

Experimental Investigation of the Effect of Partial Replacement of Cement with Ferrophosphorus on the Setting Time of Cement Paste

Sakineh Atayee¹, Payam Tarighi^{2*}, Mehdi Shalchi Tousi², Ata Hojat Kashani³

1- M.Sc. in Civil Engineering, Structural Engineering, Ahlul Bayt International University,

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering and Technology, Ahlul Bayt International University,

3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

p.tarighi@abu.ac.ir

Received: 23 October 2025 Revised: 01 January 2026 Accepted: 14 February 2026

Research paper

Abstract

Ferrophosphorus, as a by-product of the steel industry, contains reactive mineral compounds that can influence the hydration process of cement. This study aimed to evaluate the effect of various replacement levels of ferrophosphorus on the setting time of cement Paste. For this purpose, Type II Portland cement was partially replaced with ferrophosphorus at levels of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. The initial and final setting times were measured using the Vicat apparatus in accordance with ASTM C191. The experimental results revealed that increasing the ferrophosphorus content led to a continuous delay in both the initial and final setting times. Specifically, the initial setting time increased from 165 minutes in the control sample to 197.5 minutes at 20% replacement, while the final setting time rose from 222 minutes to 265 minutes under the same condition. These findings indicate that ferrophosphorus acts as a retarding admixture, delaying both the onset and completion of cement hydration. However, excessive replacement levels may result in undesirable delays that could negatively affect construction schedules and the long-term performance of concrete. Overall, the results suggest that ferrophosphorus, when used in optimum replacement ratios, has potential to serve as a sustainable mineral admixture that not only contributes to industrial waste management but also provides effective control over the setting process of cementitious materials.

Keywords: Ferrophosphorus, Cement Paste, Setting time, Vicat Needle, Portland Cement.

*Corresponding Author: Payam Tarighi

Atayee S., Tarighi P., Shalchi Tousi M., Hojat Kashani A. Experimental Investigation of the Effect of Partial Replacement of Cement with Ferrophosphorus on the Setting Time of Cement Paste. J. Concr. Struct. Mater., 2026; 10(1): 53-69. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2026.555064.1405>

2538-5828/ © 2026 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

زمان گیرش خمیر سیمانی

سکینه عطایی^۱، پیام طریقی^{۲*}، مهدی شالچی طوسی^۲، عطا حجت کاشانی^۳

۱- کارشناسی، ارشد مهندسی، عمران، دانشگاه بین المللی، اهل بیت (ع)

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی، اها بیت^(ع)

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

پست الکترونیک، نویسنده مسئول: p.tarighi@abu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیدہ

فروفسفر به‌عنوان یکی از محصولات جانبی صنایع فولاد، به دلیل دارا بودن ترکیبات معدنی فعال می‌تواند در بهبود یا تغییر رفتار هیدراتاسیون سیمان نقش مؤثری ایفا کند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مقادیر مختلف فروفسفر بر زمان‌گیرش خمیر سیمانی انجام شده است. برای این منظور، نمونه‌های سیمان تیپ II با درصدهای جایگزینی (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) درصد فروفسفر تهیه و با استفاده از دستگاه ویکات تحت شرایط استاندارد ASTM C191 مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان فروفسفر، زمان‌گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمانی افزایش یافته؛ به‌طوری که زمان‌گیرش اولیه از ۱۶۵ دقیقه در نمونه شاهد به ۱۹۷/۵ دقیقه در نمونه حاوی ۲۰ درصد فروفسفر رسید. همچنین زمان‌گیرش نهایی از ۲۲۲ دقیقه در نمونه شاهد به ۲۶۵ دقیقه در نمونه با بیشترین درصد جایگزینی افزایش پیدا کرده است. این تغییرات نشان داد که فروفسفر می‌تواند همانند یک افزودنی کندگیر عمل کند و آغاز واکنش‌های هیدراتاسیون را به تأخیر اندازد. با این حال، استفاده بیش از حد این ماده ممکن است باعث ایجاد محدودیت‌هایی در کاربردهای عملی شود؛ چراکه تأخیر زیاد در گیرش می‌تواند بر فرایندهای اجرایی و دوام بتن اثر منفی بگذارد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که فروفسفر با نسبت‌های بهینه می‌تواند به‌عنوان یک افزودنی معدنی جایگزین مورد توجه قرار گیرد و ضمن کمک به مدیریت پسماندهای صنعتی، در کنترل فرآیند گیرش خمیر سیمانی نیز نقش داشته باشد.

واژگان کلیدی: فروفسفر، زمان گیرش، خمیر سیمانی، سوزن ویکات، سیمان پرتلند.

کنترل زمان گیرش خمیر سیمانی از مسائل مهم در صنعت ساخت و سازه است. تغییرات دما، رطوبت و شرایط محیطی می‌توانند باعث تسریع یا تأخیر در فرآیند گیرش شود. از این رو، استفاده از مواد افزودنی برای کنترل این فرآیند اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از افزودنی‌های کمتر بررسی شده، فروفسفر (Ferrophosphorus) است که به عنوان محصول جانبی صنعت فولاد تولید می‌شود. فروفسفر (Ferrophosphorus)، محصول جانبی صنعت تولید آلیاژهای آهن - فسفر، حاوی ترکیبات فسفوری و آهنی است که می‌تواند در خواص گیرشی و مکانیکی سیمان تأثیر بگذارد. هنگام مخلوط شدن سیمان با آب، خمیری حاصل می‌گردد که در ابتدا دارای خاصیت پلاستیک بوده و به تدریج دچار افزایش سختی و کاهش روانی می‌شود. این تغییر تدریجی از حالت خمیری به حالت سخت و مقاوم، تحت عنوان (فرآیند گیرش سیمان) شناخته می‌شود و نقش کلیدی در تعیین خواص مکانیکی و دوام بتن ایفا می‌کند [۱]. ترکیبات شیمیایی خاص فروفسفر می‌تواند روی واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان تأثیرگذار باشد [۲].

پان و همکاران [۳] با هدف بررسی امکان استفاده از افزودنی‌های زیستی به جای افزودنی‌های شیمیایی در ملات سیمانی، پژوهشی را بر پایه استفاده از عصاره پسماند هویج به عنوان یک زیست‌افزودنی طبیعی انجام دادند. در آن مطالعه، نمونه‌های ملات با مقادیر مختلف عصاره هویج ساخته شده و تأثیر آن بر زمان گیرش و مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که عصاره هویج سبب تأخیر در واکنش‌های هیدراتاسیون اولیه سیمان و افزایش ۱/۲ تا ۲/۷ برابری زمان گیرش گردید. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی عصاره هویج در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۱۲/۵، ۱۱/۶ و ۴/۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد گزارش شد.

