Modares Civil Engineering Journal

Volume 26, Issue 1, 2026, 83-95

DOI: 10.48311/mcej.2025.99136.0

Tarbiat Modares University

Investigation of the Effect of Replacing Silica Sand with Sahand Pumice in Reactive Powder Concrete Containing 100% Diatomite Powder instead of Silica Fume

Bahman Shervani Tabar[1*], Reza Ziaei Khosroshahi[2]

1. Assistant Professor, Department of civil engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
2. M.Sc., Department of civil engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Abstract

Reactive Powder Concrete (RPC) represents a significant advancement in concrete technology, characterized by its remarkably high compressive strength compared to conventional concrete. This superior performance is attributed to its fine-grained composition, which not only enhances compressive strength but also improves other critical properties such as abrasion resistance, durability, impermeability, and resistance to corrosion. These attributes make Reactive Powder Concrete an ideal choice for various demanding applications in the construction industry, especially in high-performance structures where durability and strength are paramount. This study focuses on an innovative approach to Reactive Powder Concrete production by replacing silica sand with Sahand pumice. The primary objectives of this research include optimizing the use of locally available materials, increasing production capacity, and reducing overall costs. By utilizing pumice, a lightweight volcanic material, the study aims to address challenges associated with sourcing silica sand while maintaining the high-performance characteristics of Reactive Powder Concrete. In this study, a reference mix design for Reactive Powder Concrete was developed, in which diatomite powder was used as a complete replacement for silica fume. This reference mix served as a basis for evaluating the impact of pumice replacement. Subsequently, silica sand in the Reactive Powder Concrete mixtures was replaced with Sahand pumice at varying percentages of 15, 30, 45, 60, 75, 90, and 100 %. All specimens were subjected to water curing at a controlled temperature of 25°C for a period of 28 days. In the conducted experiments, autoclave curing was not used to ensure that the curing conditions resembled normal on-site concreting conditions, making the obtained results more practical and applicable. The study examined several key properties of the concrete, including compressive strength, tensile strength, water absorption during curing and water absorption as per ASTM C642. Additionally, the flow table test was conducted to determine the consistency of the concrete at each stage before pouring it into the molds. The results showed that as the percentage of pumice replacement increased, the compressive strength of the samples gradually decreased. However, all samples maintained a compressive strength above 50 MPa at 28 days, classifying them as high-strength concrete. For instance, the 28-day compressive strength of the reference Reactive Powder Concrete was recorded at 64.7 MPa. However, at full (100 %) replacement of silica sand with pumice, the compressive strength dropped to 50.7 MPa. However, it should be noted that this decrease in strength is not necessarily prohibitive depending on the intended application of the concrete. On the other hand, the specific weight of pumice is lower than that of silica sand. Therefore, the use of pumice had a notable effect on the density of the concrete. with increasing replacement percentages, the specific weight of the samples decreased, reaching 1764 gr/lit at 100 percentage replacement, classifying it as structural lightweight concrete. Despite the reduction in compressive strength, the resulting concrete still qualified as both high-strength and structural lightweight concrete. These classifications were determined based on the standards set Fourth in the 2017 edition of the National Building Code of Iran. Additionaly, the benefits of using pumice, such as cost savings and enhanced sustainability through the utilization of local materials, offer compelling advantages for specific construction scenarios.

Review History

Received: Jan 22, 2025

Revised: Apr 9, 2025

Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

Reactive Powder Concrete

Sahand Pumice

Silica Sand

Diatomite Powder

Local Materials

* Corresponding Author Email: b.shervani@azaruniv.ac.ir - ORCID: 0009-0007-2690-9609

مجله علمی مهندسی عمران مدرس
دوره ۲۶، شماره ۱، سال ۱۴۰۵ – صفحات ۸۳ تا ۹۵
DOI: 10.48311/mcej.2025.99136.0

بررسی تاثیر جایگزینی ماسه سیلیسی با پوکه سهند در بتن‌پودری‌واکنشی حاوی ۱۰۰٪ پودر دیاتومیت به عنوان جایگزین دوده سیلیسی

بهمن شروانی‌تبار[۱*]، رضا ضیائی خسروشاهی[۲]

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.
۲. کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی

