

Experimental Investigation of the Compressive Strength of Concrete Containing Phosphorus Slag as a Partial Replacement for Natural Sand

Mahdi Rezayee¹ , Payam Tarighi² , Mehdi Shalchi Tousi³

1.Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Ahlul Bayt International University, Tehran, Iran. E-mail: mahdirezayee0313@gmail.com

2. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Ahlul Bayt International University, Tehran, Iran. E- mail: p.tarighi@abu.ac.ir

3.Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Ahlul Bayt International University, Tehran, Iran. E- mail: m.shalchi@abu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-09-26

Received in revised form

2025-11-10

Accepted

2025-12-21

Available online

2025-12-26

Keywords:

Concrete,
Compressive strength,
Phosphorus slag,
Natural sand

ABSTRACT

Phosphorus furnace slag, a by-product of the phosphorus production industry, is generally regarded as a waste material. In this study, the effect of using phosphorus slag as a partial replacement for natural sand on the compressive strength and workability of concrete was investigated. For this purpose, concrete mixtures incorporating various replacement levels of phosphorus slag (0, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 30, 40, 50, and 60 percent by weight of sand) were produced, and compressive strength tests at ages 7, 14, and 28 days as well as slump tests were performed in accordance with ASTM C39 and ASTM C143 standards. The results indicated that incorporating limited amounts of phosphorus slag led to a significant increase in compressive strength and an improvement in the microstructure of the concrete. At 28 days, the specimen containing 7.5% phosphorus slag (PS-7.5) exhibited the highest compressive strength, reaching 28.32 MPa, which represents an increase of approximately 6.3% compared to the control concrete (26.62 MPa). Conversely, when the replacement percentage exceeded 20%, the compressive strength showed a decreasing trend. The slump test results similarly demonstrated a continuous increase in the workability of fresh concrete with increasing phosphorus slag content; the slump increased from 40 mm in the control specimen to 70 mm in the mixture containing 60% slag. Overall, the findings revealed that replacing approximately 7.5% of natural sand with phosphorus slag provides a desirable balance between compressive strength, fresh concrete workability, and environmental sustainability, and this range may therefore be considered optimal for producing structural concrete. This study is the first to employ phosphorus slag as a replacement for natural sand.

Cite this article: Rezayee, Mehdi., Tarighi, Payam., & Shalchi Tousi, Mehdi. (2025). Experimental Investigation of the Compressive Strength of Concrete Containing Phosphorus Slag as a Partial Replacement for Natural Sand. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(2), 168-183.

DOI: 10.22126/amcen.2026.13194.1052



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2026.13194.1052

Publisher: Razi University

Introduction

Research Summary: This research was conducted to examine the effects of using phosphorus furnace slag as a partial replacement for natural sand on the mechanical and rheological properties of concrete. Phosphorus slag is an industrial by-product generated during the production of yellow phosphorus and is commonly disposed of without practical use, which leads to environmental concerns. The primary objective of this study was to evaluate the feasibility of incorporating this material into concrete production to develop sustainable and high-strength concrete, while simultaneously reducing the consumption of natural resources and addressing issues related to industrial waste disposal. The increasing demand for concrete in the construction industry, together with the excessive and often uncontrolled extraction of natural sand, has resulted in environmental degradation and ecological imbalance. In contrast, the chemical and metallurgical industries generate substantial quantities of waste materials each year, such as various types of slag, the accumulation and disposal of which present serious environmental challenges. Addressing these two issues concurrently highlights the importance of reusing industrial by-products in concrete applications. Phosphorus slag, which contains compounds such as CaO , SiO_2 , and Fe_2O_3 , exhibits favorable physical and chemical characteristics that make it a promising candidate for the partial replacement of fine aggregates in concrete.

Method

In this study, a series of concrete specimens was prepared in which natural sand was partially replaced by phosphorus slag at levels of 0, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 30, 40, 50, and 60% by weight. The concrete mix proportions were determined in accordance with the guidelines of ACI 211.1-91. Compressive strength tests and slump measurements were conducted following the procedures specified in ASTM C39 and ASTM C143, respectively. Cube specimens with dimensions of 150×150 mm were cured under standard laboratory conditions and tested at curing ages of 7, 14, and 28 days.

Results

The test results demonstrated that the incorporation of limited amounts of phosphorus slag enhances the density of the cement paste and improves the compressive strength of concrete. At 28 days, the sample containing 7.5% slag (PS-7.5) exhibited the highest compressive strength, reaching 28.32 MPa—approximately 6.3% higher than that of the control sample (26.62 MPa). However, replacement levels exceeding 20% resulted in a reduction in strength, primarily due to a decrease in the active cementitious phase, dilution of the paste matrix, and weakened cohesion within the Interfacial Transition Zone (ITZ) between the paste and aggregates. Furthermore, slump test results indicated that increasing the phosphorus slag content markedly improved the workability of fresh concrete. The slump value rose from 40 mm in the control mix to 70 mm in the sample containing 60% slag. This observation highlights the lubricating effect of the fine slag particles and the reduction of internal friction between aggregates, both of which contribute to enhanced workability of the concrete.

Conclusions

The results suggest that replacing approximately 7.5% of natural sand with phosphorus slag achieves an optimal balance among compressive strength, workability of fresh concrete, and environmental sustainability. This proportion of slag not only enhances the mechanical performance of concrete but also serves as an effective approach for reducing the extraction of natural resources and managing industrial by-products. When replacement levels exceed 20%, a significant decline in concrete strength and internal cohesion is observed. Therefore, a replacement range of 5 to 10% is recommended as the most appropriate interval for producing sustainable and environmentally friendly structural concrete.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره فسفر به عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی

مهدی رضایی^۱، پیام طریقی^۲✉، مهدی شالچی طوسی^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی اهل بیت (ع)، تهران، ایران. رایانامه: mahdirezayee0313@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی اهل بیت (ع)، تهران، ایران. رایانامه: p.tarighi@abu.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی اهل بیت (ع)، تهران، ایران. رایانامه: m.shalchi@abu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵	
کلیدواژه‌ها: بتن، مقاومت فشاری، سرباره فسفر، جایگزین ماسه	سرباره کوره فسفر محصول جانبی صنعت تولید فسفر بوده که عملاً به عنوان یک ماده زائد شناخته می‌شود. در این پژوهش، اثر استفاده از سرباره فسفر به عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی بر مقاومت فشاری و کارایی بتن مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، بتن‌هایی با درصدهای مختلف جایگزینی سرباره فسفر (صفر، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد وزنی ماسه) ساخته شده و آزمون‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و اسلامپ طبق استانداردها ASTM C39 و ASTM C143 انجام شده است. نتایج نشان داد که افزودن مقادیر محدود سرباره فسفر تا جایی باعث افزایش مقاومت فشاری و بهبود ریزاختر بتن می‌شود. در سن ۲۸ روزه، نمونه (PS-7.5) حاوی ۷/۵ درصد سرباره فسفر بیشترین مقاومت فشاری را با مقدار ۲۸/۳۲ مگاپاسکال نشان داد که نسبت به بتن شاهد (۲۶/۶۲ مگاپاسکال) افزایش حدود ۶/۳ درصدی داشته است. در مقابل، با افزایش درصد جایگزینی به بیش از ۲۰ درصد، مقاومت فشاری روندی کاهشی پیدا کرده است. نتایج آزمون اسلامپ نیز بیانگر افزایش پیوسته کارایی بتن تازه با افزایش درصد سرباره فسفر بوده؛ به طوری که مقدار اسلامپ از ۴۰ میلی‌متر در نمونه شاهد به ۷۰ میلی‌متر در نمونه حاوی ۶۰ درصد سرباره فسفر افزایش یافته است. در مجموع، یافته‌ها نشان داد که جایگزینی حدود ۷/۵ درصد سرباره فسفر به جای ماسه طبیعی، تعادلی مطلوب میان مقاومت فشاری، کارایی بتن تازه و پایداری زیست‌محیطی ایجاد کرده و از این حیث محدوده بهینه پیشنهادی برای تولید بتن‌های سازه‌ای می‌باشد. در این پژوهش سعی گردیده است تا تاثیر مقادیر مختلف میزان سرباره فسفر به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی بر مقاومت فشاری و کارایی بتن، مورد بررسی قرار گیرد.

