

تأثیر عمل‌آوری حرارتی هسته و سطح ستون‌های حجیم بر مقاومت دراز مدت بتن با مقاومت زیاد

محمود نیلی^{i*}؛ امیرمسعود صالحیⁱⁱ

چکیده

موضوع تحقیق حاضر، مقایسه مقاومت فشاری سطح و هسته ستون‌های حجیم، با نمونه‌های استاندارد می‌باشد. بدین‌منظور ۸ طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۳ ساخته شد. علاوه بر طرح شاهد (بدون مواد جایگزین سیمان)، نمونه‌هایی با جایگزینی پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس بجای درصدی از وزن سیمان تهیه گردید. پس از ساخت بتن، نمونه حرارتی در داخل محفظه نیمه آدیاباتیک قرار گرفته و تاریخچه دمایی توسعه یافته، به دستگاه ویژه عمل‌آوری نمونه‌های مقاومتی انتقال می‌یابد. برای مدل‌سازی بتن هسته و سطح ستون‌های حجیم، در زمان مقرر نمونه‌ها از شرایط یاد شده خارج و تا سن آزمایش بطور ویژه عمل‌آوری می‌شوند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در بتن‌های بدون پوزولان و حاوی پوزولان‌های طبیعی و خاکستر بادی، افزایش زمان قالب‌برداری باعث کسب مقاومت بیشتر نمونه‌های سطحی می‌شود. اما برداشت سریع‌تر قالب‌ها از روی بتن حاوی میکروسیلیس، باعث بهبود کسب مقاومت این نمونه‌ها می‌شود. همچنین میکروسیلیس باعث افت بیشتر مقاومت نمونه‌ها در شرایط هسته می‌شوند.

کلمات کلیدی

بتن حجیم، قالب برداری ۲۴ و ۴۸ ساعت، بتن مقاومت زیاد، پوزولان

Effect of Heat Curing in Core and Surface of Massive Concrete Structures on long term Strength of High Strength Concrete

M. Nili; A. M. Salehi

ABSTRACT

The properties of the surface and the core, due to the hydration heat development, are normally different in mass concrete. In the present paper, hydration heat regime was applied on a cabinet contain specimens, with 0.3 water/cement ratio, to examine the influence of heat development on strength properties. Natural pozzolan, fly ash and silica fume were used, as partial replacement for cement in the predetermined specimens. The samples were taken after 1, 2 and 5 days from cabinet, to simulate surface and core of mass concrete, and then were cured in special conditions. The results indicated that strength of the natural pozzolan and fly ash samples, which were taken after 2 days from heat cabinet, attained maximum strength. While, strength of the silica fume specimens promoted when 1-day remolding time was used. Furthermore, silica fume adversely diminished compressive strength of the core specimens.

KEYWORD:

Mass Concrete, Pozzolan, Remolding time, High strength concrete

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۹/۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۲/۲۰

ⁱ * نویسنده مسئول و استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، آدرس پست الکترونیکی nili36@yahoo.ac.uk

ⁱⁱ کارشناس ارشد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، آدرس پست الکترونیکی ams_salehi@yahoo.com

۱- مقدمه

در زمان‌های نه‌چندان دور فرض می‌شد که دمای عمل‌آوری بالا در پایه پل‌ها مشکلی ایجاد نمی‌کند و این مشکل منحصر به سدها و اعضای بتن پیش‌ساخته است. اما بزرگتر شدن اعضای زیرین پل‌ها و همچنین افزایش نرمی و میزان سیمان موجود در بتن، باعث افزایش بیشتر دمای هسته مقاطع شده است. این مسأله منجر به ترک‌های حرارتی، کاهش مقاومت دراز مدت بتن و تغییرات در تخلخل و اندازه منافذ در خمیر هیدراته شده سیمان می‌شود. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که عمل‌آوری در حرارت، بر دوام بتن نیز تأثیر داشته باشد [۳]، [۸]، [۱۰].

شاید حداکثر دمای عمل‌آوری مهم‌ترین فاکتور در عمل‌آوری حرارتی است که ممکن است با افزایش آن، بهبود در خواص بتن در سنین اولیه دیده شود. اما باعث کاسته شدن از توانایی بتن در دراز مدت و همچنین کاهش دوام آن شود. مطالعات مختلف نشان از یک حداکثر دمای عمل‌آوری حرارتی مناسب در حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد می‌دهد [۵]، [۷].

Kjellsen و Detwiller [۹]، ریز ساختار خمیر سیمان عمل‌آوری شده در محدوده دمای ۵۰-۵ درجه سانتیگراد را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که دماهای پایین، منجر به توزیع یکنواخت محصولات هیدراسیون می‌شود. در حالیکه دمای بالا منجر به ایجاد ساختار نرات درشت‌تری می‌شوند.

توجه دیگر در کاهش مقاومت دراز مدت بتن عمل‌آوری شده در دمای بالا ممکن است تا حدی به دلیل وجود ترک‌های خیلی ریز ناشی از انبساط حباب‌های هوای محبوس در خمیر سیمان نهفته باشد. Alexanderson [۲] عنوان کرد که مقاومت کاسته شده ناشی از ریزترک‌های داخلی، به‌عنوان نتیجه‌ای از فشار در حفرات هوا در طی کاربرد حرارت است. در صورت به تعویق انداختن کاربرد حرارت در عمل‌آوری بتن تازه، مقاومت کششی اجازه پیشرفت می‌یابد و از تشکیل ریزترک‌های داخلی در طی عمل‌آوری حرارتی به مقدار زیادی کاسته خواهد شد.

عامل مهم دیگر در کاهش مقاومت دراز مدت و افت دوام، تأخیر در تشکیل اترینگایت است. این پدیده اثر کاهنده قوی بر خواص دراز مدت بتن در برابر دمای بالاتر از ۷۰ درجه سانتیگراد در سنین اولیه، دارد [۴]، [۶]، [۱۱].