بتن پودری واکنشی
پوکه معدنی سهند
ماسه سیلیسی
پودر دیاتومیت
مصالح بومی

چکیده

بتن‌پودری‌واکنشی، بتن جدیدی می‌باشد که مقاومت فشاری بالاتری نسبت به بتن معمولی دارد. این بتن از ریزدانه‌ها تشکیل شده‌است که به خاطر همگنی، علاوه بر افزایش مقاومت فشاری ضعف‌های دیگر بتن معمولی را در موارد سایش، دوام، نفوذپذیری و خوردگی رفع کرده‌است. در این تحقیق، برای بهره‌برداری از مصالح بومی، افزایش ظرفیت منابع تولید بتن و کاهش قیمت نهایی بتن، بررسی تاثیر جایگزینی ماسه سیلیسی با پوکه سهند در بتن‌پودری‌واکنشی مورد بررسی قرار گرفت. بتن شاهد در این تحقیق نوعی بتن‌پودری‌واکنشی است که در آن ۱۰۰ درصد دوده سیلیسی با پودر دیاتومیت جایگزین شده‌است؛ در ادامه پوکه معدنی با مقادیر ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ و ۱۰۰٪ ، در هفت گام جایگزین ماسه سیلیسی شد و همه نمونه‌ها در داخل حوضچه آب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس عمل‌آوری شدند. نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب هنگام عمل‌آوری و جذب آب به روش ASTM C642 قرار گرفتند. همچنین آزمایش میز جریان برای تعیین روانی بتن در هر مرحله قبل از ریختن بتن در قالب‌ها، انجام گرفت. نتایج نشان داد با افزایش درصدهای جایگزینی، مقاومت فشاری نمونه‌ها به تدریج کاهش می‌یابد اما همه نمونه‌ها در عمر ۲۸ روزه بالاتر از ۵۰ مگاپاسکال مقاومت فشاری دارند که در دسته‌ی بتن پرمقاومت قرار می‌گیرند؛ مقاومت فشاری۲۸ روزه بتن شاهد، ۶۴/۷ مگاپاسکال بود که با ۱۰۰٪ جایگزینی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن به ۵۰/۷ مگاپاسکال رسید. از طرفی وزن مخصوص پوکه نسبت به ماسه سیلیسی کم‌تر است، از این‌رو با افزایش درصدهای جایگزینی، وزن مخصوص نمونه‌ها کاهش پیدا نمود به‌طوری‌که در ۱۰۰٪ جایگزینی، وزن مخصوص نمونه‌ها به ۱۷۶۴ گرم‌برلیتر رسید و می‌توان آن را بتن سبک سازه‌ای دانست.

۱- مقدمه

بتن به علت ویژگی‌هایی چون استحکام بالا، دوام طولانی و هزینه مناسب، یکی از پرکاربردترین مواد در صنعت ساخت در سطح جهانی به شمار می‌آید. با توجه به روند رو به رشد این صنعت و نیاز به تولید بتن‌های با ویژگی‌های خاص، استفاده از مصالح جایگزین و بومی برای کاهش هزینه‌ها و حفظ منابع طبیعی ضروری به نظر می‌رسد [1].

بتن‌پودری‌واکنشی(RPC) یکی از انواع بتن‌های نوین با مقاومت بالا (UHSC) است که با ویژگی‌هایی همچون مقاومت فشاری بالا، دوام بیش‌تر و نفوذپذیری کم‌تر گزینه‌ای مناسب برای

* رایانامه نویسنده مسئول: b.shervani@azaruniv.ac.ir – ORCID: 0009-0007-2690-9609

سازه‌هایی با اهمیت بالا می‌باشد [2]. این بتن اولین بار از آزمایش‌های ریچارد و همکاران در سال ۱۹۹۵ بدست‌آمد؛ آن‌ها دریافتند که حذف سنگدانه‌های درشت، امکان دست‌یابی به یک ماتریس سیمانی همگن و متراکم را فراهم می‌کند [3]. ماسه سیلیسی و دوده سیلیسی، از اجزای اصلی این نوع بتن، علاوه بر مشکلات هزینه‌ای، به دلیل استخراج از معادن خاص، می‌تواند آثار زیست‌محیطی منفی به همراه داشته باشند. یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در توسعه پایدار، مصرف انرژی کم‌تر است؛ از این‌رو بررسی مصالح بومی با ویژگی‌های مناسب همچون وزن سبک‌تر، قیمت پایین‌تر و دسترسی آسان‌تر به عنوان جایگزینی مؤثر برای اجزای بتن‌پودری‌واکنشی و نیز بررسی تأثیر این جایگزینی بر خواص بتن و ارزیابی اقتصادی آن مسئله‌ای ضروری و قابل‌توجه‌است.

