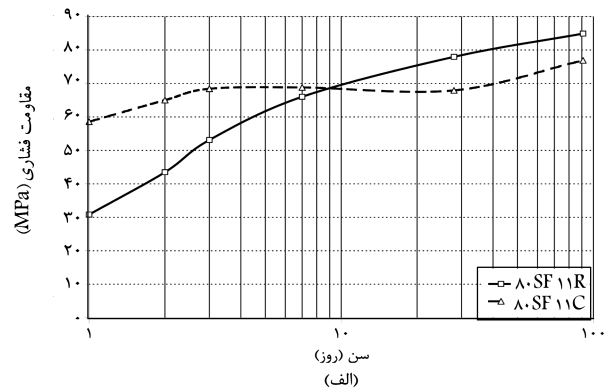
نتایج درصد جذب آب نمونه‌های شاهد در دو شرایط استاندارد و حرارتی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، میزان جذب آب در نمونه‌های حرارتی طی ۷ روز بیشتر از نمونه‌های استاندارد است. اختلاف درصد جذب آب در نیم‌ساعت و ۷ روز غوطه‌وری، به ترتیب ۹۶٪ و ۶۹٪ است. به عبارت دیگر در بتن ۸°، نمونه‌های هسته‌ی ستون‌های حجیم نسبت به نمونه‌های استاندارد دارای تخلخل بیشتری هستند.

۲.۲.۳. جذب آب بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی

مصرف پوزولان طبیعی باعث کاهش اختلاف جذب آب در دو شرایط عمل‌آوری (نسبت به بتن شاهد) می‌شود. منحنی جذب آب نمونه‌های حاوی ۱۵٪ پوزولان طبیعی، در هر دو شرایط تقریباً بر هم منطبق شوند. اما با افزایش مقدار مصرف این ماده، جذب آب نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط هسته‌کم‌تر از نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط استاندارد خواهد بود (شکل ۱۲).

۳.۲.۳. جذب آب بتن‌های حاوی خاکستر بادی

جایگزینی ۱۵٪ وزن سیمان با خاکستر بادی باعث شده جذب آب نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط هسته‌کم‌تر از نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط استاندارد باشد. با افزایش مقدار مصرف این ماده، تغییر خاصی در اختلاف جذب آب در



شکل ۱۰. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸°SF۱۱ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

و ۹° است. در توجیه افت نسبتاً زیاد مقاومت درازمدت نمونه‌های حاوی میکروسیلیس (با وجود تاریخچه‌ی دمای هیدراسیون یکسان) می‌توان گفت: مصرف میکروسیلیس تا مقداری محدود در بتن باعث تسریع فرایند هیدراسیون C+S و C+A می‌شود،^[۱۲] و دمای زیاد عمل‌آوری نیز هیدراسیون بتن را سرعت می‌بخشد (این اثر در مقاومت‌نمونه‌های هسته در ۳ روز اول، کاملاً مشهود است). با توجه به موارد فوق، تسریع هیدراسیون در سنین اولیه ممکن است باعث کندشدن فرایند هیدراسیون در سنین بالاتر و توزیع غیریکنواخت محصولات هیدراسیون شود و در نهایت به کاهش مقاومت درازمدت این نمونه‌های بتنی بینجامد.

۲.۳. جذب آب

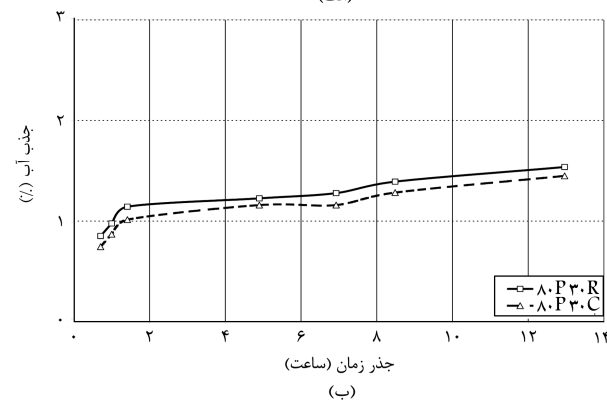
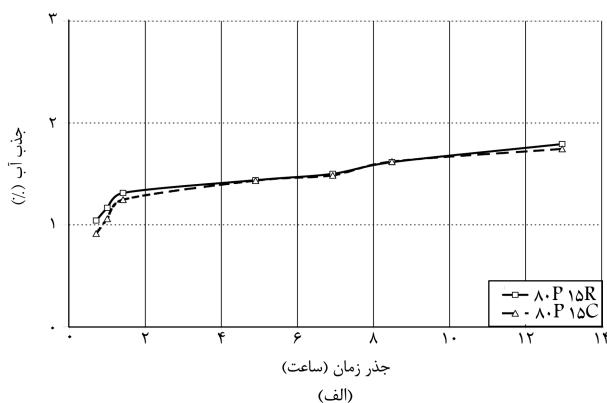
چنان‌که اشاره شد، عمل‌آوری بتن در دمای زیاد به توزیع غیریکنواخت محصولات هیدراسیون منجر می‌شود. به همین دلیل ممکن است بتن‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط حرارتی (C) دارای ریزساختاری ضعیف‌تر و حفره‌هایی درشت‌تر در مقایسه با بتن‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط استاندارد باشند. آزمایش جذب آب حجمی را می‌توان شاخص نسبتاً مناسبی برای بررسی ریزساختار بتن قلمداد کرد.