لیانگ و همکاران [۴] در پژوهشی روشی نوین برای ارتقای عملکرد بتن‌های بازیافتی با استفاده از اسید تانیک ارائه کردند. نتایج آن مطالعه نشان داد که تیمار سنگدانه‌های بازیافتی با محلول اسید تانیک موجب افزایش سرعت هیدراتاسیون، بهبود چسبندگی بین خمیر سیمان، سنگدانه‌ها و ارتقای مقاومت فشاری بتن گردید. یافته‌های آن تحقیق با نتایج پژوهش پان و همکاران (۲۰۲۲) هم‌راستا بود؛ با این تفاوت که در مطالعه پان از عصاره طبیعی هویج به عنوان یک ماده زیستی بازیافتی و کم‌هزینه استفاده شد، در حالی که لیانگ از اسید تانیک خالص بهره گرفته شده است.

مطالعاتی که توسط الخفاجی و روداک [۵] انجام شد، نشان داد که استفاده از انواع مختلف شکر می‌تواند زمان گیرش و دمای هیدراتاسیون خمیر سیمان را به طور قابل توجهی تغییر دهد. بر اساس نتایج آن تحقیق، شکر نیشکری در مقادیر کم (۰/۵٪ و ۱/۵٪) به عنوان کندگیر کننده و در مقادیر بالاتر (۲/۵٪ و ۵٪) به عنوان شتاب‌دهنده عمل کرده، درحالی که شکر چغندر در تمامی مقادیر خاصیت کندگیر کنندگی از خود نشان داده است.

در مطالعه شفائی و همکاران [۶] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از حباب‌های ریز و نانویی هوا به عنوان جایگزین آب و همچنین نقش فوق‌روان‌کننده در رفتار خمیر سیمانی، پرداخته شده است. در آن مطالعه، زمان گیرش اولیه و نهایی ملات در حضور و عدم حضور حباب‌های ریز و نانویی هوا و با درصدهای مختلف فوق‌روان‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که استفاده از این حباب‌ها باعث افزایش زمان گیرش ملات سیمانی شده که علت آن تغییر در روند واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان بوده است. همچنین افزایش مقدار فوق‌روان‌کننده تا حدی توانسته این تأخیر را کاهش دهد و باعث یکنواخت‌تر شدن فرآیند گیرش شود. تحقیق مدندوست و همکاران [۷] نشان داد که افزایش درصد خاکستر پوسته شلتوک برنج باعث تأثیر در زمان گیرش اولیه و نهایی بتن می‌شود، اما بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی و مقاومت بتن ایجاد نکرده است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از روش سرعت موج اولتراسونیک (UPV)^۱ می‌تواند به عنوان معیاری مؤثر برای ارزیابی زمان گیرش و تغییرات ساختار بتن به کار گرفته شود.

^۱ Ultrasonic Pulse Velocity.

فروفسفر یکی از محصولات جانبی صنعت تولید آلیاژ آهن و فسفر است که معمولاً به عنوان ضایعات صنعتی در نظر گرفته می شود. ترکیب شیمیایی این ماده شامل اکسیدهای فسفر و آهن است و به واسطه ماهیت قلیایی و واکنش پذیری آن، می تواند بر فرآیندهای هیدراسیون سیمان تأثیرگذار باشد [۸]. پارک و لی [۹] نشان دادند که افزودنی های فسفردار باعث شکل گیری کمپلکس های سطحی روی ذرات سیمان می شوند که مانع واکنش سریع آب با سیلیکات ها و آلومینات ها شده و فرآیند گیرش را به تأخیر می اندازد. اسماعیل و همکاران [۱۰] اثر به کارگیری پودر کنف را به عنوان الیاف طبیعی با مقادیر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی نسبت به سیمان را بر زمان گیرش ملات بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب دارای ۴۰ درصد پودر کنف و ۳۲۵ گرم آب، زمان گیرش مناسبی را برای انباشته شدن لایه های بتن در فرآیند چاپ سه بعدی فراهم کرد و موفق به عبور از زمان گیرش استاندارد ۶۰۰ دقیقه شد. در مطالعه شرما و همکاران [۱۱] تأثیر افزودن اسید ایمینودی اسید^۲ (IDA) را بر زمان گیرش و مقاومت فشاری خمیر ملات سیمانی مورد بررسی قرار گرفته است. در آن تحقیق، سیمان پرتلند معمولی با درصدهای مختلفی از (IDA) از ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی نسبت به سیمان مخلوط شده و زمان گیرش اولیه و نهایی و همچنین مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز اندازه گیری شده است. نتایج تحقیق بیانگر آن بود که افزایش مقدار IDA به ویژه بالاتر از ۱/۲۵ درصد باعث کاهش تشکیل ترکیب هیدرات سیلیکات کلسیم^۳ (CSH) شده و در نتیجه تأخیر در زمان گیرش تا حدود ۱۰ ساعت شده است. همچنین، مقاومت فشاری تا حدی کاهش یافته اما این کاهش قابل کنترل بوده است و در برخی کاربردها مانند بتن ریزی در مناطق کوهستانی که نیاز به افزایش زمان کارپذیری وجود دارد، می تواند مفید باشد.

در اقلیم های معتدل، فرآیند بتن ریزی همواره با چالش های روبه رو است. برای مقابله با این شرایط، از افزودنی های کندگیر کننده برای افزایش زمان گیرش مواد سیمانی استفاده می شود. یکی از این افزودنی ها شکر بوده که با وجود اثر کندکنندگی، به دلیل ایجاد تأخیر نامحدود در سخت شدن بتن، همراه مورد نقد قرار گرفته است. مطالعات زیادی نشان داده اند که افزودن ۱٪ شکر (بر اساس وزن سیمان) به خمیر سیمان پرتلند، موجب تأخیر در روند زمان گیرش و سخت شدن آن شده است [۱۲]. در مطالعه خان و بارادان [۱۲] از افزودنی شکر به مقدار ۰/۱۵٪ استفاده شده است. نتایج نشان دهنده آن بود که این مقدار باعث افزایش زمان گیرش گردیده، در حالی که ترکیب های بالاتر از ۰/۲۵٪ باعث تسریع فرآیند زمان گیرش شده است. آن ها همچنین بیان کردند که در بازه ۰/۳ تا ۰/۸ درصد رفتار افزودنی تغییر کرده و از کندکننده به شتاب دهنده تبدیل شده است.

در مطالعه محسنی پور و همکاران [۱۳] به بررسی اثر استفاده از مواد بازیافتی نظیر پودر شیشه، پوسته تخم مرغ، پودر آهن و لاستیک در ترکیب ملات سیمانی پرداخته شده است. در آن پژوهش نمونه ها در شرایط محیطی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری آن ها به کمک آزمون های SEM و XRD مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که افزودن این مواد بازیافتی توانسته با تغییر در ساختار داخلی خمیر سیمان، تخلخل و واکنش های شیمیایی، موجب بهبود مقاومت فشاری و دوام ملات گردد. این تغییرات در ریزساختار و واکنش های سیمانی، نقش مهمی در فرایند هیدراسیون و در نتیجه در زمان گیرش اولیه و نهایی خمیرهای سیمانی ایفا کرده است.