دیاتومیت نوعی ماده سفید رنگ با ترکیب سیلیس‌دار است که معمولاً ۸۰ الی ۹۰ درصد آن دی اکسید سیلیسیم می‌باشد. این ماده به علت حفره‌های متعددی در سطح خود جذب آب بالایی دارد؛ به طوری‌که در حالت عادی دو برابر حجم خود می‌تواند آب جذب کند. فراگولیس و همکاران در سال ۲۰۰۵ میلادی در تحقیقی جایگزینی دو نوع دیاتومیت رسی و آهکی، به عنوان یک ماده پوزولانی به جای بخشی از سیمان در ساخت ملات‌های سیمانی را مورد بررسی قرار داده و دریافتند با افزایش دیاتومیت، نیاز به آب و مقاومت بلند مدت ملات افزایش می‌یابد [4]. ارگون در سال ۲۰۱۱ میلادی در تحقیقی روی جایگزینی دیاتومیت به جای بخشی از سیمان، خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی مربوطه را مورد بررسی قرار داد و مشخص شد که میکروفسیل‌های موجود در دیاتومیت که منبع سیلیس فعال هستند، در مجاورت سیمان، خواص پوزولانی نشان می‌دهند [5]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای بهبود عملکرد حرارتی بتن، از سه نوع دیاتومیت با اندازه‌های مختلف به عنوان افزودنی استفاده کردند و دریافتند که ذرات ریزتر ظرفیت جذب بالاتری دارند [6]. کارمان و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی آثار افزودنی دیاتومیت به عنوان پوزولان طبیعی و تاثیر آن بر خصوصیات مکانیکی بتن سبک را مورد بررسی قرار داده و دریافتند این کار موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش ظرفیت حرارتی بلوک‌ها می‌شود [7]. لتیر و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی، در تحقیق خود به ارزیابی خواص مکانیکی بتن ساخته شده با دیاتومیت و سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. بهترین نتایج در نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی به جای سنگدانه درشت و ۵ درصد دیاتومیت به جای سیمان مشاهده شد [8]. سعیدی و همکاران در سال ۲۰۲۰ میلادی در تحقیقی از پودر خاک دیاتومیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که میزان اسلامپ با افزایش درصد خاک دیاتومیت کاهش می‌یابد [9]. چاخرلو و شروانی در سال ۱۳۹۹ تحقیق خود از پودر دیاتومیت ممقان با درصدهای مختلف در ۶ مرحله از صفر تا صد درصد به جای دوده سیلیسی در بتن‌پودری‌واکنشی استفاده کردند. نتایج نشانگر آن بوده‌است که بیش‌ترین مقاومت فشاری برای بتن با جایگزینی ۲۵ درصد پودر دیاتومیت حاصل می‌شود. در بقیه جایگزینی‌ها کاهش بسیار جزئی مقاومت فشاری دیده می‌شود از این‌رو جایگزینی تا ۱۰۰ هم امکان‌پذیر می‌باشد [10]. لاورمانوا و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی تأثیر جایگزینی جزئی ماسه با دیاتومیت در نوعی از ملات‌های سیمانی پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از دیاتومیت به دلیل وجود فازهای آمورف زیاد، موجب افزایش تراکم ساختار، افزایش مقاومت مکانیکی، کاهش نفوذپذیری آب و در نهایت مقاومت بیش‌تر در برابر آسیب‌های آبی می‌شوند [11]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۳ میلادی در تحقیقات خود از دیاتومیت بازیافتی برای جایگزینی بخشی از سیمان در ساخت ملات سیمان استفاده کردند. با توجه به نتایج، با افزایش مقدار دیاتومیت جایگزین، میزان آب و زمان گیرش افزایش می‌یابد. از نظر مقاومت فشاری جایگزینی ۱۰ درصد دیاتومیت در ۲۸ روز مقاومت بالاتری داشته اما جایگزینی ۲۰ درصد دیاتومیت در ۹۰ روز استحکام بالاتری از خود نشان داده‌است [12].

