مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۸، شماره‌ی ۱، ص. ۱۰۱-۱۰۹، (یادداشت فنّی)

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

محمود نیلی * **(دانشیار)**
امیرمسعود صالحی (کارشناس ارشد سازه)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

موضوع تحقیق حاضر، بررسی عمل‌آوری حرارتی (مدلی از عمل‌آوری مرکز ستون‌های حجیم) و عمل‌آوری استاندارد، و مقایسه‌ی تأثیر هریک از آن‌ها بر مقاومت فشاری اولیه و درازمدت، و حجم منافذ داخلی بتن‌های مختلف است. بدین‌منظور هشت طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰٫۳ ساخته شد. علاوه برطرح 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 پر از 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 عمل‌آوری‌شده در حرارت (نسبت به بتن شاهد) می‌شود.

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

nili36@yahoo.co.uk
ams_salehi@yahoo.com

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 حرارتِ بتن باعث می‌شود که عموماً بتن‌های حجیم در سنین اولیه تحت شرایطی کاملاً متفاوت با شرایط استاندارد قرارگیرند. محققین می‌کوشند تا روش‌هایی برای مدل‌سازیِ شرایط واقعی هسته‌ی بتن‌های حجیم بیابند، و مقاومت فشاری و سایر خواص بتن را در این شرایط ویژه ارزیابی کنند. این مسئله در بتن‌های پرمقاومت 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 گرادیان 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؛ درواقع محصول نهاییِ خمیر سیمان ــ در مقایسه با حالتی که دمای اولیه کم است ــ دارای تخلخل بیشتری می‌شود.[۵و۶]

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 رسوب‌کردنِ یکنواخت در فضای بین ذرات وجود نخواهد داشت؛ درنتیجه محصولات هیدراسیون در حوالی ذراتی که هیدراته می‌شوند به‌شدت انباشته خواهند شد. این امر به کندی 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 پایایی خمیر هیدراته‌ی سیمان می‌شود.[۵]

عامل مهم دیگر درکاهش خواص طولانی‌مدت بتن وقتی تحت دمای اولیه‌ی زیاد قرارگیرد، 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]

---

* نویسنده مسئول

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

در بررسی حاضر سعی شده با کمک سیستم مدل‌سازی حرارتی ــ که در آزمایشگاه تحقیقاتی بتن دانشگاه بوعلی‌سینا طراحی شده است ــ ضمن تولید رژیم حرارتی بتن‌های حجیم، روند کسب مقاومت و نیز جذب آب بتن‌های حاوی پوزولان و بدون پوزولان ارزیابی و با شرایط مراقبت نمونه‌ها (تحت شرایط استاندارد) مقایسه شود.

۲. طراحی آزمایش

۱.۲. مصالح مصرفی

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع ۲ (هگمتان) با نرمی $3570\ cm^2/g$ استفاده شده است. پوزولان طبیعی (پومیس قروه) که از گروه توف‌های آتشفشانی بوده به‌صورت پودرشده مورد استفاده قرارگرفته است. دوده‌ی سیلیسی مصرفی، محصول کارخانه‌ی فروسیلیس 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 سنگدانه‌ها به‌صورت اشباع با سطح خشک (SSD)[1] مورد استفاده قرارگرفته‌اند. بیشینه‌اندازه‌ی شن مصرفی ۱۹٫۵ mm و در دو محدوده‌ی ۴٫۷۵ تا ۱۲٫۵ میلی‌متر و ۱۲٫۵ تا ۱۹ میلی‌متر بوده است. دانه‌های نیمه‌شکسته و آهکی با چگالی ۲٫۶، و ماسه‌ی مصرفی ترکیبی از ماسه‌ی طبیعی و ماسه‌ی‌آهکی با چگالی ۲٫۶۷ و مدول نرمی ۲٫۹۱ بوده است. همچنین برای رسیدن به کارایی مطلوب و همگنی مخلوط، از نوعی فوق روان‌کننده با نام تجاری GLENIUM (۱۱۰M) 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_2O_3	۴٫۵۲	۱۲٫۱۳	-	۰٫۵-۱٫۷
Fe_2O_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_2O	۰٫۵۲	-	-	۰٫۲۵
K_2O	۰٫۷۲	۳٫۰۵	-	۰٫۱۵-۱
[1] LOI (٪)	-	۰٫۴۸	۱٫۲۸	-
[2] SS (cm^2/g)	۳۵۷۰	۴۵۰۰	-	۱۴۰۰۰
[3] SG (g/cm^3)	۳٫۱	۲٫۹۱	۲٫۴۳	۲٫۲۱

[1]. افت سرخ‌شدن: loss on ignition (LOI)

[2]. سطح مخصوص: specific surface (SS)

[3]. چگالی نسبی: specific gravity (SG)

۲.۲. طرح اختلاط

در این تحقیق هشت طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۰، 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 طرح‌ها مقدار فوق روان‌کننده‌ی مورد استفاده یکسان و برابر ۰٫۶ درصد وزنی سیمان است. بلافاصله بعد از فرایند ساخت و اختلاط بتن، آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTMC۱۴۳ انجام شد. جزئیات طرح اختلاط و نسبت‌های مواد و مصالح به کار رفته در ساخت بتن‌ها در جدول ۲ آمده است.