در مطالعه دیگر، الخفاجی و روداک [۱۴] تأثیر چهار نوع شکر (دان های، کاستر، قهوه ای و شیر چغندر قند) را بر زمان گیرش خمیر سیمان بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار شکر تا ۱/۵٪ زمان گیرش نهایی افزایش یافته، اما زمان گیرش اولیه کاهش پیدا کرده است. همچنین، در مقادیر بالاتر (۲/۵ و ۵٪)، کاهش در هر دو زمان گیرش اولیه و گیرش نهایی دیده شد، به جز در مورد

^۲ Iminodiacetic acid

^۳ Calcium Silicate Hydrate

^۴ Khan & Baradan

۵٪ شیره چغندر قند که باعث کاهش زمان اولیه و افزایش زمان نهایی گیرش نسبت به نمونه شاهد گردد.

احمد و همکاران [۱۵] تأثیر آب چغندر قند (Sugar cane juice) را بر زمان گیرش و مقاومت فشاری خمیر سیمان و ملات ساخته شده از سیمان نوع I و V را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان نمودند که با دوز (میزان ترکیب قند) ۰/۰۵ درصد زمان گیرش اولیه و نهایی افزایش یافته، اما با افزایش دوز به ۰/۲۵ درصد هر دو زمان کاهش پیدا کرده است. همچنین مشاهده شد که در مقادیر بالاتر، ترک‌های وسیع‌تری در ریزساختار ایجاد شده که به کاهش مقاومت مکانیکی منجر گردید. همچنین در مطالعه عثمان و همکاران [۱۶] نیز تأثیر افزودنی شکر بر زمان گیرش و مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه تحقیق نشان داد که نمونه با افزایش اندک ۳/۲۳ درصدی مقاومت فشاری بتن در روز ۲۸ نسبت به نمونه شاهد همراه بوده است. این یافته‌ها تأکید بر این داشتند که مقدار مصرفی شکر باید به دقت کنترل شود تا ضمن بهره‌مندی از مزایای کندکنندگی، از افت مقاومت مکانیکی بتن جلوگیری گردد.

در مطالعه پاول و همکاران [۱۷] به بررسی نقش آب نیشکر^۵ (SCJ) به عنوان یک افزودنی طبیعی در خواص گیرش و سخت‌شدگی مواد سیمانی پرداخته شده است. نتایج آن تحقیق نشان داد که افزودن آب نیشکر در درصدهای مختلف به خمیر و بتن باعث کاهش قابل توجه زمان گیرش اولیه و نهایی گردیده، به طوری که در برخی ترکیبات، زمان گیرش اولیه از ۷۹٪ به ۱۰٪ کاهش یافته است. همچنین کاهش نسبت های آب به سیمان (W/C) و سیمان به ماسه (C/S) همراه با آب نیشکر باعث کاهش بیشتر در زمان گیرش شده است. نتایج بیانگر آن بود که آب نیشکر توانسته به طور مؤثری زمان گیرش را کنترل کرده و به عنوان جایگزینی طبیعی و اقتصادی برای کندکننده‌های شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد.

مرور پژوهش‌های انجام شده نشان داد که عمده مطالعات در زمینه جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند با سایر مواد جانبی و پسماندهای صنعتی بر افزودنی‌هایی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره بلند، میکروسیلیس، پوزولان‌های طبیعی و متاکائولین متمرکز بوده است [۱۸ و ۱۹]. در مقابل، تحقیقات مربوط به استفاده از فروفسفر به عنوان یکی از محصولات جانبی فرآیند تولید آلیاژهای آهن و فسفر بسیار محدود می‌باشد. اکثر مطالعات موجود به بررسی خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری یا دوام در برابر عوامل محیطی پرداخته‌اند [۲۰] و توجه کمی به اثرگذاری فروفسفر بر زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمانی و یا بتن داشت‌هاند. علاوه بر این، اکثر پژوهش‌ها با استفاده از سیمان پرتلند نوع I و سایر ترکیبات خاص انجام شده است، در حالی که داده‌های تجربی مربوط به سیمان پرتلند نوع II که به دلیل حرارت هیدراسیون متوسط و کاربرد گسترده در پروژه‌های سازه‌های اهمیت خاصی دارد بسیار اندک بوده است. این کمبود اطلاعات علمی، ضرورت انجام پژوهش اختصاصی در این زمینه را روشن می‌سازد. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی آزمایشگاهی اثر جایگزینی درصدهای مختلف فروفسفر به عنوان ماده افزودنی به جای سیمان پرتلند نوع II بر زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمانی است. برای این منظور در این مطالعه نمونه‌های خمیر حاوی مقادیر مختلف فروفسفر ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. زمان گیرش اولیه و نهایی این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ویکات و مطابق با الزامات استاندارد ASTM C191 [21] اندازه‌گیری شده و نتایج بدست آمده با نمونه شاهد بدون افزودنی مقایسه گردیده است تا بتواند اثر فروفسفر را به طور دقیق ارزیابی نمود. به این ترتیب در این پژوهش سعی شده تا داده‌های علمی و فنی قابل اتکایی برای استفاده پایدار از فروفسفر در صنعت بتن فراهم آورد و بستر لازم برای تحقیقات تکمیلی در زمینه مصالح جایگزین سیمان را ایجاد نماید.

⁵ Sugarcane Juice

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۱-۲- مواد مصرفی

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل سیمان پرتلند تیپ II، که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) نشان داده شده است، فروفسفر (FeP) تهیه شده از محصولات کارخانه شیمیایی صنایع فسفوری ایران که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۲) بیان شده و آب شرب شهری شهر تهران است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان تیپ II [۲۲]

ویژگی	مقدار تقریبی
رنگ	خاکستری مایل به سبز
وزن مخصوص	۳/۱۶ گرم بر سانتی متر مکعب
دمای هیدراتاسیون	متوسط (پایین تر از تیپ I و بالاتر از تیپ IV)
زمان گیرش	حداقل زمان گیرش اولیه ۴۵ تا ۷۵ دقیقه و نهایی ۳۶۰ دقیقه
مقاومت فشاری (۲۸ روزه)	حدود ۲۵ تا ۳۵ مگاپاسکال

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی فروفسفر [۲۳، ۲۴]

ویژگی	مقدار
فرمول شیمیایی	مخلوط Fe_3P ، Fe_2P و فرمول کلی FeP
شماره CAS ^۶	۸۰۴۹-۱۹-۲
وزن مولکولی	تقریباً ۸۶/۸۲ گرم بر مول (g/mol)
رنگ	جامد خاکستری - فلزی
نقطه ذوب	۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ سانتی گراد
چگالی	معمولاً بین ۵/۸ تا ۷/۸ گرم بر سانتی متر مکعب
ترکیب شیمیایی	۷۰ درصد آهن و ۲۶ درصد فسفر
حلالیت در آب	نامحلول
پایداری	پایداری در دمای محیط در تماس با اسید قوی یا آب، ممکن است فسفین آزاد کند

^۶ Chemical Abstracts Service

جدول ۳. ویژگی‌های ریزساختاری فروفسفر [۲۵]

