

Investigation on the Compressive Strength of Concrete with Microsilica Additive under Different Durations of Accelerated Steam Curing

Mohammadreza Seify Asghshahr^{1*}, Pouya Sadigh Dalali², Ata Talebzadeh²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- BSc, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

The purpose of this research is to conduct a laboratory study to investigate the effect of using microsilica additive on the compressive strength of concrete under different durations of accelerated steam curing. For this aim, four mix designs have been considered, in which in two of them microsilica additive is used in the amount of 10% and 15% by weight of cement. 48 cubic samples were cured by immersion in water and their compressive strength was measured at the ages of 3, 7, 14, and 28 days. Also, 84 cubic samples were subjected to accelerated steam curing under the maximum temperature of 66 ± 2 °C and their compressive strength was measured after 4, 8, 16, 24, 32, 40, and 48 hours of treatment. The research results show that by adding microsilica to concrete, the ultimate compressive strength increases in both types of curing. Calculating the ratio of the strength of the samples under steam curing to the corresponding value in water curing indicates that the designs with microsilica have weaker performance than the designs without microsilica in terms of gain rate in compressive strength. Also, the results show that with the reduction of the water-cement ratio, concrete strength setting in steam curing occurs faster. Finally, it is suggested that if microsilica powder is used in concrete as an additive, in order to provide 70% of the 28-day strength of concrete, which is necessary for producing prefabricated and prestressed concrete, microsilica powder must be used in the amount of 15% by weight of cement and concrete must be subjected to steam treatment for 24 hours.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 November 2022

Revise Date: 09 February 2023

Accept Date: 11 March 2023

Keywords:

Concrete
Compressive Strength
Steam Curing
Additive
Microsilica

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.370274.2972>

*Corresponding author: Mohammadreza Seify Asghshahr

Email address: m.seifi@azaruniv.ac.ir

بررسی مقاومت فشاری بتن با ماده افزودنی میکروسیلیس تحت مدت زمان‌های مختلف از عمل‌آوری تسریع‌یافته با بخار

محمدرضا سیفی اسگ شهر^{۱*}، پویا صدیق دلالی^۲، عطا طالب زاده^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

هدف از این تحقیق انجام یک مطالعه آزمایشگاهی جهت بررسی تأثیر استفاده از ماده افزودنی میکروسیلیس در مقاومت فشاری بتن تحت مدت زمان‌های مختلف از عمل‌آوری تسریع‌یافته با بخار می‌باشد. بدین منظور چهار طرح مخلوط که در دو طرح از ماده افزودنی میکروسیلیس به مقدار ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی سیمان استفاده شده، در نظر گرفته شده‌اند. ۴۸ نمونه مکعبی تحت عمل‌آوری با روش غوطه‌وری در آب قرار گرفته و در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری آنها سنجیده شده است. همچنین ۸۴ نمونه مکعبی تحت عمل‌آوری تسریع‌یافته با بخار تحت حداکثر دمای $66 \pm 2^\circ C$ قرار گرفته و مقاومت فشاری آنها با ۴، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۰ و ۴۸ ساعت عمل‌آوری اندازه‌گیری شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با اضافه کردن میکروسیلیس به بتن مقاومت فشاری نهایی در هر دو نوع عمل‌آوری افزایش می‌یابد. محاسبه نسبت مقاومت نمونه‌ها تحت عمل‌آوری با بخار بر مقدار متناظر در عمل‌آوری با آب نشان می‌دهد که طرح‌های دارای میکروسیلیس عملکرد ضعیف‌تری نسبت به طرح‌های بدون میکروسیلیس از نظر نرخ رشد مقاومت فشاری دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با کاهش نسبت آب به سیمان، گیرش مقاومت بتن در عمل‌آوری با بخار سریع‌تر رخ می‌دهد. در نهایت پیشنهاد می‌شود در صورت استفاده از پودر میکروسیلیس در بتن به عنوان ماده افزودنی، برای تأمین ۷۰٪ از مقدار مقاومت ۲۸ روزه بتن که برای ساخت بتن‌های پیش‌ساخته و پیش‌تنیده لازم است، از پودر میکروسیلیس به مقدار ۱۵٪ وزنی سیمان استفاده شده و بتن تحت ۲۴ ساعت عمل‌آوری با بخار قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بتن، مقاومت فشاری، عمل‌آوری با بخار، ماده افزودنی، میکروسیلیس.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۱/۰۸/۲۳	۱۴۰۱/۱۱/۲۰	۱۴۰۱/۱۲/۲۰	۱۴۰۱/۱۲/۲۰	۱۴۰۲/۰۹/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.370274.2972
*نویسنده مسئول:		محمدرضا سیفی اسگ شهر			
پست الکترونیکی:		m.seifi@azaruniv.ac.ir			

۱- مقدمه

عمل آوری بتن اشاره به روش‌هایی دارد که برای تأمین رطوبت کافی به منظور ادامه هیدراتاسیون سیمان استفاده می‌شوند. در عمل آوری بتن دما و رطوبت داخل و خارج بتن کنترل می‌شود [۱]. عمل آوری پیوسته سیمان منجر به ادامه یافتن فرآیند هیدراتاسیون می‌شود که این مسئله منجر به افزایش تشکیل ژل (هیدرات سیلیکات کلسیم)، افزایش مقاومت، کاهش اندازه فضاهای خالی و کاهش انقباض خشک و پلاستیک بتن می‌شود [۲]. در عمل آوری بتن حفظ رطوبت مناسب در داخل بتن بسیار حیاتی است چون هیدراتاسیون سیمان زمانی که رطوبت نسبی داخلی کمتر از ۸۰٪ باشد، متوقف می‌شود [۳]. رطوبت داخلی ناکافی و عدم هیدراتاسیون کامل سیمان منجر به مقاومت و نفوذناپذیری ناکافی بتن می‌شود [۴].

سه روش اصلی برای عمل آوری بتن با حفظ رطوبت مورد نیاز در دمای مناسب استفاده می‌شود: (۱) آب اختلاط در حین سخت شدن بتن در سنین کم حفظ می‌شود تا اینکه خصوصیات مورد نظر از بتن بدست آید. این روش می‌تواند با استفاده از روش‌های مناسب مانند استغراق در آب، آب پاشی، مه پاشی یا پوشش‌های مرطوب اشباع انجام گیرد؛ (۲) فقدان آب اختلاط ناشی از تبخیر از سطح بتن کاهش می‌یابد. این مورد می‌تواند با پوشاندن بتن با کاغذهای نفوذناپذیر یا ورقه‌های پلاستیک یا با استفاده از مواد غشایی انجام گیرد و (۳) گیرش مقاومت با استفاده از مهیا نمودن حرارت به همراه رطوبت بالا در سنین کم بتن از طریق استفاده از روش‌هایی مانند عمل آوری بخار در فشار اتمسفر یا عمل آوری بخار بالا در فشار بالا (اتوکلاو) تسریع داده می‌شود [۵]. اثر روش‌های مختلف عمل آوری بر روی مقاومت فشاری بتن مقایسه شده و نتیجه گرفته شده است که نوع سیستم عمل آوری به صورت قابل توجهی بر روی مقاومت بتن تأثیرگذار است [۶].

عمل آوری با بخار در واقع عمل آوری با حرارت است که با محتوای بالای رطوبت انجام گرفته و به منظور تسریع در هیدراتاسیون سیمان تحت فشار اتمسفر و در راستای بالا بردن مقاومت بتن در سنین کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش عمل آوری با بخار بر پایه استفاده از بخار آب گرم در دمای بین ۴۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای یک دوره زمانی محدود است [۷]. بتن در معرض عمل آوری با بخار در دمای بین ۴۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد و دوره زمانی حدود ۲۴ ساعت به خصوصیات بهتری خواهد رسیده و افزایش دمای عمل آوری از ۸۰ درجه سانتی‌گراد اثر منفی بر روی ریزساختار، کاهش مقاومت نهایی و زوال سایر خصوصیات بتن دارد [۷ و ۸]. در عمل آوری با بخار آب در دمای متوسط ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد و در یک دوره زمانی حداقل ۱ روزه و ۴ ساعته ۷۰ درصد از مقاومت ۲۸ روزه بتن بدست می‌آید که برای تولید اعضای پیش‌ساخته مناسب خواهد بود [۹]. استفاده از عمل آوری با بخار در بتن منجر به فرآیند هیدراتاسیون سریع همراه با سخت‌شدگی سریع می‌شود که منجر به سازه با چگالی کمتر و توزیع نامتناسب محصولات هیدراتاسیون در مقایسه با بتن عمل آوری شده در حالت مستغرق در آب می‌شود. بنابراین در حالت عمل آوری با بخار تخلخل بیشتری ایجاد می‌شود اگرچه مقاومت فشاری در سنین کمتر افزایش می‌یابد [۱۰]. مدت زمان عمل آوری، دمای عمل آوری، نوع سیمان، نسبت آب به مواد سیمانی، مواد مضاف معدنی و نوع عمل آوری بعد از عمل آوری با بخار پارامترهای مهم در مشخصات بتن عمل آوری شده با بخار هستند [۱۱]. با وجود رشد سریع مقاومت در عمل آوری بتن با بخار، این نوع از عمل آوری تأثیر منفی بر ریزساختار بتن دارد که رشد دیر هنگام اترینگات در این نوع از عمل آوری دلیل این اثرات مضر دانسته شده است [۱۲].