اما جایگزینی پوزولان در عمل‌آوری حرارتی می‌تواند باعث کاهش اثرات مخرب شود. بعنوان مثال زمانی که بتن در برابر حرارت‌های بطور قابل‌توجهی زیادتر از معمول (به دلیل حرارت هیدراسیون یا هر علت دیگری) قرار می‌گیرد، بیشتر بتن‌های دارای مواد افزودنی معدنی افزایش مقاومت نشان می‌دهند که

دلیل آن اینست که این بتن‌ها ممکن است از فعال‌سازی حرارتی برای تسریع واکنش پوزولانی بهره ببرند.

بنابراین به نظر می‌رسد کنترل کیفیت بتن به‌روش سنتی (استاندارد)، ارائه دهنده خواص واقعی بتن در نقاط مختلف ستون‌های حجیم نمی‌باشد. بدین منظور در تحقیق حاضر با عمل‌آوری نمونه‌های مکعب ۱۰۰ میلیمتری در شرایط هسته و پوسته ستون‌های حجیم (از نظر دما و رطوبت)، مقاومت فشاری این نمونه‌ها با نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد مقایسه شده است.

۲- طراحی آزمایش

۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت بتن از سیمان پرتلند نوع دو با نرمی $2570 \text{ cm}^2/\text{g}$ استفاده شده است. پوزولان طبیعی (پومیس قروه) از گروه توف‌های آتشفشانی بوده که به میزان مناسب آسیاب شده است. دوده سیلیسی مصرفی، محصول کارخانه فروسیلیس ایران و خاکستر بادی آفریفای جنوبی با کلسیم کم (نوع F) در این تحقیق مورد استفاده گرفته است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی مصرفی

خواص	سیمان	پوزولان طبیعی	خاکستر بادی	میکرو سیلیس
SiO ₂	۲۱/۴۴	۵۳/۶۸	۵۶/۹۶	۸۵-۹۵
Al ₂ O ₃	۴/۵۲	۱۲/۱۲	۲۵/۷۶	۰/۵-۱/۷
Fe ₂ O ₃	۳/۶۹	۷/۰۴	۶/۵	۰/۴-۲
CaO	۶۳/۵۴	۹/۴۳	۴-۱۰	-
MgO	۱/۴۸	۹/۰۲	۲/۵	-
SO ₃	۲/۲۶	۲/۵۲	<۰/۳۵	-
Na ₂ O	۰/۵۲	-	۰/۱۴	۰/۱۵-۰/۲
K ₂ O	۰/۷۲	۳/۰۵	۰/۱۴	۰/۱۵-۱/۰۲
LOI (%)	-	۰/۴۸	۱/۲۸	۱/۵-۲/۵
SS(cm ² /g)	۳۵۷۰	۴۵۰	-	۱۴۰۰۰
SG(g/cm ³)	۳/۱	۲/۹۱	۲/۴۳	۲/۳۱

LOI: Loss on ignition, SS: Specific surface, SG: Specific gravity.

سنگدانه‌های درشت مصرفی در این تحقیق دارای حداکثر اندازه ۱۹/۵mm، نیمه‌شکسته و آهکی با چگالی ۲/۶ است. همچنین ریزدانه (ماسه) مورد استفاده دارای چگالی ۲/۶۷ و مدول نرمی ۲/۹۳ می‌باشد. برای دستیابی کارایی مناسب، فوق روان‌کننده با نام تجاری GLENIUM (110M) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق، ۸ طرح مخلوط با نسبت آب به سیمان ۰/۳۰ ساخته شده است. علاوه بر طرح شاهد، جایگزینی پوزولان



طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس با مقادیر مشخص انجام جدول (۲) آورده شده است.
شده است مقادیر طرح اختلاط در

جدول (۲): مقادیر طرح اختلاط بتن (وزن مصالح سنگی در حالت اشباع با سطح خشک می باشد)

بتن	آب	سیمان	پوزولان طبیعی	خاکستر بادی	میکرو سیلیس	سنگدانه ریز	سنگدانه درشت	فوق روان کننده	اسلامپ
								(%)	cm
						Kg/m ³			
۸۰	۱۶۴/۷	۵۴۰	-	-	-	۸۶۵	۸۲۹	-۰/۶	۱۵
۸۰-P۱۵	۱۶۴/۷	۴۵۹	۸۱	-	-	۸۶۱	۸۲۸	-۰/۶	۲۱
۸۰-P۳۰	۱۶۴/۷	۳۷۸	۱۶۲	-	-	۸۵۹	۸۲۵	-۰/۶	۲۲/۵
۸۰-FA۱۵	۱۶۴/۷	۴۵۹	-	۸۱	-	۸۵۴	۸۲۰	-۰/۶	-
۸۰-FA۲۵	۱۶۴/۷	۴۰۵	-	۱۳۵	-	۸۴۷	۸۱۳	-۰/۶	-
۸۰-SF۵	۱۶۴/۷	۵۱۳	-	-	۲۷	۸۵۹	۸۲۵	-۰/۶	۱۰/۵
۸۰-SF۸	۱۶۴/۷	۴۹۶/۸	-	-	۴۳/۲	۸۵۶	۸۲۲	-۰/۶	۱۶/۵
۸۰-SF۱۱	۱۶۴/۷	۴۸۰/۶	-	-	۵۹/۴	۸۵۳	۸۲۰	-۰/۶	۱۲

نیمه آدیباتیک عمل آوری می شوند. بعد از ۲۴ و ۴۸ ساعت ۴ نمونه از محفظه و قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش در هوای آزاد نگهداری می شوند. این مدل برای شرایطی است که قالب برداری از روی بتن های حجیم بعد از یک یا دو روز صورت گرفته و لایه سطحی در معرض هوای محیط (بدون عمل آوری رطوبتی) قرار خواهد گرفت. برای مدل سازی نمونه های هسته مقاطع حجیم، بعد از ۵ روز - که دمای نمونه نیمه آدیباتیک نزدیک به دمای محیط رسیده است - نمونه ها از محفظه و قالب خارج شده و در پلاستیک (بدون تبادل رطوبت با محیط خارج) و در دمای محیط عمل آوری می شوند.