در تحقیق حاضر آزمایش جذب آب روی نمونه‌های بتنی انجام و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج جذب آب اولیه (نیم‌ساعته) و جذب آب نهایی (۷ روزه) نیز در این جدول نشان داده شده است.

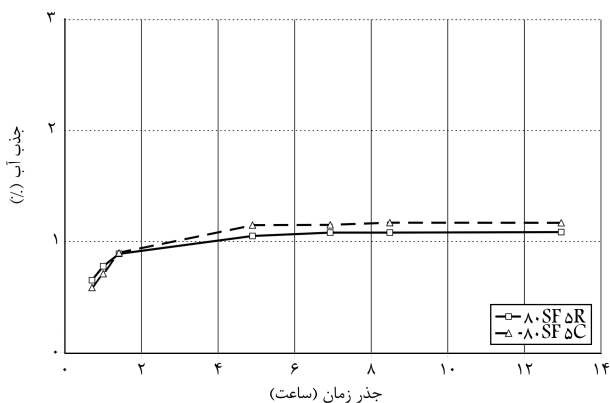
مقایسه با بتن FA15^o صورت نمی‌گیرد (شکل ۱۳). در نتیجه می‌توان گفت که مصرف خاکستر بادی در ستون‌های حجیم با مقاومت زیاد باعث پرسیدن سریع‌تر حفرات خالی بتن از محصولات هیدراسیون می‌شود. اما افزایش مقدار خاکستر بادی اثر محسوسی بر جذب آب ندارد.

۴.۲.۳. جذب آب بتن حاوی میکروسیلیس

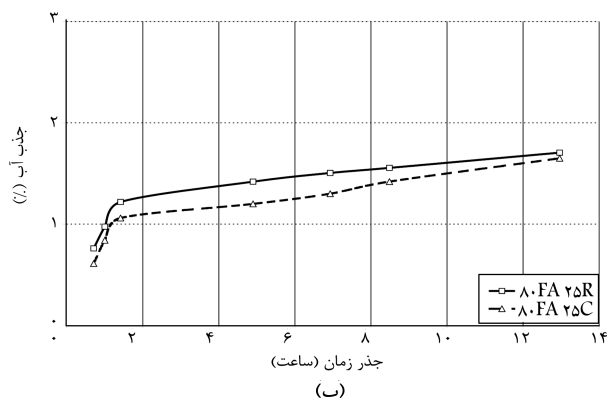
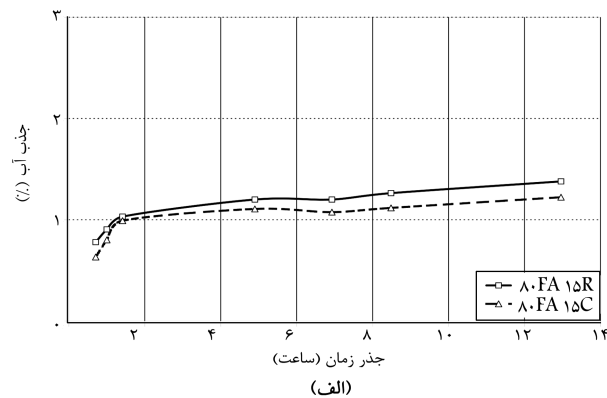
آهنگ جذب آب بتن‌های حاوی میکروسیلیس در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. بتن‌های حاوی این ماده نیز اثر پذیری کمی نسبت به عمل‌آوری در دمای بالا دارند. با جایگزینی ۵٪ میکروسیلیس از اختلاف جذب آب در دو شرایط عمل‌آوری کاسته می‌شود (در مقایسه با بتن شاهد). جایگزینی ۸٪ و ۱۱٪