اضافه کردن افزودنی‌های معدنی و پوزولانی در اختلاط بتن اثر قابل توجه در کاهش و جبران اثرات مضر عمل آوری با بخار دارد [۷، ۱۳ و ۱۴]. پوزولان‌ها توانایی قابل ملاحظه‌ای در کاهش نفوذپذیری بتن و افزایش دوام بتن دارند [۱۵ و ۱۶]. استفاده از مواد سیمانی مضاف برای کاهش اثرات مضر بکارگیری عمل آوری با بخار در خصوصیات درازمدت بتن پیشنهاد شده است [۱۷-۱۹]. مصالح پوزولانی شروع به مشارکت در افزایش مقاومت در سنین زیادتر بسته به واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم می‌کنند [۲۰]. همچنین اضافه کردن مصالح پوزولانی به بتن عمل آوری شده با بخار منجر به بهبود خصوصیات دیگری از بتن مانند کاهش نفوذپذیری کلراید به بتن و کاهش مقدار جذب آب می‌شود [۲۱ و ۲۲].

میکروسیلیس به عنوان یک ماده افزودنی ارتقا دهنده خصوصیات بتن و یا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند در بتن استفاده می‌شود. میکروسیلیس به علت ذرات ریز داخل آن، سطح رویه بزرگ و محتوای دی‌اکسید سیلیسیم بالا یک پوزولان بسیار

واکنش‌ها در داخل بتن محسوب می‌شود. در بتن تازه میکروسیلیس تقاضای آب و اسلامپ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تقاضای آب بتن با افزایش مقدار میکروسیلیس افزایش می‌یابد که عمدتاً به دلیل سطح روبه بزرگ میکروسیلیس است [۲۳]. یزدانی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ نشان داده‌اند که عمل‌آوری تسریع‌یافته با استفاده از بخار روش مؤثری در ایجاد خصوصیات مناسب در سنین ابتدایی بتن میکروسیلیسی (بتن با میکروسیلیس جایگزین شده به عنوان بخشی از سیمان) می‌باشد. با سنجش مقاومت فشاری، مقاومت سطحی و انقباض برای مدت زمان‌های مختلف از عمل‌آوری با بخار، نشان داده شده است که مدت زمان ۱۲ ساعت و دمای حدود ۶۶ درجه سانتی‌گراد برای عمل‌آوری با بخار بتن میکروسیلیسی ایده‌آل محسوب می‌شود [۲۴].

با توجه به زمینه‌های توضیح داده شده، تحقیقاتی در زمینه بررسی اثر عمل‌آوری با روش‌های مختلف بر روی خصوصیات بتن معمولی و پوزولانی انجام شده است. سفی‌الدین^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۷ اثر روش‌های مختلف عمل‌آوری شامل عمل‌آوری آب، عمل‌آوری پوششی و عمل‌آوری در هوای آزاد بر روی خصوصیات مقاومت فشاری، سرعت پالس ال‌تراسونیک، مدول الاستیسیته دینامیکی و نرخ انتقال رطوبت در بتن حاوی ۱۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس به جای سیمان را بررسی کرده و نشان دادند که بتن میکروسیلیسی بایستی برای رسیدن به خصوصیات مناسب در حالت سخت شده در آب عمل‌آوری شود [۲۵]. راحم^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۳ مقاومت فشاری بتن با درصد‌های مختلف جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی با سیمان را تحت روش‌های مختلف عمل‌آوری غوطه‌وری در آب و عمل‌آوری با بخار در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد سنجیده و نشان دادند که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده توسط بخار بین ۷ تا ۱۴ درصد کمتر از مقدار متناظر در حالت عمل‌آوری به روش مستغرق در آب می‌باشد [۲۶]. نادری و همکاران در سال ۱۳۹۷ تأثیر شش نوع عمل‌آوری شامل غوطه‌وری در آب، گونی مرطوب، گونی مرطوب به همراه نایلون، ماده عمل‌آورنده، بخار و رها شده در محیط آزمایشگاه را بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که تنها دو روش عمل‌آوری غوطه‌وری در آب و عمل‌آوری توسط گونی مرطوب به همراه نایلون، قادر به تامین حداقل مقاومت مشخصه فشاری بودند [۲۷]. لیو^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۰ اثرات روش‌های عمل‌آوری مختلف بتن بعد از عمل‌آوری با بخار را بر روی خصوصیات مقاومتی و نفوذپذیری بتن مورد بررسی قرار دادند [۲۸]. بررسی ریزساختار بتن در تحقیق آنها نشان داد که عمل‌آوری مرطوب متعاقباً بعد از عمل‌آوری با بخار به صورت مؤثری می‌تواند اثرات مضر عمل‌آوری با بخار آب بر روی بتن را کاهش دهد. بوکنداکجی^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثرات عمل‌آوری با بخار را بر روی خصوصیات بتن شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی ناشی از خمش و مدول الاستیسیته بتن بررسی کرده و سیکل بهینه عمل‌آوری با بخار با هدف رسیدن به بهترین خصوصیات برای بتن را پیشنهاد دادند [۲۹]. با توجه به مشکلات ریزساختاری به وجود آمده برای بتن عمل‌آوری شده تحت بخار، پژوهش‌های در زمینه بررسی دوام بتن تحت این نوع از عمل‌آوری انجام یافته است. یان^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ در مورد مقاومت سولفاتی بتن با سرباره آهن‌گدازی تحت عمل‌آوری با بتن پرداختند [۳۰ و ۳۱]. اثر رویه‌های مختلف عمل‌آوری با بخار بر روی مقاومت کلرایدی بتن سبز پرمقاومت مورد بررسی قرار گرفته است [۳۲]. امکان‌پذیری افزایش مناسب دما در عمل‌آوری با بخار برای بتن با سرباره آهن‌گدازی یا خاکستر بادی از دیدگاه مقاومت و دوام مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۳].

با توجه به مطالعات اشاره شده و همچنین عدم وجود تحقیقات در زمینه بررسی اثرات عمل‌آوری با بخار با دوره‌های زمانی متفاوت بر روی خصوصیات مقاومتی بتن با افزودنی میکروسیلیس و نه به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، هدف این مقاله بررسی تأثیر استفاده از ماده افزودنی میکروسیلیس در مقاومت فشاری بتن تحت عمل‌آوری تسریع‌یافته با بخار با مدت زمان‌های مختلف از عمل‌آوری می‌باشد. بدین منظور چهار طرح مخلوط که در دو طرح از ماده افزودنی میکروسیلیس به مقدار ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی سیمان استفاده شده، در نظر گرفته شده‌اند. ۴۸ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر تحت عمل‌آوری با روش غوطه‌وری در آب قرار گرفته و در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری آنها اندازه‌گیری شده است. ۸۴ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر نیز تحت عمل‌آوری تسریع‌یافته با بخار تحت حداکثر دمای $2 \pm 66^\circ\text{C}$ به مدت ۴، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۰ و ۴۸ ساعت قرار گرفته و مقاومت فشاری آنها اندازه‌گیری شده است. در نهایت با

¹ Yazdani

² Safiuddin

³ Raheem

⁴ Liu

⁵ Boukendakdji

⁶ Yan

مقایسه نتایج مقاومت فشاری بدست آمده و تحلیل آنها به بررسی تأثیر استفاده از ماده افزودنی میکروسیلیس در عمل آوری با بخار بر روی مقاومت فشاری بتن پرداخته خواهد شد. نتایج این تحقیق می تواند در صنعت تولید بتن های پیش ساخته و پیش تنیده با استفاده از عمل آوری تسریع یافته با بخار استفاده شود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

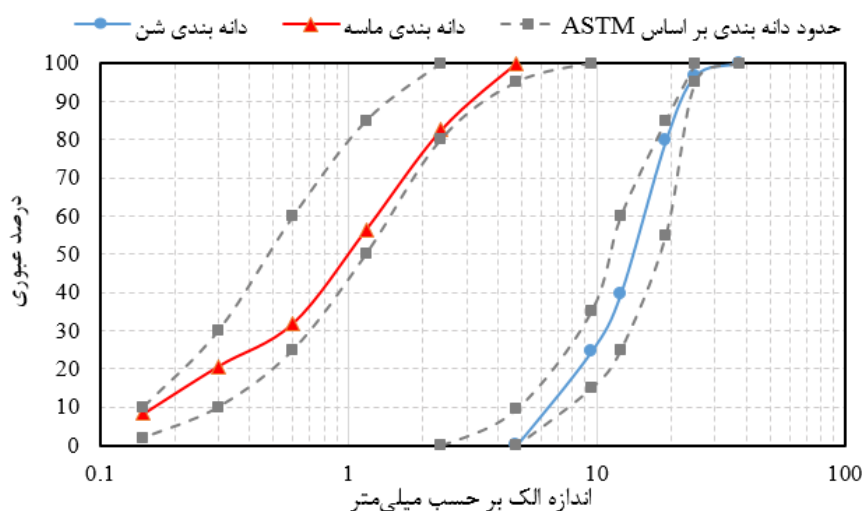
سیمان مورد استفاده در مخلوط های آزمایشی، سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت سیمان صوفیان می باشد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ گزارش شده است. مشخصات پودر میکروسیلیس کارخانه فروسیلیس ایران مورد استفاده نیز در جدول ۲ اشاره شده است. این پودر با ساختار آمورف فوق العاده ریز به شکل کلوخه ای با دمای ذوب حدود ۱۵۵۰ درجه سانتی گراد می باشد. محدوده استاندارد اندازه سنگدانه های استفاده شده بر اساس استاندارد ASTM C33-03 [۳۴] مشخص شده است. وزن مخصوص شن بادامی، شن نخودی و ماسه مورد استفاده در مخلوط های آزمایشی به ترتیب ۲۳۴۰، ۲۲۸۰ و ۲۱۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. بزرگترین بعد سنگدانه ها برابر ۳۷/۵ میلی متر بوده و مدول نرمی ماسه نیز برابر ۳ است. منحنی دانه بندی سنگدانه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. آب مصرفی در مخلوط های آزمایشی نیز آب شرب آزمایشگاه تکنولوژی بتن می باشد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان تیپ ۲ صوفیان