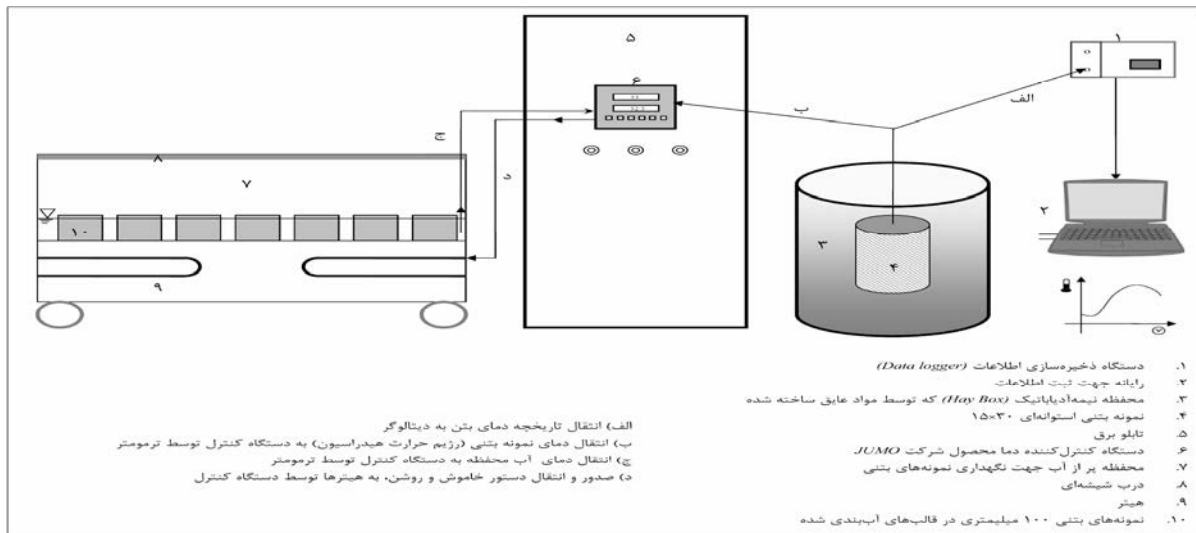
علاوه بر این، نمونه های استاندارد برای ارزیابی، قالب گیری می شود. این نمونه ها به اتاق با دمای 23 ± 2 و رطوبت ۹۰٪ منتقل می شوند. پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان انجام آزمایش در آب با دمای 20 ± 2 عمل آوری می شوند.

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های عمل آوری شده در سنین ۲۸ و ۹۱ روز توسط چک هیدرولیکی ADR ۲۰۰۰ KN با سرعت ۳ kN/S انجام شد و مقاومت فشاری بتن در سن مقرر از میانگین مقاومت فشاری دو نمونه بدست آمد.

۳-۲- چگونگی تهیه و عمل آوری نمونه ها و آزمایش مقاومت فشاری

پس از ساخت هر طرح اختلاط، بتن مطابق استاندارد در یک قالب ویژه استوانه ای 15×30 سانتیمتری ریخته شده و درون محفظه نیمه آدیباتیک قرار داده می شود. قبل از بسته شدن درب محفظه، دو سنسور حرارتی (ترمومتر) داخل نمونه بتن قرار می گیرد. از طریق سنسور اول، دمای بتن در هر یک دقیقه توسط دیتالوگر و از طریق نرم افزار Guardian و PC۲۰۰W به طور اتوماتیک جمع آوری می گردد. از طریق سنسور دوم دمای بتن در هر دقیقه به دستگاه Temperature Matched Curing Cabinet (TMCC) انتقال می یابد. این دستگاه شکل (۱) برای عمل آوری نمونه های بتنی در شرایط دمایی مورد نظر طراحی شده است (در این تحقیق مدل دمایی بطور مستقیم از محفظه نیمه آدیباتیک گرفته شده است).

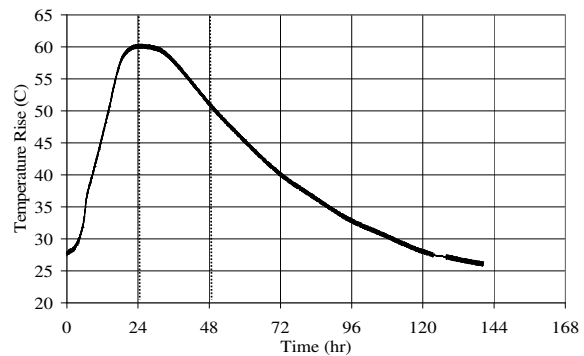
بتن در قالب های مکعبی ۱۰۰ میلیمتری ویژه (عایق در مقابل نفوذ آب) ریخته شده و پس از تراکم مناسب (توسط میز لرزان)، بداخل محفظه TMCC منتقل می گردند. بدین ترتیب نمونه های واقع در محفظه TMCC، تحت دمای بتن در شرایط



شکل (۱): محفظه طراحی شده برای اعمال شرایط رژیم دمایی به نمونه‌های بتنی (TMCC)

۴-۲- تاریخچه دمای اعمال شده بر نمونه‌های بتنی

همانطور که اشاره شد هر بتن تحت تاریخچه دمایی نیمه‌آدیاباتیکی خود عمل‌آوری می‌گردد. نمونه‌ای از تاریخچه دمایی اعمال شده (بتن ۸۰) در شکل (۲) ملاحظه می‌شود. مشخصات این منحنی برای هر بتن شامل دمای اولیه، دمای حداکثر و دما بعد از ۲۴ و ۴۸ ساعت در جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۲): منحنی تاریخچه دمای نیمه‌آدیاباتیکی بتن ۸۰