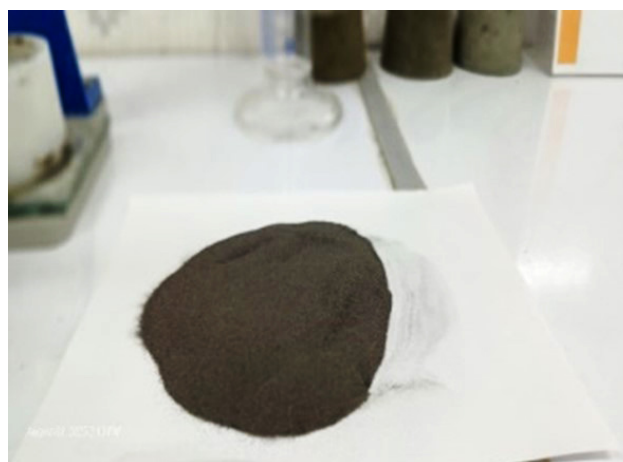
ویژگی	مقدار / توضیح
فاز اولیه	آمورف ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
فاز پس از کلسینه‌سازی	کریستالی FePO_4 منوکلینیک پس از 550°C چهار ساعت
پارامترهای شبکه کریستالی	$a = 5.036\text{nm}$, $b = 5.036\text{nm}$, $c = 11.255\text{nm}$
مورفولوژی ذرات (SEM)	ذرات نامنظم و زایه‌دار با توزیع یکنواخت
رفتار حرارتی (TG-DSC)	کاهش جرم تا حدود 700°C به دلیل از دست دادن آب ساختاری
گروه‌های شیمیایی (FTIR)	باندهای 1636cm^{-1} و 3428cm^{-1} مرتبط با گروه‌ها آب و پیوندهای P-O
نسبت شیمیایی Fe:P	$\text{Fe} \approx 36.84\%$, $\text{P} \approx 20.99\%$ نسبت مولی تقریباً 0.973

۲-۲- طرح اختلاط

برای بررسی تأثیر فروفسفر بر زمان گیرش خمیر سیمانی، طرح اختلاط خمیر با درصدهای جایگزینی مختلف (۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) از وزن سیمان طراحی شده و نسبت آب به سیمان ثابت در نظر گرفته شده است. در شکل (۱) فروفسفر مورد استفاده در طرح اختلاط خمیر سیمانی نمایش داده شده است.

جدول ۴. مقادیر مواد مصرفی برای تست زمان گیرش اولیه و نهایی

سیمان تیپ II به گرم	آب به گرم	مقدار فروفسفر به گرم	درصد (FeP)
۶۵۰	۱۶۲/۵	۰	۰٪
۶۱۷/۵	۱۶۲/۵	۳۲/۵	۵٪
۵۸۵	۱۶۲/۵	۶۵	۱۰٪
۵۵۲/۵	۱۶۲/۵	۹۷/۵	۱۵٪
۵۲۰	۱۶۲/۵	۱۳۰	۲۰٪



شکل (۱) نمایی از فروفسفر مورد استفاده به عنوان ماده جایگزین در طرح اختلاط خمیر سیمانی

۳-۲- روش انجام آزمایش

به منظور بررسی تأثیر جایگزینی جزئی فروفسفر (FeP) با سیمان پرتلند نوع II بر زمان گیرش خمیر سیمانی، مجموعه‌های از آزمایش‌ها مطابق با الزامات استاندارد ASTM C191-19 انجام شد. کلیه مراحل ساخت، آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌ها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و در دمای محیط $23 \pm 2^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی بیش از ۹۰ درصد صورت گرفت تا اثرات محیطی بر نتایج به حداقل برسد.

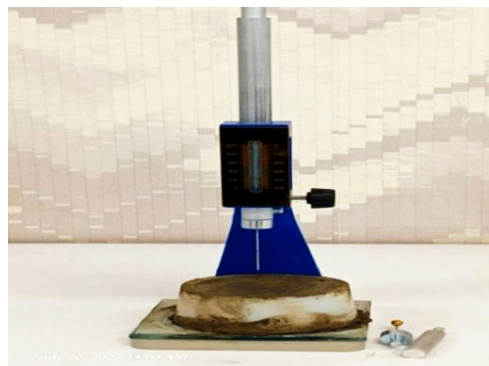
ابتدا مواد اولیه شامل سیمان پرتلند نوع II، فروفسفر (شکل ۱) و آب شرب شهری، مطابق با مقادیر تعیین شده در جدول (۳) با دقت توزین شدند. نسبت آب به سیمان (W/C) در تمامی طرح‌ها ثابت نگه داشته شد تا تن‌ها متغیر مؤثر در نتایج، درصد جایگزینی فروفسفر باشد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا سیمان و فروفسفر به مدت یک دقیقه در حالت خشک توسط همزن مکانیکی مخلوط شدند. سپس آب به صورت تدریجی به مخلوط اضافه شده و عمل اختلاط تر در دو مرحله و جمعاً به مدت سه دقیقه ادامه یافت تا خمیر یکنواختی حاصل شود.

پس از آماده‌سازی، خمیر در قالب استاندارد دستگاه ویکات ریخته شده و با کوبه لاستیکی متراکم گردید تا هوای محبوس خارج شود. آزمون تعیین زمان گیرش با استفاده از دستگاه سوزن ویکات (Vicat Apparatus) مطابق با ساختار نشان داده شده در شکل ۲ انجام گرفت. این دستگاه شامل پایه فلزی صلب، قالب مخروطی استاندارد، میله قائم متحرک، سیستم تنظیم وزن و مجموعه‌های از سوزن‌های قابل تعویض برای تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی است. قبل از آغاز هر آزمایش، دستگاه با استفاده از نمونه شاهد کالیبره شد تا دقت نفوذ سوزن‌ها تضمین گردد.



شکل (۲) اجزای اصلی دستگاه سوزن ویکات مطابق با استاندارد ASTM C191

در تعیین زمان گیرش اولیه، سوزن استاندارد با قطر 1 ± 0.05 میلی‌متر و وزن 300 ± 0.5 گرم در فواصل زمانی منظم (هر ۱۰ دقیقه) بر سطح نمونه اعمال شد تا لحظه‌ای که عمق نفوذ سوزن کمتر از 25 ± 2 میلی‌متر گردد. این لحظه به عنوان زمان گیرش اولیه ثبت گردید. به طور مشابه، زمان گیرش نهایی زمانی تعریف شد که سوزن ویکات دیگر در نمونه نفوذ نکرده یا تن‌ها اثری سطحی بر جای گذارد. نمودار شماتیک فرآیند تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳) روند انجام آزمون و تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی با دستگاه ویکات