نتایج	مشخصات فیزیکی	نتایج	مشخصات شیمیایی
۲۲۳۰ ± ۶۱/۱۲۳	سطح مخصوص سیمان (بلین) (cm ² /g)	۲۱/۷۰ ± ۰/۳۳۵	اکسید سیلیسیوم % SiO ₂
۳/۸۶	باقیمانده بر روی الک ۹۰ میکرون %	۵/۲۲ ± ۰/۳۶۴	اکسید آلومینیوم % Al ₂ O ₃
۰/۱۸ ± ۰/۰۵۷	انبساط با روش اتوکلاو %	۳/۷۴ ± ۰/۳۲۹	اکسید آهن % Fe ₂ O ₃
۱/۱ ± ۰/۷۲۹	انبساط با روش لوشاتلیه (mm)	۶۴/۴۴ ± ۰/۵۳۲	اکسید کلسیم % CaO
۱۱۵ ± ۱/۶۸۹	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۲/۲۲ ± ۰/۱۲۵	اکسید منیزیم % MgO
۱۸۵ ± ۱۲/۵۱۸	زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۲/۰۰ ± ۰/۰۲۸	سولفویت (SO ₃ ^{۲-}) %
۳/۱۶ ± ۰/۲۵۲	چگالی (g/cm ³)	۰/۶۲ ± ۰/۱۱۸	باقیمانده نامحلول IR %
۱۷۲ ± ۵/۷۵۱	مقاومت فشاری ۲ روزه (kg/cm ²)	۰/۲۲ ± ۰/۰۲۵	اکسید سدیم % Na ₂ O
۲۴۰ ± ۵/۶۳۴	مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm ²)	۰/۵۸ ± ۰/۰۳۸	اکسید پتاسیم % K ₂ O
۳۴۵ ± ۹/۳۸۸	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	۰/۰۱ ± ۰/۰۰۱	یون کلراید % Cl ⁻
۴۶۵ ± ۱۶/۵۳۴	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	۱/۳۵ ± ۰/۱۴۳	آهک آزاد %
		۹۰/۹۰	ضریب اشباع آهک %
		۵۱/۳۰	تری کلسیم سیلیکات % C ₃ S
		۲۳/۵۲	دی کلسیم سیلیکات % C ₂ S
		۷/۵۰	تری کلسیم آلومینات % C ₃ A
		۱۱/۳۷	تترا کلسیم آلومینوفریٹ % C ₄ AF

جدول ۲: مشخصات شیمیایی و فیزیکی پودر میکروسیلیس

نتایج	مشخصات فیزیکی	نتایج	مشخصات شیمیایی
آمورف	ساختار	> ۸۵	اکسید سیلیسیوم % SiO ₂
کروی	شکل ذرات	< ۲	اکسید آهن % Fe ₂ O ₃
< ۴۰	اندازه ذرات (μm)	< ۱/۵	اکسید کلسیم % CaO
۲۰۰-۳۰۰	چگالی انبوهی (kg/m ³)	< ۱	اکسید آلومینیوم % Al ₂ O ₃
۱۴-۲۰	سطح ویژه (m ² /g)	< ۱/۵	اکسید منیزیم % MgO
۴۰۰-۶۰۰	چگالی (kg/m ³)	< ۳	کربن % C
		< ۳/۵	افت سرخ شدن % LOI
		۱	رطوبت %



شکل ۱: منحنی دانه بندی سنگدانه‌ها

۲-۲- طرح مخلوط

در این تحقیق چهار طرح مخلوط بتن مطابق با استاندارد ACI 211 [۳۵] تهیه شده است به این صورت که طرح شماره ۱ به عنوان طرح پایه و بدون ماده افزودنی می‌باشد. در طرح‌های شماره ۲ و ۳ میکروسیلیس به صورت مضاف به بتن اضافه خواهد گردید و جایگزین سیمان نخواهد شد، بنابراین نسبت آب به سیمان با درصدی بالاتری برای طرح پایه انتخاب شده تا در طرح‌های مخلوط شماره ۲ و ۳ مشکل اختلاط نمونه‌ها با توجه به افزایش تقاضای آب در بتن در صورت استفاده از پودر میکروسیلیس ایجاد نشود. طرح‌های شماره ۲ و ۳ به ترتیب دارای ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیمان میکروسیلیس هستند تا با مقایسه روند تغییرات مقاومت نمونه‌های ساخته شده بر اساس این طرح‌ها در سنین مختلف تحت روش‌های مختلف عمل‌آوری با طرح شماره ۱، تأثیر استفاده از میکروسیلیس در بتن بررسی شود. بر اساس آزمایشات و ملاحظات قبلی از نظر مقاومت نهایی ۲۸ روزه و اسلامپ نمونه‌های ساخته شده، مقدار مقاومت و اسلامپ طرح ۴ تقریباً مشابه طرح ۳ خواهد بود با این تفاوت که طرح ۳ با نسبت آب به سیمان ۰/۶ و دارای میکروسیلیس و طرح ۴ با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و بدون میکروسیلیس است که می‌تواند معیار مناسبی برای بررسی کسب مقاومت و روند رشد آن در نمونه‌های با مقاومت نهایی ۲۸ روزه و اسلامپ یکسان در بتن با و بدون ماده افزودنی میکروسیلیس باشد. اسلامپ نمونه‌های ساخته شده بر اساس طرح‌های مخلوط شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۱۲/۵، ۴، ۲/۵ و ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است در اختلاط مصالح، شن نخودی و بادامی با درصد یکسان در بتن استفاده شده‌اند. اطلاعات مربوط به طرح‌های مخلوط در جدول ۳ اشاره شده است. لازم به ذکر است که در هیچ کدام از طرح‌های مخلوط ارائه شده از روان‌کننده استفاده نشده است.

جدول ۳: مشخصات طرح‌های مخلوط در یک مترمکعب بتن بر حسب کیلوگرم

شماره	ماسه	شن	نسبت آب به سیمان	آب	سیمان	پودر میکروسیلیس
۱	۷۲۵	۸۵۸	۰/۶	۱۸۱	۳۰۲	۰
۲	۷۲۵	۸۵۸	۰/۶	۱۸۱	۳۰۲	۳۰/۲
۳	۷۲۵	۸۵۸	۰/۶	۱۸۱	۳۰۲	۴۵/۳
۴	۶۴۲/۵	۸۵۸	۰/۳۵	۱۶۶	۴۷۴/۵	۰

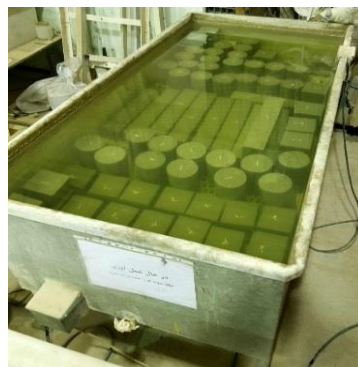
۲-۳- روش های عمل آوری

عمل آوری های مدنظر در این تحقیق، عمل آوری با غوطه‌وری در آب (شکل ۲-الف) و عمل آوری با بخار (شکل ۲-ب) می‌باشد. نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر ساخته شده بر اساس طرح‌های مخلوط اشاره شده در جدول ۳، ۲۴ ساعت بعد از بتن‌ریزی از قالب جدا شده و تحت عمل آوری قرار گرفتند. نمونه‌های تحت عمل آوری با آب مطابق با استاندارد ASTM C192 [۳۶] در حوضچه آب با دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ قرار گرفته و در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C109 [۳۷] قرار گرفتند.

یک سیکل کامل روند عمل آوری با بخار برای نمونه‌ها مطابق آیین‌نامه ACI-308R [۱] در شکل ۳ نشان داده شده است. اگرچه روش معمول اعمال بلافاصله عمل آوری با بخار بعد از اختلاط بتن است، نشان داده شده که این روش مضر بوده و تأخیر قبل از مواجهه با بخار برای خصوصیات بتن از جمله مقاومت و دوام مفید خواهد بود [۳۸]. در صورت کوتاه بودن فاز تأخیر، تفاوت در ضرائب انبساط حرارتی اجزای بتن منجر به ایجاد ترک ناشی از تنش کششی و افزایش تخلخل شود [۳۹]. در این تحقیق فاز تأخیر معادل با ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. دوره گرم‌شدن نمونه به عنوان زمان مورد نیاز برای بالا بردن دما به دمای حداکثر هدف تعریف می‌شود. نرخ گرم شدن نمونه‌ها در این تحقیق معادل با 20°C/hr در نظر گرفته شده که در بازه قابل قبول پیشنهاد شده توسط نویل (۱۱ تا ۳۳ درجه سانتی‌گراد در ساعت) [۵] قرار دارد. دمای حداکثر عمل آوری با بخار به صورت مستقیم بر روی خصوصیات بتن در سنین کم و زیاد تأثیرگذار خواهد بود [۷]. بیشینه دمای عمل آوری در دامنه ۴۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است در حالی که دمای بهینه عموماً بین ۵۰ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد است [۴۰]. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، دمای حداکثر بهینه برای عمل آوری با بخار برای بتن حدود 66°C است که منجر به کاهش پتانسیل انقباض خشک و خزش، کاهش اثر دما بر رشد درازمدت مقاومت، کاهش مقدار هزینه مرتبط با انرژی و کاهش اثر بالقوه تأخیر در تشکیل اترینگات می‌شود [۲۴]. دمای حداکثر عمل آوری در این تحقیق برابر با $66 \pm 2^\circ\text{C}$ است که با توجه به توضیحات داده شده در بازه قابل قبول قرار دارد. طول مدت زمان عمل آوری بتن با حداکثر دما می‌تواند بر روی خصوصیات بتن تأثیر قابل توجهی داشته باشد [۷]. در تحقیق حاضر به منظور بررسی این پارامتر، مدت زمان‌های مختلف ۴، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۰ و ۴۸ ساعت برای عمل آوری تحت حداکثر دما انتخاب شده‌اند. مطابق شکل ۳، فاز آخر از سیکل عمل آوری با بخار مربوط به دوره سرد شدن می‌شود که در این تحقیق زمان ۱ ساعت برای آن انتخاب شده که تقریباً با نرخ 50°C در نظر گرفته شده توسط رضانیانپور و همکاران [۲۱] مطابقت دارد. لازم به ذکر است برای هر یک از سنین مورد نظر برای سنجش مقاومت فشاری تحت عمل آوری با آب و بخار، ۳ نمونه در نظر گرفته شده که مجموعاً ۱۳۲ نمونه شامل ۴۸ نمونه تحت عمل آوری با آب و ۸۴ نمونه تحت عمل آوری با بخار هستند. لازم به ذکر است که با توجه به زمان تأخیر (۱ ساعت)، زمان مربوط به دوره گرم شدن (۲ ساعت) و زمان مربوط به دوره سرد شدن (۱ ساعت) تعریف شده در عمل آوری با بخار مطابق شکل ۳، سن نمونه‌های تحت ۴، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۰ و ۴۸ ساعت عمل آوری با بخار در زمان آزمایش به ترتیب ۸، ۱۲، ۲۰، ۲۸، ۳۶، ۴۴ و ۵۲ ساعت هستند. نمونه‌ای از نحوه شکست نمونه‌ها تحت آزمایش فشاری در شکل ۴ نشان داده شده است.