جدول (۳): مشخصات تاریخچه دمای نیمه‌آدیاباتیکی

بتن	دمای اولیه	حداکثر دما	دمای ۲۴ و ۴۸ ساعته	
			۲۴ ساعته	۴۸ ساعته
۸۰	۲۷/۵	۶۱	۶۱	۵۱
۸۰-P15	۲۷/۵	۵۶	۵۴	۵۱/۵
۸۰-P20	۲۷/۵	۵۰	۴۷/۵	۴۷
۸۰-FA15	۲۷	۵۶	۴۶	۵۴
۸۰-FA25	۲۶/۵	۴۹/۵	۳۸/۵	۴۹
۸۰-SF5	۲۷	۵۹	۵۸	۵۵/۵
۸۰-SF8	۲۶/۵	۶۰	۵۸/۵	۵۶/۵
۸۰-SF11	۲۸	۶۰	۵۹	۵۲

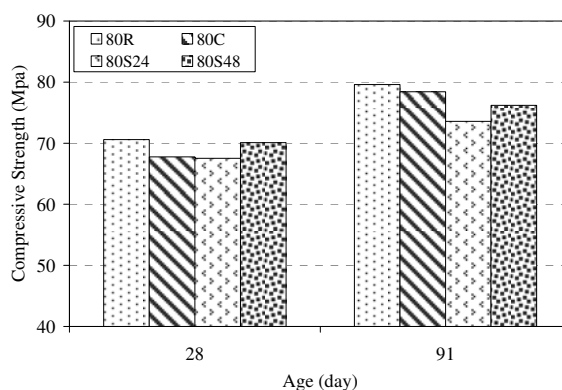
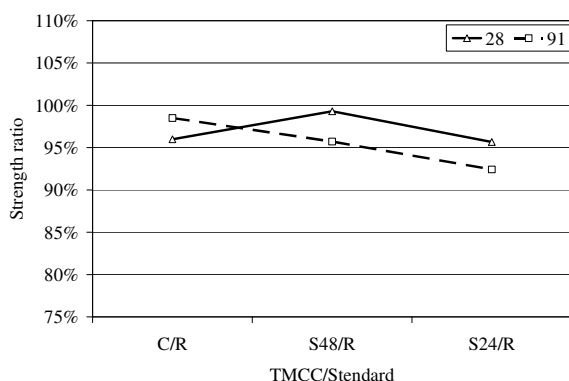
۳- نتایج و تحلیل‌ها

نتایج مقاومت فشاری بتن‌ها در شرایط عمل‌آوری مختلف در جدول (۴) آورده شده است.

۳-۱- مقاومت فشاری بتن بدون افزودنی معدنی

در شکل (۳) نتایج مقاومت بتن شاهد دیده می‌شود. در نمودار اول، مقاومت فشاری درازمدت بتن در سنین ۲۸ و ۹۱ روز بصورت ستونی نشان داده شده است. علاوه بر این برای بررسی تأثیر عمل‌آوری‌های مختلف، نسبت مقاومت نمونه‌های C، S۴۸ و S۲۴ به مقاومت نمونه استاندارد محاسبه و در نمودار دوم ارائه شده است.

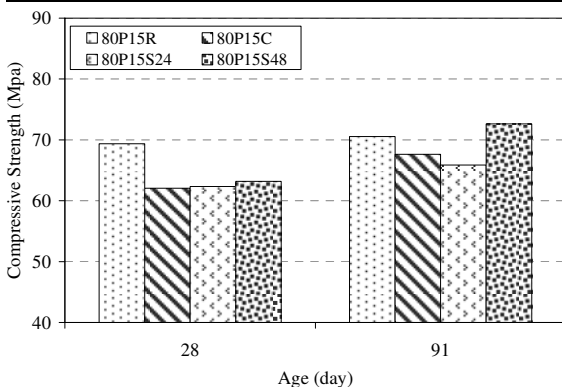
در بتن ۸۰، در دراز مدت، نمونه‌های استاندارد دارای بیشترین مقاومت و نمونه‌های S۲۴ دارای کمترین مقاومت است. با توجه به نتایج نسبت مقاومت‌ها، نمونه‌های C در ۲۸ روز افت مقاومتی نزدیک به ۴٪، در مقایسه با نمونه‌های استاندارد دارند. اما این نمونه‌ها در فاصله ۲۸ تا ۹۱ روز روند کسب مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های استاندارد داشته و باعث کاهش اختلاف مقاومتی در سن ۹۱ روز می‌شود. با توجه به نتایج نمونه‌های S۲۴ و S۴۸، دیده می‌شود که افزایش زمان



شکل (۳): منحنی‌های بتن ۸۰

جدول (۴): مقاومت فشاری بتن‌ها در شرایط استاندارد (R)، هسته (C)، سطح با قالب‌برداری ۲۴ (S۲۴) و ۴۸ (S۴۸) ساعته

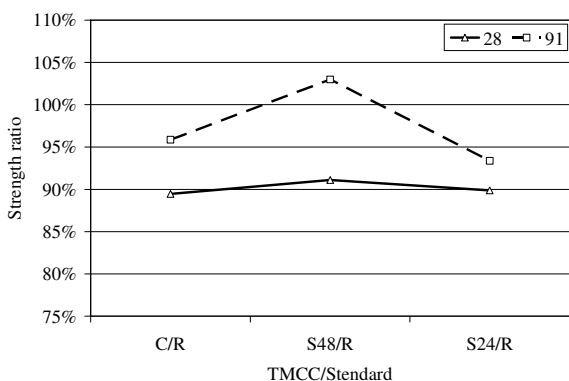
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)								بتن
روز ۹۱				روز ۲۸				
S۴۸	S۲۴	C	R	S۴۸	S۲۴	C	R	
۷۶/۲۱	۷۳/۵۸	۷۸/۴۲	۷۹/۶۱	۷۰/۱۱	۶۷/۵۵	۶۷/۷۷	۷۰/۶۱	۸۰
۷۲/۶۴	۶۵/۸۵	۶۷/۶۲	۷۰/۵۴	۶۳/۱۹	۶۲/۳۴	۶۲/۰۵	۶۹/۳۶	۸۰-P۱۵
۶۷/۹۹	۶۴/۰۵	۷۱/۱۹	۷۲/۰۵	۶۲/۱۳	۵۹/۳۵	۵۸/۴۴	۶۴/۷۸	۸۰-P۳۰
۸۱/۵۹	۶۸/۸۷	۷۸/۶۶	۸۰/۰۵	۷۱/۹۲	۶۴/۸۹	۶۳/۶۹	۶۸/۰۲	۸۰-FA۱۵
۷۵/۶۹	۶۳/۶۴	۸۲/۸۸	۸۳/۹۲	۷۲/۲۱	۶۰/۱۴	۶۹/۸۶	۷۲/۸۱	۸۰-FA۲۵
۶۸/۶۰	۷۳/۲۰	۷۱/۵۸	۷۳/۰۲	۷۰/۴۴	۷۰/۳۲	۶۳/۴۳	۷۱/۶۷	۸۰-SF۵
۶۳/۴۶	۸۰/۴۹	۷۴/۷۰	۷۹/۷۱	۶۳/۹۹	۷۵/۸۲	۶۶/۷۹	۷۲/۰۵	۸۰-SF۸
۷۹/۵۷	۸۳/۵۹	۷۶/۸۸	۸۴/۹۰	۷۷/۱۰	۷۴/۶۳	۶۷/۹۳	۷۷/۹۴	۸۰-SF۱۱