برای هر ترکیب، دو نمونه مجزا تهیه و نتایج حاصل میانگین گیری شد تا اثر خطای آزمایشگاهی کاهش یابد. در طول آزمون، نمونه‌ها درون محفظه‌های با دمای ثابت و رطوبت کنترل شده نگهداری شدند تا از تبخیر زودهنگام آب و تغییر نرخ هیدراتاسیون جلوگیری شود. در پایان، زمان گیرش اولیه و نهایی برای نمونه‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد فروفسفر استخراج شد. به منظور بررسی کمی اثر فروفسفر بر رفتار گیرش خمیر سیمانی، زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌ها در پنج سطح جایگزینی متفاوت اندازه گیری گردید. مقادیر به دست آمده برای هر طرح اختلاط نشان دهنده تغییرات تدریجی در زمان شروع و پایان فرآیند گیرش در اثر افزایش درصد فروفسفر است. این نتایج بیانگر آن‌اند که حضور فروفسفر در ترکیب خمیر، بر سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون تأثیر مستقیم گذاشته و با افزایش میزان آن، تأخیر محسوسی در هر دو زمان گیرش مشاهده می‌شود. میانگین داده‌های حاصل از دو تکرار آزمایش برای هر نمونه در جدول (۴) آورده شده است. این جدول شامل مقادیر زمان گیرش اولیه و نهایی، همراه با درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد، بوده و مبنای تحلیل‌های بخش بعدی قرار گرفته است.

جدول ۴. نتایج آزمایش تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمانی حاوی مقادیر مختلف فروفسفر

درصد تغییر زمان نهایی نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر زمان اولیه نسبت به نمونه شاهد	زمان گیرش نهایی (دقیقه)	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	FeP(%)
-	-	۲۲۲	۱۶۵	۰
۸/۱۰	۱۵/۲	۲۴۰	۱۹۰	۵
۹/۹	۱۶/۰۷	۲۴۴	۱۹۱/۵	۱۰
۱۸/۲۴	۱۷/۲۷	۲۶۲/۵	۱۹۳/۵	۱۵
۱۹/۳۶	۱۹/۳۹	۲۶۵	۱۹۷/۵	۲۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- زمان گیرش اولیه خمیر سیمانی

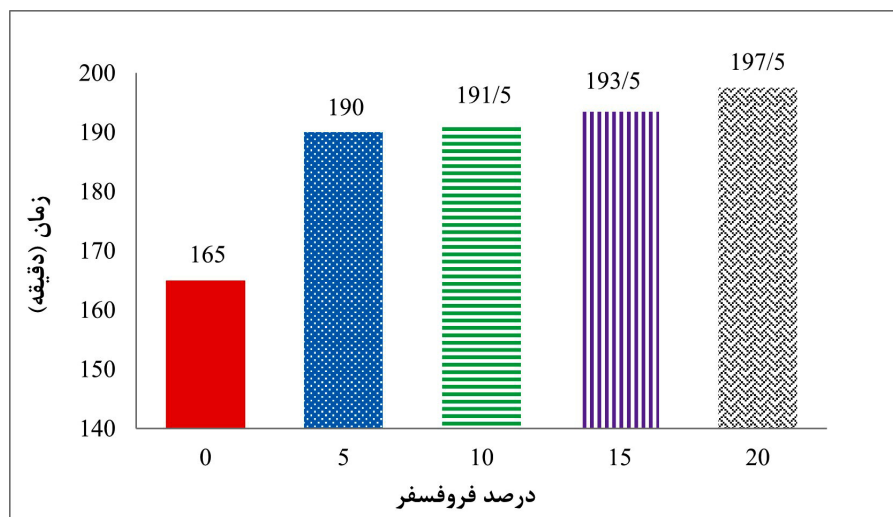
بر اساس نتایج به دست آمده و مطابق با شکل (۴)، روند تغییرات زمان گیرش اولیه خمیر سیمانی در اثر افزایش درصد جایگزینی فروفسفر (FeP) نشان دهنده رفتار کاملاً صعودی و منظم است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش مقدار فروفسفر از ۰ تا ۲۰ درصد، زمان گیرش اولیه از ۱۶۵ دقیقه برای نمونه شاهد به حدود ۱۹۷/۵ دقیقه در بالاترین سطح جایگزینی افزایش یافته است. این افزایش تدریجی بیانگر تأثیر مستقیم حضور فروفسفر در کاهش نرخ واکنش های اولیه هیدراتاسیون سیمان و در نتیجه، تأخیر در تشکیل فازهای اولیه $C-S-H$ می باشد.

افزایش یکنواخت در زمان گیرش اولیه (شکل ۴) حاکی از آن است که بررسی های انجام شده در پژوهش های اخیر نشان می دهد که افزودنی های فسفاتی، بسته به ساختار مولکولی خود، از طریق مکانیزم های متفاوتی بر فرایند هیدراتاسیون سیمان اثر می گذارند. این افزودنی ها معمولاً با ایجاد پیوندهای سطحی با یون های کلسیم و کنترل نحوه رسوب آن ها، موجب کاهش نرخ تشکیل اولیه فازهای $C-S-H$ و در برخی موارد کاهش سرعت تشکیل فازهای $C-A-S-H$ می شوند. این تأثیر مستقیم بر مسیر رسوب یون های کلسیم، سبب تأخیر در آغاز واکنش های اولیه هیدراتاسیون و کند شدن سرعت تشکیل ژل های هیدراته در ساعات نخست می گردد. این برهم کنش ها سبب تأخیر در شروع هیدراتاسیون، پایداری فازهای پیش ساز و جلوگیری از هسته زایی زودهنگام ژل های سیمانی می گردد. همچنین برخی از فسفات ها با رقابت برای اتصال به کلسیم، دسترسی سیمان به یون های آزاد را محدود کرده و در نتیجه موجب کاهش سرعت هیدراتاسیون اولیه و افزایش زمان گیرش می شوند. بنابراین تأثیر فسفات ها حاصل مجموع های از تعاملات شیمیایی سطحی است که مکانیزم تأخیر درگیرش را به صورت قابل تبیین توضیح می دهد [۲۶].

از دیدگاه فیزیکی، حضور ذرات ریز و نسبتاً سنگین فروفسفر در مخلوط، به افزایش چسبندگی داخلی خمیر و کاهش نفوذپذیری آب در شبکه سیمانی منجر می شود. این پدیده انتقال حرارت و جرم را در حین واکنش های اولیه کند کرده و در نهایت باعث تأخیر قابل ملاحظه در شروع گیرش اولیه می گردد.

مطابق تحلیل داده های شکل (۴)، افزایش ۵ تا ۲۰ درصد فروفسفر موجب رشد زمانی بین ۱۵/۲ تا ۱۹/۳۹ درصد در مقایسه با نمونه شاهد شده است. این رفتار تقریباً خطی بیانگر آن است که فروفسفر در محدوده آزمایش شده، بدون ایجاد اثرات جانبی نامنظم، بر kinetics واکنش های هیدراتاسیون تأثیر می گذارد و بنابراین، می توان آن را به عنوان یک افزودنی کندگیرکننده با پاسخ قابل پیش بینی در طراحی مخلوط های سیمانی مورد استفاده قرار داد.