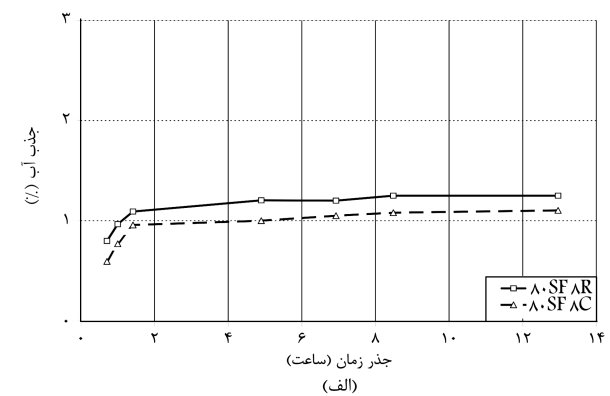
شکل ۱۲. آهنگ جذب آب بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی در شرایط استاندارد و TMCC.



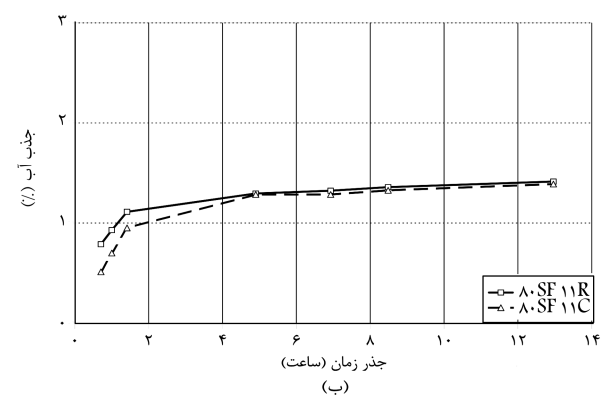
شکل ۱۴. آهنگ جذب آب بتن حاوی ۵ درصد میکروسیلیس در شرایط استاندارد و TMCC.



شکل ۱۳. آهنگ جذب آب بتن‌های حاوی خاکستر بادی در شرایط استاندارد و TMCC.



شکل ۱۵. آهنگ جذب آب بتن حاوی ۱۱ و ۸ درصد میکروسیلیس در شرایط استاندارد و TMCC.



جایگزینی پوزولان طبیعی گرچه باعث افت مقاومت نمونه‌های هسته در ۲۸ روز به میزان حدود ۱۰٪ شده، در سن ۹۱ روز اختلاف بین مقاومت در دو شرایط عمل‌آوری کاهش یافته و به کم‌تر از ۴٪ می‌رسد. مصرف خاکستر بادی باعث کاهش اختلاف مقاومت نمونه‌های هسته به استاندارد در سن ۹۱ روز به کم‌تر از ۱٪ می‌شود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی، این بتن‌ها می‌توانند از افزایش دمای مقاطع حجیم برای توسعه‌ی بیشتر مقاومت اولیه بهره ببرند. بنابراین مشکل مقاومت کم این بتن‌ها در سنین اولیه تا حدودی برطرف می‌شود.

جایگزینی میکروسیلیس در بتن باعث کسب مقاومت زیاد نمونه‌های هسته در سنین اولیه می‌شود. اما در طولانی‌مدت، باعث افت مقاومت نمونه‌های هسته نسبت به استاندارد از ۸٪ تا ۱۳٪ می‌شود (سن ۲۸ روز). روند افت مقاومت، با افزایش مقدار جایگزینی بیشتر شده، اما افزایش سن بتن (۹۱ روز) باعث کاهش اختلاف مقاومت بین ۲٪ تا ۱۰٪ می‌شود. نمونه‌های بتن شاهد که در شرایط حرارتی عمل‌آوری شده‌اند، در زمان‌های مختلف نسبت به نمونه‌های استاندارد جذب آب بیشتری دارند. بنابراین می‌توان گفت که نمونه‌های هسته‌ی مقاطع حجیم دارای تخلخل بیشتری نسبت به نمونه‌های استاندارد هستند.