۳.۲. شرح دستگاه

هسته‌ی بتن‌های حجیم تحت رژیم حرارتی ناشی از هیدراسیون سیمان قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی هسته و تهیه‌ی نمونه‌هایی که تحت شرایط حرارتی هسته‌ی بتن حجیم عمل‌آوری شده باشند، از سیستم عمل‌آوری حرارتی بتن (TMCS)[2] استفاده شده است. این سیستم که در آزمایشگاه تحقیقاتی بتن و مواد سازه‌یی دانشگاه بوعلی‌سینا طراحی و اجرا شده، قادر است رژیم حرارتی تولیدشده ناشی از حرارت هیدراسیون نمونه‌ی بتنی را در شرایط نیمه‌آدیاباتیک و با فاصله‌ی زمانی ۱ دقیقه به یک دستگاه ثبات مدل CR۱۰X انتقال داده و پس از پردازش در حافظه‌ی رایانه ثبت کند. از سوی دیگر رژیم حرارتی مذکور به TMCS اعمال می‌شود تا بدین‌وسیله نمونه‌های نگه‌داری شده در محفظه تحت رژیم حرارتی معادل هسته‌ی بتن حجیم قرارگیرد. جزئیات این روند با ذکر تجهیزات مورد استفاده، در شکل ۱ نشان داده شده است.

۴.۲. نحوه‌ی تهیه و عمل‌آوری نمونه‌ها و آزمایش مقاومت فشاری

پس از ساخت هر سری بتن، یک نمونه‌ی استوانه‌یی ۳۰×۱۵ سانتی‌متری (در قالب مخصوص فلزی) مطابق استاندارد تهیه و درون محفظه‌ی نیمه‌آدیاباتیک قرار داده می‌شود. این محفظه شامل یک مخزن ایزوله‌ی مناسب است که نمونه‌ی بتن در آن قرار می‌گیرد. در این روش اجازه‌ی عبور مقدار کمی گرما ــ کم‌تر از $100\ J/(h.K)$ ــ از بدنه عایق وجود دارد.

بیست و دو نمونه‌ی مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری در قالب‌های ویژه (عایق‌در مقابل نفوذ آب) تهیه و پس از تراکم مناسب توسط میز لرزان، به داخل محفظه‌ی TMCS منتقل شد. نمونه‌ها در سنین مقرر از محفظه خارج و پس از قالب‌برداری تحت آزمایش قرار می‌گیرند. بعد از ۵ روز ــ که دمای نمونه‌ی نیمه‌آدیاباتیک تقریباً به دمای محیط رسید ــ تمامی نمونه‌ها از محفظه و قالب خارج، و در پلاستیک و در دمای محیط عمل‌آوری می‌شوند تا در سنین طولانی تحت آزمایش قرارگیرند.

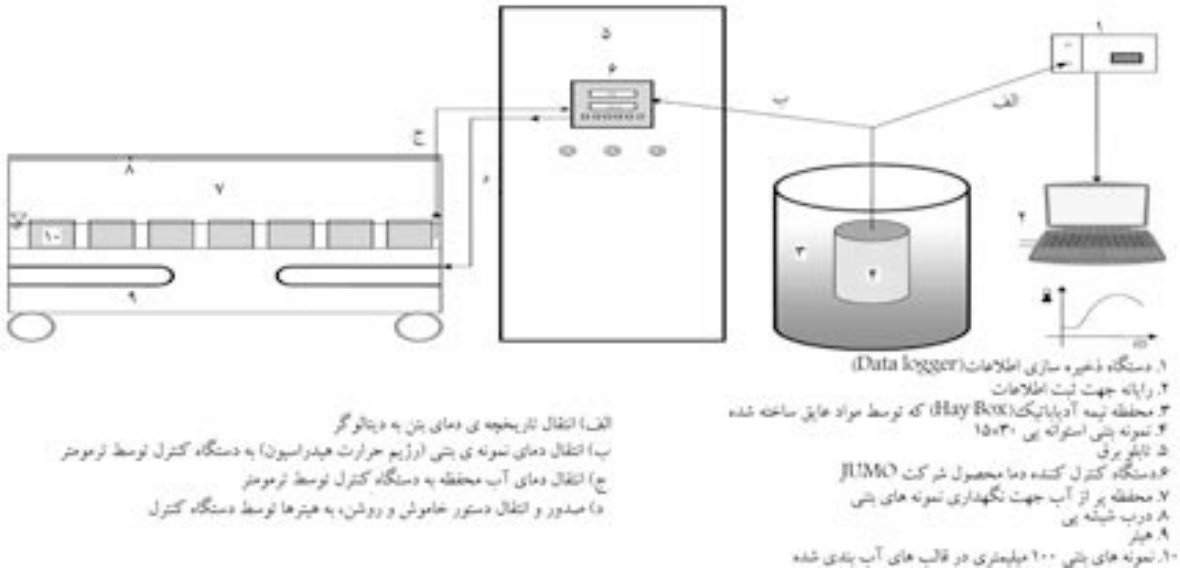
همچنین ۱۵ نمونه‌ی مکعبی در شرایط استاندارد قالب‌گیری می‌شوند. این نمونه‌ها به اتاق با دمای ۲±۲۳ و رطوبت ۹۰٪ منتقل می‌شوند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان انجام آزمایش در آب با دمای ۲±۲۰ عمل‌آوری می‌شوند.

نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در سنین ۱، ۲، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه توسط جک هیدرولیکی ADR ۲۰۰۰KN و با سرعت ۳ کیلو نیوتن بر ثانیه تحت آزمایش مقاومت فشاری قرارگرفتند. در نهایت مقاومت فشاری بتن در سن مقرر از میانگین مقاومت فشاری دو نمونه به‌دست آمد.