استناد: رضایی، مهدی؛ طریقی، پیام؛ شالچی طوسی، مهدی. (۱۴۰۴). بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره فسفر به عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۲(۲)، ۱۸۳-۱۶۸. DOI: 10.22126/amcen.2026.13194.1052



۱. مقدمه

پسماند صنعتی به صورت جامد، نیمه جامد و مایع بوده و از تنوع بسیار زیادی برخوردار هستند. رشد سریع تکنولوژی، دستیابی به پروسه‌های جدید تولید، جایگزینی مواد مصنوعی به جای الیاف طبیعی و سنتز هزاران نوع مواد و ترکیبات شیمیایی، باعث افزایش حجم زیادی از زباله‌های جامد و مایع خطرناک گردیده است. جابجایی و استعمال نامناسب پسماند صنعتی که اغلب محتوی مواد خطرناک هستند، مشکلات زیادی را برای انسان و محیط زیست ایجاد می‌کند. کنترل موثر و اعمال یک مدیریت صحیح پسماند صنعتی، برای بهداشت، حفظ محیط زیست و مدیریت منابع طبیعی، از اهمیت خاصی برخوردار است [۱].

یکی از همین ضایعات صنعتی که تولید آن در اکثر کشورهای رو به انکشاف در حال افزایش است، سرباره کوره فسفر بوده که یک محصول جانبی تولید فسفر زرد از طریق ذوب کانی‌های فسفاتی، به همراه سیلیس و کک در یک کوره الکتریکی است که عمدتاً حدود (۹۰ درصد) از اکسید کلسیم (CaO) و سیلیس (SiO_2) تشکیل شده است. اجزای دیگر سرباره فسفر که به کانی استفاده شده بستگی دارد را می‌توان شامل ۵ - ۲/۵ درصد آلومینا، ۲/۵ - ۰/۲ درصد اکسید آهن، ۳ - ۰/۵ درصد اکسید منیزیم، ۵ - ۱ درصد اکسید فسفر و ۲/۵ - ۰ درصد فلوئور باشد [۲]. به ازای تولید یک تن عنصر فسفر تقریباً ده ۱۰ سرباره تولید می‌شود [۲] که این خود نشان دهنده حجم بالایی از تولید این پسماند صنعتی می‌باشد. از جانب دیگر بتن ماده‌ای است که بدون اغراق اساس جامعه مدرن ما را شکل می‌دهد. در زندگی روزمره ما، به ندرت موضوعی را می‌توان یافت که به طور مستقیم یا غیر مستقیم در ارتباط با بتن نباشد. بدون شک یکی از مصالح پرکاربرد و مهم در ترکیب بتن، سنگدانه (شن و ماسه) بوده که در حدود ۶۰ الی ۷۵ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهد [۳]. شن و ماسه جزء منابع طبیعی بوده که معمولاً به نوع شکسته از طریق شکستن قطعات سنگی بزرگ در اندازه‌های لاشه سنگ، قلوه سنگ و شن درشت با منشأ سنگ‌های ریزبافت که خیلی سخت نبوده و دچار تجزیه و هوازدگی نشده اند و طبیعی که نوعی مصالح رسوبی اند و به صورت لایه یا عدسی در نتیجه فرآیند رسوب گذاری در آبرفت‌ها نهشته‌های دریاچه‌ای و دریایی (دلتاها) و یا نهشته‌های یخچالی و بادی شکل می‌گیرند،

تولید می‌شوند [۴]. افزایش روزافزون تقاضا برای بتن، منجر به استخراج بی‌رویه این منابع طبیعی شده است. برداشت غیرمدرانه ماسه از بستر رودخانه‌ها و معادن، پیامدهایی همچون تخریب اکوسیستم‌های طبیعی، کاهش کیفیت آب، فرسایش خاک و ایجاد ناپایداری محیط زیست را به همراه دارد [۵]. این مسئله ضرورت استفاده از مواد جایگزین مناسب برای کاهش مصرف منابع طبیعی و حرکت به سمت ساخت‌وساز پایدار را آشکار می‌سازد. در سوی دیگر، صنایع متالورژی و فرآیند تولید فسفر، سالانه مقادیر قابل توجهی پسماند به صورت سرباره تولید می‌کنند. انباشت این پسماندها، علاوه بر اشغال زمین، موجب آلودگی محیط زیست و خطرات زیست محیطی می‌شود. یکی از این پسماندها، سرباره کوره فسفر است که به دلیل ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی خاص، قابلیت استفاده در بتن را داراست. استفاده از این ماده به عنوان جایگزین درصدی از ماسه، می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات زیست محیطی و اقتصادی، امکان بهره‌برداری از یک محصول جانبی صنعتی را فراهم کند. اهمیت این مسئله باعث شده که اخیراً محققان توجه خاصی به بررسی استفاده از سرباره فسفر در تولید بتن داشته باشند. لینگ بین هو و همکاران در تحقیق خود دریافتند که با افزایش درصد جایگزینی سرباره فسفر به جای سیمان، مقاومت فشاری خمیرها هم در سنین اولیه (۲ روز) و هم در سنین بالاتر (۲۸ روز) کاهش یافته است، اما افزایش دمای عمل‌آوری از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۴۰ درجه سانتی‌گراد به بهبود این وضعیت کمک کرد [۶]. همچنان تحقیقان یان هی و همکاران نشان داد که استفاده از سرباره فسفر اصلاح شده به همراه با اکسید منیزیم به عنوان مواد پوزولانی می‌تواند تاخیر قابل ملاحظه‌ای در زمان گیرش ملات سیمانی داشته باشد که با افزایش میزان اکسید منیزیم جبران شد، اما باعث بهبود فعالیت پوزولانی آن گردید [۷]. همچنان تحقیقات یوپنگ هوانگ نشان داد که میزان هیدراسیون سیمان از ۵۴/۳ درصد در نمونه بدون سرباره به ۸۷ درصد در نمونه بتن با عملکرد بالای حاوی ۶۰ درصد سرباره فسفری رسیده است. نسبت Ca/Si با افزایش درصد سرباره فسفری کاهش یافت و مشاهدات میکروسکوپی نشان‌دهنده تشکیل ریزساختاری فشرده‌تر بود [۸]. بر اساس تحقیقات مین پنگ و همکاران، مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی نیز با افزایش سرباره فسفر از ۱۰ تا ۵۰ درصد کاهش یافت

کاهش ضریب مهاجرت ترسیع شده یون و کاهش جذب آب نیم ساعته ملات سیمان شده است [۱۴].

در نهایت، می توان نتیجه گرفت که سرباره فسفری، با وجود فعالیت پوزولانی نسبتاً پایین تر، پتانسیل قابل توجهی برای استفاده در بتن های پایدار و دوستدار محیط زیست دارد، مشروط بر آنکه اصلاحات لازم در فرآوری یا ترکیب آن اعمال شود. این موضوع نه تنها به کاهش دفن پسماندهای صنعتی کمک می کند، بلکه با کاهش مصرف انرژی در تولید سیمان و افزایش دوام سازه ها، در راستای توسعه پایدار و اقتصاد سبز در صنعت ساخت و ساز نقش مهمی ایفا خواهد کرد. با وجود این یافته ها، مرور منابع نشان می دهد که تاکنون تقریباً تمامی پژوهش های مرتبط با سرباره فسفر، بر تأثیر آن در بخش چسباننده بتن تمرکز داشته اند و تأثیر استفاده از این ماده به عنوان جایگزین سنگدانه های ریز (ماسه) بر مقاومت و دوام بتن، به طور سیستماتیک مورد بررسی قرار نگرفته است. این موضوع، یکی از خلأهای مهم علمی و پژوهشی در زمینه بهره گیری از پسماندهای صنعتی در بتن محسوب می شود.

