



Investigating the Effect of Silica Fume Waste Powder of Sand Blasting as Cement Replacement in the Rheological and Mechanical Properties of Concrete

Amir Hossein Moharrer^{1*} 

¹Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 07.30.2023

Revised: 08.12.2023

Accepted: 08.30.2023

Keyword:

Cement Replacement
Silica Fume Waste Powder
Concrete
Compressive Strength
Green Concrete

***Corresponding Author:**

Amir Hossein Moharrer

Email: moharrer.o@gmail.com

ABSTRACT

Cement is known as the main building material in concrete production. Due to its high cost and environmental pollution and damage during the production process, researchers are always searching for suitable alternatives to cement. Silica fume waste powder from the sandblasting factory, due to its silica content, can be a suitable substitute and was the subject under investigation in the present study. 164 specimens were prepared to measure and evaluate the effect of substituting 5%, 7.5%, and 10% by weight of cement with silica waste powder in two mix designs of 410 and 460 kilograms per cubic meter. The 90-day compressive strength of concrete with 5% substitution in the 460-kilogram mix design showed an increase of 10% in strength, and in other mix designs, no significant change in strength was observed, indicating the acceptability of silica waste powder as a suitable substitute for cement in terms of strength. The water absorption percentage of concrete decreased significantly by 20% with the increase of silica waste powder due to its fine structure and filling the pores and voids of concrete. Based on the results, if silica waste powder, which itself is an environmental problem in the industry, can be used as a cement substitute, it is possible to use 5% less cement in concrete economically and help prevent environmental pollution.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Utilizing industrial waste materials as partial replacements for traditional constituents in concrete production offers both economic and environmental benefits. Cement production accounts for approximately 8% of global CO₂ emissions, so any reduction in the amount of cement used can lower the carbon footprint of concrete. Various waste materials that have been investigated as possible cement replacements include fly ash, slag, recycled concrete aggregates, and silica fume among others.

This study aimed to evaluate the potential for utilizing waste silica powder from sandblasting operations as a partial replacement for cement in concrete mixtures. Sandblasting is widely used for surface cleaning and preparation in various industries. The abrasive silica sand particles become worn down during blasting, generating fine silica powder waste that is difficult and costly to dispose of properly. If shown to be feasible, using this waste silica powder as a cement replacement could offer economic gains through reduced cement costs as well as environmental benefits through industrial waste utilization.

Methodology

For this study, two normal-strength concrete mixtures with target compressive strengths of 250 kg/cm² and 300 kg/cm² at 28 days were designed according to the Iranian concrete code. 164 specimens were prepared to measure and evaluate the effect of substituting 5%, 7.5%, and 10% by weight of cement with silica waste powder in two mix designs of 410 and 460 kilograms per cubic meter. Eight concrete mixtures were produced with 0%, 5% and 10% replacement of cement weight with waste silica powder by mass while maintaining a constant water-to-cementitious materials ratio of 0.39 and 0.35, respectively. Ordinary Portland cement (OPC), silica fume that wastes from sandblasting machines, crushed stone coarse aggregates, and potable water were used without any chemical admixtures.

A total of 168 concrete specimens were cast to evaluate the influence of silica powder addition on key properties of fresh and hardened concrete. 48 cylinder specimens (150 x 300mm) were cast to measure compressive strength at 28 and 90 days. 72 cubic specimens (150mm cubes) were cast for compressive strength testing at 7, 28 and 90 days to evaluate strength development over time. Another 48 cubic specimens (50mm cubes) were cast for water absorption testing at 7, 28 and 90 days to assess the effect on concrete permeability.

Fresh concrete properties measured included slump and unit weight. Compressive strength was determined according to ASTM C39. Water absorption tests were performed according to ASTM C642. Electron microscopy imaging of polished concrete sections was performed to visually examine the microstructure.

Results and discussion

Replacing 5% of cement weight with silica powder did not significantly impact the workability, density or 28-day compressive strengths of the concrete mixtures, indicating that up to 5% replacement is feasible without adverse effects. The silica powder acted as a filler, reducing voids in the concrete and decreasing water demand. However, the data presented in Figure 1 demonstrates that replacing 10% of the cement led to a 22% decrease in slump due to the fineness of the silica particles, indicating the optimum replacement level is around 5%.

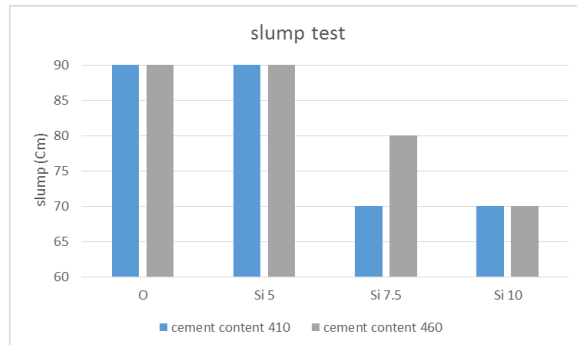


Figure 1. Slump test.

Water absorption of the concrete decreased with the use of silica powder due to its filler effect as can be observed in Figure 2 which can improve durability.

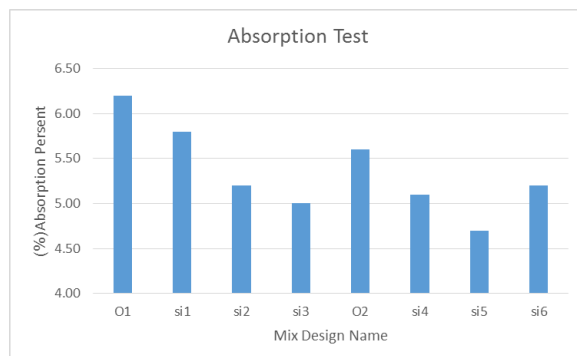


Figure 2. Absorption Test.

Figure 3 visually confirms that the 90-day compressive strengths were higher than at 28 days, suggesting a slow but steady reaction between the silica and cement over time. Electron microscopy images showed that the silica powder reduced voids in the concrete at 5% replacement but caused micro cracks at 10% replacement likely due to shrinkage of the cement paste.

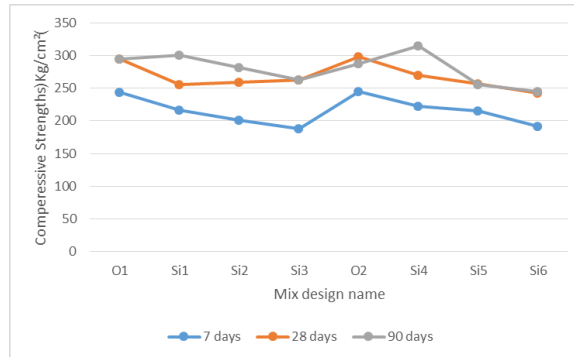


Figure 3. The variation of compressive strength over age.

Conclusion

The results of this study indicated that waste silica powder from sandblasting has the potential as a partial replacement for cement in concrete mixtures. Up to 5% replacement by weight of cement showed no significant effects on workability, strength or permeability, suggesting this level of replacement is feasible without negatively impacting performance. Higher replacements of 10% started to decrease workability and strength, indicating an optimum replacement level of around 5%. The key findings are as follows:

- 1- Replacing up to 5% of the cement weight with silica powder did not notably affect the workability of the concrete mixtures. However, a 10% replacement led to a 22% reduction in slump likely due to the fineness of the silica particles.
- 2- The concrete density initially increased with up to 5% replacement but decreased at 10%, suggesting an optimum replacement level.
- 3- Water absorption of the concrete decreased with the addition of silica powder due to its filler effect, which can improve durability.
- 4- The 28-day compressive strengths were not significantly impacted by 5% cement replacement but started to decrease at 10% replacement.
- 5- The 90-day compressive strengths were higher, indicating a slow but continuous reaction between the silica powder and cement hydration products over time.
- 6- Microscopy images showed that the silica powder reduced voids and porosity at 5% replacement but also caused microcracking at 10% replacement likely due to shrinkage of the cement paste.

In summary, utilizing waste silica powder as a partial cement replacement at dosages up to 5% offers economic and environmental benefits through reduced cement needs and industrial waste utilization, without negatively affecting concrete properties.