به طور کلی، نتایج این بخش (شکل ۴) تأیید می کند که جایگزینی جزئی سیمان پرتلند نوع II با فروفسفر، با ایجاد تأخیر در شروع واکنش های شیمیایی اولیه، زمان گیرش اولیه خمیر را به صورت معنی داری افزایش داده است. با این حال، در کاربردهای اجرایی، انتخاب درصد جایگزینی بهینه ضروری است تا مزایای افزایش زمان کارپذیری حفظ شود و از تأخیر بیش از حد در گیرش نهایی جلوگیری گردد.



شکل (۴) نمودار زمان گیرش اولیه خمیر سیمانی

۳-۲- زمان گیرش نهایی خمیر سیمانی

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش و مطابق با شکل (۵)، روند تغییرات زمان گیرش نهایی خمیر سیمانی نیز همانند زمان گیرش اولیه، الگوی افزایشی منظم و احتمالاً به شکل خطی را با افزایش درصد فروفسفر (FeP) نشان داده است. مطابق داده‌های ثبت شده در شکل (۴)، زمان گیرش نهایی از ۲۲۲ دقیقه در نمونه شاهد بدون فروفسفر به ۲۶۵ دقیقه در نمونه حاوی ۲۰ درصد جایگزینی افزایش یافته است. این افزایش پیوسته بیانگر آن است که فروفسفر نه تنها آغاز واکنش‌های هیدراتاسیون را به تأخیر می‌اندازد، بلکه بر مرحله‌ی تکمیل این واکنش‌ها نیز اثر کندکننده‌ای قابل توجه داشته است.

بر مبنای تحلیل داده‌ها، افزایش درصد فروفسفر از ۵ تا ۲۰ درصد منجر به رشد زمانی بین ۸/۱۰ تا ۱۹/۳۶ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است. روند تقریباً خطی افزایش زمان گیرش نهایی در شکل (۵)، وابستگی مستقیم میان میزان جایگزینی فروفسفر و تأخیر در تکمیل فرآیند گیرش را به وضوح نشان می‌دهد. این پدیده را می‌توان به حضور ترکیبات فسفوری در ساختار فروفسفر نسبت داد که با ایجاد لایه‌های بازدارنده بر سطح ذرات سیمان، نفوذ آب و تبادل یون‌ها را محدود کرده و تشکیل بلورهای نهایی فازهای هیدراته (نظیر C-S-H و Ca(OH)_2) را به تأخیر می‌اندازد.

از دیدگاه ترمودینامیکی، تأخیر در زمان گیرش نهایی به کاهش نرخ آزادسازی حرارت هیدراتاسیون مربوط می‌شود؛ زیرا وجود فروفسفر، واکنش‌های برهم‌کنش بین یون‌های فسفات و کلسیم را تقویت کرده و سبب تشکیل ترکیبات پایدارتر اما با واکنش‌پذیری کمتر در محیط قلیایی خمیر سیمان می‌گردد. در نتیجه، تشکیل ساختار پیوسته‌ی کریستالی در شبکه‌ی سیمانی دیرتر انجام شده و خمیر تا مدت زمان طولانی‌تری در حالت نیمه‌پلاستیک باقی می‌ماند.

این رفتار از دیدگاه کاربردی، دو جنبه‌ی متفاوت دارد: در پروژه‌هایی که نیاز به افزایش زمان کارپذیری و جلوگیری از گیرش زودرس وجود دارد، استفاده از درصدهای پایین فروفسفر (۵ تا ۱۰ درصد) می‌تواند مطلوب باشد. اما در مقادیر بالاتر (بیش از ۱۵ درصد جایگزینی)، تأخیر بیش از حد در گیرش نهایی ممکن است مشکلاتی نظیر کاهش سرعت پیشرفت عملیات ساخت، افزایش زمان قالب‌برداری و احتمال افت مقاومت اولیه را به دنبال داشته باشد.

در مجموع، همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، فروفسفر با عملکردی شب‌هافزودنی کندگیر، بر مرحله‌ی نهایی هیدراتاسیون سیمان تأثیرگذار است و رفتار آن با افزایش درصد جایگزینی از نظر مقدار و جهت تغییرات قابل پیش‌بینی می‌باشد. این ویژگی،

درصد فروغسفر	زمان (دقیقه)
0	222
5	240
10	244
15	262/5
20	265

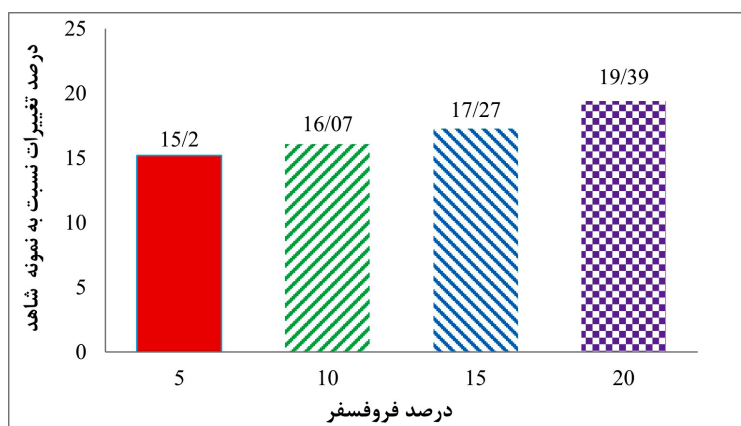
۶۶ نشریه علمی مصالح و سازه‌های بتنی، انجمن علمی بتن ایران

به منظور درک دقیق تر اثر فروفسفر بر روند تغییرات زمان گیرش، درصد افزایش زمان گیرش اولیه و نهایی نسبت به نمونه شاهد محاسبه و در شکل های (۶) و (۷) نمایش داده شده است. این نمودارها دیدی کمی از شدت اثر فروفسفر در سطوح مختلف جایگزینی ارائه می دهند. مطابق شکل (۶)، روند تغییر درصدی زمان گیرش اولیه بیانگر افزایش پیوسته از حدود ۱۵/۲ درصد در ترکیب حاوی ۵ درصد فروفسفر تا ۱۹/۳۹ درصد در ترکیب ۲۰ درصدی است. این تغییر نسبتاً محدود و خطی نشان می دهد که در مرحله ی آغاز گیرش، فروفسفر با مکانیزمی پایدار و یکنواخت عمل کرده و اثر آن از نوع تعدیلی و کنترل شده است. به بیان دیگر، در ناحیه ی واکنش های اولیه، سیستم سیمانی هنوز ظرفیت جذب بخشی از یون های فسفات را دارد و در نتیجه، تأخیر ایجاد شده در این مرحله از حد مجاز فراتر نمی رود. در مقابل، همان گونه که در شکل (۷) مشاهده می شود، افزایش درصد فروفسفر تأثیر قوی تری بر زمان گیرش نهایی داشته است؛ به طوری که درصد تغییرات از حدود ۸/۱۰ درصد در نمونه های حاوی ۵ درصد فروفسفر به ۱۹/۳۶ درصد در سطح ۲۰ درصد افزایش یافته است. این اختلاف رفتاری بین دو مرحله ی گیرش نشان دهنده ی تشدید اثر بازدارندگی فروفسفر در فازهای پایانی هیدراتاسیون است، جایی که ساختار ژل C-S-H به سمت پیوستگی کامل پیش می رود. وجود یون های فسفر در این مرحله احتمالاً موجب اختلال در رشد کریستال های هیدروکسید کلسیم و کند شدن فرآیند سخت شدگی نهایی می شود.