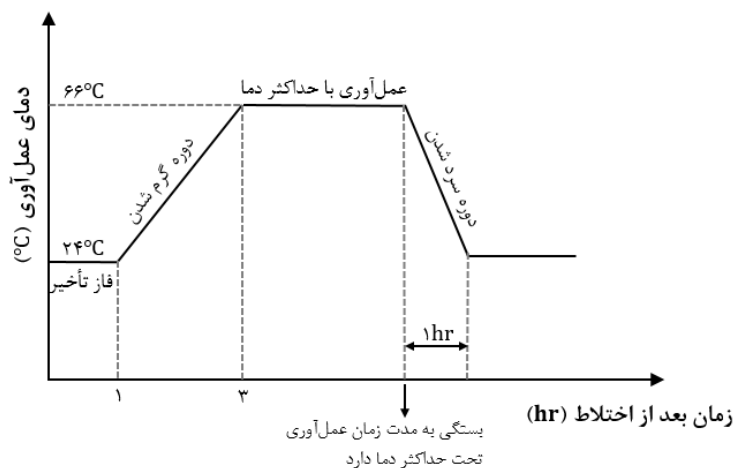


(ب)



(الف)

شکل ۲: عمل آوری نمونه‌ها به روش (الف) غوطه‌وری در آب و (ب) بخار



شکل ۳: رویه عمل آوری با بخار



(ب)

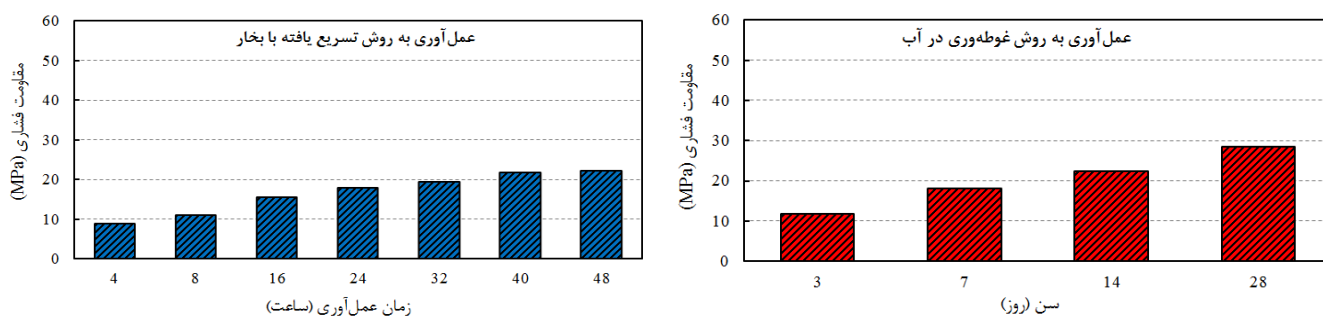


(الف)

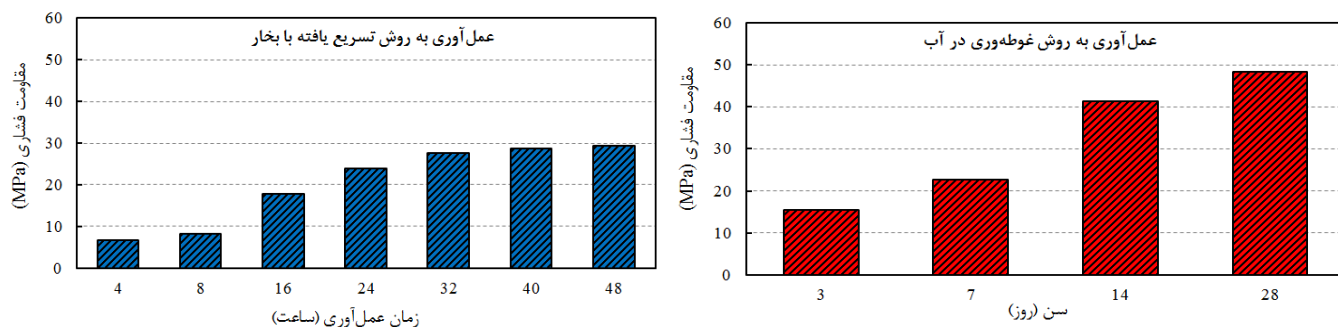
شکل ۴: نحوه شکست نمونه‌های ساخته شده بر اساس طرح مخلوط شماره ۲ تحت آزمایش مقاومت فشاری (الف) عمل آوری شده به روش غوطه‌وری در آب و سن ۲۸ روز و (ب) عمل آوری شده تحت ۸ ساعت بخار آب

۳- بررسی و تحلیل نتایج

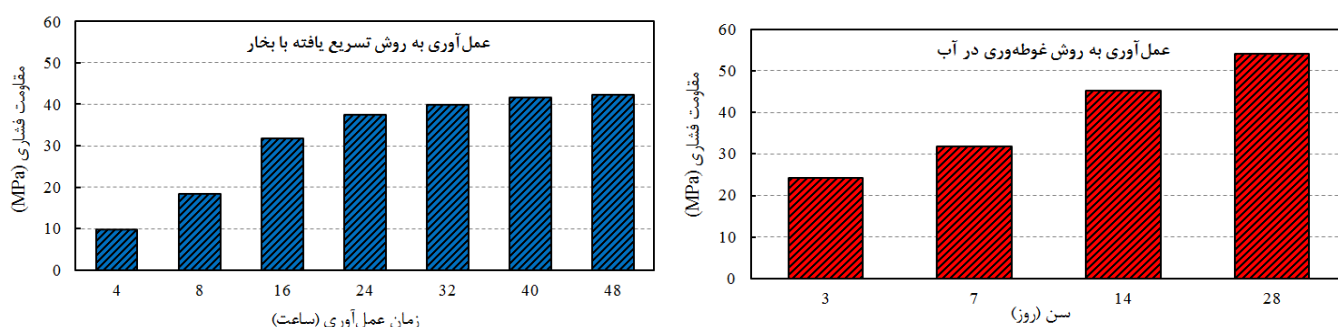
نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در آب و بخار برای طرح‌های مخلوط شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب در اشکال ۵، ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. اعداد گزارش شده در نمودارها میانگین مقاومت فشاری بدست آمده برای سه نمونه می‌باشند.



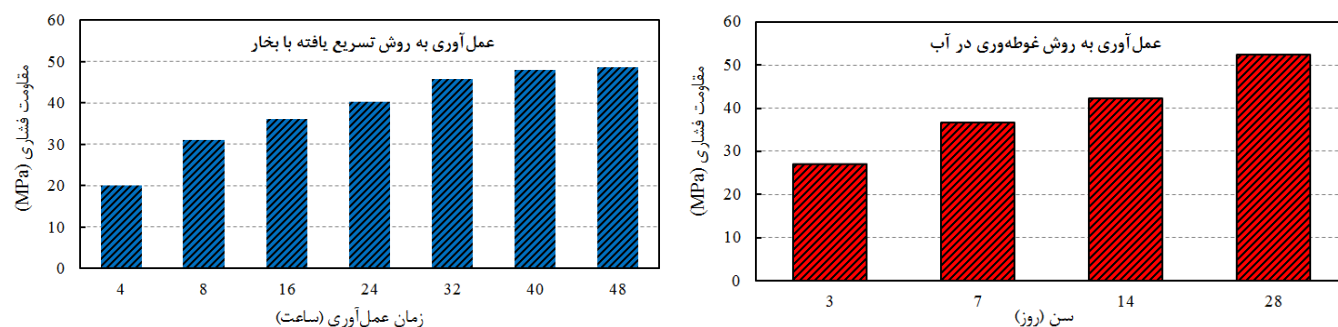
شکل ۵: نتایج مقاومت فشاری بدست آمده برای نمونه‌ها تحت عمل آوری با آب و بخار برای طرح مخلوط شماره ۱



شکل ۶: نتایج مقاومت فشاری بدست آمده برای نمونه‌ها تحت عمل آوری با آب و بخار برای طرح مخلوط شماره ۲