بررسی اثر جایگزینی پسماند ماسه حاصل از کارخانهٔ سند بلاست با سیمان در مشخصات رئولوژی و مکانیکی بتن

امیرحسین محرر¹

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>سیمان به عنوان اصلی‌ترین مصالح سازندهٔ بتن شناخته می‌شود که به علت گران قیمت بودن و آلودگی و آسیب به محیط زیست در روند تولید بتن همواره محققان به دنبال پیدا کردن جایگزین مناسب برای سیمان هستند. پودر ماسه سیلیس پسماند کارخانهٔ سند بلاست به علت دارا بودن سیلیس می‌تواند جایگزین مناسبی باشد که در این پژوهش به بررسی این مهم پرداخته شده است. ۱۶۴ آزمون برای سنجش و ارزیابی تأثیر جایگزینی ۵، ۷.۵ و ۱۰ درصدی وزن سیمان با پودر پسماند سیلیس در دو طرح اختلاط عیار سیمان ۴۱۰ و ۴۶۰ کیلوگرم در متر مکعب پرداخته شده است. مقاومت ۹۰ روزه بتن با جایگزینی ۵ درصد در طرح اختلاط با عیار ۴۶۰ کیلوگرم در هر متر مکعب، ۱۰ درصد افزایش مقاومت را به دنبال داشته است و در سایر طرح اختلاطها نیز تفاوت مقاومت چشمگیری رخ نمی‌دهد که خود این عدم تغییر نشان دهندهٔ قابل قبول بودن پودر سیلیس به عنوان جایگزین مناسب با سیمان از منظر مقاومت می‌باشد. درصد جذب آب بتن با توجه به افزایش پودر سیلیس کاهش قابل توجه ۲۰ درصدی رخ می‌دهد که به دلیل ریزساختار بودن سیلیس و پرکردن خلل و فرج بتن اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج به دست آمده در صورتی که بتوان از پودر پسماند سیلیس که خود یک معضل محیط زیستی در صنعت به حساب می‌آید جایگزین سیمان گردد می‌تواند از منظر اقتصادی ۵ درصد سیمان کمتر در بتن استفاده نمود و کمک شایانی به جلوگیری از آلودگی محیط زیست نمود.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸</p> <p>کلید واژگان: جایگزین سیمان پودر پسماند سیلیس مقاومت فشاری بتن بتن سبز بازیافت مصالح</p> <p>نویسنده مسئول: امیرحسین محرر پست الکترونیکی: moharrer.o@gmail.com</p>



مقدمه

در دهه‌های اخیر محققان تلاش کرده‌اند تا بتوانند به وسیلهٔ مصالح حاصل از پسماندهای صنعتی کاربردهایی را به منظور بهبود خواص صنعت بتن ایجاد نمایند [۱-۳]، این امر می‌تواند از چند منظر قابل توجه باشد، مهم‌ترین عاملی که محققان را به بررسی چنین مسائلی سوق داده است این است که معمولاً دفع پسماندهای صنعتی و ساختمانی بسیار هزینه بر و آسیب زنده به محیط زیست می‌باشد و استفاده از این پسماندهای در صنایع دیگر این هزینه‌ها و مضرات را به شدت کاهش می‌دهد، با همین رویکرد می‌توان به صنعت ساختمان و به طور خاص صنعت بتن به عنوان پرمصرفترین ماده پس از آب در جهان نگاه کرد، در این صنعت که گرانترین مصالح آن سیمان است، اگر بتوان مواد پسماند صنایع دیگر را جایگزین سیمان نمود و عیار سیمان مورد استفاده را در بتن به این وسیله کاهش داد، هم از لحاظ اقتصادی بتن تولیدی به صرفه است هم از لحاظ حفظ محیط زیست می‌تواند مثر ثمر باشد و به اهداف عالیّه توسعهٔ پایدار نزدیک‌تر شد [۴-۶].

علاوه بر این در تحقیقات گذشته اثبات شده است که استفاده از موادی همچون پوزولان، پوستهٔ سوخته برنج و پودر سنگ آهک به عنوان جایگزین سیمان مزایای خوبی را هم از منظر مشخصات مکانیکی و هم از منظر خواص رئولوژی به دنبال خواهد داشت. که کاهش هزینهٔ بتن تولیدی، افزایش دوام و پایداری و حفاظت از محیط زیست به علت کاهش عیار سیمان مصرفی از مزایایی بوده که محققان به آن اشاره نموده‌اند [۷-۱۲]. محرر و همکاران نیز در پژوهشی به بررسی اثر کوارتز به عنوان یک سنگدانهٔ سیلیسی و زئولیت در بتن مغناطیسه پرداخته است و در این پژوهش به افزایش مقاومت فشاری بتن در اثر افزودن مواد پایهٔ سیلیسی گزارش شده است [۱۳؛ ۱۴].

سندبلاست یک تکنیک متداول آماده‌سازی سطح است که در ساخت و ساز برای تمیز کردن، صاف کردن و پرداخت سطوح استفاده می‌شود. این فرآیند شامل به حرکت درآوردن مواد ساینده، مانند ماسه، دانه‌های شیشه‌ای، یا اکسید آلومینوم، با سرعت بالا در برابر یک سطح با استفاده از هوای فشرده است. ضایعات سندبلاست محصول جانبی این فرآیند است و معمولاً از مخلوطی از مواد ساینده، ذرات رنگ و زباله‌های سطح در حال تمیز کردن تشکیل شده است. دفع زباله‌های سندبلاست می‌تواند پرهزینه و برای محیط زیست مضر باشد، زیرا اغلب به محل‌های دفن زباله ختم می‌شود یا به طور غیرقانونی تخلیه می‌شود. بازیافت و استفادهٔ مجدد از زباله‌های سندبلاست در مصالح ساختمانی، مانند بتن، می‌تواند راه حلی پایدار برای این مشکل ارائه دهد [۱۵].

محمدزاده چاوشان و رحمانی در سال ۱۴۰۰ در آزمایشگاه دانشگاه زنجان به بررسی تأثیر پودر سنگ آهک بر مشخصات مکانیکی بتن پودری پرداختند آنها دریافتند که خواص مکانیکی و خواص رئولوژی بتن ساخته شده با پودر سنگ آهک به مراتب بهتر از نمونهٔ بتن‌های شاهد می‌باشد از آنجایی که کارخانهٔ تولید سیمان پس از حمل و نقل و نیروگاه‌های تولید انرژی به عنوان سومین عامل انسانی تولیدکنندهٔ گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن شناخته می‌شود که به ازای هر تن سیمان تولیدی حدود ۱۰۰ کیلوگرم گاز دی اکسید کربن به اتمسفر اضافه می‌گردد که نقش بسزایی در گرم شدن کرهٔ زمین دارد [۱۵].

در پژوهشی که توسط سباستین^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام داده‌اند و ارایه نموده‌اند به بررسی اثر اضافه نمودن دورریز ساقهٔ نیشکر بر خواص بتن پودری واکنشی انجام شده است مشاهده گردید که با افزایش میزان میکروسیلیس تا ۱۲.۵ درصد، خود می‌تواند نتیجهٔ قابل قبولی از منظر محیط زیستی، اقتصادی، کنترل دوام و کنترل جمع‌شدگی بتن باشد زیرا در گذشته ثابت گردیده است کاهش میزان عیار سیمان در بتن علاوه بر کاهش مخاطرات زیست محیطی حاصل از گازهای گلخانه‌ای کارخانه سیمان و کاهش قیمت تمام شده بتن دوده سیلیسی به عنوان جایگزین سیمان دوام بتن را افزایش می‌دهد و با توجه به این‌که خمیر سیمان عامل اصلی ترک‌های جمع‌شدگی می‌باشند با کاهش عیار

¹ Sebastin

سیمان خطر ترک خوردگی حاصل از جمع شدگی نیز کاهش می‌یابد [۱۶] که این دو نتیجه در تحقیقات کولپاردی^۱ و همکاران [۱۷] و تام^۲ و همکاران مشاهده گردیده است [۱۸].

در پژوهشی که توسط تاپیک و پروسک^۳ در سال ۲۰۱۷ بر روی بررسی اثر استفاده از بتن بازیافتی و پودر سنگ سیلیس بر روی مقاومت مکانیکی و پروسه هیدراتاسیون سیمان انجام می‌شود دریافتند که مقاومت فشاری نمونه‌هایی که پودر سنگ سیلیس ۱۰ درصد وزن سیمان جایگزین می‌شود تا ۲۰ درصد افزایش مقاومت را در بتن ایجاد نماید. این در حالی است که با افزایش میان جایگزینی پودر سنگدانه سیلیسی با سیمان مقاومت فشاری بتن ۶۵ درصد نسبت به مقاومت فشاری نمونه شاهد کاهش می‌یابد. همچنین ایشان با تحقیق در خصوص میزان جریان حرارت‌زایی و آزاد کردن حرارت توانستند تأثیر افزودن مصالح متفاوت بر بتن از آزمایش حرارت‌زایی را تعیین نمایند [۱۹].