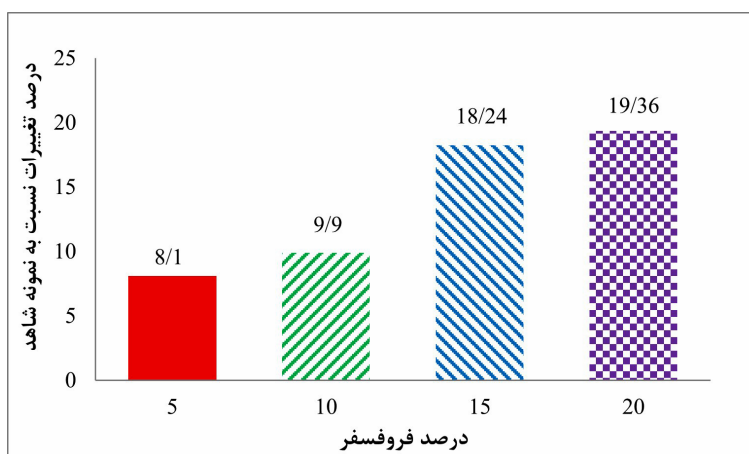
بررسی تطبیقی شکل های (۶) و (۷) نشان می دهد که شیب تغییرات در مرحله ی نهایی بیشتر از مرحله ی اولیه است، که این موضوع می تواند به دلیل اثر تجمعی فروفسفر بر محصولات ثانویه ی هیدراتاسیون باشد. این تأخیر افزوده در مرحله ی پایانی ممکن است از منظر ریزساختاری به تشکیل لایه های غیرفعال در مرز دانه های سیمان مرتبط باشد که نفوذ آب و تبادل یونی را در بخش های داخلی خمیر محدود می سازد.

از دیدگاه کاربردی، تحلیل درصد تغییرات ارائه شده در شکل های (۶) و (۷) به طراحان مخلوط سیمانی این امکان را می دهد که اثر فروفسفر را به صورت کمی در معادلات پیش بینی زمان گیرش لحاظ کنند. به ویژه در شرایطی که کنترل زمان گیرش برای جلوگیری از گیرش زودرس یا دیرگیرشدگی غیرمجاز ضروری است، می توان از این داده ها به عنوان مبنایی برای تعیین درصد جایگزینی بهینه بهره گرفت.

در نتیجه، تحلیل نمودارهای درصد تغییرات (شکل های ۶ و ۷) تأیید می کند که فروفسفر در محدوده ی جایگزینی ۵ تا ۱۰ درصد می تواند زمان گیرش را در حد مطلوب افزایش دهد، اما افزایش بیش از ۱۵ درصد باعث تأخیر چشمگیر در گیرش نهایی شده و از نظر فنی برای پروژه های با زمان محدود، نامناسب ارزیابی می شود.



شکل (۶) درصد تغییرات زمان گیرش اولیه نسبت به نمونه شاهد (%).



شکل (۷) درصد تغییرات زمان گیرش نهایی نسبت به نمونه شاهد (%).

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر جایگزینی فروفسفر (FeP) به عنوان یکی از محصولات جانبی صنعت فولاد بر زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمانی حاوی سیمان پرتلند نوع II بررسی شد. هدف اصلی تحقیق، تحلیل نقش فروفسفر در تغییر رفتار هیدراتاسیون و تعیین درصد بهینه جایگزینی جهت دستیابی به کنترل مهندسی زمان گیرش بود. بدین منظور، نمونه‌هایی با سطوح جایگزینی مختلف شامل ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد ساخته و مطابق استاندارد ASTM C191 مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون‌ها و تحلیل‌های انجام شده نشان داد که حضور فروفسفر تأثیر قابل توجهی بر فرآیند گیرش دارد.

۱. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که افزایش میزان فروفسفر منجر به افزایش تدریجی در هر دو زمان گیرش اولیه و نهایی می‌شود. این روند افزایشی حاکی از رفتار پایدار و قابل پیش‌بینی فروفسفر در سیستم سیمانی است. بررسی منحنی‌ها نشان داد که اثر کندگیرکنندگی فروفسفر در مرحله نهایی گیرش محسوس‌تر است، به طوری که یون‌های فسفات با ایجاد لایه‌های غیرفعال بر سطح ذرات سیمان، رشد بلورهای C-S-H و Ca(OH)_2 را محدود کرده و تکمیل سخت‌شدگی ساختار را به تأخیر می‌اندازند.

۲. تحلیل درصد تغییرات زمان گیرش نشان داد که در مقادیر پایین جایگزینی، یعنی بین ۵ تا ۱۰ درصد، افزایش زمان گیرش در محدودهای کنترل شده و مطلوب قرار دارد که موجب بهبود کارپذیری خمیر می‌شود. با این حال، افزایش بیش از ۱۵ درصد فروفسفر منجر به تأخیر چشمگیر در گیرش نهایی گردید و از نظر اجرایی نامطلوب ارزیابی می‌شود. این موضوع اهمیت انتخاب درصد جایگزینی بهینه را فقط روی کنترل زمان گیرش برای دستیابی به تعادل میان افزایش کارپذیری و حفظ سرعت سخت‌شدگی نشان می‌دهد.

۳. از دیدگاه فیزیکی و شیمیایی، تأثیر فروفسفر بر زمان گیرش ناشی از واکنش ترکیبات فسفوری با یون‌های کلسیم آزاد در محیط قلیایی خمیر سیمان است. تشکیل ترکیبات فسفات کلسیم پایدار احتمالاً باعث کاهش سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون، افت نرخ آزادسازی حرارت و تأخیر در تشکیل فازهای ژل C-S-H می‌شود. این رفتار به ویژه در مراحل پایانی هیدراتاسیون برجسته‌تر بوده و دلیل اصلی افزایش محسوس‌تر زمان گیرش نهایی نسبت به اولیه است.

۴. از دید مهندسی کاربرد، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از فروفسفر در مقادیر محدود می‌تواند ابزاری مؤثر برای کنترل زمان گیرش در شرایط خاص اجرایی باشد. در پروژه‌هایی که نیاز به افزایش زمان کارپذیری وجود دارد، مانند بتن‌ریزی در هوای گرم یا در سازه‌های حجیم، استفاده از مقادیر پایین فروفسفر مزیت قابل توجهی ایجاد می‌کند. در مقابل، در پروژه‌هایی که

نیاز به گیرش سریع یا کسب مقاومت اولیه بالا دارند، مقدار فروفسفر باید به دقت کنترل شود تا موجب کندی بیش از حد فرآیند سخت‌شدگی نگردد.