جایگزینی انواع پوزولان‌ها (پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس) در بتن باعث کاهش اختلاف بین جذب آب نمونه‌های حرارتی و استاندارد در سن ۲۸ روز شده است. این نتیجه حاکی از مؤثر بودن افزودن پوزولان برای کاهش حجم منافذ تا سن مشخص است.

از این ماده‌ی پوزولانی، باعث جذب آب کم‌تر نمونه‌های عمل‌آوری شده در هسته‌ی ستون‌های حجیم نسبت به نمونه‌های استاندارد می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

نمونه‌های مدل‌سازی شده از هسته‌ی ستون‌های حجیم در سنین اولیه کسب مقاومت بیشتری (حدود ۱/۲۵ تا ۲ برابر بیشتر) نسبت به نمونه‌های استاندارد دارند. اما روند کسب مقاومت نمونه‌های استاندارد به تدریج با گذشت زمان (تا ۲۸ روز) افزایش می‌یابد، به طوری که مقاومت نمونه‌های هسته نسبت به نمونه‌های استاندارد کاهش می‌یابد. از سن ۲۸ تا ۹۱ روز مجدداً روند کسب مقاومت نمونه‌های هسته افزایش یافته و باعث کاهش اختلاف مقاومت با نمونه‌های استاندارد می‌شود.

به نظر می‌رسد که عمل‌آوری حرارتی با رژیم‌دمایی اعمال شده در این تحقیق که دارای ویژگی‌هایی همچون زمان تأخیر اولیه مناسب، نرخ صعود و نزول دمایی کم و پیک دمایی زیر ۶۰ درجه سانتی‌گراد است، برای مقاومت فشاری بتن‌های مختلف چندان زیان‌آور نیست و فقط باعث به تأخیر افتادن دسته‌ی از واکنش‌ها تا سن ۲۸ روز می‌شود. از آن پس با آغاز این واکنش‌ها شاهد تسریع روند کسب مقاومت نمونه‌های حرارتی هستیم. در نتیجه اساساً سن ۲۸ روز زمان مناسبی برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌های حجیم نیست.

پانویس

1. Saturated Surface Dry
2. temperature matched curing system (TMCS)

منابع

1. Ekolu, S.O., *Role of Heat Curing in Concrete Durability Effects of Lithium Salts and Chloride Ingress on Delayed Ettringite Formation*, The Degree of Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering, University of Toronto (2004).
2. Kjellsen, K.O. and Lagerblad, B. "Microstructure of tricalcium silicate and Portland cement systems at middle periods of hydration-development of Hadley grains", *Cement and Concrete Research*, **37**(1), pp. 13-20 (2006).
3. Yuan, R.L.; Ragab, M.; Hill, R.E. and Cook, J.E. "Evaluation of core strength in high strength concrete", *Concr Int.*, **13**(5), pp. 30-34 (May 1991).
4. Koibuchi, K.; Yamaguchi, H.; Kabota, K. and Ishikawa, Y. "Hydration and compressive strength development of high strength concrete heated to 60 or 80°C at the early age", *Proceedings of Cement and Concrete*, No. 45, Concrete Association of Japan, pp. 204-209 (1991).
5. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, 4th Ed. Essex: Pearson Education, Limited (1995).
6. Kjellsen, K.O. and Detwiler, R.J. "Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures", *Cement and Concrete Research*, **22**, pp. 112-120 (1992).
7. Thomas, M.D.A., *Delayed Ettringite Formation in Concrete-Recent Developments and Future Directions*, Department of Civil Engineering, University of Toronto (August 1998).
8. Famy, C.; Scrivener, K.L.; Atkinson, A. and Brough, A.R.; "Effects of an early or late heat treatment on the microstructure and composition of inner C-S-H products of Portland cement mortars", *Cement and Concrete Research*, **32**(2), pp. 269-278 (2002).
9. Glasser, F.P.; Damidot, D. and Atkins, M. "Phase development in cement in relation to the secondary ettringite problem", *Advances in Cement Research*, **7**(26), pp. 57-68 (1995).
10. Heinz, D.; Ludwig, V. and Rudinger, I. "Delayed ettringite formation in heat-treated mortars and concretes" *Concrete Precasting Plant and Technology*, **11**, pp. 56-61 (1989).
11. BS 1881; Testing Concrete - Part 122; Method for Determination of Water Absorption.
12. Detwiler, R.J.; Bhatta, J.I. and Bhattacharja, S., *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements*, Portland Cement Association (1998).