آقای سوکمانا^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی امکان جایگزینی پسماند ماسهٔ کارخانه سند بلاست به جای سیمان در مراحل ساخت بتن پرداخته است. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد که جای‌دهی سیمان در بتن باعث بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن و دوام بتن تا جایگزینی ۴۰ درصد می‌گردد و از طرفی دیگر با کاهش عیار سیمان و جلوگیری از ورود پسماند در طبیعت به حفظ محیط زیست کمک شایانی می‌کند [۲۰].

غلامپور و همکاران در سال ۲۰۲۱ نیز به بررسی اثرات افزودن ماسهٔ پسماند در بتن پرداخته‌اند و نتیجهٔ این تحقیق نشان از افزایش و بهبود خواص مکانیکی بتن و همچنین کاهش آلودگی محیط زیست گردیده است [۲۱].

کریم^۵ و همکاران در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ به امکان سنجی و بررسی اثر استفاده از پسماند ماسه‌ای کارخانهٔ سند بلاست و خاکستر بادی در قطعات پیش ساخته بتن با مقاومت بالا پرداخته‌اند، نتایج حاصل نشان از افزایش مقاومت فشاری و همچنین کاهش میزان جذب آب آزمونه‌ها داشته است [۲۲؛ ۲۳].

کاوور^۶ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲ در طی پژوهشی در خصوص ویژگی‌های بتن ساخته شده با پسماند ماسه سیلیسی که انتشار داده‌اند به این نتایج دست یافته‌اند که مدت زمان عمل‌آوری به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد و این کاهش چشمگیر مدت زمان عمل‌آوری بدون تأثیر منفی بر مقاومت مکانیکی بتن گزارش گردیده است [۲۴].

چوداری^۷ و همکاران در سال ۲۰۲۰ و دمیس^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر افزودن خاکستر بادی و پسماند پودر شیشهٔ سیلیسی پرداخته‌اند، ایشان در نتایج پژوهش آزمایشگاهی خود به این نتیجه دست یافتند که این دو مواد می‌تواند در تولید و ساخت بتن با توانمندی بالا مورد استفاده قرار گیرد که با بهبود مقاومت و دوام بتن در محصول نهایی همراه است [۲۵؛ ۲۶].

قماریه^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی مزایای محیط زیستی و اقتصادی استفاده از پسماند ماسهٔ دستگاه سند بلاست به جای بخشی از سیمان مورد نیاز بتن پرداختند، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پسماند ماسه می‌تواند به صورت شاخص و مشهودی هم هزینه ساخت بتن و هم میزان گازهای گلخانه‌ای را تولید شده به علت تولید سیمان در کارخانه سیمان کاهش دهد [۲۷].

¹ Collepardi

² Tam

³ Topić & Prošek

⁴ Sukmana

⁵ Karim

⁶ Kaur

⁷ Choudhary

⁸ Demiss

⁹ Qomariah

لیمباجیا^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۰ در پژوهشی مشابه لی^۲ و همکاران [۱۰] به بررسی امکان استفاده از بتن بازیافتی و پسماند ماسه در بتن با توانایی بالا پرداختند و نتیجه حاصل حاکی از آن بود که محصول نهایی با افزایش مقاومت فشاری و بهبود دوام بتن همراه است [۲۸].

در پژوهشی دیگر که در سال ۲۰۲۱ بر روی استفاده از پسماند کارخانه‌های سنبلاست در ساخت بتن خود تراکم نموده‌اند یانگ^۳ و همکاران مشاهده نمودند که درصد‌های متفاوت اضافه نمودن و یا جایگزین نمودن پسماندهای متفاوت با سیمان وابستگی مستقیم به کاربری بتن خودتراکم و ویژگی‌های مورد انتظار و همچنین شرایط محیطی مورد انتظار دارد [۲۹].

در پژوهشی که در خصوص تأثیر افزودن پسماند ماسه در ویژگی‌های بتن خودتراکم تازه و سخت شده در سال ۲۰۲۱ توسط پاراشار^۴ و همکاران انجام گردیده است به این نتیجه دست یافته شده که پسماند ماسه می‌تواند نیاز به عملیات تراکم‌پذیری در مرحله جای‌دهی در قالب به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد و کارپذیری و کارایی بتن را بهبود دهد و همچنین تا ۱۰ درصد جایگزینی کاهش مقاومت و تغییر در دوام بتن اتفاق نمی‌افتد [۳۰].

پاچیده و همکاران نیز در بررسی اثر اضافه نمودن سیلیس بر مقاومت‌های مکانیکی بتن تحت حرارت به این نتیجه رسیدند که سیلیس مقاومت‌های خمشی فشاری و کششی بتن را در این شرایط نسبت به نمونه شاهد بهبود می‌بخشد [۳۱]. تأثیر افزایش مقاومت‌های مکانیکی بتن در صورت جایگزینی سیمان با پوزولان در دو پژوهش دیگر که توسط توفیق و پاچیده [۳۲] و همکاران در دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه سمنان به اثبات رسیده است [۳۳].

برنامه آزمایشگاهی

مواد و مصالح تشکیل دهنده

سیمان

سیمان مورد استفاده در این پژوهش سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان فیروزآباد بوده که آنالیز شیمیایی آن مطابق جدول قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱. جدول عناصر تشکیل دهنده سیمان.

عناصر	درصد
SiO ₂	۲۰.۵
Al ₂ O ₃	۴.۹۵
Fe ₂ O ₃	۳.۵
CaO	۶۳.۲۵
MgO	۱.۵
SO ₃	۲.۱

¹ Limbachiya

² Li

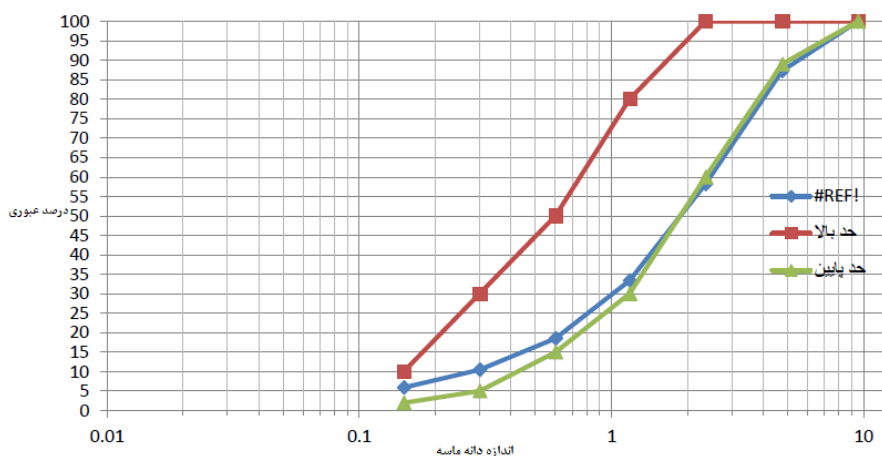
³ Yang

⁴ Parashar

عناصر	درصد
K ₂ O	۰.۵۵
Na ₂ O	۰.۳۵
L.O.I	۲.۶۵
جرم مخصوص (kg/m ³)	۳.۱۵
سطح مخصوص (cm ² /gr)	۳۱۱۰