۵. از منظر زیست‌محیطی، به‌کارگیری فروفسفر در صنعت سیمان علاوه بر اثر فنی مطلوب، موجب کاهش ضایعات صنعتی و حرکت در مسیر توسعه‌ی پایدار در بخش ساخت‌وساز می‌شود. به این ترتیب، فروفسفر را می‌توان افزودنی معدنی مؤثری دانست که هم‌زمان از نظر عملکرد فنی و ملاحظات زیست‌محیطی ارزش استفاده دارد.

۶. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان داد که فروفسفر می‌تواند به‌عنوان یک کندگیرکننده‌ی پایدار در ترکیبات سیمانی مورد استفاده قرار گیرد و رفتار آن در محدوده‌ی جایگزینی مورد مطالعه از نوع خطی و قابل پیش‌بینی است. به دلیل محدودیت آزمایشگاهی تکرار نمونه‌ها بیشتر از دو امکان پذیر نبود. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، اثر این ماده بر خواص مکانیکی، ریزساختار و دوام بتن، همچنین برهم‌کنش آن با سایر افزودنی‌های معدنی یا شیمیایی بررسی شود تا درک جامع‌تری از نقش فروفسفر در عملکرد درازمدت مصالح سیمانی حاصل گردد.

۵- تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه‌ی خود را از جناب آقای دکتر حسنعلی ترابی و جناب آقای حسن کلهر ابراز می‌دارند که در فرآیند انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج، راهنمایی‌ها، حمایت‌ها و نکات علمی ارزشمندی ارائه کردند. همکاری و همراهی ایشان نقش بسزایی در پیشبرد دقیق و موفقیت‌آمیز این پژوهش داشته است.

۶- منابع

- [1] Baradan, B. (1998). *Construction Materials* (5th ed.). Dokuz Eylul University Technical Faculty Publication Section, Izmir, Turkey.
- [2] Jiang, S.P., Mutin, J.C. & Nonat, A. (1995). Studies on mechanism and physico-chemical parameters at the origin of cement setting. *Cement and Concrete Research*, 25(4), 779–789.
- [3] Pan, J., Feng, K., Wang, P., Chen, H. & Yang, W. (2022). Retardation and compressive strength enhancement effect of upcycling waste carrot as bio-admixture for cement mortars. *Journal of Building Engineering*, 62, 105402. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105402>
- [4] Wang, L., Wang, J.L., Qian, X., Fang, Y., Chen, P.Y. & Tuinukuafe, A. (2020). Tea staining-inspired treatment for fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 262, 120027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120027>
- [5] Al Khafaji, Z.S. & Ruddock, F. (2018). Study of the retardant effect of different sugar types on setting time and temperature of cement paste. *Journal of Civil Engineering Technology*.
- [6] Shafaei, J., Saghravani, S.F. & Torki, A. (2024). Experimental assessment of using micro-nano air bubbles (MINAB) and superplasticizer on setting time and compressive strength of cement mortar. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(3), 205–217.
- [7] Madandoust, R. & Shahabi, S.F. (2014). Evaluating the setting process of fresh concrete containing rice husk ash using ultrasonic method. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44(2), 75–84.

- [8] Chen, Z., Wang, J. & Zhang, T. (2022). Utilization of ferrophosphorus as cementitious additive: Setting and strength behavior. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120935.
- [9] Lee, H.J. & Park, K.S. (2019). Effect of phosphate additives on setting behavior and strength development of cement. *Construction and Building Materials*, 212, 390–398.
- [10] Ismail, A., Ibrahim, M. & Abdullah, R. (2022). Initial and final setting time determination of 3D printing mortar with kenaf powder addition. *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering*. <https://doi.org/10.30880/rpmme.2022.03.01.114>
- [11] Sharma, P., Sharma, N., Singh, P., Verma, M. & Parihar, H.S. (2020). Examination of the effect of iminodiacetic acid on setting time and compressive strength of cement mortar paste. *Department of Civil Engineering, GLA University, Mathura, India volume 32 (4), 2020, 878-881*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.336>.
- [12] Khan, B. & Baradan, B. (2002). The effect of sugar on setting time of various types of cements. *ACI Materials Journal*. Quarterly science vision vo; 8(1) July-September, 2002.
- [13] Mohsenipour Asl, J., Gholhaki, M. & Shirdar, M.K. (2024). Experimental study of mechanical properties and microstructure of cement mortar containing glass powder, eggshell, iron, and rubber powders under acidic, dry, and alkaline environments. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(3), 2065–2384. <https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21291>
- [14] Al Khafaji, Z.S. & Ruddock, F. (2018). Study of the retardant effect of using different sugars on setting time and temperature of cement paste. *Journal of Civil Engineering Technology*, 9 (1). ISSN0976-6308. <http://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/12248>.
- [15] Ahmad, S., Lawan, A. & Al-Osta, M. (2020). Effect of sugar dosage on setting time, microstructure and strength of Type I and V Portland cements. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00483.
- [16] Usman, N.D., Chom, H.A., Salisu, C., Abubakar, H.O. & Gyang, J.B. (2016). Impact of sugar on setting time of ordinary Portland cement paste and compressive strength of concrete. *Journal of Environment and Earth Science*, 6(5), 45–51.
- [17] Paul, S.C., Babafemi, A.J., Miah, M.J., Basit, M.A., Hasan, N.M.S. & Kong, S.Y. (2022). Role of sugarcane juice as a natural admixture on setting time and hardened properties of cementitious materials. *Materials*, 13(20), 4636. <https://doi.org/10.3390/ma13204636>
- [18] Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M. (2014). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education, New York.
- [19] Thomas, M.D.A. (2007). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
- [20] Zhang, C., Chen, W. & Ling, T.C. (2018). Utilization of ferrophosphorus slag as a supplementary cementitious material: Hydration, strength, and microstructure of blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 173, 138–246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.040>
- [21] ASTM International. (2019). *ASTM C191-19: Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C0191-19>
- [22] Shetty, M.S. (2005). *ACI 116R – Cement and Concrete Terminology*. ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.

- [23] Wu, H., Zhang, C. & Liu, Y. (2019). New technologies in phosphorus-based alloy production. *Journal of Industrial Metallurgy*, 65(2), 112–119.
- [24] Zhou, H.Y. (2009). *Northern Chemical Industry*, 41, 50. (in Chinese).
- [25] Ma, Y., Shen, W., & Yao, Y. (2019). Preparation of nanoscale iron(III) phosphate by using ferro-phosphorus as raw material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 252, 022032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/252/2/022032>.
- [26] Emminger, Y.H., Bastian, A., Ladner, L., Steiner, T., & Ruiz-Agudo, C. (2025). Additive-mediated phosphate doping in C-S-H and C-A-S-H crystallization pathways. *Materials Advances*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1039/D5MA00758E>.
- [27] Lee, S. J., & Kim, Y. (2021). Effect of inorganic retarders on long-term mechanical performance of cement-based composites. *Materials Today Communications*, 27, 102226. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102226>.