تحقیق حاضر که یک تحلیل آزمایشگاهی است و با هدف بررسی مقاومت فشاری بتنی که با جایگزینی بخشی از ماسه با سرباره فسفر ساخته شده است، انجام گردید تا تأثیر استفاده از سرباره فسفر، به عنوان جایگزین بخشی ماسه بر مقاومت فشاری بتن های غیر سازه ای (دارای مقاومت کم) بررسی شود و یک محدوده بهینه برای استفاده از آن در ترکیب بتن به عنوان جایگزین ماسه بدست آید، زیرا مقاومت فشاری بتن مهم ترین مولفه بتن محسوب می شود و در صورتی که این بتن بتواند مقاومت مورد نظر را برآورده نماید، می توان روی مولفه های دیگر آن نیز تحقیقاتی انجام داد و نتایج کامل تری از امکان استفاده این نوع بتن حتی در ساخت بتن های سازه ای این نیز بدست آورد.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۱-۲. مصالح آزمایش

سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان پرتلند معمولی تیپ ۲ بر اساس استاندارد ASTM C150-11 [۱۵] بوده که

و بر پایه نتایج مقاومت فشاری، نتیجه گیری شد که فعالیت سرباره فسفر پایین است. اثر ماده فعال کننده شیمیایی بر مقاومت فشاری ملات های سیمانی حاوی ۳۰ درصد سرباره فسفر، بهتر از افزایش نرمی سرباره فسفر از ۳۰۰ مترمربع بر کیلوگرم به ۴۵۰ مترمربع بر کیلوگرم بود. [۹]. صادق طاهرمنش و ابراهیم نجفی کانی نیز دریافتند که استفاده از سرباره فسفر و سرباره ذوب آهن بر رفتار رئولوژی خمیرهای سیمان آمیخته دارای این دو سرباره هم مانند خمیر سیمان پرتلند با مدل بینگهام مطابقت دارد و سرباره ذوب آهن اثرگذاری بیش تری را در پارامترهای رئولوژیکی در مقایسه با سرباره فسفر از خود نشان می دهد [۱۰]. در تحقیقات گوپنگ چن و همکاران معلوم شد که مقاومت بالا در بتن حاوی سرباره فسفر از طریق عمل آوری حرارتی در زمان کوتاه به دست می آید و همچنان بر اساس نتایج، سیمان در بتن مقاومت بالا حاوی مقادیر زیاد سرباره فسفر که تحت عمل آوری حرارتی (۹۰ درجه سانتی گراد، ۱ مگاپاسکال-۱۸۰ درجه سانتی گراد و ۲ مگاپاسکال-۲۵۰ درجه سانتی گراد) قرار گرفته، به طور کامل هیدراته شده و محصول هیدراتاسیون هیدروکسید کلسیم به طور کامل مصرف می شود [۱۱]. گوپینگ کیان نیز به این نتیجه رسید که از پودر سرباره فسفر برای تثبیت ماسه سنگ تثبیت شده با سیمان می توان استفاده کرد طوری که سرباره فسفر مقاومت فشاری اولیه ماسه سنگ تثبیت شده با سیمان را تا حد کمی کاهش می دهد، اما در نهایت مقاومت فشاری در پایان ۹۰ روز عمل آوری افزایش می یابد [۱۲]. کوشینگ لیو و یونگ کیو نیز دریافتند که کامپوزیت سرباره فسفر و سنگ آهک می تواند افزایش دمای آدیباتیک بتن را به طور چشمگیری کاهش دهد. با ۳۳ درصد وزنی کامپوزیت سرباره فسفر و سنگ آهک، افزایش دمای آدیباتیک بتن ۵۵ درجه سانتی گراد است که ۱۰ درجه کمتر از نمونه کنترل می باشد. افزودن کامپوزیت سرباره فسفر و سنگ آهک بر مقاومت بلندمدت بتن تأثیر نمی گذارد. هنگامی که نسبت آب به سیمان ۰/۱۵-۰/۱ کاهش یابد، مقاومت بلندمدت بتن حاوی کامپوزیت سرباره فسفر و سنگ آهک حدود ۱۰ درصد افزایش نسبت به گروه کنترل نشان می دهد [۱۳]. همچنین بررسی پارامترهای مربوط به دوام بتن نشان می دهد که در صورت عمل آوری طولانی مدت، جایگزینی ۳۰ الی ۷۰ درصد از وزن سیمان باعث افزایش مقاومت الکتریکی ویژه،

ادامه جدول ۲. مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده برای ترکیب شیمیایی سرباره فسفر [۲]

۴/۶۷	۲/۵ - ۰/۸	W; (Al ₂ O ₃)
۱/۲۷	۲/۵ - ۰/۸	W; (MgO)
۱/۱۳	۱ - ۰/۲	W; (Fe ₂ O ₃)
۰/۹۵	۳/۵ - ۰/۸	W; (P ₂ O ₅)
	۳ - ۱	W; (F)

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

ردیف	نوع سنگدانه	درصد جذب آب	چگالی اشباع با سطح خشک (kg/m ³)	حد اکثر قطر سنگدانه‌ها	مدول نرمی
۱	ماسه طبیعی	۲/۱۹	۲۶۰۰	-	۲/۵۴
۲	شن طبیعی	۱	۲۷۰۰	۳۷/۵	۱/۸۳
۳	سرباره فسفر	۲/۱۱	۲۸۰۰	-	۲/۶۲



شکل ۱. سرباره فسفر استفاده شده در این تحقیق

مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین سرباره فسفر مورد استفاده که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، از کارخانه صنایع فسفر ایران بوده که مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده برای ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ و دانه‌بندی آن نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مواد تشکلی دهنده سیمان نوع ۲ [۱۶]

اسم ماده	فرمول شیمیایی	میزان تشکیل دهنده (%)
آهک	CaO	حدود ۶۳ درصد
سیلیس	SiO ₂	حدود ۲۰ درصد
آلومین	Al ₂ O ₃	حدود ۶ درصد
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	حدود ۳ درصد
اکسید منیزیم	MgO	حدود ۱/۵ درصد

شن مصرفی در این آزمایش از نوع شکسته کوهی و ماسه مصرفی، از ماسه شسته شرکت معدن سازکو شهرستان شهریار می‌باشد. دانه‌بندی سنگدانه طبیعی استفاده شده براساس استاندارد ASTM C29-11 [۱۷] و استاندارد ملی ۴۹۷۷ ایران [۱۸] می‌باشد، که مشخصات فیزیکی و شیمیایی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین نمودار دانه‌بندی ریزدانه و درشت‌دانه براساس استاندارد ASTM C29-11 [۱۷] در شکل ۳ و ۴ ارائه شده است. آب مورد استفاده در این آزمایش‌ها نیز آب لوله‌کشی شهر تهران بوده که با توجه به استاندارد ملی ۱۴۷۴۸ ایران استفاده از آن مانعی ندارد [۱۹].