سنگدانه

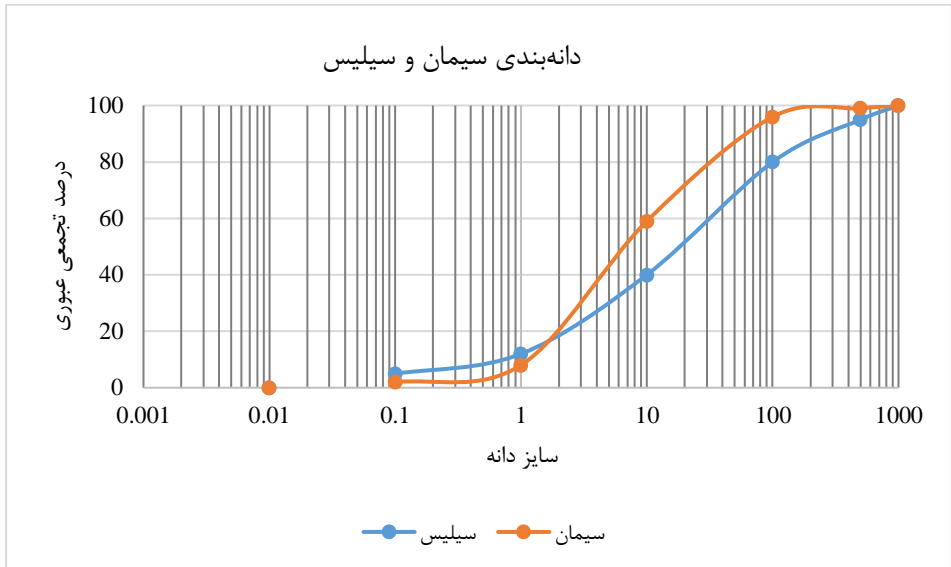
سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش از معدن صدرا کنار دوکوهک خریداری شده بود که با دانه‌بندی استاندارد مطابق با استاندارد ۳۰۲ جمهوری اسلامی ایران تهیه و کنترل گردیده است. نمودار دانه‌بندی سنگدانه مصرفی مطابق شکل استخراج گردیده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه.

پسماند ماسه

پسماند حاصل از سندبلاست کارخانه سندبلاست قطعات آلومینیوم و چدن در این پژوهش استفاده گردیده است که ماسه اصلی آن از معادن سیلیسی ملایر به دست آمده است. اندازه ماسه‌های مورد استفاده در کارخانه از ۰.۵ میلی متر تا ۱.۲ میلی متر بوده است که پس از چهارالی پنج بار استفاده به دلیل برخورد با شتاب به قطعات اندازه ذرات به ابعاد ریزتری تبدیل می‌شود که توسط دستگاه مکنده متصل به کابین سند بلاست جمع آوری می‌گردد. پس از انجام آزمایش بلین، تعیین اندازه ذرات پسماند مشاهده گردیده شد که ابعاد ذرات بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون می‌باشد. که در مقایسه با قطر ذرات سیمان که ما بین ۱۰ تا ۹۰ میکرون است می‌توان ذرات را هم اندازه و مشابه سیمان در نظر گرفت. دلیل دیگر می‌تواند خاصیت سیلیس موجود در پسماند باشد که می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان به حساب آید، شکل مقایسه دانه‌بندی دو ماده سیمان و پودر سیلیس را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار مقایسه دانه‌بندی ماسه و سیمان.

آب

آب مورد استفاده در ساخت مخلوط بتن از آب لوله کشی شهرک صنعتی بوده است که از لحاظ سختی و میزان اسیدی بودن مورد آزمایش قرار گرفت و معیارهای پذیرش را طبق جدول دارا بوده است.

جدول ۲. نتایج آزمایش آب.

سنجش آب	
معیار پذیرش	جواب آزمایش
PH	۷
TDS	۱۷۰ ppm

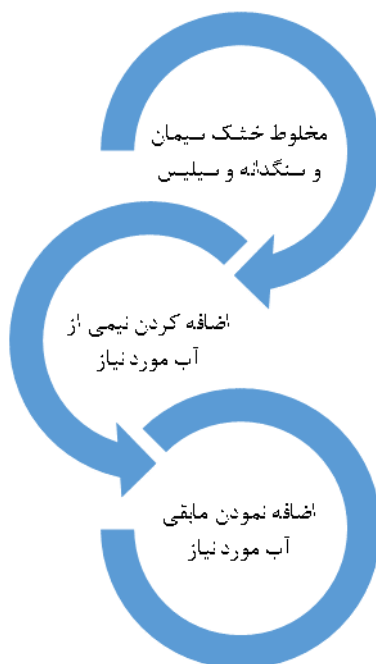
روش انجام آزمایش

آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش به منظور ساخت بتن از سیمان سنگدانه (ماسه و شن) و پودر سنگدانه سیلیس حاصل از دستگاه سند بلاست و آب استفاده گردیده است. با توجه به این‌که در این پژوهش میزان اضافه نمودن پودر سنگدانه سیلیس زیاد نمی‌باشد از فوق روان کننده به منظور کاهش پارامترهای متغیر تأثیرگذار در آزمایش استفاده نگردیده است. این پژوهش به منظور کنترل و بررسی اثر افزایش میزان پودر سنگدانه سیلیس با کمک از آیین‌نامه بتن ایران دو طرح مخلوط با مقاومت نمونه شاهد 250 Kg/cm^2 و 300 Kg/cm^2 و اسلامپ حدود ۹۰ میلی متر طرحی و ساخته شد. به طور معمول برای بتن‌های حاوی ریزدانه عیار سیمان را بیش از 400 Kg/cm^2 در نظر می‌گیرند، تا جایی‌که در بتن‌های پودری واکنشی عیار سیمان می‌تواند تا 1000 Kg/m^3 در شرایط خاص در نظر گرفته شود. و همچنین برای

بتن‌های معمولی که مجموع میزان ریزدانه و عیار سیمان بالا بوده و هم‌زمان از مواد افزودنی استفاده نمی‌گردد نسبت آب به سیمان بین ۰.۳۵ تا ۰.۵ در نظر گرفته می‌شود که این نسبت برای آب به مواد سیمانی حداکثر به ۰.۴ کاهش می‌یابد. دلیل استفاده از دو عیار سیمان به منظور بررسی هر چه بهتر تأثیر میزان افزایش وزنی سیمان در این جایگزینی بوده است.

مراحل ساخت بتن در این پژوهش به سه قسمت تقسیم شده است:



شکل ۳. مدل شماتیک مراحل ساخت.

ابتدا مواد خشک با هم مخلوط شده و به وسیله میکسر آزمایشگاه ترکیب می‌شوند. سپس در مرحلهٔ دوم نیمی از آب مورد نیاز در این پژوهش به مدت ۳ دقیقه مخلوط شده و نهایتاً در انتهای مرحلهٔ اختلاط مابقی آب مورد نیاز طرح به مخلوط اضافه می‌گردد و به مدت ۵ دقیقه به خوبی ترکیب می‌گردد و مخلوط همگن بتن، آماده ریختن درون قالب می‌شود.

مشخصات طرح مخلوط

۸ طرح مخلوط با توجه به میزان جایگزینی پسماند ماسه با سیمان در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته است که توضیحات و نحوهٔ نام‌گذاری هر کدام در جدول زیر به نمایش گذاشته شده است. در جدول ارایه شده طرح اختلاط نمونه‌های شاهد با نماد O نشان داده شده است و طرح اختلاط‌های دارای پسماند ماسه با نماد Si نشان داده شده‌اند. نسبت‌های طرح مخلوط برای یک متر مکعب بتن با توجه به مشخصات ACI ۲۱۱.۱ در جدول ارایه شده است در این جدول نسبت آب به مواد سیمانی W/C_m ارایه شده است که منظور از مواد سیمانی مجموع سیمان و سیلیس استفاده شده در طرح اختلاط می‌باشد. در این پژوهش از دو عیار سیمان ۴۱۰ و ۴۶۰ کیلوگرم در هر متر مکعب استفاده گردیده

که در هر طرح اختلاط برای حذف عامل تأثیرگذار بر مشخصات بتن نسبت آب به مواد سیمانی به صورت ثابت ۰.۳۹ و ۰.۳۵ در نظر گرفته شد.

جدول ۳. طرح اختلاط.