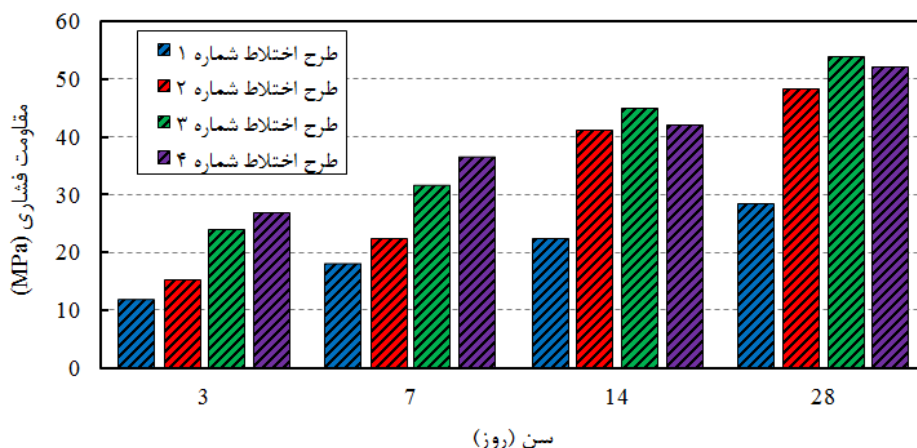


شکل ۷: نتایج مقاومت فشاری بدست آمده برای نمونه‌ها تحت عمل آوری با آب و بخار برای طرح مخلوط شماره ۳

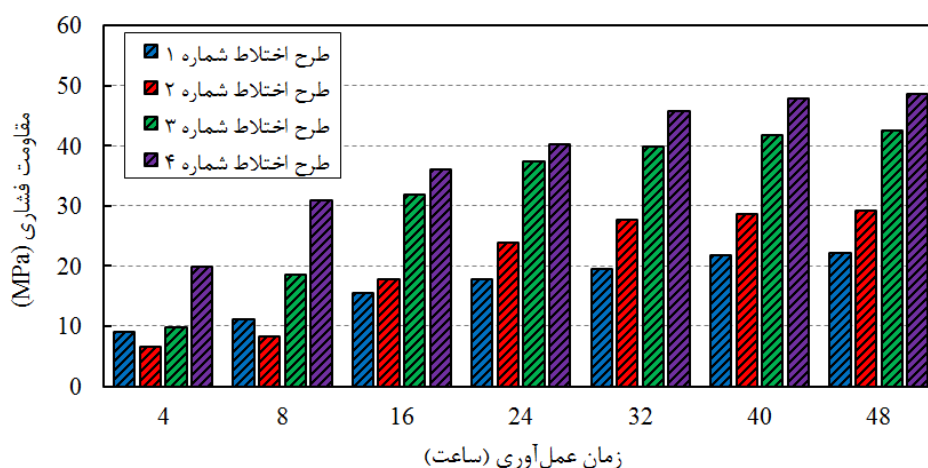


شکل ۸: نتایج مقاومت فشاری بدست آمده برای نمونه‌ها تحت عمل آوری با آب و بخار برای طرح مخلوط شماره ۴

به دلیل افزایش تقاضای آب ناشی از بکارگیری پودر میکروسیلیس کاهش کارایی و در نتیجه اسلامپ بتن رخ می‌دهد که اعداد بدست آمده مؤید این مطلب هستند. بر اساس شکل ۵، ۶، ۷ و ۸ در طرح‌های مخلوط شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ مقاومت ۲۸ روزه کسب شده تحت عمل آوری با آب به ترتیب ۲۸/۵، ۴۸/۴، ۵۴/۱۷ و ۵۲/۲۹ مگاپاسکال و مقاومت تحت ۴۸ ساعت عمل آوری با بخار به ترتیب ۲۲/۲۲، ۲۸/۲۹، ۴۲/۴۴ و ۴۸/۶۶ مگاپاسکال بدست آمده‌اند. بنابراین در طرح‌های مخلوط شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ متناظر با ۴۸ ساعت عمل آوری با بخار به ترتیب ۷۸، ۶۰، ۷۸ و ۹۳ درصد از مقاومت ۲۸ روزه خود تحت عمل آوری با آب بدست آمده است. این یعنی با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت نهایی در عمل آوری با بخار بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش درصد میکروسیلیس مقاومت نهایی در هر دو نوع عمل آوری افزایش می‌یابد. با مقایسه مقاومت‌های کسب شده در عمل آوری با آب نتیجه‌گیری می‌شود که در طرح‌های مخلوط شماره ۱ تا ۳ با افزایش درصد میکروسیلیس مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. طرح مخلوط شماره ۳ دارای بیشترین مقاومت ۲۸ روزه تحت عمل آوری با آب است اما همانطور که پیش‌بینی می‌شد بسیار نزدیک به مقاومت ۲۸ روزه عمل آوری با آب در طرح شماره ۴ می‌باشد. برای سهولت در مقایسه مقاومت فشاری بدست آمده برای هر یک از طرح‌های مخلوط در سنین مختلف تحت عمل آوری با آب و بخار، مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط مختلف برای عمل آوری با آب و بخار به ترتیب در اشکال ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۹: نتایج مقاومت فشاری بدست آمده برای نمونه‌ها تحت عمل آوری با آب برای طرح‌های مخلوط مختلف



شکل ۱۰: نتایج مقاومت فشاری بدست آمده برای نمونه‌ها تحت عمل آوری با بخار برای طرح‌های مخلوط مختلف

در شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که در عمل آوری با آب طرح مخلوط شماره ۳ در سنین ۳ و ۷ روزه مقاومت فشاری کمتری از طرح مخلوط شماره ۴ داراست اما از سن ۱۴ روزه طرح شماره ۳ مقاومت بیشتری داشته و در سن ۲۸ روزه نیز مقدار اندکی مقاومت فشاری بیشتری از طرح مخلوط شماره ۴ دارد. این موضوع نشان می‌دهد طرح مخلوط دارای میکروسیلیس در سنین بالاتر مقاومت نهایی بیشتری تحت عمل آوری با آب خواهند داشت. همچنین مقاومت فشاری متناظر با طرح مخلوط شماره ۲ که در سن ۳ و ۷ روزه تحت عمل آوری با آب مقدار قابل توجهی کمتر از طرح مخلوط شماره ۴ می‌باشد، پس از ۱۴ روز مقاومتی بسیار نزدیک به طرح مخلوط شماره ۴ نشان می‌دهد که این موضوع دلالت بر آن دارد که طرح دارای میکروسیلیس در بازه زمانی بین ۷ و ۱۴ روز در عمل آوری با آب مقاومت قابل توجهی کسب می‌کند. با بررسی شکل ۱۰ نیز می‌توان نتیجه گرفت که در ۸ ساعت دوره عمل آوری با بخار، طرح‌های مخلوط دارای میکروسیلیس (طرح‌های شماره ۲ و ۳) عملکرد ضعیف‌تری نسبت به طرح بدون میکروسیلیس (طرح ۱) از نظر نرخ رشد مقاومت دارند که دلیل آن در افزایش تقاضای آب در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و ترک خوردگی این نمونه‌ها در این بازه زمانی است. همچنین نمونه‌ها تحت ۲۴ ساعت عمل آوری با بخار نسبت به مقاومت ۲۸ روزه بتن تحت عمل آوری با آب، طرح‌های دارای میکروسیلیس بیشترین رشد مقاومت را نسبت به طرح‌های بدون میکروسیلیس داشته‌اند. همچنین با مقایسه نتایج بدست آمده برای طرح‌های مخلوط شماره ۲ و ۳ می‌توان دریافت که با افزایش مقدار میکروسیلیس نرخ افزایش مقاومت بیشتر می‌شود.

جهت بررسی روند رشد مقاومت فشاری در عمل آوری با آب، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ملاک قرار داده شده و مقاومت‌های فشاری ۳، ۷ و ۱۴ روزه برحسب درصدی از مقاومت فشاری ۲۸ روزه در جدول ۴ گزارش شده‌اند. همچنین در عمل آوری با بخار نیز مقاومت فشاری بتن با ۴۸ ساعت عمل آوری ملاک قرار داده شده و مقاومت‌های فشاری بدست آمده با ۴، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۴۰ ساعت عمل آوری برحسب درصدی از مقاومت فشاری متناظر با ۴۸ ساعت عمل آوری با بخار در جدول ۵ اشاره شده‌اند. در جداول ۴ و ۵ انحراف معیار مقاومت‌های فشاری بدست آمده برای نمونه‌ها داخل پرانتز روبروی اعداد میانگین مقاومت فشاری نشان داده شده‌اند.

جدول ۴: روند رشد مقاومت فشاری هر طرح مخلوط تحت عمل آوری با آب نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن

شماره طرح	۱	۲	۳	۴
سن بتن (روز)	مقاومت (MPa)	مقاومت (MPa)	مقاومت (MPa)	مقاومت (MPa)
۳	۱۱/۷۸ (±۰/۸۵)	۱۵/۳۳ (±۰/۰۲)	۲۴/۲۰ (±۱/۳۵)	۲۶/۹۴ (±۰/۹۴)
۷	۱۸/۱۷ (±۰/۱۹)	۲۲/۶۵ (±۱/۷۸)	۳۱/۸۱ (±۲/۱۱)	۳۶/۵۸ (±۰/۸۷)
۱۴	۲۲/۴۸ (±۰/۱۳)	۴۱/۳۷ (±۱/۲۸)	۴۵/۱۸ (±۱/۰۷)	۴۲/۲۶ (±۰/۳۶)
۲۸	۲۸/۵۰ (±۰/۹۶)	۴۸/۴۰ (±۱/۶۴)	۵۴/۱۷ (±۱/۸۴)	۵۲/۲۹ (±۰/۷۷)

جدول ۵: روند رشد مقاومت فشاری هر طرح مخلوط تحت عمل آوری با بخار نسبت به مقاومت فشاری بتن با ۴۸ ساعت عمل آوری