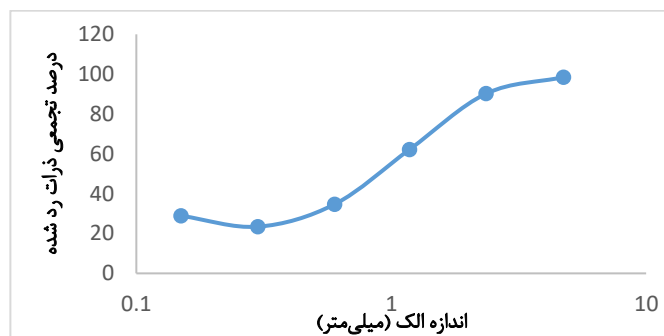
جدول ۲. مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده برای ترکیب شیمیایی سرباره فسفر [۲]

نام ماده	محدوده نظری %	میانگین بدست آمده %
M; (CaO)	۴۷-۵۲	۴۷/۶۶
W; (SiO ₂)	۴۰-۴۳	۴۳/۱۵

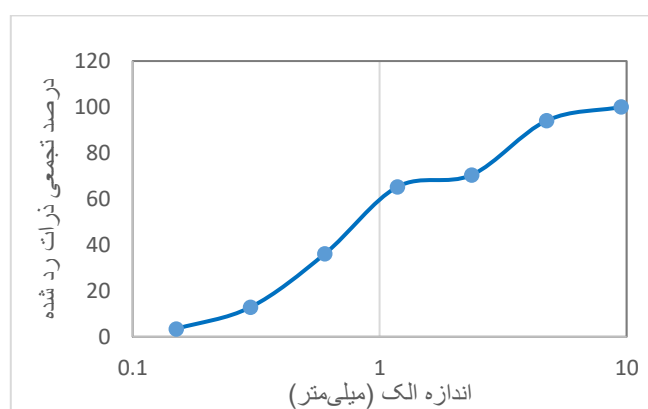
عملیات اختلاط، از هر یک از طرح‌های اختلاط آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد ۲-۳۲۰۳ ملی ایران [۲۲] گرفته شد. جدول ۴ جزئیات طرح‌های اختلاط و مشخصات بتن تازه را نشان می‌دهد. در این پژوهش، جایگزینی سرباره فسفر به صورت وزنی انجام شده است. با توجه به چگالی بالاتر سرباره فسفر نسبت به ماسه طبیعی، در درصدهای بالای جایگزینی، حجم واقعی ریزدانه‌ها در واحد حجم بتن کاهش یافته است. این کاهش حجم می‌تواند منجر به افزایش نسبی حجم خمیر سیمان، تغییر نسبت خمیر به سنگدانه و در نهایت اثرگذاری بر چگالی، تراکم و مقاومت فشاری بتن گردد. از این‌رو، بخشی از افت مقاومت مشاهده شده در درصدهای بالای جایگزینی را می‌توان به اثرات حجمی ناشی از اختلاف چگالی مصالح نسبت داد. در نتیجه تغییرات در مقاومت، تاثیر همزمان تغییرات حجمی و جایگزینی ماده می‌باشد. بررسی جایگزینی بر مبنای حجم معادل، به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده مطرح می‌گردد.

جدول ۴. طرح اختلاط (kg/m^3)

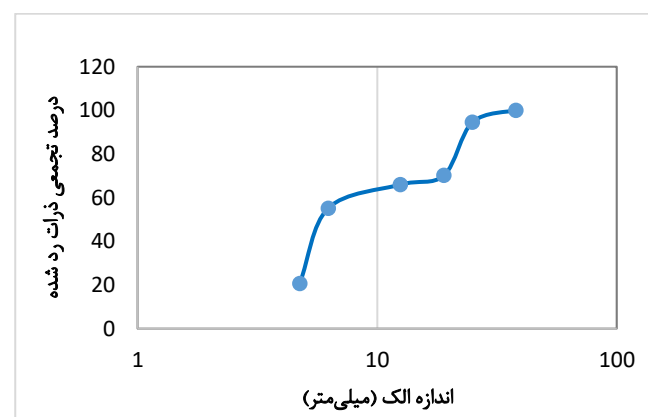
شماره طرح	نام طرح	نسبت آب به سیمان	شن kg/m^3	ماسه kg/m^3	سرباره فسفر kg/m^3	آب kg/m^3	سیمان kg/m^3
۱	PS-0	۰/۶۹	۱۱۹۰/۰۲	۶۴۵/۹۳	۰	۱۹۹/۴۱	۲۶۲/۳۲
۲	PS-5	۰/۶۹	۱۱۹۰/۰۲	۶۱۳/۶۳	۳۲/۳۰	۱۹۹/۴۱	۲۶۲/۳۲
۳	PS-7.5	۰/۶۹	۱۱۹۰/۰۲	۵۹۷/۴۸	۴۸/۴۴	۱۹۹/۴۱	۲۶۲/۳۲
۴	PS-10	۰/۶۹	۱۱۹۰/۰۲	۵۸۱/۳۴	۶۴/۵۹	۱۹۹/۴۱	۲۶۲/۳۲
۵	PS-12.5	۰/۶۹	۱۱۹۰/۰۲	۵۶۵/۱۹	۸۰/۷۴	۱۹۹/۴۱	۲۶۲/۳۲
۶	PS-15	۰/۶۹	۱۱۹۰/۰۲	۵۴۹/۰۴	۹۶/۸۹	۱۹۹/۴۱	۲۶۲/۳۲
۷	PS-20	۰/۶۹	۱۱۹۰/۰۲	۵۱۶/۷۴	۱۲۹/۱۹	۱۹۹/۴۱	۲۶۲/۳۲



شکل ۲. نمودار دانه بندی سرباره فسفر



شکل ۳. نمودار دانه بندی ماسه



شکل ۴. نمودار دانه بندی شن

۲-۲. طرح اختلاط

طرح اختلاط بتن مورد آزمایش در این تحقیق مطابق آئین‌نامه ACI 211.1-91 [۲۰] طراحی شده است. درصد رطوبت مصالح مطابق با استاندارد ملی ۴۹۸۳ ایران تعیین شد [۲۱] و در پایان



شکل ۵. جریات اختلاط و قالب‌ریزی بتن

۲۶۲/۳۲	۱۹۹/۴۱	۱۹۳/۷۸	۴۵۲/۱۵	۱۱۹۰/۰۲	۰/۶۹	PS-30	۸
۲۶۲/۳۲	۱۹۹/۴۱	۲۵۸/۳۷	۳۸۷/۵۶	۱۱۹۰/۰۲	۰/۶۹	PS-40	۹
۲۶۲/۳۲	۱۹۹/۴۱	۳۲۲/۹۶	۳۲۲/۹۷	۱۱۹۰/۰۲	۰/۶۹	PS-50	۱۰
۲۶۲/۳۲	۱۹۹/۴۱	۳۸۷/۵۶	۲۵۸/۳۷	۱۱۹۰/۰۲	۰/۶۹	PS-60	۱۱

۳-۲. برنامه آزمایش‌ها

برای این تحقیق آزمایشگاهی، ۱۱ طرح اختلاط ساخته شده است که (PS-0) نمونه بتن شاهد بدون سرباره فسفر می‌باشد. (PS-10) حاوی ۱۰ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه، (PS-20) حاوی ۲۰ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه، (PS-30) حاوی ۳۰ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه، (PS-40) حاوی ۴۰ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه، (PS-50) حاوی ۵۰ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه، (PS-60) حاوی ۶۰ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه، (PS-7.5) حاوی ۵ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه، (PS-12.5) حاوی ۷/۵ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه، (PS-15) حاوی ۱۵ درصد وزنی سرباره جایگزین ماسه می‌باشند. بعد از توزین مصالح مورد نیاز، براساس استاندارد کلیه مراحل ساخت، آماده سازی، عمل‌آوری و آزمایش نمونه‌ها در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و در دمای محیط $23 \pm 2^\circ$ و رطوبت نسبی بیش از ۷۰ درصد صورت گرفت تا اثرات محیطی به حد اقل برسد. بعد از تهیه مواد و توزین آن‌ها به مقدار طراحی شده، بر اساس استاندارد ASTM C192/C192M-23 نمونه‌ها ساخته شده و بعد از ساخت نمونه‌ها تست اسلامپ و بعد از عمل‌آوری بعد از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، تست مقاومت فشاری انجام شد.



شکل ۶. جریات ساخت نمونه‌ها و تست مقاومت فشاری

۳. نتایج و بحث

نمونه‌های مورد آزمایش این تحقیق از نوع مکعبی با ابعاد 150×150 میلی‌متر ساخته شدند. سن بتن‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انتخاب شده است. همچنان نتایج آزمایش بتن تازه (تست اسلامپ) نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای هر طرح اختلاط و هر سن عمل‌آوری، سه نمونه مکعبی آزمایش شد و مقادیر گزارش‌شده میانگین نتایج می‌باشند. بررسی

واکنش های هیدراسیونی ندارد و در درصدهای بالا باعث کاهش مقاومت اولیه می شود.