شماره طرح اختلاط	نام طرح	سیمان (Kg)	پودر سیلیس (Kg)	آب (Kg)	W/Cm	سنگدانه (Kg) شن ماسه
۱	O1	۴۱۰	۰	۱۶۰	۰.۳۹	۶۳۰ ۱۱۰۰
۲	si1	۳۹۰	۲۰	۱۶۰	۰.۳۹	۶۳۰ ۱۱۰۰
۳	si2	۳۷۹	۳۱	۱۶۰	۰.۳۹	۶۳۰ ۱۱۰۰
۴	si3	۳۶۹	۴۱	۱۶۰	۰.۳۹	۶۳۰ ۱۱۰۰
۵	O2	۴۶۰	۰	۱۶۰	۰.۳۵	۶۸۰ ۱۰۰۰
۶	si4	۴۳۷	۲۳	۱۶۰	۰.۳۵	۶۸۰ ۱۰۰۰
۷	si5	۴۲۵	۳۵	۱۶۰	۰.۳۵	۶۸۰ ۱۰۰۰
۸	si6	۴۱۴	۴۶	۱۶۰	۰.۳۵	۶۸۰ ۱۰۰۰

برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش ۱۶۸ نمونه بتنی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته شده است. از این تعداد آزمون ۴۸ نمونه استوانه‌ای ۱۵*۳۰ سانتیمتر ساخته شده است و ۷۲ نمونه مکعبی ۱۵ سانتیمتری برای سنجش مقاومت فشاری سنین متفاوت ساخته شده است. آزمون‌های مکعبی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است و در آزمون‌های استوانه‌ای تنها سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مورد ارزیابی قرار گرفته شده است و آزمون جذب آب بر روی آزمون‌های مکعبی ۵۰ میلی متر انجام می‌گردد که برای هر نمونه دو آزمون در سه سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته و اجرا می‌گردد. لذا ۴۸ آزمون برای انجام این آزمایش ساخته و نگهداری گردید. در ادامه به آزمایش‌های انجام شده پرداخته شده است:

آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی دو آزمون مکعبی و استوانه‌ای انجام گردید. آزمایش مقاومت فشاری آزمون‌های استوانه‌ای مطابق استاندارد بدین صورت که ابتدا طرح اختلاط بتن انجام می‌گردد و پس از جای‌دهی در قالب‌های استوانه‌ای ۱۵*۳۰ سانتیمتر در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه پس از عمل‌آوری سطوح آن خشک شده به حالت اشباع و به منظور بارگذاری زیر جک ۲۰۰ تنی کلاهک گذاری و آماده می‌گردد. همچنین آزمون‌های مکعبی به ابعاد ۱۵*۱۵ سانتیمتر پس از خروج از حوضچه نگهداری پس از آماده‌سازی شکست انجام می‌گردد، نکته حائز اهمیت در خصوص انتخاب سطح بارگذاری این است که حتماً می‌بایست سطحی انتخاب گردد که صاف و بدون زائده باشد که خطایی در پروسه بارگذاری روی ندهد. در خصوص آزمون‌های مکعبی که مطابق استاندارد شماره به همان طریق ذکر شده در خصوص آزمون‌های استوانه‌ای عملیات ساخت و نگهداری و شکست انجام می‌گردد با این تفاوت که تعداد آزمون‌های مکعبی با توجه به این که شکست آزمون‌های ۷ روزه نیز بدان اضافه می‌گردد، بیشتر است.

آزمایش درصد جذب آب

آزمایش درصد جذب آب آزمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵۰ میلی‌متر که مطابق استاندارد ASTM C۹۴۸ انجام شد. در این آزمایش به منظور محاسبه جذب آب آزمونه‌های مکعبی در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه از هر طرح مخلوط دو آزمونه ساخته و نگهداری می‌شود و در سنین مشخص شده میزان جذب آب در دو حالت کوتاه مدت و نهایی اندازه‌گیری می‌شود. درصد جذب آب آزمونه‌ها از طریق فرمول که در ادامه به آن اشاره می‌شود محاسبه می‌گردد. که در این فرمول W_1 میزان وزن جذب آب سنگدانه با درجهٔ اشباع و W_2 میزان وزن آزمونه در حالت خشک قرار گرفته در آون می‌باشد. برای محاسبه دو مقدار فوق ابتدا آزمونه‌ها را در حوضچهٔ نگهداری به مدت سن مشخصه در دمای آب ۲۳ درجه نگهداری نموده و پس از خروج از حوضچه توزین می‌گردند و سپس برای توزین وزن خشک آزمونه آن را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد در آون نگهداری نموده و تا زمان ثابت شدن دمای آزمونه با دمای محیط نگهداری و سپس توزین انجام می‌گردد و سپس آزمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت دیگر در آون نگهداری می‌شود و به همان روش قبل عملیات توزین انجام می‌گیرد در این مرحله اگر اختلاف دو توزین کمتر از ۰.۵ درصد وزن خشک نمونه باشد عدد وزن خشک نمونه ثبت می‌گردد و در غیر این صورت این روش ادامه می‌یابد تا شرط کاهش اختلاف تأمین گردد. برای سنجش و محاسبه میزان درجهٔ اشباع نیز پس از اندازه‌گیری وزن نمونه خشک آزمونه‌ها را هر ۲۴ ساعت داخل آب گذاشته و اندازه‌گیری انجام می‌دهند هر زمان اختلاف هر دو اندازه‌گیری کمتر از ۰.۵ درصد وزن خشک آزمونه شد کفایت اندازه‌گیری اعلام می‌گردد و میزان وزن سنجش شده به عنوان درجهٔ اشباع بتن ثبت می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش می‌توان ملاحظه نمود که با اضافه نمودن پودر ماسه به طرح اختلاط و افزایش زمان عمل‌آوری جذب آب نمونه‌ها برای دو مدل تعریفی جذب آب کوتاه مدت و نهایی به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که می‌تواند این روند کاهش به علت کاهش تخلخل آزمونه‌ها با توجه به اثر پرکنندگی پودر ماسه پسماند باشد و همچنین افزایش درجهٔ هیدراتاسیون خمیر سیمان اتفاق بیفتد.

$$wab = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_2} \right) \times 100 \quad (1)$$

آزمایش اسلامپ

برای تعیین میزان کارپذیری و کارایی بتن ساخته شده آزمایش تعیین روانی یا همان کارپذیری بتن مطابق استاندارد ASTM C۱۴۳ انجام گردید.

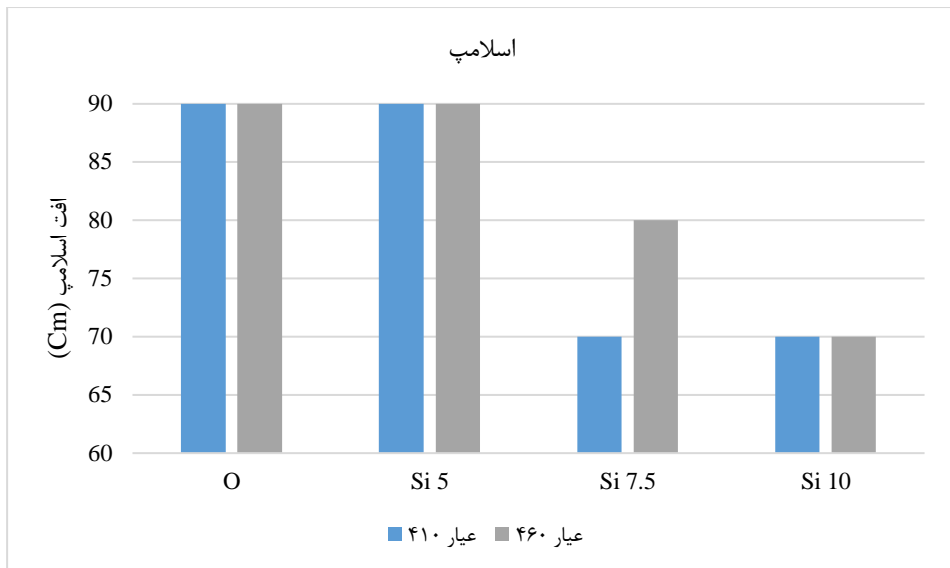
مشخصه پژوهش

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی اثر جایگزینی پودر سنگ سیلیس حاصل از عملیات سند بلاست در کارگاه‌های صنعتی پرداخته شده است که در صنایع فولاد به عنوان یک پسماند و دور ریز محسوب می‌شود، نوآوری این تحقیق در این است که تاکنون در خصوص این پسماند که دفع آن برای صنایع یک معضل و برای محیط زیست یک ضرر به حساب می‌آید پژوهشی انجام نگردیده است. نگارندگان این مقاله با باور بر این که سیلیس می‌تواند به عنوان یک مکمل سیمان و به عنوان یک ماده چسباننده در ملات سیمان و بتن نقش ایفا کند.