آزمایش جذب آب مطابقِ دستورالعمل BS ۱۸۸۱-Part ۱۲۲ انجام شد.[۱۱] براین اساس، در سن ۲۸ روز از هر طرح سه نمونه‌ی استاندارد و دو نمونه‌ی TMCS،

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

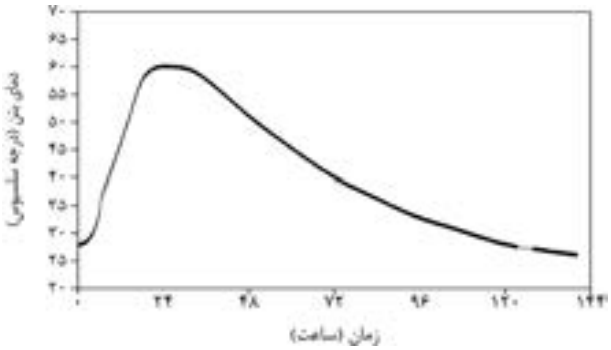
بتن	نسبت آب به مواد سیمانی	آب	سیمان	پوزولان طبیعی	خاکستر بادی kg/cm^3	میکروسیلیس	ماسه (SSD)	شن (SSD)	فوق روان‌کننده (٪)	اسلامپ (cm)
۸۰	۰/۳	۱۶۴/۷	۵۴۰	-	-	-	۸۶۵	۸۲۹	۰/۶	۱۵
۸۰P۱۵	۰/۳	۱۶۴/۷	۴۵۹	۸۱	-	-	۸۶۱	۸۲۸	۰/۶	۲۱
۸۰P۳۰	۰/۳	۱۶۴/۷	۳۷۸	۱۶۲	-	-	۸۵۹	۸۲۵	۰/۶	۲۲/۵
۸۰FA۱۵	۰/۳	۱۶۴/۷	۴۵۹	-	۸۱	-	۸۵۴	۸۲۰	۰/۶	-
۸۰FA۲۵	۰/۳	۱۶۴/۷	۴۰۵	-	۱۳۵	-	۸۴۷	۸۱۳	۰/۶	-
۸۰SF۵	۰/۳	۱۶۴/۷	۵۱۳	-	-	۲۷	۸۵۹	۸۲۵	۰/۶	۱۰/۵
۸۰SF۸	۰/۳	۱۶۴/۷	۴۹۶/۸	-	-	۴۳/۲	۸۵۶	۸۲۲	۰/۶	۱۶/۵
۸۰SF۱۱	۰/۳	۱۶۴/۷	۴۸۰/۶	-	-	۵۹/۴	۸۵۳	۸۲۰	۰/۶	۱۲



شکل ۱. محفظه‌ی طراحی‌شده برای اعمال شرایط رژیم دمایی به نمونه‌های بتنی (TMCS).

درون گرم‌خانه با دمای ۴۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۱۴ روز خشک می‌شوند. پس از خروج نمونه‌ها از گرم‌خانه، جرم نمونه‌ها در وضعیت خشک توزین شده و سپس در ظرف آب قرار داده می‌شوند.

نمونه‌ها مدت ۰/۵، ۱، ۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۱۶۸ ساعت درون آب باقی می‌مانند و سپس از آب خارج می‌شوند، و در وضعیت اشباع با سطح خشک توزین می‌شوند. این عمل به‌گونه‌یی انجام می‌شود که ارتفاع آب روی نمونه‌ها ۵±۲۵ میلی‌متر باشد. نتایج جذب آب اندازه‌گیری شده برای هر نمونه به‌عنوان افزایش جرم نمونه براثر غرق‌شدن در آب و برحسب درصدی از وزن خشک نمونه ارائه می‌شود.



شکل ۲. منحنی تاریخچه‌ی دمای نیمه‌آدیاباتیک بتن ۸۰.

۵.۲. تاریخچه‌ی دمای اعمال‌شده بر نمونه‌های بتنی

چنان‌که اشاره شد هر نمونه بتن تحت تاریخچه‌ی دمایی نیمه‌آدیاباتیک خود عمل‌آوری می‌شود. نمونه‌یی از تاریخچه‌ی دمایی اعمال‌شده (بتن ۸۰) در شکل ۲ ملاحظه می‌شود. مشخصات این منحنی برای تمامی بتن‌های ساخته‌شده ــ شامل دمای اولیه، دمای بیشینه و زمان دمای بیشینه ــ در جدول ۳ آورده شده است.

چنان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در بتن شاهد بیشینه‌دمای ناشی از هیدراسیون به ۶۱ درجه سلسیوس می‌رسد. با جایگزینی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی به‌جای بخشی از سیمان دمای بیشینه به‌ترتیب ۵ و ۱۱ درجه سلسیوس کاهش یافته است. اما افزودن میکروسیلیس تغییر محسوسی در دمای بیشینه ایجاد نکرده است. همچنین مدت زمان تأخیریِ منحنی نیمه‌آدیاباتیکِ تمامی بتن‌ها بیش از ۶ ساعت، و سرعت صعود و نزول آن بین ۱ تا ۲ درجه سلسیوس در هر ساعت است.

جدول ۳. مشخصات تاریخچه‌ی دمای نیمه‌آدیاباتیک.