۳-۱-۲. مقاومت فشاری ۱۴ روزه

در شکل ۸ نمودار نتایج مقاومت فشاری روز ۱۴ را ملاحظه می فرمایید. در سن ۱۴ روز، روند رشد مقاومت فشاری در تمامی نمونه ها محسوس است. مقاومت بتن شاهد به ۲۲/۷ مگاپاسکال افزایش یافت و در نمونه (PS-7.5) به حداکثر مقدار ۲۴/۲۲ مگاپاسکال رسید که نسبت به نمونه شاهد افزایش حدود ۶/۷ درصدی را نشان می دهد. با این حال، در نمونه های دارای جایگزینی بالاتر از ۱۵ درصد، کاهش تدریجی مقاومت دیده می شود؛ به گونه ای که در (PS-30)، (PS-40) و (PS-60) مقادیر مقاومت به ترتیب ۲۰/۹۴، ۲۰/۵۸ و ۱۹/۷۳ مگاپاسکال اندازه گیری شده اند. این روند نزولی بیانگر آن است که در سطوح بالاتر جایگزینی، اثرات منفی ناشی از کاهش سطح تماس خمیرسنگدانه و کمبود مواد فعال بر اثرات مثبت پرکنندگی غلبه می کند.

۳-۱-۳. مقاومت فشاری ۲۸ روزه

مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه که در شکل ۹ ملاحظه می فرمایید، نشان می دهد که تمام نمونه ها نسبت به سنین ۷ و ۱۴ روزه افزایش قابل ملاحظه ای داشته اند. بتن شاهد (PS-0) دارای مقاومت ۲۶/۶۲ مگاپاسکال است، در حالی که نمونه (PS-7.5) با مقاومت ۲۸/۳۲ مگاپاسکال بیشترین مقدار را در میان کل ترکیبات دارد. این مقدار بیانگر افزایش ۶/۳ درصدی نسبت به نمونه شاهد است. در نمونه های با جایگزینی بیش از ۲۰ درصد، کاهش محسوسی در مقاومت مشاهده می شود؛ به طوری که مقدار آن در (PS-60) به ۲۳/۹۳ مگاپاسکال کاهش یافته است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که استفاده از حدود ۷/۵ درصد سرباره فسفر به عنوان جایگزین ماسه، مقدار بهینه ای است که در آن اثرات مثبت پرکنندگی و واکنش های دیر هنگام به تعادل مطلوبی می رسند.

آماري داده ها نشان داد که انحراف معیار نتایج محدود بوده و ضریب تغییرات در محدوده قابل قبول آزمایش های بتن قرار دارد. با این حال، با توجه به محدود بودن اختلاف مقاومت بین برخی طرح ها، نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند و افزایش مقاومت مشاهده شده به عنوان یک بهبود نسبی در نظر گرفته می شود.

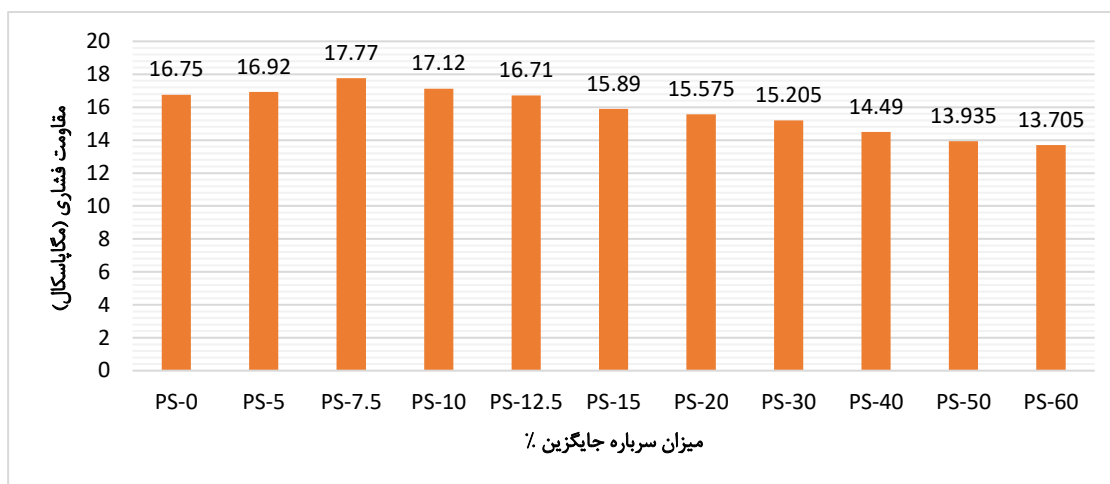
۳-۱-۱. مقاومت فشاری

جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری از استاندارد ASTM C39 [24] استفاده شده است. در ابتدا نمونه های حاوی (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰) درصد وزنی سرباره به عنوان جایگزین بخشی از ماسه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. بعداً نظر به اینکه از این میان میزان ۱۰ درصد بیشترین مقاومت فشاری را نشان داد، درصدهای جزئی تر نزدیک به ۱۰ درصد (۵، ۷/۵، ۱۲/۵، ۱۵) نیز ساخته شده و مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت تا بهینه ترین میزان ممکن برای مقاومت فشاری به دست بیاید.

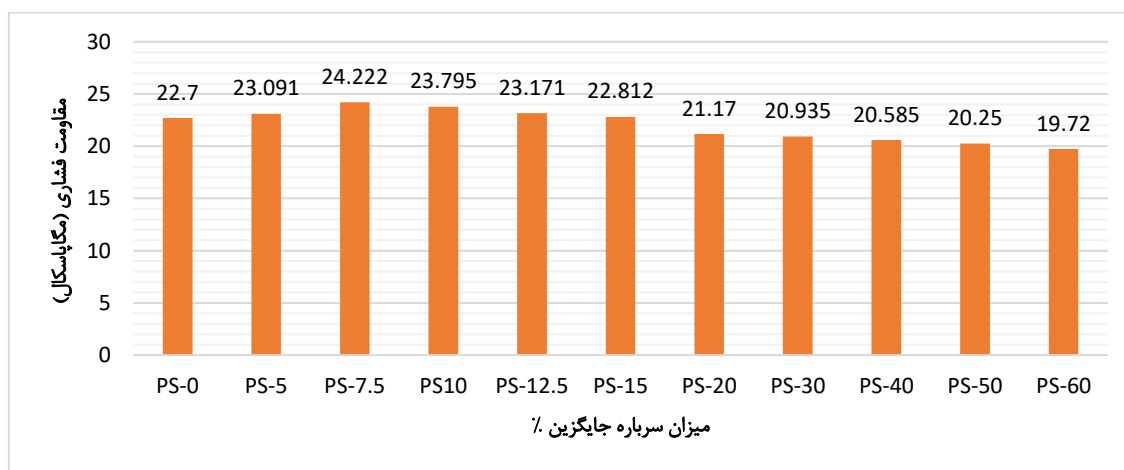
۳-۱-۱. مقاومت فشاری ۷ روزه

شکل ۷ نمودار نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه بوده و نشان می دهد که بتن شاهد (PS-0) دارای مقاومت ۱۶/۷۵ مگاپاسکال بوده و با جایگزینی مقادیر اندک سرباره فسفر، تغییرات اندکی در مقاومت مشاهده می شود. در نمونه های (PS-5) و (PS-7.5) به ترتیب مقادیر ۱۶/۹۲ و ۱۷/۷۷ مگاپاسکال به دست آمد که بیانگر افزایش جزئی مقاومت اولیه در اثر حضور مقدار محدود سرباره فسفر است. اما با افزایش میزان جایگزینی بیش از ۱۰ درصد، روند مقاومت فشاری ۷ روزه کاهشی می شود و در نهایت در نمونه (PS-60) مقاومت تا ۱۳/۷۰ مگاپاسکال افت می کند.