نتایج و بحث

کارایی و روانی بتن تازه

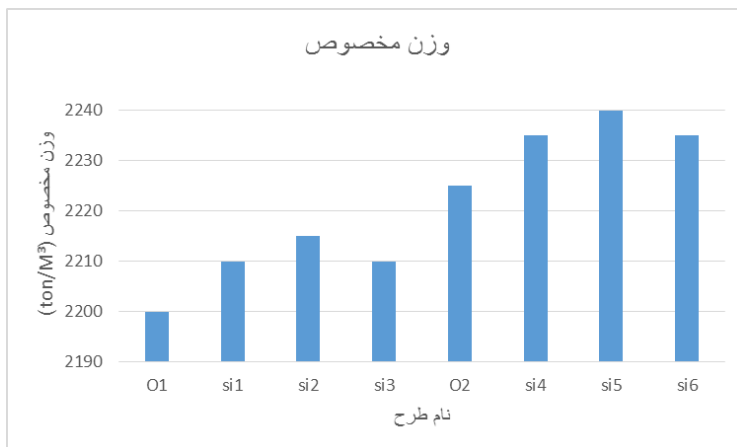
نتایج آزمایش روانی در شکل قابل مشاهده می‌باشد. در طرح مخلوط‌هایی که همراه با افزایش میزان درصد جایگزینی پودر سیلیس با سیمان میزان اسلامپ با کاهش همراه است. که این کاهش چشمگیر می‌تواند به علت ریزتر بودن و جاذب بودن آب توسط پودر سیلیس می‌باشد. طرح اختلاط محاسبه شده برای دو عیار ۴۱۰ و ۴۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده که با فرض در نظر گرفتن اسلامپ ۹۰ میلیمتر بوده است که پس از جایگزینی ۱۰ درصد پودر سیلیس با سیمان اسلامپ با بیش از ۲۰ درصد افت به اسلامپ عدد ۷۰ میلی متر کاهش یافت.



شکل ۴. نمودار نتایج آزمایش اسلامپ.

وزن مخصوص

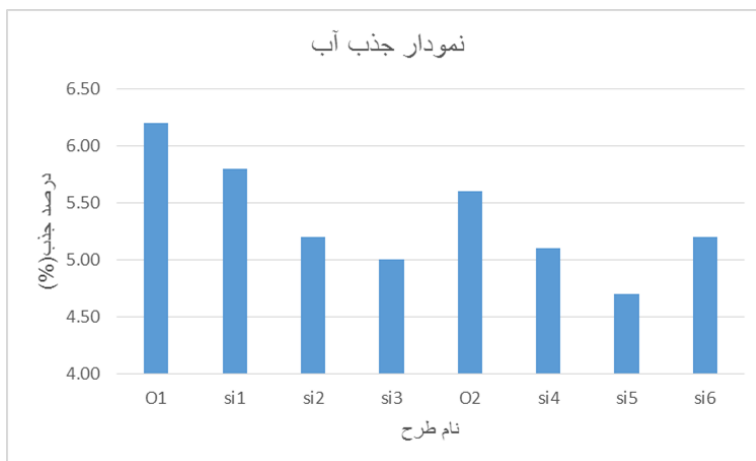
در شکل می‌توان میانگین وزن مخصوص آزمون‌های بتنی هر آزمون را ملاحظه نمود، در هر دو طرح اختلاط عیار ۴۱۰ و ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌توان مشاهده کرد که میزان وزن مخصوص در ابتدا حالت صعودی و سپس به حالت نزولی می‌رسد که این نشان از رسیدن به حالت بهینه در میزان جایگزینی ۷.۵ درصدی پودر سیلیس با سیمان در طرح‌های اختلاط دارد و در بیشترین حالت ممکن وزن مخصوص آزمون‌های دارای ۷.۵ درصد جایگزینی سیلیس با سیمان بوده است که در عیار ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب به عدد ۲۲۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌رسد که نشان از ۱.۸۲ درصد رشد نسبت به نمونه اصلی شاهد دارد.



شکل ۵. نمودار نتایج وزن مخصوص.

جذب آب

نتایج به دست آمده آزمایش جذب آب در شکل قابل مشاهده است و می‌توان نتیجه گرفت که همواره اضافه نمودن پودر سیلیس به طرح اختلاط باعث کاهش میزان جذب آب بتن گردد به غیر از حالت جایگزینی ۱۰ درصدی سیلیس بازیافتی با سیمان در آزمون‌های پر سیمان عیار ۴۶۰ کیلوگرم در متر مکعب که این می‌تواند نشان از عبور از حالت بهینه جایگزینی و میزان اضافه‌تر بودن پودر سیلیس در بتن باشد. در ادامه می‌توان به منظور تکمیل تأثیر افزودن پودر سیلیس بازیافتی به جای سیمان در بتن بر مشخصهٔ جذب آب آزمون‌های بتنی با بررسی نمودار ارتباط مقاومت فشاری و درصد جذب آب نتایج خوبی حاصل گردد.



شکل ۶. نمودار نتایج جذب آب.

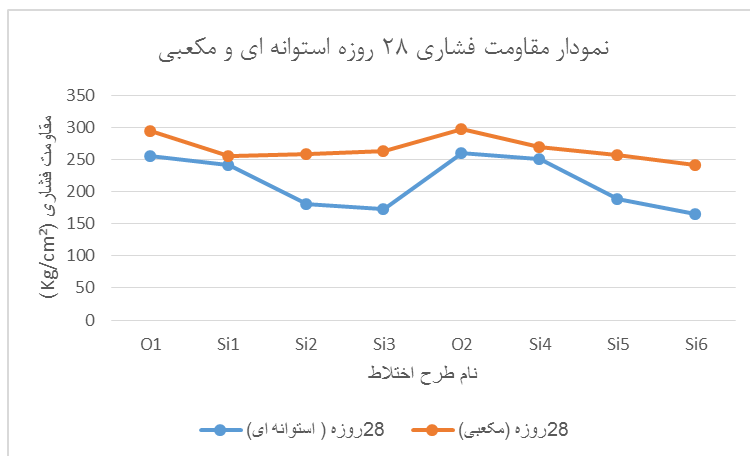
مقاومت فشاری

در جدول می‌توان نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای در سنین متفاوت را ملاحظه و بررسی نمود.

جدول ۴. جدول نتایج مقاومت فشاری آزمون‌ها.

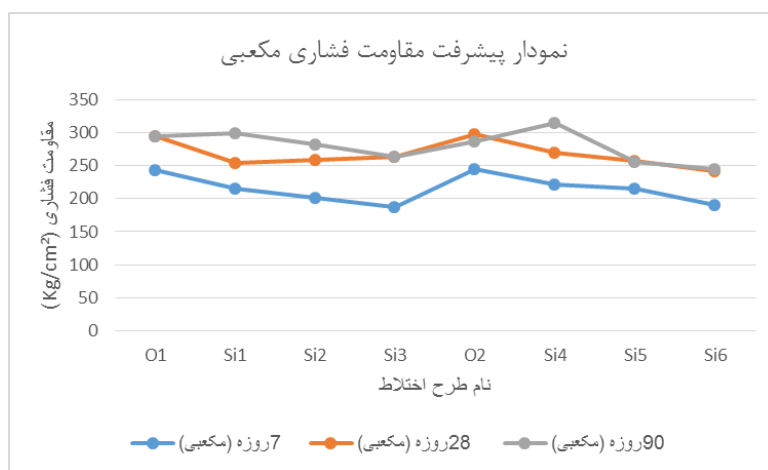
شکست نمونه (Kg/cm^2)				
طرح اختلاط	۷روزه (مکعبی)	۲۸روزه (استوانه‌ای)	۲۸روزه (مکعبی)	۹۰روزه (مکعبی)
O1	۲۴۴	۲۵۵	۲۹۴	۲۹۴
Si1	۲۱۶	۲۴۲	۲۵۵	۳۰۰
Si2	۲۰۱	۱۸۰	۲۵۹	۲۸۲
Si3	۱۸۸	۱۷۳	۲۶۳	۲۶۳
O2	۲۴۵	۲۶۰	۲۹۸	۲۸۷
Si4	۲۲۲	۲۵۰	۲۷۰	۳۱۵
Si5	۲۱۵	۱۸۹	۲۵۷	۲۵۶
Si6	۱۹۱	۱۶۵	۲۴۲	۲۴۵

نمودار شکل مقایسه نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون‌های استوانه‌ای و مکعبی دارای درصد‌های متفاوت جایگزینی سیلیس با سیمان را به نمایش می‌گذارد و از روی این نمودار میزان تغییرات و شیوه تغییرات را می‌توان بررسی و نتیجه‌گیری کرد. از روی نمودار می‌توان نتیجه‌گیری کرد تأثیر جایگزین نمودن پودر بازیافتی سیلیس با سیمان در طرح اختلاط‌های عیار سیمان ۴۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب تأثیر بیشتری گذاشته است که حجم و وزن بیشتر استفاده از پودر سیلیس بازیافتی درصد‌های ۵، ۷.۵ و ۱۰ درصد وزن سیمان در طرح اختلاطی که عیار سیمان بیشتر دارد، می‌تواند دلیل آن باشد.