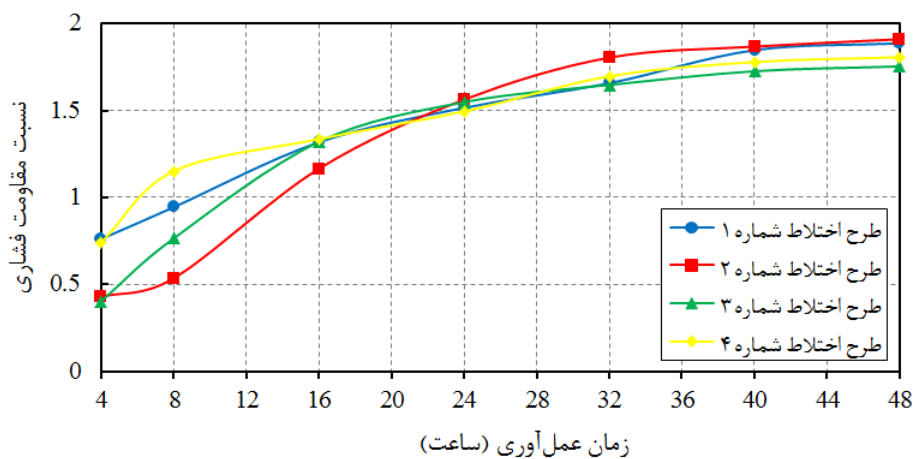
شماره طرح	۱	۲	۳	۴
زمان عمل آوری (ساعت)	مقاومت (MPa)	مقاومت (MPa)	مقاومت (MPa)	مقاومت (MPa)
۴	۸/۹۶ (±۰/۱۷)	۶/۵۷ (±۰/۰۹)	۹/۷۵ (±۰/۰۵)	۱۹/۹۲ (±۰/۶۱)
۸	۱۱/۱۲ (±۰/۲۵)	۸/۲۰ (±۰/۳۲)	۱۸/۵۰ (±۰/۰۸)	۳۱ (±۱/۱۷)
۱۶	۱۵/۵۲ (±۰/۰۷)	۱۷/۸۶ (±۱/۱۷)	۳۱/۹۰ (±۱/۱۵)	۳۵/۹۹ (±۲/۳۱)
۲۴	۱۷/۸۵ (±۰/۲۵)	۲۳/۹۶ (±۲/۱۷)	۳۷/۴۷ (±۱/۹۳)	۴۰/۲۷ (±۰/۰۹)
۳۲	۱۹/۵۲ (±۰/۷۱)	۲۷/۶۶ (±۰/۲۹)	۳۹/۸۶ (±۱/۱۷)	۴۵/۷۱ (±۱/۸۵)
۴۰	۲۱/۷۶ (±۰/۷۶)	۲۸/۶۳ (±۰/۸۷)	۴۱/۷۷ (±۱/۸۱)	۴۷/۹۲ (±۰/۳۸)
۴۸	۲۲/۲۲ (±۰/۶۸)	۲۹/۲۸ (±۰/۹۳)	۴۲/۴۴ (±۰/۰۹)	۴۸/۶۶ (±۰/۱۴)

بر اساس جداول ۴ و ۵، روند رشد مقاومت فشاری در طرح‌های مختلف با تغییر نسبت آب به سیمان یا اضافه شدن پودر میکروسیلیس تغییر می‌کند و روند این تغییر در سنین اولیه و نهایی تفاوت‌هایی دارد، به همین دلیل مقاومت‌های فشاری متناظر با زمان‌های مختلف عمل آوری با بخار برای هر طرح مخلوط نسبت به مقاومت فشاری سنین مختلف عمل آوری با آب می‌تواند اطلاعات مفیدی را مهیا نماید که در جدول ۶ گزارش شده است. همچنین برای مشاهده نحوه رشد مقاومت فشاری در عمل آوری با بخار نسبت به عمل آوری با آب، نمودارهای نسبت مقاومت‌های فشاری بتن با زمان‌های مختلف عمل آوری با بخار به مقاومت‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بتن در حالت عمل آوری با آب به ترتیب در اشکال ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند.

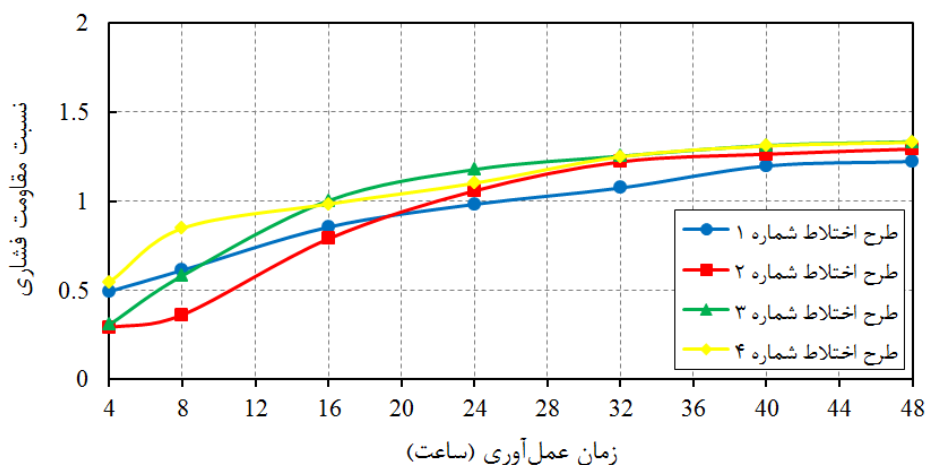
در عمل آوری با بخار با مقایسه دو طرح مخلوط شماره ۱ و ۴ می‌توان ادعا کرد هرچه نسبت آب به سیمان کمتر باشد، سرعت کسب مقاومت نهایی در حالت ۴۸ ساعت عمل آوری با بخار بیشتر می‌شود. از مقایسه دو طرح مخلوط شماره ۲ و ۳ با طرح مخلوط شماره ۱ نیز نتیجه‌گیری می‌شود که طرح دارای میکروسیلیس در ساعات اولیه مقاومت کمتری کسب می‌کنند ولی با گذشت زمان در طرح مخلوط شماره ۲ با ۲۴ ساعت عمل آوری و در طرح مخلوط شماره ۳ با ۱۶ ساعت عمل آوری به نسبت طرح مخلوط شماره ۱، درصد بیشتری از مقاومت فشاری با ۴۸ ساعت عمل آوری بدست آمده است. با مقایسه دو طرح مخلوط شماره ۲ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت که هرچه درصد میکروسیلیس موجود در بتن بیشتر باشد سرعت کسب مقاومت بیشتر شده و یا به عبارتی زمان گیرش کمتر می‌شود. دو طرح مخلوط شماره ۳ و ۴ در زمان‌های عمل آوری بیشتر از ۸ ساعت نسبت به مقاومت فشاری بدست آمده با ۴۸ ساعت عمل آوری، تقریباً درصد برابری را کسب کرده‌اند که این موضوع می‌تواند به برابر بودن اسلامپ این دو طرح مربوط باشد.

جدول ۶: نسبت مقاومت فشاری بتن با زمان‌های مختلف عمل‌آوری با بخار به مقاومت فشاری سنین مختلف تحت عمل‌آوری با آب

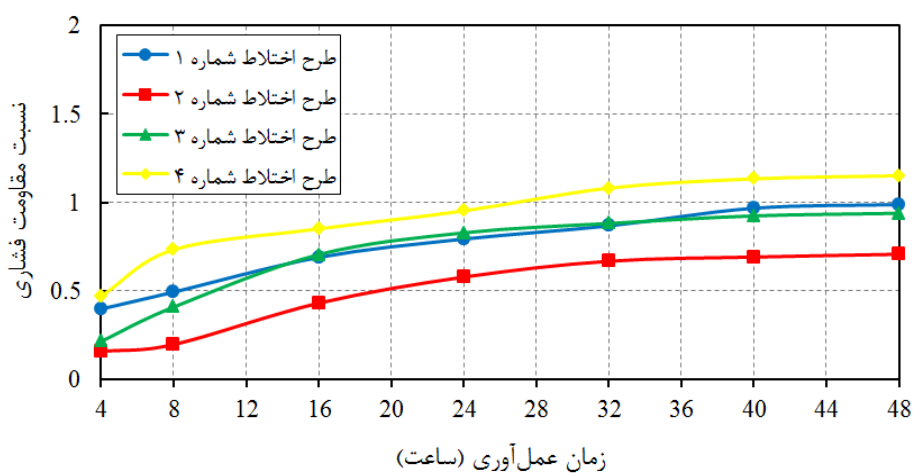
زمان عمل‌آوری با بخار (ساعت)							شماره طرح	سن بتن در عمل‌آوری با آب (روز)
۴۸	۴۰	۳۲	۲۴	۱۶	۸	۴		
۱/۸۹	۱/۸۵	۱/۶۶	۱/۵۲	۱/۳۲	۰/۹۴	۰/۷۶	۱	۳
۱/۹۱	۱/۸۷	۱/۸۰	۱/۵۶	۱/۱۷	۰/۵۳	۰/۴۳	۲	
۱/۷۵	۱/۷۳	۱/۶۵	۱/۵۵	۱/۳۲	۰/۷۶	۰/۴۰	۳	
۱/۸۱	۱/۷۸	۱/۷۰	۱/۴۹	۱/۳۴	۱/۱۵	۰/۷۴	۴	
۱/۲۲	۱/۲۰	۱/۰۷	۰/۹۸	۰/۸۵	۰/۶۱	۰/۴۹	۱	۷
۱/۲۹	۱/۲۶	۱/۲۲	۱/۰۶	۰/۷۹	۰/۳۶	۰/۲۹	۲	
۱/۳۳	۱/۳۱	۱/۲۵	۱/۱۸	۱	۰/۵۸	۰/۳۱	۳	
۱/۳۳	۱/۳۱	۱/۲۵	۱/۱۰	۰/۹۸	۰/۸۵	۰/۵۴	۴	
۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۸۷	۰/۷۹	۰/۶۹	۰/۴۹	۰/۴۰	۱	۱۴
۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۵۸	۰/۴۳	۰/۲۰	۰/۱۶	۲	
۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۷۱	۰/۴۱	۰/۲۲	۳	
۱/۱۵	۱/۱۳	۱/۰۸	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۴۷	۴	
۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۳۱	۱	۲۸
۰/۶	۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۵	۰/۳۷	۰/۱۷	۰/۱۴	۲	
۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۱۸	۳	
۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۵۹	۰/۳۸	۴	