قالب‌برداری باعث کسب مقاومت بیشتر نمونه‌های سطحی در دراز مدت می‌شود. تأثیر نامناسب قالب‌برداری در سن ۹۱ روز تشدید می‌شود. چون برخلاف نمونه‌های C که بعد از ۲۸ روز با افزایش روند کسب مقاومت، مقداری از افت مقاومت ۲۸ روزه خود را نسبت به نمونه‌های استاندارد جبران کرده‌اند، نمونه‌های S۲۴ و S۴۸ بعد از ۲۸ روز نیز دارای روند کسب مقاومت کمی بوده که باعث افت بیشتر مقاومت این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های استاندارد می‌شود.

۳-۲- مقاومت فشاری بتن حاوی پوزولان طبیعی

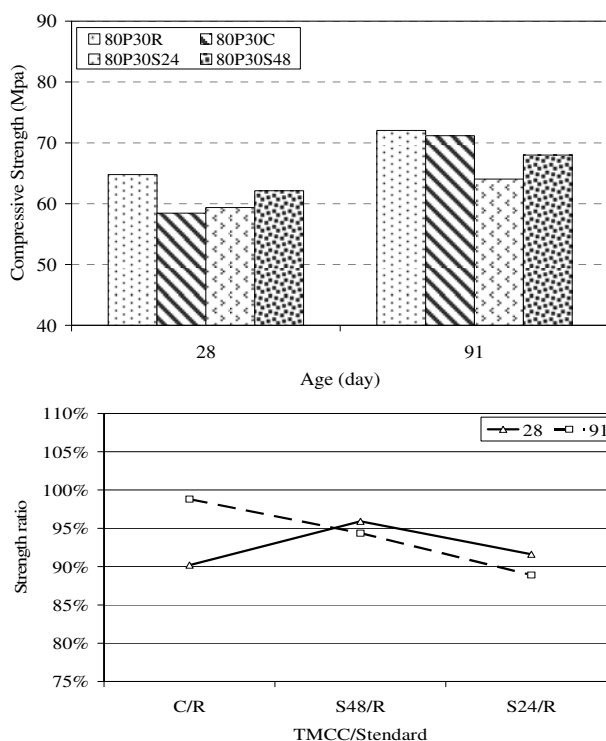
جایگزینی ۱۵٪ پوزولان طبیعی، باعث کاهش بیشتر مقاومت بتن‌های سطحی و هسته در ۲۸ روز می‌شود (نسبت به بتن شاهد). اما این کاهش به مقدار زیادی تا ۹۱ روز جبران می‌شود. با توجه به شکل (۴)، ملاحظه می‌شود که افزایش زمان قالب‌برداری، گرچه تا ۲۸ روز تأثیر محسوسی نداشته، اما در ۹۱ روز باعث کاهش اختلاف مقاومت نمونه‌های سطحی با نمونه‌های استاندارد شده است. نمونه‌های هسته نیز با وجود افت مقاومت ۱۰٪ در سن ۲۸ روز، در دراز مدت دارای مقاومتی نزدیک به ۴٪ کمتر نمونه‌های استاندارد است.



شکل (۴): منحنی‌های بتن ۸۰P۱۵

مؤثر در افزایش مقاومت نمونه‌های سطحی است. همچنین نمونه‌های هسته در سن ۹۱ روز دارای مقاومتی نزدیک به نمونه‌های استاندارد است. (شکل (۵)).

افزایش مقدار جایگزینی پوزولان طبیعی باعث گردیده، نمونه‌های سطحی بعد از ۲۸ روز، روند کسب مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های استاندارد داشته باشند (برخلاف نتایج بتن ۸۰P۱۵). اما در این بتن نیز افزایش زمان قالب‌برداری عامل



شکل (۵): منحنی‌های بتن ۸۰P۳۰

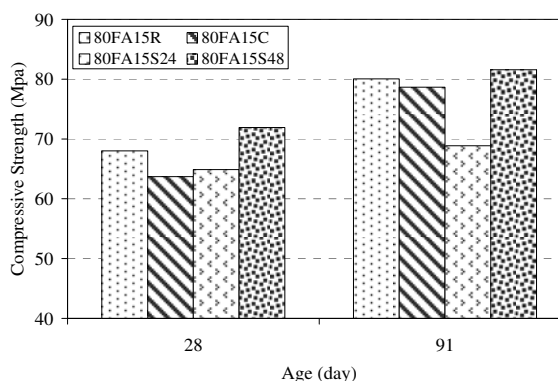
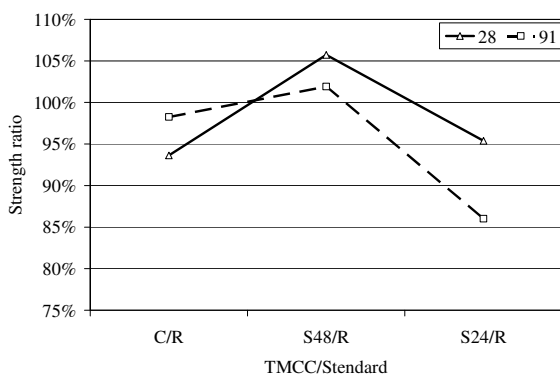
می‌شود، نمونه‌های S۲۴ در ۲۸ و ۹۱ روز بترتیب نزدیک به ۱۸٪ و ۲۴٪ افت مقاومت از خود نشان داده‌اند. اما افزایش زمان ماندگاری قالب باعث گردیده مقادیر کاهش مقاومت در سن ۲۸ و ۹۱ روز به ۱٪ و ۱۰٪ تقلیل یابد.