شکل ۷. نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌ای و مکعبی.

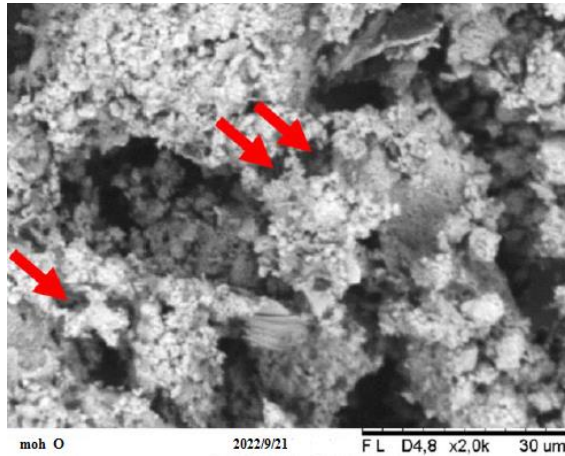
نتایج پیشرفت مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی مکعب ۱۵*۱۵ سانتیمتری با توجه به سن آزمونه‌ها در سن‌های ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق نمودار شکل ارائه شده است. با توجه به نمودار نشان داده شده می‌توان نتیجه گرفت مقاومت ۹۰ روزه بتن ساخته شده با مواد جایگزین سیلیس در طرح اختلاط‌های شماره ۱ و ۲ و ۴ نسبت به نمونه‌های ۲۸ روزه همراه با افزایش مقاومت بوده که بیشترین افزایش مقاومت مربوط به نمونه طرح اختلاط با عیار ۴۱۰ کیلوگرم در متر مکعب و درصد جایگزینی ۵ درصد مواد بوده که ۴۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش مقاومت داشته که این به معنی افزایش ۱۸ درصدی مقاومت می‌باشد و همچنین بالاترین مقدار مقاومت در بین تمامی آزمونه‌ها و سنین مربوط به آزمونه شماره ۴ در سن ۹۰ روزگی می‌باشد که به مقاومت ۳۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع دست یافته است. می‌توان دلیل افزایش مقاومت رخ داده در طرح اختلاط‌های یاد شده را حضور سیلیس دانست، سیلیس در مقاومت‌های دراز مدت به علت واکنش با هیدروکسید کلسیم تبدیل می‌شود به هیدروکسید سیلیکات کلسیم که عامل اصلی مقاومت در بتن است عنوان کرد.



شکل ۸. نمودار مقاومت فشاری آزمونهٔ مکعبی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه.

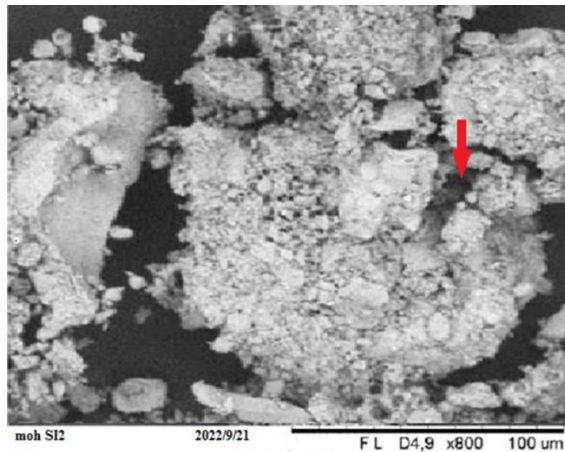
نتایج عکسبرداری SEM

با توجه به تصاویر ارائه شده می‌توان با کمک عکسبرداری الکترونی مقیاس بالا ریز ساختارهای بتن فاقد و دارای مواد سیلیس بازیافتی را بررسی و تأثیر اضافه شدن مواد به بتن را در ریز ساختار بتن بررسی نمود. در تصویر شکل نمونه شاهد بتن فاقد مواد سیلیس بازیافتی را می‌توان ملاحظه نمود که دارای خلل و فرج قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه‌های دارای سیلیس می‌باشد.



شکل ۹. تصویر میکروسکوپی نمونه شاهد.

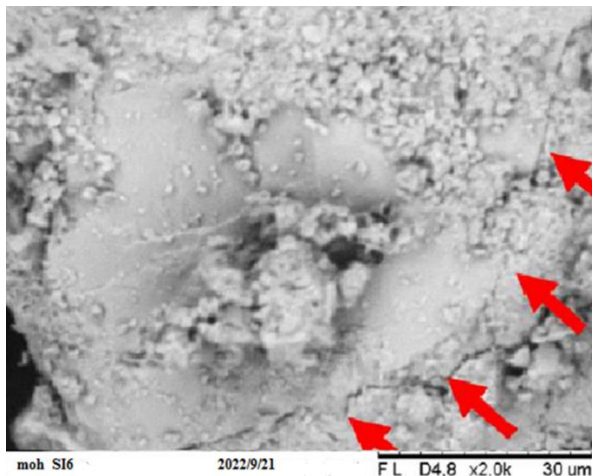
در شکل می‌توان خلل و فرج موجود در بتن با درصد جایگزینی ۵ درصد سیلیس بازیافتی با سیمان را با تصویر گذشته مقایسه نمود در تصویر میکروسکوپی خلل و فرج کمتری نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد که همین می‌تواند عاملی جهت افزایش وزن مخصوص و کاهش جذب آب بتن باشد.



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپی نمونه ۵ درصد جایگزینی پودر سیلیس.

نمونه تصویر میکروسکوپی طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد جایگزینی پودر ماسه سیلیسی در عیار ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب در شکل ملاحظه می‌گردد. در تصویر ارایه شده می‌توان ترک‌هایی را ملاحظه نمود که به دلیل درصد و وزن بالای وجود پودر سیلیس در بتن است که می‌تواند دو علت را داشته باشد، ۱- شکننده شدن بتن به علت حضور درصد بالای پودر سیلیس. ۲- افزایش خطر جمع‌شدگی با توجه به ازدیاد وزنی و حجمی سیلیس که آب بیشتری را از بتن به خود جذب می‌کند. همان‌طور که به صورت گسترده در بخش نتایج عنوان گردید به نظر می‌رسد همین ترک‌ها می‌تواند عامل اصلی بالا بردن درصد جذب نمونه‌های این طرح اختلاط شده و نفوذپذیری نمونه‌ها را بالا می‌برد و همین باعث

افزایش خطر آسیب پذیر بودن بتن به دلیل نفوذ عوامل خوردنده به بتن گردد و دوام بتن دست خوش تغییرات ناخوشایندی گردد.



شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپی آزمونهٔ ۱۰ درصدی جایگزینی پودر سیلیس.

نتیجه گیری

- ۱- تأثیر افزودن سیلیس بر روانی بتن در طرح اختلاطهای جایگزینی ۵ درصدی سیلیس به جای سیمان در دو طرح اختلاط عیار سیمان ۴۱۰ و ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب تغییراتی را ایجاد نمی‌کند ولی با اضافه شدن درصد جایگزینی تا ۱۰ درصد این میزان کاهش ۲۲ درصدی اسلامپ اتفاق می‌افتد. که به نظر می‌رسد این کاهش اسلامپ به علت ریزی دانه‌های سیلیس و کاهش خلل و فرج بتن و همچنین جذب بالای آب طرح اختلاط توسط پودر سیلیس تلقی کرد.
- ۲- وزن مخصوص بتن با افزایش میزان جایگزینی پودر سیلیس همواره همراه با افزایش پودر به غیر از جایگزینی ۱۰ درصد وزن سیمان با سیلیس که می‌تواند نشان از گذشتن از درصد بهینه جایگزینی دهد.
- ۳- با توجه به پر کنندگی خلل و فرج با پودر سیلیس کاهش جذب آب را نمونه‌ها در این پژوهش رخ داد که مورد انتظار نیز بود. کاهش جذب آب باعث افزایش دوام بتن شود.
- ۴- مقاومت ۲۸ روزهٔ بتن در نمونه‌های با جایگزینی ۵ درصد تغییرات زیادی در میزان مقاومت بتن رخ نمی‌دهد و همین باعث می‌شود بتوان از پودر سیلیس به عنوان ۵ درصد وزن سیمان استفاده نمود که خود باعث کاهش هزینه و کاهش آلاینده‌گی محیط زیست می‌شود.
- ۵- به علت واکنش سیلیس موجود در سیمان به صورت زمان بر و تدریجی نتایج مقاومت‌های ۹۰ روزه به مراتب بهتر بوده است.
- ۶- در نتایج حاصل از عکسبرداری الکترونی با مقیاس بالا می‌توان ملاحظه نمود که خلل و فرج بتن با استفاده از پودر سیلیس کاهش چشمگیری داشته است و همچنین درصدهای جایگزینی ۱۰ درصد ترک‌های ریزی که حاصل از جمع شدگی پلاستیک خمیر سیمان است اتفاق افتاده است.