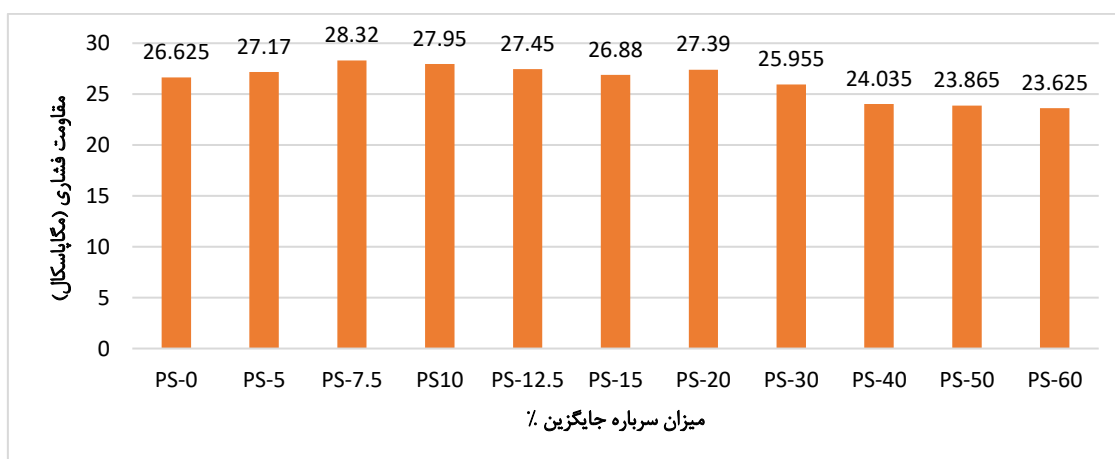
علت این افت را می توان به کاهش نسبت مواد فعال سیمانی و نیز تأخیر در هیدراسیون نسبت داد، چرا که سرباره فسفر ذاتاً خاصیت پوزولانی ضعیف و فعالیت هیدرولیکی پایین تری نسبت به ماسه طبیعی دارد. بنابراین، در سنین کوتاه، سرباره نقش فعالی در



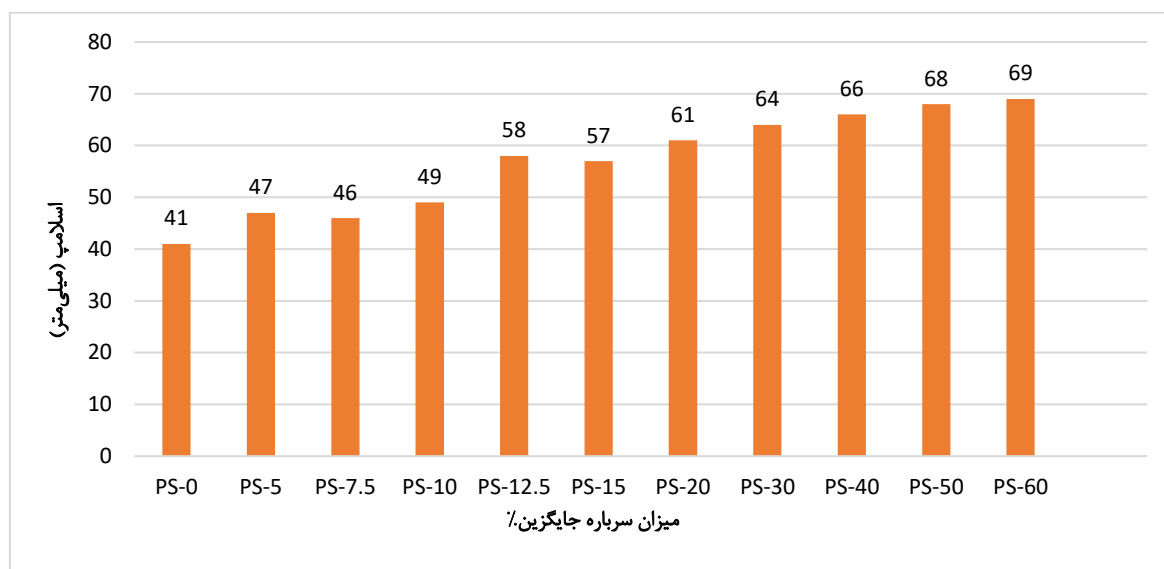
شکل ۷. نمودار نتایج مقاومت فشاری در روز ۷



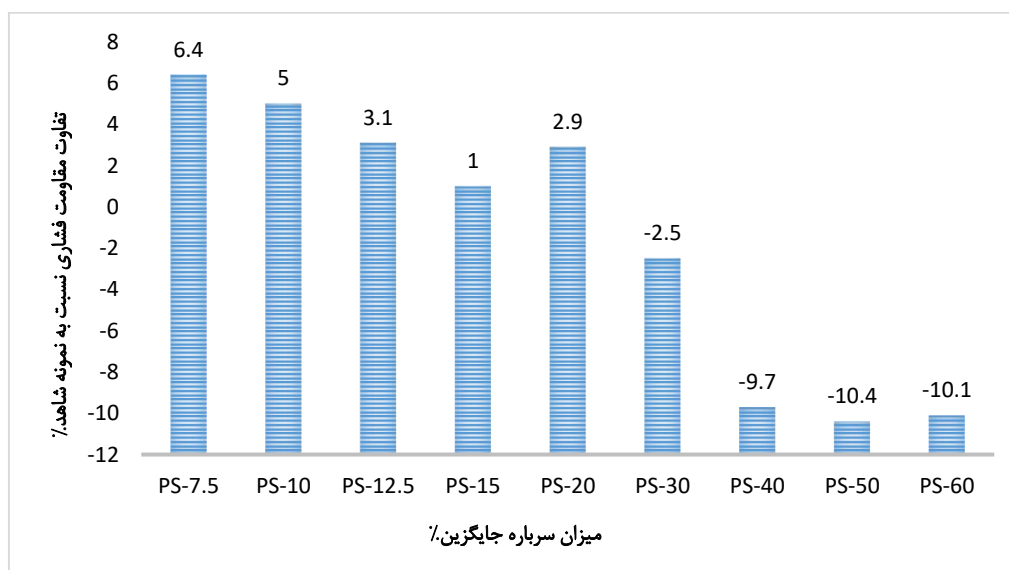
شکل ۸. نمودار نتایج مقاومت فشاری روز ۱۴



شکل ۹. نمودار نتایج مقاومت فشاری روز ۲۸



شکل ۱۰. نمودار نتایج آزمایش اسلامپ نمونه‌ها



شکل ۱۱. نمودار تفاوت مقاومت فشاری نمونه‌ها با نمونه شاهد (%)

۲-۳. اسلامپ (روانی بتن)

فسفر موجب افزایش پیوسته اسلامپ بتن‌ها شده است؛ به‌طوری که مقدار اسلامپ از ۴۰ میلی‌متر در نمونه شاهد (PS-0) به حدود ۷۰ میلی‌متر در نمونه (PS-60) افزایش یافته است. این روند صعودی

نتایج آزمون اسلامپ بتن‌های حاوی سرباره فسفر به‌عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش میزان جایگزینی سرباره

۳-۳. تحلیل نتایج

۳-۳-۱. مقاومت فشاری

تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان می‌دهد که استفاده از سرباره فسفر به عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی، اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار مکانیکی بتن دارد. بررسی روند تغییرات مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بیانگر آن است که عملکرد سرباره فسفر به میزان جایگزینی، سن بتن و نحوه ی برهم‌کنش آن با خمیر سیمان وابسته است. در سن ۷ روزه، روند تغییرات مقاومت فشاری نشان می‌دهد که افزودن مقادیر اندک سرباره فسفر (تا حدود ۷/۵ درصد) موجب افزایش جزئی مقاومت اولیه بتن شده است. این افزایش را می‌توان ناشی از اثر پرکنندگی ذرات ریز سرباره دانست که باعث بهبود تراکم خمیر سیمان و کاهش تخلخل در ساختار بتن می‌شود. در این مرحله، نقش سرباره عمدتاً فیزیکی است و در واکنش‌های شیمیایی شرکت چندانی ندارد. در مقابل، با افزایش میزان جایگزینی به بیش از ۱۰ درصد، مقاومت فشاری ۷ روزه کاهش یافته است. این امر را می‌توان به کاهش میزان فاز فعال سیمانی و فعالیت پوزولانی پایین سرباره نسبت داد، که منجر به تأخیر در رشد محصولات هیدراسیون در سنین اولیه می‌شود. در سن ۱۴ روزه، نتایج نشان‌دهنده افزایش محسوس مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌هاست. این رشد مقاومت در نمونه‌های حاوی درصد‌های پایین سرباره به‌ویژه در نمونه (PS-7.5) چشمگیرتر است. حضور مقدار بهینه‌ای از سرباره فسفر در این مرحله علاوه بر اثر پرکنندگی، با فراهم کردن هسته‌هایی برای رشد محصولات هیدراسیون ثانویه (C-S-H) موجب افزایش چگالی ریزساختار و بهبود ناحیه بین‌سطحی (ITZ) بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌شود. در نمونه‌های دارای جایگزینی بیش از ۱۵ درصد، کاهش تدریجی مقاومت مشاهده شده است که نشان می‌دهد افزایش بیش از حد سرباره باعث کاهش پیوند بین فازهای خمیر و سنگدانه و در نتیجه افت عملکرد مکانیکی بتن می‌گردد. در سن ۲۸ روزه، روند کلی نتایج تأییدکننده رفتار بهینه بتن در درصد‌های