یکی از دلایل مهم افت مقاومت بتن‌های حاوی خاکستر بادی در شرایط S۲۴ بخاطر حساسیت بالای این ماده به عمل‌آوری رطوبتی است. زیرا در شرایط یاد شده نمونه‌ها تنها به مدت ۲۴ ساعت عمل‌آوری رطوبتی شده و سپس خشک می‌شوند.

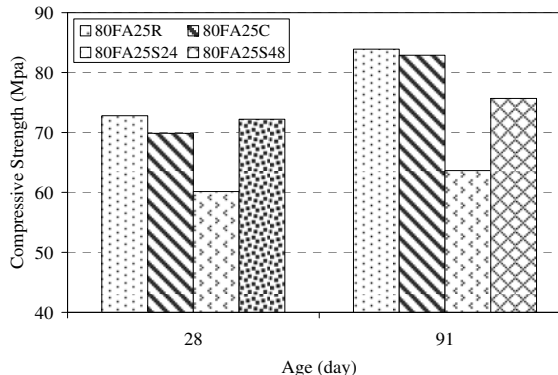
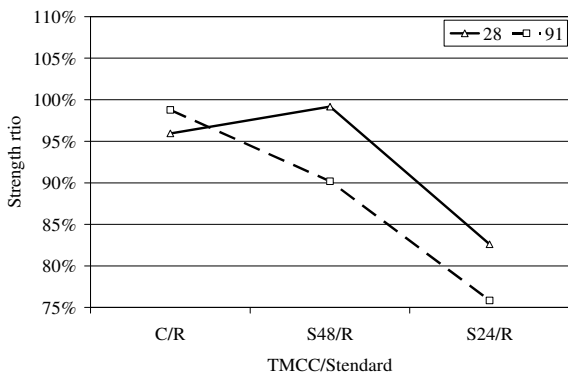
۳-۳- مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی

در بتن حاوی ۱۵٪ خاکستر بادی، نمونه‌های S۴۸ بیشترین مقاومت را کسب کرده‌اند. با توجه به شکل (۶)، ملاحظه می‌شود که قالب‌برداری ۲۴ ساعته، باعث اختلال در کسب مقاومت شده و در سن ۹۱ روز نزدیک به ۱۴٪ افت مقاومت نسبت به نمونه‌های استاندارد وجود دارد.

افزایش مقدار جایگزینی خاکستر بادی باعث تضعیف نمونه‌های سطحی شده است. همانطور که در شکل (۷) دیده

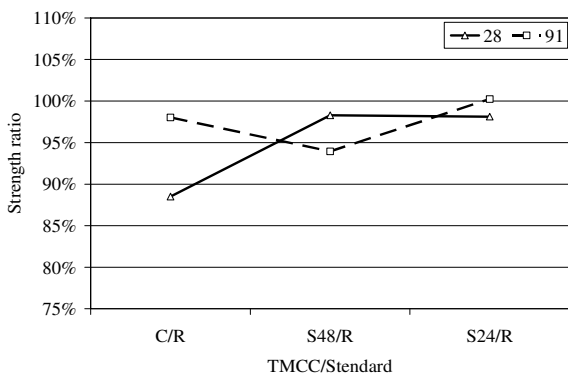


شکل (۶): منحنی‌های مقاومت فشاری بتن ۸۰FA۱۵



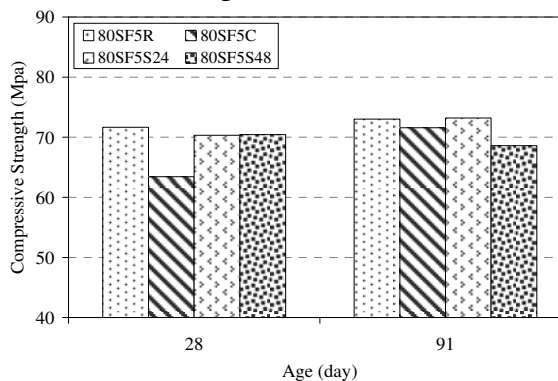
شکل (۷): منحنی‌های مقاومت فشاری بتن ۸۰FA۲۵

کسب مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های استاندارد دارند. نمونه‌های S۴۸ با وجود مقاومت یکسان با نمونه‌های S۲۴ در ۲۸ روز، بعد از آن دچار افت کسب مقاومت شده‌اند. جایگزینی ۸٪ میکروسیلیس باعث گردیده نمونه‌های S۲۴ بیشترین مقاومت را در دراز مدت کسب کنند (شکل (۹)). در این بتن، نمونه‌های C در دراز مدت دارای مقاومتی نزدیک به ۹۳٪ مقاومت‌های استاندارد است. در این بتن ضعیف‌ترین روند کسب مقاومت متعلق به نمونه‌های، S۴۸ است. روند گفته شده در بتن SF۱۱۸۰ نیز دیده می‌شود.