References

- [1] Ahmad, J., Majdi, A., Babeker Elhag, A., Deifalla, A. F., Soomro, M., Isleem, H. F., & Qaidi, S. (2022). A Step towards Sustainable Concrete with Substitution of Plastic Waste in Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Crystals*, 12(7), 944. <https://doi.org/10.3390/cryst12070944>
- [2] Branca, T. A., Colla, V., Algermissen, D., Granbom, H., Martini, U., Morillon, A., Pietruck, R., & Rosendahl, S. (2020). Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe. *Metals*, 10(3), 345. <https://doi.org/10.3390/met10030345>
- [3] Hosseini, S. A. (2020). Application of various types of recycled waste materials in concrete constructions. *Advances in concrete construction*, 9(5), 479-489. <https://doi.org/10.12989/ACC.2020.9.5.479>
- [4] Liew, K. M., & Akbar, A. (2020). The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 232(2), 117232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117232>
- [5] Mohammadzadeh Chavoshan, N., & Rahmani, H. (2021). The effect of limestone powder on mechanical properties of Reactive Powder Concrete (RPC). *Concrete Research*, 14(2), 129-139. <https://doi.org/10.22124/jcr.2021.17026.1447>
- [6] Toghroli, A., Shariati, M., Sajedi, F., Ibrahim, Z., Koting, S., Mohamad, E. T., & Khorami, M. (2018). A review on pavement porous concrete using recycled waste materials. *Smart Struct. Syst*, 22(4), 433-440. <https://doi.org/10.12989/sss.2018.22.4.433>
- [7] Abdulrahman, H., Muhamad, R., Visintin, P., & Azim Shukri, A. (2022). Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 327(9), 126909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126909>
- [8] Kara De Maeijer, P., Craeye, B., Snellings, R., Kazemi-Kamyab, H., Loots, M., Janssens, K., & Nuyts, G. (2020). Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability. *Construction and Building Materials*, 263, 120493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120493>
- [9] Jafari, K., & Rajabipour, F. (2021). Performance of Impure Calcined Clay as a Pozzolan in Concrete. *Transportation Research Record*, 2675(2), 98-107. <https://doi.org/10.1177/0361198120953140>
- [10] Li, P. P., Brouwers, H. J. H., Chen, W., & Yu, Q. (2020). Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 242, 118112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118112>
- [11] Zhuang, W., Li, S., Wang, Z., Zhang, Z., & Yu, Q. (2022). Impact of micromechanics on dynamic compressive behavior of ultra-high performance concrete containing limestone powder. *Composites Part B: Engineering*, 243, 110160. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110160>
- [12] Teixeira, E. R., Camões, A., & Branco, F. G. (2019). Valorisation of wood fly ash on concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 292-310. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.028>
- [13] Moharrer, A., Gholhaki, M., Rezaeifar, O., & Kheyroddin, A. (2021). Examining the Impact of Magnetic Field on Compressive Strength of Cement Paste with Quartz Aggregate and Zeolite. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(Special Issue 1), 151-166. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.132815>

- [14] Moharrer, A., Gholhaki, M., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A. (2023). Study on Mechanical and Microstructural Properties of the Magnetized Cement Mortar Incorporating Quartz Grains and Natural Zeolite. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(3), 1399-1410. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-01008-3>
- [15] Bechikh, A., Klinkova, O., Maalej, Y., Tawfiq, I., & Nasri, R. (2020). Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102, 102653. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102653>
- [16] Sebastin, S., Priya, A. K., Karthick, A., Sathyamurthy, R., & Ghosh, A. (2020). Agro Waste Sugarcane Bagasse as a Cementitious Material for Reactive Powder Concrete. *Clean Technologies*, 2(4), 476-491. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol2040030>
- [17] Colleparidi, S., Coppola, L., Troli, R., & Colleparidi, M. (1997). Mechanical properties of modified reactive powder concrete. *American Concrete Institute Special Publications*, 173, 1-22. https://www.researchgate.net/publication/292777362_Mechanical_properties_of_modified_reactive_powder_concrete
- [18] Tam, C. M., Tam, V. W. Y., & Ng, K. M. (2012). Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 26(1), 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006>
- [19] Topič, J., & Prošek, Z. (2017). Hydration process and mechanical properties of cement paste with recycled concrete powder and silica sand powder. *Acta Polytechnica Czech Technical University Proceedings*, 13, 125-129. <https://doi.org/10.14311/APP.2017.13.0125>
- [20] Sukmana, N. C., Melati, M. S., Setyawan, M. I., Prayoggi, E., & Anggarini, U. (2018, September 7-8). *Optimization of cellular lightweight concrete using silica sand of sandblasting waste based on factorial experimental design*. 13th Joint Conference on Chemistry, Semarang, Indonesia. <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012096>
- [21] Gholampour, A., Zheng, J., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Development of waste-based concretes containing foundry sand, recycled fine aggregate, ground granulated blast furnace slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, 267, 121004. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121004>
- [22] Karim, M., Zain, M., Jamil, M., & Lai, F. (2011, September 16-18). *Significance of waste materials in sustainable concrete and sustainable development*. 2011 International Conference on Biotechnology and Environment Management, Singapore, Asia. https://www.researchgate.net/publication/268004469_Significance_of_Waste_Materials_in_Sustainable_Concrete_and_Sustainable_Development
- [23] Karim, M., Zain, M., Jamil, M., Lai, F., & Islam, M. (2012). Strength of mortar and concrete as influenced by rice husk ash: a review. *World Applied Sciences Journal*, 19(10), 1501-1513. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.19.10.533>
- [24] Kaur, G., Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Properties of concrete containing fungal treated waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 29, 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.091>
- [25] Choudhary, R., Gupta, R., Nagar, R., & Jain, A. (2020). Sorptivity characteristics of high strength self-consolidating concrete produced by marble waste powder, fly ash, and micro silica. *Materials Today: Proceedings*, 32, 531-535. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.287>
- [26] Demiss, B. A., Oyawa, W. O., & Shitote, S. M. (2018). Mechanical and microstructural properties of recycled reactive powder concrete containing waste glass powder and fly

- ash at standard curing. *Cogent Engineering*, 5(1), 1464877. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1464877>
- [27] Qomariah, Q., Sugiharti, S., & Riyanto, S. (2019, August 29-30). *The utilization of sandblasting sand waste for mortar and normal concrete*. 1st Annual Technology, Applied Science, and Engineering Conference, East Java, Indonesia. <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/732/1/012036>
- [28] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574-580. <https://doi.org/10.1007/BF02480538>
- [29] Yang, Z., Liu, S., Yu, L., & Xu, L. (2021). A Comprehensive Study on the Hardening Features and Performance of Self-Compacting Concrete with High-Volume Fly Ash and Slag. *Materials*, 14(15), 4286. <https://doi.org/10.3390/ma14154286>
- [30] Parashar, A., Aggarwal, P., Saini, B., Aggarwal, Y., & Bishnoi, S. (2020). Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 251, 118875. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118875>
- [31] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. *Journal of Structural Fire Engineering*, 11(2), 221-246. <https://doi.org/10.1108/JSFE-11-2018-0038>
- [32] Toufigh, V., & Pachideh, G. (2022). Cementitious mortars containing pozzolana under elevated temperatures. *Structural Concrete*, 23(5), 3294-3312. <https://doi.org/10.1002/suco.202100567>
- [33] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2020). Experimental Study on Mechanical Strength of Porous Concrete Pavement Containing Pozzolans. *Advances in Civil Engineering Materials*, 9(1), 38-52. <https://doi.org/10.1520/acem20180111>