بتن	دمای اولیه (درجه سلسیوس)	بیشینه‌ی دما (درجه سلسیوس)	زمان وقوع بیشینه‌ی دما (ساعت)
۸۰	۲۷/۵	۶۱	۲۳
۸۰P۱۵	۲۷/۵	۵۶	۲۹/۲۵
۸۰P۳۰	۲۷/۵	۵۰	۲۹/۵
۸۰FA۱۵	۲۷	۵۶	۳۵/۷۵
۸۰FA۲۵	۲۶/۵	۴۹/۵	۴۳
۸۰SF۵	۲۷	۵۹	۲۸/۵
۸۰SF۸	۲۶/۵	۶۰	۲۸
۸۰SF۱۱	۲۸	۶۰	۲۴/۷۵

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

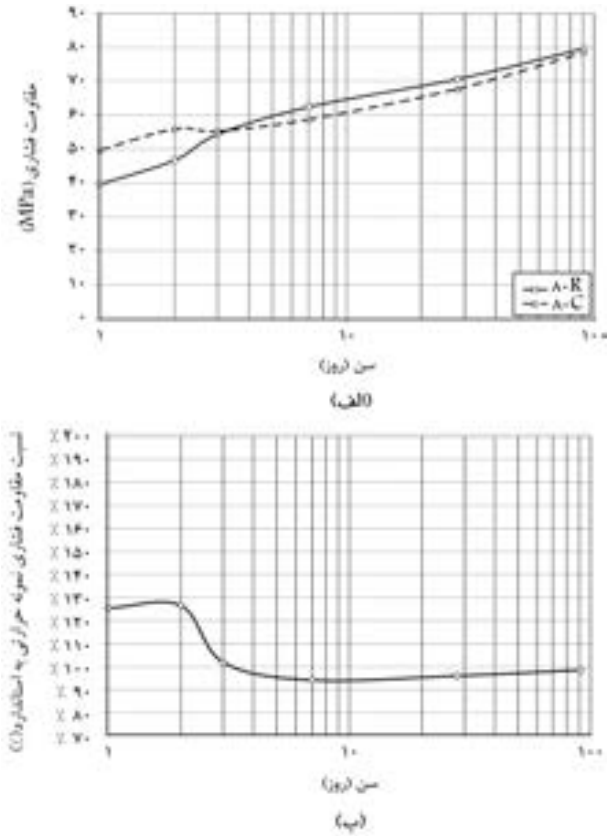
در شکل ۳ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن ۸۰ در دو نمودار مجزا نشان داده شده است. در شکل ۳الف نمودار توسعه‌ی مقاومت فشاری در دو شرایط استاندارد (R) و عمل‌آوری تحت رژیم هیدراسیون (C) ارائه شده است.

در شکل ۳ب، 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.

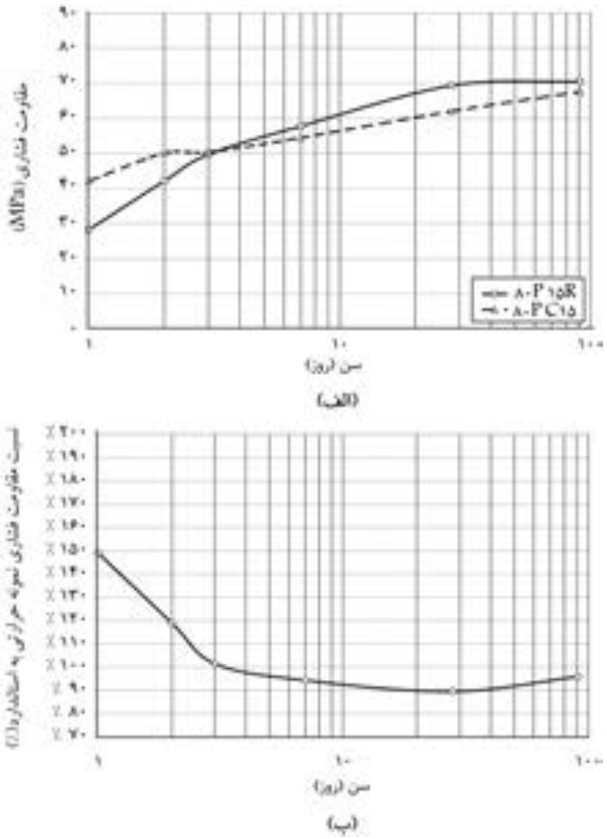
نسبت مقاومت نمونه‌های C به R در روز اول حدود ۱/۲۵ است. این نسبت با افزایش سن بتن کاهش یافته و در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز به‌ترتیب به ۱، ۰/۹۴ و ۰/۹۶ می‌رسد. ملاحظه می‌شود که بعد از ۷ روز، روند کسب مقاومت نمونه‌های هسته افزایش یافته و باعث کاهش اختلاف مقاومت در دو شرایط عمل‌آوری می‌شود. در طولانی‌مدت (۹۱ روز) 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).



شکل ۳. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).