بیانگر تأثیر مثبت سرباره فسفر بر افزایش کارایی بتن تازه است. درصد‌های پایین جایگزینی (۵ تا ۷.۵ درصد) افزایش نسبتاً ملایمی در روانی ایجاد کرده‌اند که می‌توان آن را ناشی از اثر روان‌کنندگی فیزیکی ذرات ریز سرباره دانست.

در درصد‌های جایگزینی متوسط (۱۰ تا ۲۰ درصد)، افزایش محسوس‌تری در مقدار اسلامپ مشاهده می‌شود. این رفتار را می‌توان به اثر ترکیبی کاهش زبری سطحی مصالح ریزدانه و تغییر توزیع دانه‌بندی کل مخلوط نسبت داد که منجر به تراکم بهتر و کاهش اصطکاک بین فازهای خمیر و سنگدانه می‌شود. به‌طور هم‌زمان، کاهش سطح فعال سیلیسی در این محدوده مانع از جذب بخشی از آب اختلاط شده و باعث روان‌تر شدن مخلوط می‌گردد.

در درصد‌های بالا (بیش از ۳۰ درصد)، افزایش اسلامپ بیشتر از قبل است و به بیشترین مقدار خود در نمونه (PS-60) (حدود ۷۰ میلی‌متر) می‌رسد. هرچند این افزایش ظاهراً نشانگر بهبود روانی است، اما باید توجه داشت که در این محدوده، افزایش اسلامپ لزوماً به معنای بهبود واقعی کارایی نیست. در واقع، افزایش بیش از حد سرباره موجب کاهش چسبندگی در خمیر سیمان و تضعیف پیوند داخلی مخلوط می‌شود که می‌تواند در حالت سخت‌شده بر مقاومت و دوام بتن اثر منفی بگذارد.

به‌طور کلی، روند تغییرات اسلامپ نشان می‌دهد که افزایش تدریجی سرباره فسفر باعث بهبود قابل‌توجه روانی بتن تازه می‌شود، اما این بهبود تا حدود ۲۰ درصد جایگزینی مطلوب تلقی می‌گردد و مقادیر بالاتر، هرچند موجب روان‌تر شدن مخلوط می‌شوند، می‌توانند منجر به افت ویژگی‌های مقاومتی و پایداری بلندمدت بتن شوند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی حدود ۷/۵ تا ۱۵ درصد سرباره فسفر علاوه بر دستیابی به کارایی مناسب، با حفظ تراکم ساختاری و چسبندگی خمیر، تعادل مناسبی میان روانی و عملکرد مکانیکی بتن ایجاد می‌کند.

دانه بندی دانست. ذرات ریز و صاف سرباره موجب کاهش اصطکاک داخلی بین سنگدانه ها و خمیر سیمان می شوند. از طرفی، سطح ویژه کمتر و ساختار شیشه ای سرباره نسبت به ماسه طبیعی، میزان جذب آب را کاهش داده و در نتیجه، بخشی از آب اختلاط به صورت آزاد باقی می ماند که به روان تر شدن مخلوط کمک می کند. در درصدهای متوسط (۱۰ تا ۲۰ درصد جایگزینی)، افزایش قابل توجه تری در اسلامپ مشاهده شده است. در این محدوده، نقش توزیع بهینه تر ذرات و افزایش روانی ناشی از کاهش زبری سطحی سنگدانه ها برجسته تر است. این ترکیب به بهبود جریان خمیر در بین سنگدانه ها منجر شده و از تجمع موضعی خمیر جلوگیری می کند. همچنین، ساختار غیرفعال شیمیایی سرباره در این محدوده باعث تأخیر جزئی در واکنش های اولیه هیدراسیون شده که منجر به افزایش زمان حفظ کارایی بتن تازه می شود. در جایگزینی های بالا (۳۰ تا ۶۰ درصد)، روند افزایشی اسلامپ همچنان ادامه یافته است، اما این افزایش بیش از آنکه نشانه بهبود واقعی کارایی باشد، نتیجه کاهش چسبندگی در خمیر سیمان و افت انسجام داخلی مخلوط است. در این حالت، مقدار سرباره به قدری زیاد است که سطح فعال سیمانی کاهش یافته و پیوندهای داخلی بین خمیر و سنگدانه ضعیف تر می شوند. در نتیجه، هرچند بتن تازه روان تر به نظر می رسد، اما پایداری مخلوط کاهش یافته و احتمال جداشدگی سنگدانه ها یا آب انداختگی افزایش می یابد.

به طور کلی، تحلیل داده ها نشان می دهد که افزایش تدریجی سرباره فسفر موجب افزایش پیوسته اسلامپ می شود، اما کارایی مطلوب بتن تنها در بازه ای محدود از درصد جایگزینی (تقریباً بین ۷.۵ تا ۱۵ درصد) حاصل می گردد. در این محدوده، ترکیب متعادل اثر پرکنندگی، توزیع مناسب ذرات، کاهش اصطکاک و حفظ پیوستگی خمیر موجب دستیابی به بتن تازه ای با روانی مناسب، انسجام کافی و قابلیت تراکم مطلوب می شود. بنابراین، بر اساس تحلیل نتایج آزمایش اسلامپ، می توان نتیجه گرفت که سرباره فسفر در مقادیر

پایین سرباره است. بیشترین مقاومت مربوط به نمونه (PS-7.5) با مقدار ۲۸.۳۲ مگاپاسکال بوده که نسبت به بتن شاهد (۲۶/۶۲ مگاپاسکال) افزایش ۶.۳ درصدی را نشان می دهد. این افزایش ناشی از واکنش های دیر هنگام سرباره فسفر با ترکیبات کلسیمی خمیر سیمان و تولید ثانویه ژل C-S-H است که موجب چگالی بیشتر و بهبود پیوستگی در ناحیه انتقالی (ITZ) می گردد. با این حال، در درصدهای جایگزینی بیش از ۲۰ درصد، مقاومت فشاری روندی کاهشی دارد و در نمونه (PS-60) به ۲۳/۹۳ مگاپاسکال می رسد. این کاهش را می توان ناشی از رقیق شدن فاز خمیر سیمانی، افزایش تخلخل و کاهش پیوستگی داخلی ساختار بتن دانست.

در مجموع، تحلیل نتایج نشان می دهد که حضور مقادیر محدود سرباره فسفر، با بهبود تراکم خمیر سیمان و اصلاح ریزساختار، تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی بتن دارد. با این حال، افزایش بیش از حد آن موجب کاهش مواد فعال سیمانی و ضعف در ناحیه بین سطحی (ITZ) شده و در نهایت به افت مقاومت فشاری منجر می گردد. بنابراین، درصد جایگزینی حدود ۷.۵ درصد سرباره فسفر به عنوان محدوده بهینه برای دستیابی به مقاومت فشاری مطلوب، رفتار مکانیکی پایدار و استفاده پایدار از پسماندهای صنعتی در بتن پیشنهاد می شود.