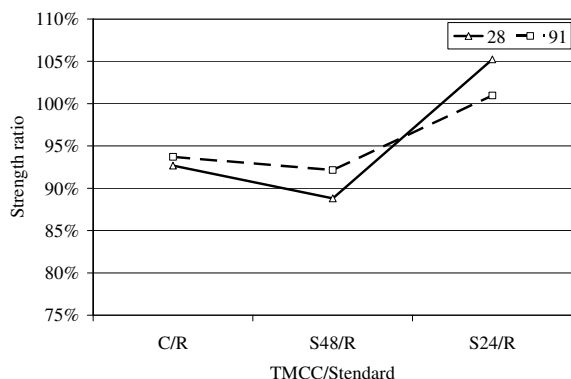


۳-۴- مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیس

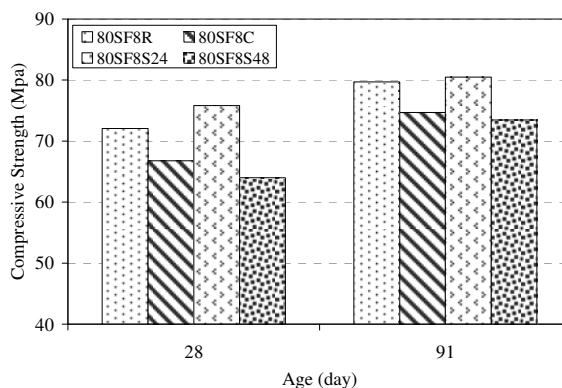
جایگزینی میکروسیلیس در بتن باعث تغییر جالبی در روند کسب مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در حرارت شده است. خروج تندتر نمونه‌های حاوی میکروسیلیس از شرایط عمل‌آوری حرارتی، باعث کسب مقاومت بیشتر می‌شود. در بتن حاوی ۵٪ میکروسیلیس، نمونه‌های هسته در ۲۸ روز دارای کمترین مقاومت می‌باشند (شکل (۸)). اما نمونه‌های S۲۴ در دراز مدت بالاترین مقاومت نمونه‌های حرارتی را کسب کرده‌اند و بر خلاف اکثر بتن‌های قبلی، بعد از ۲۸ روز روند



شکل (۸): منحنی‌های بتن ۸۰SF۵

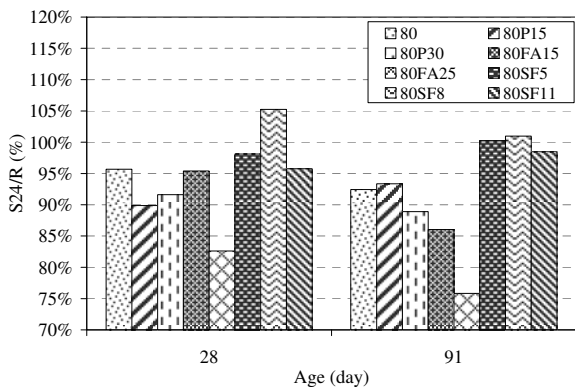


شکل (۹): منحنی‌های بتن ۸۰SF۸



۳-۵- تأثیر انواع پوزولان‌ها بر مقاومت فشاری بتن سطح ستون‌های حجیم

در شکل (۱۱)، نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های سطحی که بعد از ۲۴ ساعت قالب‌برداری شده‌اند به نمونه‌های استاندارد نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود در بتن‌های حاوی میکروسیلیس، خروج تندتر نمونه‌ها از شرایط حرارتی مفید بوده و باعث کسب مقاومت بیشتر در دراز مدت شده است. از این رو نمونه‌های حاوی میکروسیلیس در شرایط S24/R دارای مقاومت‌های دراز مدت بالایی هستند (حتی بیشتر از مقاومت نمونه‌های استاندارد). از این میان بتن ۸۰SF۸ بهترین نتیجه را کسب کرده است. در این شرایط عمل‌آوری، بتن‌های مختلف دچار افت مقاومتی بین ۵٪ تا ۲۵٪ شده‌اند (بجز جایگزینی میکروسیلیس). از بین کلیه نمونه‌ها، بتن ۸۰FA۲۵ بیشترین افت مقاومت را نسبت به نمونه‌های استاندارد خود دارد.

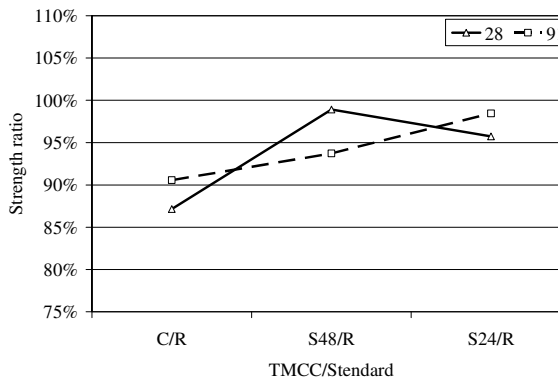
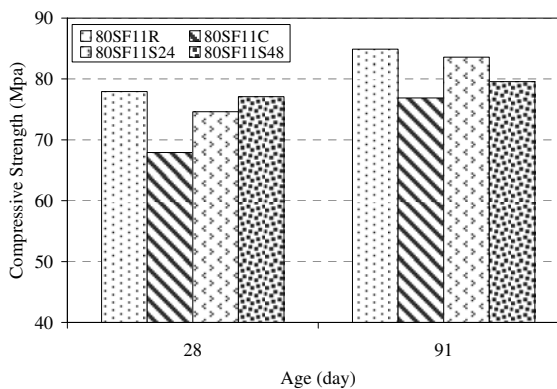


شکل (۱۱): نسبت مقاومت نمونه‌های S24/R به استاندارد

در شرایط S48/R نمونه‌های حاوی میکروسیلیس دچار کاهش مقاومت بیشتری می‌شوند. اما نمونه‌های ۸۰P۱۵ و ۸۰FA۱۵ دارای بیشترین مقاومت، نسبت به مقاومت نمونه‌های استاندارد

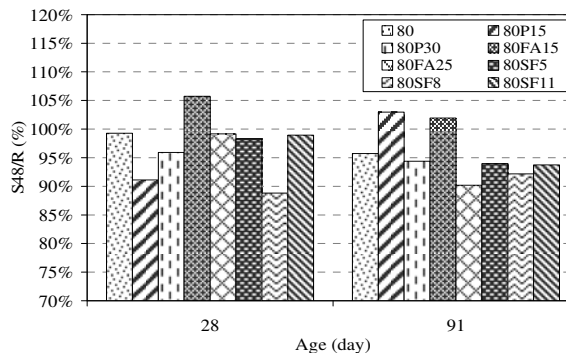
با این تفاوت که در سن ۲۸ روز نمونه‌های S48/R دارای مقاومت بیشتری نسبت به S24/R هستند. اما تا سن ۹۱ روز، نمونه‌های S48/R دچار افت کسب مقاومت می‌شوند و بالعکس نمونه‌های S24/R، کسب مقاومت بیشتری دارند. (شکل (۱۰)).