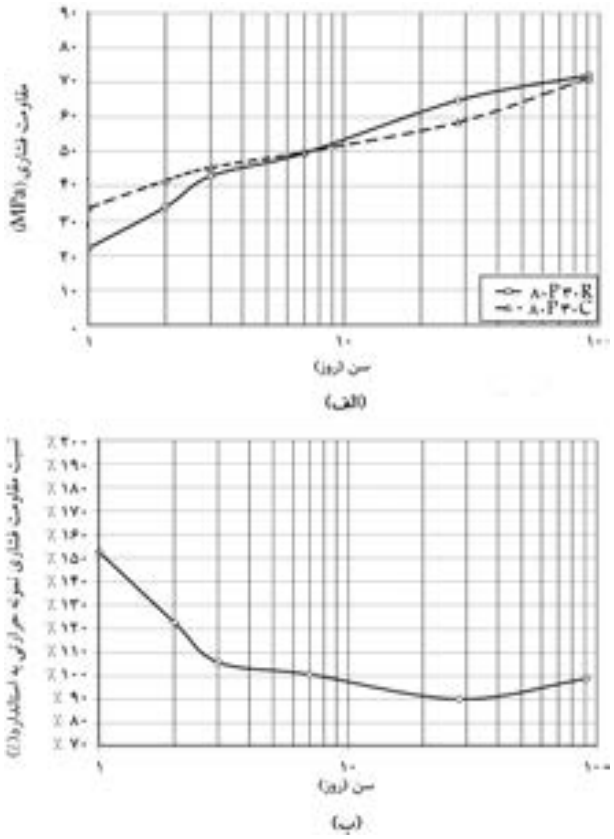
شکل ۴. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰P۱۵ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون(C).

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 سنین اولیه و بالعکس، و افزایش مقاومت نمونه‌های استاندارد در درازمدت است (شکل ۵).

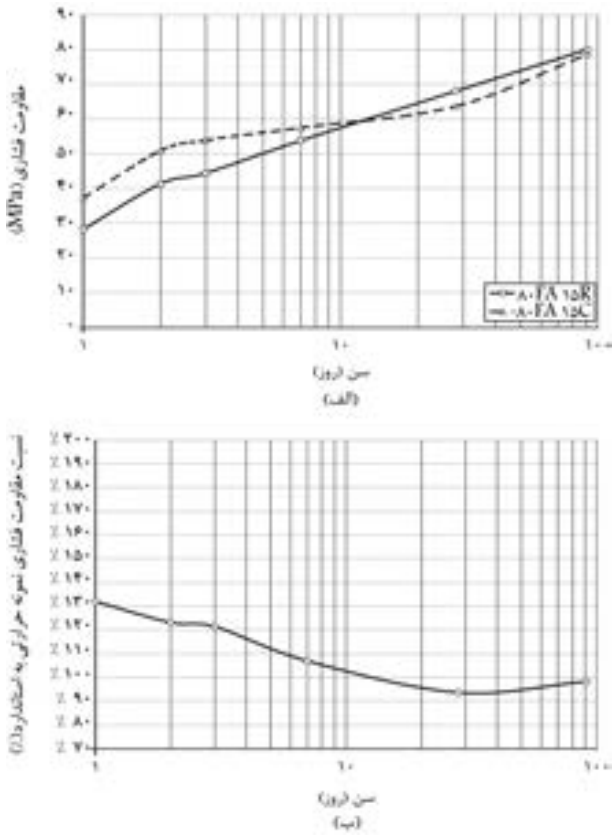
با توجه به نتایج به‌دست آمده، جایگزینی پوزولان طبیعی باعث کاهش بیشتر مقاومت نمونه‌های هسته در ۲۸ روز (نسبت به نتایج بتن شاهد) می‌شود. اما در سن ۹۱ روز، مقاومت در دو شرایط عمل‌آوری بسیار به هم نزدیک می‌شود.

۳.۱.۳. مقاومت فشاری بتن‌های حاوی خاکستر بادی

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



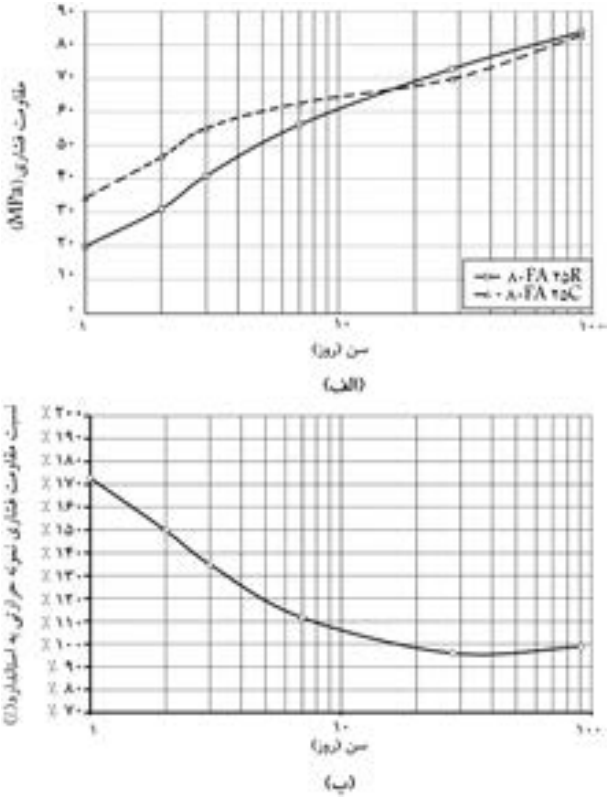
شکل ۵. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰P۳۰ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).