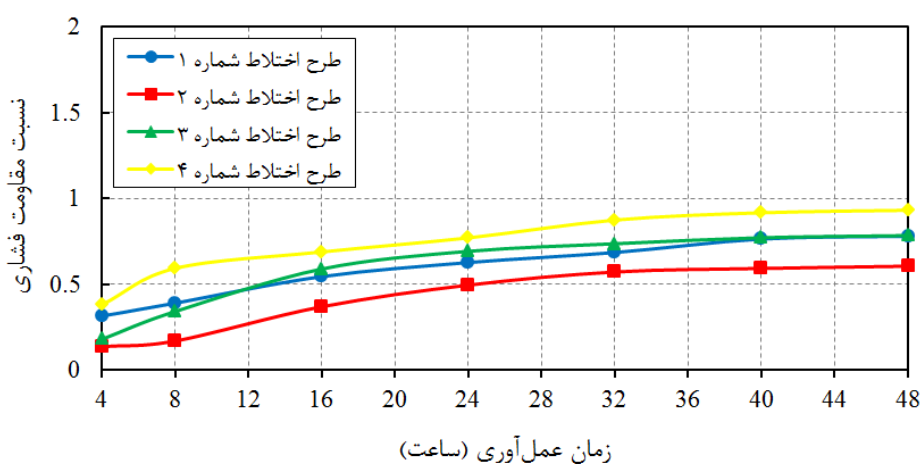
شکل ۱۱: نسبت مقاومت فشاری بتن با زمان‌های مختلف عمل‌آوری با بخار به مقاومت فشاری ۳ روزه بتن تحت عمل‌آوری با آب



شکل ۱۲: نسبت مقاومت فشاری بتن با زمان‌های مختلف عمل آوری با بخار به مقاومت فشاری ۷ روزه بتن تحت عمل آوری با آب



شکل ۱۳: نسبت مقاومت فشاری بتن با زمان‌های مختلف عمل آوری با بخار به مقاومت فشاری ۱۴ روزه بتن تحت عمل آوری با آب



شکل ۱۴: نسبت مقاومت فشاری بتن با زمان‌های مختلف عمل آوری با بخار به مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن تحت عمل آوری با آب

بر اساس جداول ارائه شده مشخص است که طرح‌های دارای میکروسیلیس در مقایسه با طرح‌های بدون آن تحت عمل آوری با بخار دیرتر به مقاومت ۳ روزه تحت عمل آوری با آب می‌رسند. اما این موضوع برای مقاومت ۷ روزه بتن تحت عمل آوری با آب صادق نیست

زیرا طرح شماره ۳ که دارای بیشترین مقدار میکروسیلیس است؛ تحت ۱۶ ساعت عمل‌آوری با بخار پیش‌تر از تمامی طرح‌ها به مقاومت ۷ روزه تحت عمل‌آوری با آب رسیده است. در ارتباط با مقاومت ۱۴ روزه تحت عمل‌آوری با آب، طرح‌های بدون میکروسیلیس تحت عمل‌آوری با بخار به مقاومت مذکور رسیده‌اند در حالی که طرح‌های دارای میکروسیلیس قادر به آن نبوده‌اند اما عملکرد طرح شماره ۳ با محتوای پودر میکروسیلیس بیشتر بهتر بوده است. در نهایت در مورد مقاومت ۲۸ روزه بتن در حالت عمل‌آوری با آب نیز مشاهده می‌شود که هیچکدام از طرح‌ها تحت ۴۸ ساعت عمل‌آوری با بخار به مقاومت ۲۸ روزه بتن نرسیده‌اند. مشاهده روند افزایش مقاومت در این حالت نیز مشابه مقاومت ۷ روزه بتن مؤید آن است که طرح شماره ۳ نسبت به طرح شماره ۲ عملکرد بهتری داشته است. بایستی اشاره نمود که با وجود رشد سریع مقاومت در عمل‌آوری بتن با بخار، این نوع از عمل‌آوری تأثیر منفی بر ریزساختار بتن در نتیجه خشک‌شدگی و ترک‌خوردگی داخل بتن دارد که رشد دیر هنگام اترینگات در این نوع از عمل‌آوری دلیل این اثرات مضر دانسته شده است [۱۲]. این مسئله تأثیر مستقیم در روند کسب مقاومت نمونه‌ها تحت عمل‌آوری با بخار و آب خواهد داشت.

بر اساس شکل ۱۱، طرح‌های مخلوط شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب تقریباً با ۹، ۱۴، ۱۱ و ۶ ساعت عمل‌آوری با بخار به مقاومت فشاری ۳ روزه بتن در حالت عمل‌آوری با آب رسیده‌اند. این مسئله دلالت بر آن دارد که طرح شماره ۴ با نسبت آب به سیمان کمتر و بدون میکروسیلیس زودتر به مقاومت ۳ روزه بتن در حالت عمل‌آوری با آب رسیده است. به صورت کلی طرح‌های بدون میکروسیلیس سریع‌تر از طرح‌های دارای میکروسیلیس به مقاومت ۳ روزه بتن رسیده‌اند و با مقایسه طرح شماره ۲ و ۳ نیز می‌توان نتیجه گرفت که طرح دارای میکروسیلیس بیشتر (۱۵٪ در مقایسه با ۱۰٪) عملکرد بهتری در رسیدن به مقاومت ۳ روزه بتن داشته است. بر اساس شکل ۱۲، طرح‌های مخلوط شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب تقریباً با ۲۵، ۲۲، ۱۶ و ۱۷ ساعت عمل‌آوری با بخار به مقاومت فشاری ۷ روزه بتن در حالت عمل‌آوری با آب رسیده‌اند. در این مورد مشاهده می‌شود که بهترین عملکرد برای طرح شماره ۳ با ۱۵٪ ماده افزودنی پودر میکروسیلیس بوده است. بر اساس شکل ۱۳، طرح‌های مخلوط بدون میکروسیلیس شماره ۱ و ۴ تقریباً با ۴۸ و ۲۷ ساعت عمل‌آوری با بخار به مقاومت ۱۴ روزه بتن در حالت عمل‌آوری با آب رسیده‌اند اما طرح‌های با میکروسیلیس شماره ۲ و ۳ قادر به تأمین مقاومت ۱۴ روزه بتن در طول مدت ۴۸ ساعت عمل‌آوری با بخار نبوده‌اند ولی در این حالت نیز مشابه حالت‌های قبل عملکرد طرح شماره ۳ با ۱۵٪ ماده افزودنی میکروسیلیس بهتر بوده است. بر اساس شکل ۱۴ نیز هیچکدام از طرح‌ها با ۴۸ ساعت عمل‌آوری با بخار قادر به تأمین مقاومت ۲۸ روزه بتن در حالت عمل‌آوری با آب نبوده‌اند. برای اعضای بتنی پیش‌ساخته و همچنین در بتن‌های پیش‌تنیده، تأمین ۷۰٪ از مقاومت ۲۸ روزه بتن لازم خواهد بود [۹]. بر اساس جدول ۶ و شکل ۱۴، طرح‌های شماره ۱، ۳ و ۴ به ترتیب با ۳۴، ۲۴ و ۱۶ ساعت عمل‌آوری با بخار به ۷۰٪ از مقاومت ۲۸ روزه بتن رسیده‌اند در حالی که طرح ۲ قادر به تأمین ۷۰٪ از مقاومت ۲۸ روزه بتن نبوده است. بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که در عمل‌آوری با بخار بهتر است که نسبت آب به سیمان برای بتن کمتر در نظر گرفته شده و حداقل امکان برای رشد مناسب مقاومت از میکروسیلیس به صورت ماده افزودنی در بتن استفاده نشود چون سطح بتن میکروسیلیسی تمایل به خشک‌شدگی سریع دارد که متعاقباً منجر به انقباض و ترک‌خوردگی قبل از اختلاط نهایی شده و روند رشد مقاومت را مختل می‌سازد. بر اساس نتایج این مطالعه در صورت استفاده از میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی استفاده از ۱۵٪ وزنی سیمان منجر به عملکرد مناسب‌تری در عمل‌آوری با بخار خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر استفاده از ماده افزودنی میکروسیلیس در مقاومت فشاری بتن تحت عمل‌آوری با روش غوطه‌وری در آب و همچنین عمل‌آوری تسریع‌یافته با بخار در سنین مختلف بررسی شده است. بدین منظور چهار طرح مخلوط که در دو طرح از ماده افزودنی میکروسیلیس به مقدار ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی سیمان استفاده شده، در نظر گرفته شده‌اند. ۴۸ نمونه مکعبی تحت عمل‌آوری با روش غوطه‌وری در آب قرار گرفته و در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری آنها سنجیده شده است. همچنین ۸۴ نمونه مکعبی تحت عمل‌آوری تسریع‌یافته با بخار تحت حداکثر دمای 66 ± 2 °C قرار گرفته و مقاومت فشاری آنها با ۴، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۰ و ۴۸ ساعت عمل‌آوری اندازه‌گیری شده است. تحلیل نتایج بدست آمده نشان می‌دهد:

۱- اضافه کردن پودر میکروسیلیس به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری نهایی در هر دو نوع عمل‌آوری می‌شود، به عنوان مثال با افزودن ۱۵٪ وزنی سیمان از این ماده افزودنی به بتن مقاومت فشاری ۲۸ روزه تحت عمل‌آوری با آب و مقاومت فشاری بتن تحت ۴۸ ساعت عمل‌آوری با بخار حدوداً ۹۰٪ افزایش نشان داده است. با در نظر گرفتن معیار کسب ۷۰٪ مقاومت ۲۸ روزه برای بتن‌های پیش‌ساخته و پیش‌تنیده، بتن دارای ۱۰٪ پودر میکروسیلیس قادر به تأمین این مقاومت نبوده درحالی که با افزودن ۱۵٪ پودر میکروسیلیس به بتن در ۲۴ ساعت عمل‌آوری با بخار این مقدار رشد مقاومت بدست آمده است.