۳-۲-۳. اسلامپ یا روانی بتن

تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش اسلامپ نشان می دهد که استفاده از سرباره فسفر به عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی موجب تغییر قابل توجهی در ویژگی های رئولوژیکی و کارایی بتن تازه می شود. روند افزایشی مقدار اسلامپ با افزایش درصد جایگزینی سرباره فسفر (از ۴۰ میلی متر در نمونه شاهد تا حدود ۷۰ میلی متر در نمونه حاوی ۶۰ درصد سرباره) بیانگر تأثیر مستقیم خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سرباره بر رفتار بتن تازه است. درصدهای پایین جایگزینی (۵ تا ۱۰ درصد) باعث افزایش تدریجی روانی شده اند که می توان آن را ناشی از اثر پرکنندگی و اصلاح

هرچند اسلامپ افزایش می‌یابد، اما چسبندگی و انسجام مخلوط کاهش یافته و احتمال جداشدگی و افت دوام بتن بیشتر می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که سرباره فسفر در صورت کنترل دقیق میزان جایگزینی، قابلیت استفاده به‌عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی در بتن‌های سازه‌ای را دارد و می‌تواند به‌عنوان یکی از مصالح جایگزین نوین در تولید بتن‌های با دوام بالا و اثر زیست‌محیطی کمتر مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- [۱] پناهنده، م.، و ضمیرایی، ز (۱۳۹۴). پایش پسمان‌های صنایع: مطالعه موردی صنایع فولاد استان گیلان. پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی.
- [۲] سوئزلی، (۲۰۱۰). فرایند کوره فسفر زرد. انتشارات صنعت متالورژیک پکن.
- [۳] میندس، سیدنی (۱۳۹۳). مصالح ساختمانی (شکرچی‌زاده، م.، قدوسی، پ.، و رمضانپور، ع.ا. مترجمان). انتشارات دانشگاه تهران.
- [۴] رحیمی، ح (۱۳۹۶). مصالح ساختمانی. انتشارات دانشگاه تهران.
- [۵] لطفی‌شیراز، ف. (۱۴۰۳). اثرات زیست‌محیطی برداشت بی‌رویه از معادن شن و ماسه. در هفتمین کنگره ملی علوم انسانی.
- [6] Hu, L., Chen, Z., Yang, H., Zhu, X., & Wang, W. (2024). Mechanical properties and microstructure evolution of phosphate slag–cement based materials under varied curing temperatures. *Developments in the Built Environment*.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100389>
- [7] He, Y., Liu, Y., Liu, X., Lan, M., Lei, M., Lei, B., & Chen, Q. (2024). Mechanical properties of eco-cement mortar containing MgO-modified phosphorous slag. *Construction and Building Materials*.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136223>
- [8] Huang, Y., Chen, G., Yang, R., Yu, R., Xiao, R., & Wang, Z. (2023). Hydration kinetics and microstructure development of ultra-high performance concrete (UHPC) by high volume of phosphorus slag powder. *Cement and Concrete Composites*.

محدود، رفتار مثبت در بهبود کارایی بتن تازه از خود نشان می‌دهد؛ اما افزایش بیش از حد آن، با تضعیف پیوندهای داخلی و کاهش چسبندگی، اثر منفی بر پایداری و یکنواختی مخلوط خواهد داشت.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از سرباره فسفر به‌عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن دارد. آزمایش‌های مقاومت فشاری و اسلامپ بر روی نمونه‌های مختلف با درصدهای متفاوت جایگزینی (از ۰ تا ۶۰ درصد وزنی ماسه) انجام گرفت و تحلیل داده‌ها بیانگر رفتار دوگانه این ماده در بهبود یا تضعیف عملکرد بتن است. در ارزیابی مقاومت فشاری، مشاهده شد که افزودن مقادیر محدود سرباره فسفر (حدود ۵ تا ۱۰ درصد) منجر به افزایش محسوس مقاومت در سنین مختلف می‌شود. بیشترین مقاومت در نمونه حاوی ۷٫۵ درصد سرباره (PS-7.5) به مقدار ۲۸/۳۲ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز به‌دست آمد که نسبت به بتن شاهد (۲۶/۶۲ مگاپاسکال) افزایش ۶/۴ درصدی را نشان می‌دهد. این بهبود ناشی از اثر پرکنندگی ذرات ریز سرباره و واکنش‌های دیر هنگام آن با فازهای کلسیمی خمیر سیمان است که موجب تشکیل ثانویه ژل C-S-H و بهبود ناحیه انتقالی (ITZ) می‌گردد. در مقابل، با افزایش درصد جایگزینی به بیش از ۲۰ درصد، کاهش پیوستگی داخلی و رقیق شدن فاز خمیر سیمانی باعث افت مقاومت فشاری شد. از سوی دیگر، نتایج آزمون اسلامپ نشان داد که افزایش درصد جایگزینی سرباره فسفر موجب افزایش تدریجی روانی بتن تازه می‌شود؛ به‌طوری‌که اسلامپ از ۴۱ میلی‌متر در نمونه شاهد به حدود ۶۹ میلی‌متر در نمونه حاوی ۶۰ درصد سرباره افزایش یافت. افزایش روانی در درصدهای پایین (تا حدود ۱۵ درصد) را می‌توان نتیجه سطح صاف‌تر و شکل گردتر ذرات سرباره و کاهش اصطکاک داخلی بین سنگدانه‌ها دانست. با این حال، در درصدهای بالاتر،

- [19] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (2010). Aggregates for concrete — Specifications (ISIRI 14748).
- [20] American Concrete Institute (ACI). (1991). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1–91).
- [21] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (1992). Concrete — Determination of density (ISIRI 4983).
- [22] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (2009). Concrete — Determination of slump (ISIRI 3203-2).
- [23] ASTM International. (2011). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C39/C39M–11). ASTM.
- [24] ASTM International. (2020). Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete (ASTM C143/C143M–20). ASTM.
- <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104978>
- [9] Pang, M., Sun, Z., Chen, M., Lang, J., Dong, J., & Tian, X. (2020). Influence of phosphorus slag on physical and mechanical properties of cement mortars. *Materials*, 13, 2390. <https://doi.org/10.3390/ma13102390>
- [۱۰] طاهرمنش، ص.، و نجفی‌کانی، ا. (۱۴۰۰). بررسی اثر سرباره فسفر و سرباره ذوب‌آهن بر رفتار رئولوژی سیمان آمیخته. نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران.
- [11] Chen, G., Huang, Y., Yang, R., Yu, R., Xiao, R., Wang, Z., Ke, X., Xie, G., Cheng, J., & Bao, M. (2023). Comparative study on mechanical properties and microstructure development of ultra-high-performance concrete incorporating phosphorous slag under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, 392, 131963. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131963>
- [12] Qian, G., Liu, W., Gong, X., Li, X., & Zhang, Y. (2022). Property evaluation of cement-stabilized macadam modified via phosphorus slag. *Frontiers in Materials*, 8, 803106. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.803106>
- [13] Liu, K., & Cui, Y. (2021). Effects of different content of phosphorus slag composite concrete: Heat evolution, sulphate-corrosion resistance and volume deformation. *Crystals*, 11, 1293. <https://doi.org/10.3390/cryst11111293>
- [۱۴] ناصرالاسلامی، ن.، بخشی، ج.، نعمتی‌چاری، م.، و حاجی‌مهدی، م. (۱۳۹۹). بررسی اثر سرباره فسفر بر مشخصات مکانیکی و دوام ملات‌های سیمانی. در دومین کنفرانس ملی دوام بتن. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [15] ASTM International. (2011). Standard specification for Portland cement (ASTM C150–11). ASTM.
- [16] Tehran Cement Co. (n.d.). Official website. <https://tehrancement.co.ir>
- [17] ASTM International. (2011). Standard test method for bulk density (“unit weight”) and voids in aggregate (ASTM C29–11). ASTM.
- [18] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (1992). Concrete — Determination of compressive strength of cubic specimens (ISIRI 4977).