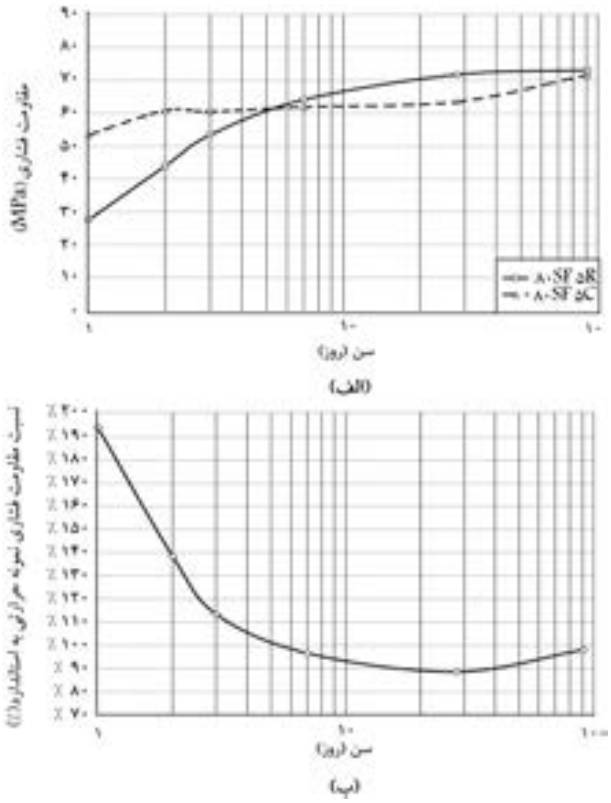
شکل ۶. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰FA۱۵ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

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

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



شکل ۷. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰FA۲۵ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).



شکل ۸. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰SF۵ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

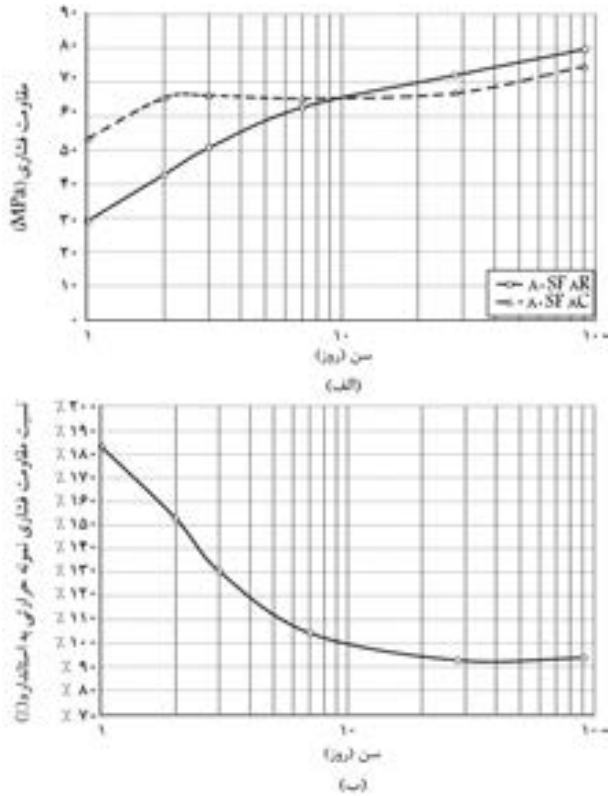
جالب در این بتن، مقاومت بیشتر نمونه‌های هسته نسبت به استاندارد، حتی بعد از ۷ روز است. این مسئله نشان‌گر تأثیرپذیری زیاد بتن حاوی خاکستر بادی از عمل‌آوری حرارتی است. این در حالی است که نتایج مقاومت در درازمدت تقریباً مشابه بتن‌های قبلی است.

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. بدین‌ترتیب نتایج حاصله نشان می‌دهد که مصرف پوزولان طبیعی و خاکستر بادی در بتن‌های حجیم نه‌تنها 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 آزادشدن حرارت ناشی از هیدراسیون سیمان در مقاطع حجیم بتنی نه‌تنها عاملی منفی محسوب نخواهد شد، بلکه باعث بهبود هیدراسیون پوزولان‌ها می‌شود.

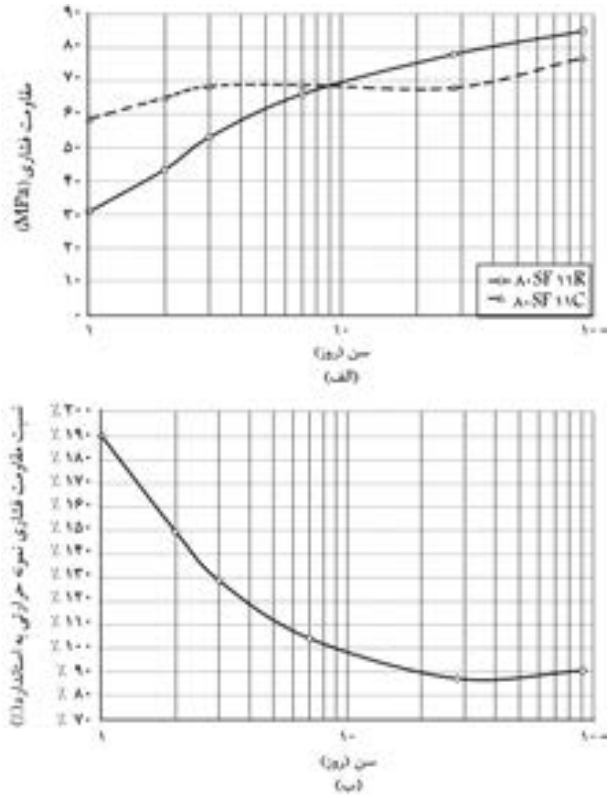
۴.۱.۳. مقاومت فشاری بتن‌های حاوی میکروسیلیس

نتایج مقاومت فشاری یک‌روزه‌ی 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 به‌ترتیب حدود ۰٫۸۹، ۰٫۹۳



شکل ۹. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰SF۸ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).