از جمله دلایل اصلی روند یاد شده اینست که حضور میکروسیلیس در بتن باعث تند شدن هیدراسیون C_3A و C_3S می‌شود. همچنین با توجه به دمای بالای عمل‌آوری، روند هیدراسیون در سنین اولیه تندتر شده، در نتیجه اثرات مخرب در دراز مدت تشدید می‌گردد. ولی با خروج تندتر نمونه‌ها از این شرایط بهبود خواص دیده می‌شود.



شکل (۱۰): منحنی‌های بتن ۸۰SF۱۱

خود می‌باشند. این در حالی است که نمونه‌های ۸۰P۱۵ تا ۲۸ روز مقاومت مناسبی کسب نکرده‌اند، اما با افزایش روند کسب مقاومت تا سن ۹۱ روز، مقاومتی بیش از مقاومت نمونه‌های استاندارد کسب می‌کنند. ضعیف‌ترین نمونه در این شرایط بتن حاوی ۸٪ میکروسیلیس است (شکل (۱۲)).



شکل (۱۲): نسبت مقاومت نمونه‌های S۴۸ به استاندارد

۴- نتیجه‌گیری

- در بتن‌های معمولی و حاوی پوزولان‌های طبیعی و خاکستر بادی که در شرایط سطح ستون‌های حجیم عمل‌آوری شده‌اند، افزایش زمان قالب‌برداری باعث کسب مقاومت بیشتر نمونه‌های سطحی می‌شود. همچنین روند کسب مقاومت نمونه‌های هسته بعد از ۲۸ روز افزایش یافته و باعث کاهش افت مقاومت می‌شود.
- جایگزینی مقادیر کمتر پوزولان طبیعی (۱۵٪) باعث کسب مقاومت بهتر نمونه‌های سطحی و هسته شده است.

۶- مراجع

- افزایش این ماده در بتن باعث ضعیف‌تر شدن نمونه‌های سطحی بویژه در سن ۹۱ روز می‌شود.
- جایگزینی خاکستر بادی باعث کسب مقاومت مناسب نمونه‌های هسته و قالب‌برداری ۴۸ ساعت می‌شود. این روند در بتن‌های حاوی مقادیر کمتر خاکستر بادی محسوس‌تر است. مقاومت این نمونه‌ها که بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده‌اند، بین ۱۵٪ تا ۲۵٪ کاهش یافته است.
- جایگزینی میکروسیلیس باعث افت زیاد مقاومت نمونه‌های هسته نسبت به استاندارد می‌شود. روند افت مقاومت، با افزایش مقدار این ماده در بتن، بیشتر می‌شود.
- کاهش زمان عمل‌آوری حرارتی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، باعث کسب مقاومت بیشتر می‌شود. در نتیجه برداشت سریع‌تر قالب‌ها از روی بتن باعث بهبود کسب مقاومت نمونه‌های سطحی می‌شود.
- با توجه به نتایج ارائه شده، به نظر می‌رسد تخمین مقاومت فشاری نقاط مختلف مقطع ستون‌های حجیم از طریق نمونه‌های استاندارد، تا اندازه‌ای غیرمحافظة‌کارانه (بویژه در سطح ستون) می‌باشد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از کمک‌های آقایان مهدی سلیمانی راد، احمد معظمی گودرزی و حسان صالحی سپاسگزاری می‌نمایند.

- [۱] مهتا، پویندار، مونته‌ئرو، پائولو؛ ترجمه رضانیانپور، ع.، قدوسی، پ.، گنجیان، الف.؛ ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ویرایش اول، ۱۳۸۵.
- [۲] Alexanderson, J.; "Strength losses in heat-cured concrete", Swedish Cement and Research Institute Proceedings, Stockholm, No. 43, 1972.
- [۳] 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.
- [۴] Glasser, F. P.; Damidot, D.; Atkins, M.; "Phase development in cement in relation to the secondary ettringite problem", Advances in Cement Research, Vol. 7, No. 26, pp. 57-68, 1995.
- [۵] Hanson. J. A.; "Optimum Steam Curing Procedure in Precasting Plants", ACI Materials Journal, Vol. 60, No. 1, pp. 75-100, 1963.
- [۶] Heinz, D.; Ludwig, V.; Rudinger, I.; "Delayed ettringite formation in heat-treated mortars and concretes", Concrete Precasting Plant and Technology, Vol. 11, pp. 56-61, 1989.
- [۷] Kaszynska, M.; "Early Age Properties of High-Strength/High-Performance Concrete", Cement and Concrete Composite, Vol. 24, pp. 253-361, 2002.
- [۸] Kjellman, O.; Olofsson, J.; "3D Structural Analysis of Crack Risk in Hardening Concrete", Report No. 2001:53-2, Luleå University of Technology, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, 2001.
- [۹] Kjellsen, K. O.; Detwiler, R. J.; "Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures", Cement and Concrete Research, Vol. 22, pp. 112-120, 2004.
- [۱۰] Riding, K. A.; Poole, J. L.; "Evaluation of Temperature Prediction Methods for Mass Concrete Members", ACI Materials Journal, Vol. 103, No. 5, pp. 357-365, 2006.
- [۱۱] Taylor, H. F. W.; Famy, C.; Scrivener, K. L.; "Delayed Ettringite Formation", Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 683-693, 2001.