۲- طرح‌های دارای پودر میکروسیلیس در بازه زمانی بین ۷ تا ۱۴ روز در عمل‌آوری با آب و ۲۴ ساعت اول در عمل‌آوری با بخار درصد قابل توجهی از مقاومت نهایی عمل‌آوری متناظر را کسب می‌کنند.

۳- با کاهش نسبت آب به سیمان سرعت کسب مقاومت نهایی تحت عمل‌آوری با بخار بیشتر می‌شود. برای نمونه تحت ۴۸ ساعت عمل‌آوری با بخار برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۶ و ۰/۳۵ به ترتیب ۷۸٪ و ۹۳٪ مقاومت ۲۸ روزه بتن بدست آمده است.

۴- طرح‌های دارای میکروسیلیس در عمل‌آوری با بخار در اکثر حالات عملکرد به مراتب ضعیف‌تری از طرح بدون میکروسیلیس از نظر نرخ رشد مقاومت دارند. برای نمونه تحت ۴۸ ساعت عمل‌آوری با بخار، در بتن بدون میکروسیلیس ۷۸٪ و در بتن با ۱۰٪ میکروسیلیس ۶۰٪ مقاومت ۲۸ روزه کسب شده است.

۵- با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که با وجود افزایش مقاومت نهایی در صورت استفاده از پودر میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی در بتن، نرخ رشد مقاومت در این نوع بتن‌ها در مقایسه با بتن‌های معمولی بدون ماده افزودنی تحت عمل‌آوری با بخار دچار مشکل خواهد بود. در صورت لزوم استفاده از پودر میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی در بتن تحت عمل‌آوری با بخار پیشنهاد می‌شود که ۱۵٪ وزنی سیمان از پودر میکروسیلیس استفاده شده و تحت حداکثر دمای 66 ± 2 °C بتن به مدت ۲۴ ساعت تحت عمل‌آوری با بخار قرار گیرد.

مراجع

- [1] ACI 308R-01. (2001). *Guide to curing concrete*. American Concrete Institute, USA.
- [2] Mi, Z., Hu, Y., Li, Q. and An, Z. (2018). Effect of curing humidity on the fracture properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 169, 403-413.
- [3] Jensen, O.M. (1995). Thermodynamic limitation of self-desiccation. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 157-164.
- [4] Patel, R.G., Killoh, D.C., Parrott, L.J. and Gutteridge, W.A. (1988). Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste. *Materials and Structures*, 21(3), 192-197.
- [5] Neville, A.M. (2002). *Properties of Concrete*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- [6] Naderi, M., Sheibani, R. and Shayanfar, M.A. (2009). Comparison of different curing effects on concrete strength. In: *3rd International Conference on concrete and development*. Tehran, Iran, 507-516.
- [7] Zeyad, A.M., Tayeh, B.A., Adesina, A., de Azevedo, A.R., Amin, M., Hadzima-Nyarko, M. and Agwa, I.S. (2022). Review on effect of steam curing on behavior of concrete. *Cleaner Materials*, 3, 100042.
- [8] Türkel, S. and Alabas, V. (2005). The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 405-411.
- [9] Aydin, A.C., Öz, A., Polat, R. and Mindivan, H. (2015). Effects of the different atmospheric steam curing processes on the properties of self-compacting-concrete containing microsilica. *Sadhana*, 40(4), 1361-1371.
- [10] Mo, Z., Gao, X. and Su, A. (2021). Mechanical performances and microstructures of metakaolin contained UHPC matrix under steam curing conditions. *Construction and Building Materials*, 268, 121112.
- [11] Gambhir, M. (2004). *Concrete technology*. 3rd edition. India: Tata McGraw-Hill Education.
- [12] Barbarulo, R., Peycelon, H. and Leclercq, S. (2007). Chemical equilibria between C-S-H and ettringite, at 20 and 85°C. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1176-1181.
- [13] Baoju, L., Youjun, X., Shiqiong, Z. and Jian, L. (2001). Some factors affecting early compressive strength of steam-curing concrete with ultrafine fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1455-1458.
- [14] Zhimin, H., Junzhe, L. and Kangwu, Z. (2012). Influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of steam-cured concrete. *Energy procedia*, 16, 836-841.
- [15] Ji, T. (2005). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and concrete Research*, 35(10), 1943-1947.
- [16] Montes, P., Bremner, T.W. and Castellanos, F. (2006). Interactive effects of fly ash and CNI on corrosion of reinforced high-performance concrete. *Materials and Structures*, 39(2), 201-210.

- [17] Wang, M., Xie, Y., Long, G., Ma, C. and Zeng, X. (2019). Microhardness characteristics of high-strength cement paste and interfacial transition zone at different curing regimes. *Construction and Building Materials*, 221, 151-162.
- [18] Zeyad, A.M., Johari, M.A.M., Alharbi, Y.R., Abadel, A.A., Amran, Y.M., Tayeh, B.A. and Abutaleb, A. (2021). Influence of steam curing regimes on the properties of ultrafine POFA-based high-strength green concrete. *Journal of Building Engineering*, 38, 102204.
- [19] Zhang, J., Chen, T. and Gao, X. (2021). Incorporation of self-ignited coal gangue in steam cured precast concrete. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126004.
- [20] Chen, L., Zheng, K., Xia, T. and Long, G. (2019). Mechanical property, sorptivity and microstructure of steam-cured concrete incorporated with the combination of metakaolin-limestone. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00267.
- [21] Ramezani pour, A.M., Esmaili, K., Ghahari, S.A. and Ramezani pour, A.A. (2014). Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. *Construction and building materials*, 73, 187-194.
- [22] Shi, J., Liu, B., Zhou, F., Shen, S., Guo, A. and Xie, Y. (2021). Effect of steam curing regimes on temperature and humidity gradient, permeability and microstructure of concrete. *Construction and Building Materials*, 281, 122562.
- [23] Scali, M.J., Chin, D., and Berke, N.S. (1987). Effect of microsilica and fly ash upon the microstructure and permeability of concrete. In: *Proceeding of 9th International Conference on Cement Microscopy*. Duncanville, Texas: International Cement Microscopy Association, 375-387.
- [24] Yazdani, N., Filsaime, M. and Islam, S. (2008). Accelerated curing of silica-fume concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 20(8), 521-529.
- [25] Safiuddin, M., Raman, S.N. and Zain, M.F.M. (2007). Effect of different curing methods on the properties of microsilica concrete. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1(2), 87-95.
- [26] Raheem, A.A., Soyingbe, A.A. and Emenike, A.J. (2013). Effect of curing methods on density and compressive strength of concrete. *International Journal of Applied Science and Technology*, 3(4), 55-64.
- [27] Naderi, M., Valibeigi, R. and Mirsafi, S.M. (2017). Studying the effects of kind of curing on compressive strength and permeability of concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(3), 106-123.
- [28] Liu, B., Jiang, J., Shen, S., Zhou, F., Shi, J. and He, Z. (2020). Effects of curing methods of concrete after steam curing on mechanical strength and permeability. *Construction and Building Materials*, 256, 119441.
- [29] Boukendakdji, M., Touahmia, M., Achour, B., Albaqawy, G., Abdelhafez, M.H.H., Elkhayat, K. and Noaime, E. (2021). The effects of steam-curing on the properties of concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(2), 6974-6978.
- [30] Yan, X., Jiang, L., Guo, M., Chen, Y., Song, Z. and Bian, R. (2019). Evaluation of sulfate resistance of slag contained concrete under steam curing. *Construction and Building Materials*, 195, 231-237.
- [31] Yan, X., Jiang, L., Guo, M., Chen, Y., Zhu, P., Jin, W. and Zha, J. (2020). Using EDTA-2Na to inhibit sulfate attack in slag cement mortar under steam curing. *Construction and Building Materials*, 265, 120324.
- [32] Zeyad, A.M., Johari, M.A.M., Abutaleb, A. and Tayeh, B.A. (2021). The effect of steam curing regimes on the chloride resistance and pore size of high-strength green concrete. *Construction and Building Materials*, 280, 122409.
- [33] Zhuang, S. and Sun, J. (2020). The feasibility of properly raising temperature for preparing high-volume fly ash or slag steam-cured concrete: An evaluation on DEF, 4-year strength and durability. *Construction and Building Materials*, 242, 118094.
- [34] ASTM C33-03. (2003). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken.
- [35] ACI C211.1-91. (2000). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ACI manual of concrete practice, Part 1, Michigan, USA.
- [36] ASTM C192. (2016). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International, West Conshohocken.
- [37] ASTM C109. (2007). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM International, West Conshohocken.
- [38] Erdem, T.K., Turanlı, L. and Erdogan, T.Y. (2003). Setting time: an important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 741-745.
- [39] Mironov, S.A. (1966). *Some generalizations in theory and technology of acceleration of concrete hardening*. Washington, DC: Highway Research Board Special Report, No. 90.
- [40] Benammar, B., Mezghiche, B. and Guettala, S. (2013). Influence of atmospheric steam curing by solar energy on the compressive and flexural strength of concretes. *Construction and Building materials*, 49, 511-518.