شکل ۱۰. روند کسب مقاومت فشاری بتن ۸۰SF۱۱ در شرایط استاندارد (R) و تحت رژیم هیدراسیون (C).

و ۰٫۹ 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_3S و C_3A 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.

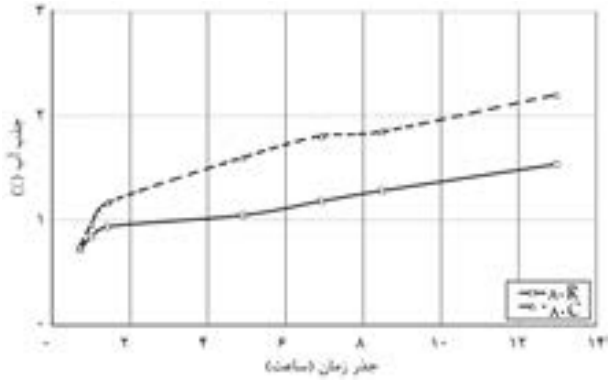
۲.۳. جذب آب

چنان که اشاره شد، عمل‌آوری بتن در دمای زیاد به توزیع غیریکنواخت محصولات هیدراسیون منجر می‌شود. به‌همین 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.

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

بتن	جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه)		جذب آب نهایی (۷ روز)	
	R	C	R	C
۸۰	۰٫۷۲	۰٫۷۵	۱٫۵۳	۲٫۲
۸۰P۱۵	۱٫۰۴	۰٫۹۱	۱٫۷۹	۱٫۷۵
۸۰P۳۰	۰٫۸۵	۰٫۷۵	۱٫۵۴	۱٫۴۵
۸۰FA۱۵	۰٫۷۸	۰٫۶۳	۱٫۳۸	۱٫۲۲
۸۰FA۲۵	۰٫۷۶	۰٫۸۱	۱٫۷۱	۱٫۸
۸۰SF۵	۰٫۶۵	۰٫۵۸	۱٫۰۸	۱٫۱۷
۸۰SF۸	۰٫۸	۰٫۵۹	۱٫۲۵	۱٫۱
۸۰SF۱۱	۰٫۷۹	۰٫۵۱	۱٫۴۱	۱٫۳۹



شکل ۱۱. آهنگ جذب آب بتن ۸۰ در شرایط استاندارد و TMCC.

۱.۲.۳. جذب آب بتن بدون افزودنی معدنی

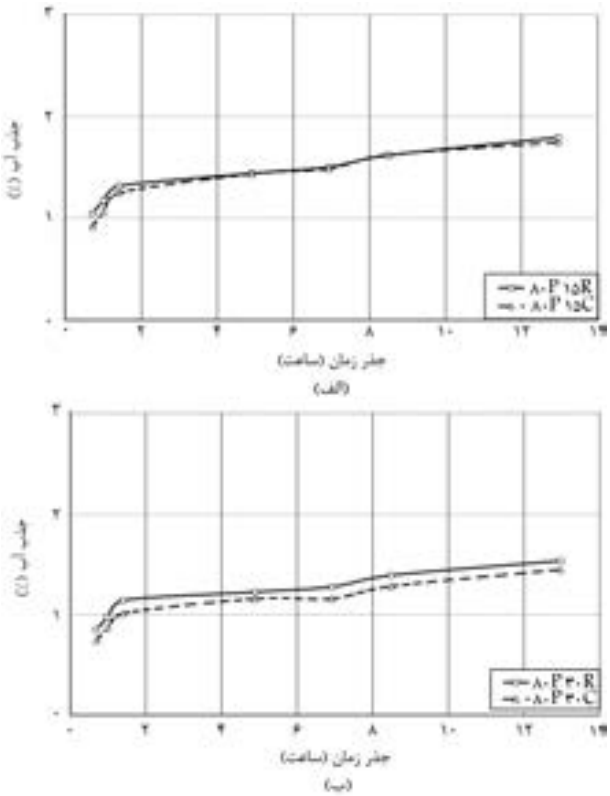
نتایج درصد جذب آب نمونه‌های شاهد در دو شرایط استاندارد و حرارتی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، میزان جذب آب در نمونه‌های حرارتی طی ۷ روز بیشتر از نمونه‌های استاندارد است. اختلاف درصد جذب آب در نیم‌ساعت و ۷ روز غوطه‌وری، به‌ترتیب ۹۶٪ و ۶۹٪ است. به‌عبارت دیگر در بتن ۸۰، نمونه‌های هسته‌ی ستون‌های حجیم نسبت به نمونه‌های استاندارد دارای تخلخل بیشتری هستند.

۲.۲.۳. جذب آب بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی

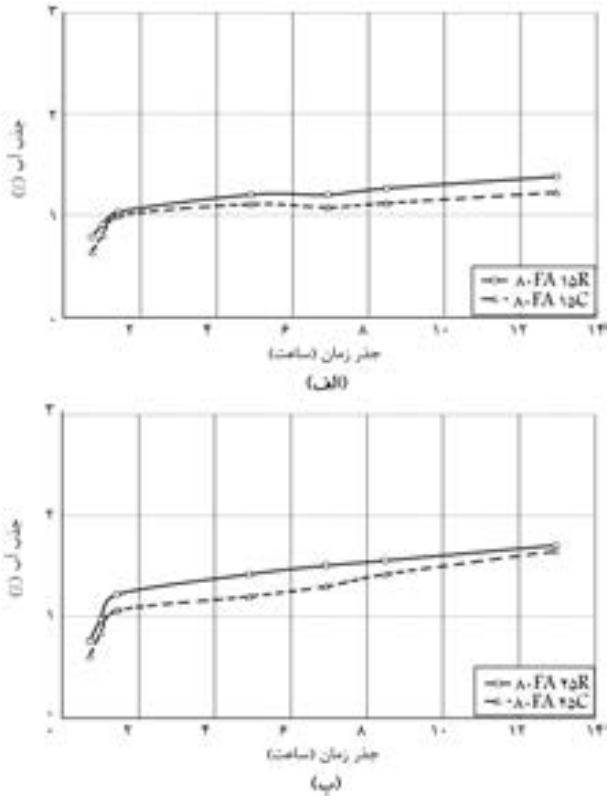
مصرف پوزولان طبیعی باعث کاهش اختلاف جذب آب در دو شرایط عمل‌آوری (نسبت به بتن شاهد) می‌شود. منحنی جذب آب نمونه‌های حاوی ۱۵٪ پوزولان طبیعی، در هر دو شرایط تقریباً بر هم منطبق شوند. اما با افزایش مقدار مصرف این ماده، جذب آب نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط هسته کم‌تر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد 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 هسته کم‌تر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد باشد. با افزایش مقدار مصرف این ماده، تغییر خاصی در اختلاف جذب آب در



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

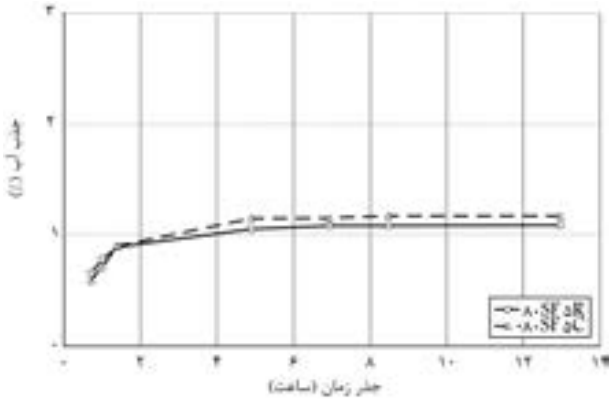


شکل ۱۳. آهنگ جذب آب بتن‌های حاوی خاکستر بادی در شرایط استاندارد و TMCC.

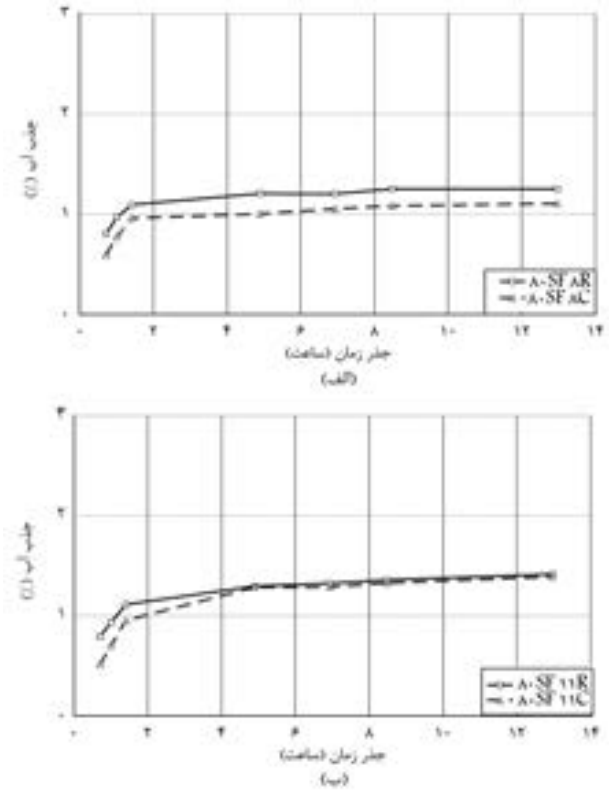
مقایسه با بتن ۸۰FA۱۵ صورت نمی‌گیرد (شکل ۱۳). درنتیجه می‌توان گفت که مصرف خاکستر بادی در ستون‌های حجیم با مقاومت زیاد باعث پرشدن سریع‌ترِ حفرات خالی بتن از محصولات هیدراسیون می‌شود. اما افزایش مقدار خاکستر بادی اثر محسوسی بر جذب آب ندارد.

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



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

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

۴. نتیجه‌گیری

نمونه‌های مدل‌سازی‌شده 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 به‌تدریج با گذشت زمان (تا ۲۸ روز) افزایش می‌یابد، به‌طوری 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 اعمال‌شده در این تحقیق که دارای ویژگی‌هایی همچون زمان تأخیر اولیه‌ی 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 دسته‌یی از واکنش‌ها تا سن ۲۸ روز می‌شود. از آن پس با آغاز این واکنش‌ها شاهد تسریعِ روند کسب مقاومت نمونه‌های حرارتی هستیم. درنتیجه اساساً سن ۲۸ روز زمان مناسبی برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌های حجیم نیست.

جایگزینی پوزولان طبیعی گرچه باعث افت مقاومت نمونه‌های هسته در ۲۸ روز به‌میزان 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 مؤثربودن افزودن پوزولان برای کاهش حجم منافذ تا سن مشخص است.

پانوشت

1. Saturated Suface 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 Doctore 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.; Bhatty, J.I. and Bhattacharja, S., *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements,* Portland Cement Association (1998).