پوکه، ماده‌ای سبک و متخلخل با منشأ آتشفشانی است که منابع غنی آن در کشورهای دارای آتشفشان در دسترس می‌باشد. با وجود این، کاربرد گسترده‌ای به عنوان پوزولان ندارد. تخمین‌ها نشان می‌دهند که در سال ۲۰۲۳ تولید جهانی پوکه به حدود ۱۸ میلیون تن رسید [13]. این ماده در فرآیند سرد شدن گدازه‌های مذاب، زمانی که گازهای به دام افتاده آزاد می‌شوند، شکل می‌گیرد و ساختاری سبک و پر از منافذ ایجاد می‌کند. پوکه به دلیل ویژگی‌های خاص خود معمولاً در حوزه‌هایی مانند تصفیه فاضلاب [14]، صنعت نساجی [15] و ساخت بتن متخلخل برای بهبود زهکشی و کاهش

خطر سیلاب در ساخت جاده‌ها و تثبیت خاک[16] به کار می‌رود .در برخی مطالعات آزمایشگاهی استفاده از این ماده به صورت میکرونیزه‌شده به عنوان پوزولان، در نقش افزودنی یا جایگزین بخشی از سیمان مورد بررسی قرار گرفته است [17]؛ از جمله به عنوان افزودنی در ملات‌های خود متراکم [18]، به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن با مقاومت بالا(HSC) [19]، جایگزین بخشی از سیمان در بتن تقویت‌شده با فیبر با عملکرد بالا (HPFRC) [20] و به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ملات های سیمانی [21&22]. کابرالونا و همکاران در سال ۲۰۲۰ خواص مکانیکی بتن‌های مسلح دارای پوکه‌های معدنی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این جایگزینی در ضمن کاهش ردپای کربنی و هزینه‌های تولید، مقاومت مشابه یا بهتری نسبت به بتن شاهد دارند[23]. افزودن پودر پوکه به بتن و ملات‌های سیمانی به طور کلی خواص مکانیکی آن را بهبود می بخشد [18&22]؛ این تاثیر بیشتر در سنین اولیه برجسته است[18&21]. ولی در برخی موارد، مقاومت فشاری در سنین بعدی نیز بهبود می یابد [24]. سنگدانه‌های سبک وزن اغلب در ساخت ملات‌های سیمانی و یا انواع بتن با چگالی کم استفاده می‌شوند؛ پوکه معدنی نیز به علت تخلخل خود، از سنگدانه‌های سبک وزن محسوب شده و از این رو برای تولید بتن سبک استفاده می شود [25]. استفاده از پوکه‌های معدنی به عنوان سنگدانه در بتن توسط تانیلدیزی و گوکالاپ در سال ۲۰۲۳ بررسی و مشخص شد که این جایگزینی باعث افزایش کارایی، مقاومت در برابر دمای بالا و سولفات و کاهش چگالی بتن می‌شود. با این حال، آثار منفی مانند کاهش مقاومت فشاری و کششی و افزایش جذب آب نیز مشاهده شد [26]. در آزمایش‌هایی نیز تاثیر استفاده از پوکه در بتن‌سبک به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به همراه الیاف فولادی برررسی شده که مزایای زیست‌محیطی، افزایش مقاومت در برابر یخ‌زدگی و حرارت است [27].

در پیشینه تحقیقات ذکر شده، دیاتومیت اغلب به عنوان یک افزودنی پوزولانی و یا جایگزین بخشی از سیمان در مخلوط‌های بتن و ملات‌های سیمانی به‌کار رفته‌است. از آن جایی که دیاتومیت دارای سیلیس آمور است، جایگزین مناسبی برای دوده سیلیسی می‌باشد. همچنین مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پوکه معدنی عمدتاً به دو شکل در صنعت بتن استفاده شده است: به عنوان جایگزین سنگدانه در بتن‌های سبک و به‌صورت پودر میکرونیزه به عنوان افزودنی پوزولانی یا جایگزینی بخشی از سیمان در سایر انواع بتن؛ نتایج این تحقیقات حاکی از آن است که استفاده از پوکه معدنی، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید و آثار زیست‌محیطی، مقاومت مکانیکی مشابه یا حتی بالاتری در مقایسه با نمونه‌های شاهد ایجاد می‌کند. در این پژوهش تاثیر استفاده هم‌زمان از دیاتومیت به جای دوده سیلیسی و پوکه معدنی سهند به جای ماسه سیلیسی بر روانی، چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب حین عمل آوری ، جذب آب به روش ASTM C642 و هزینه تولید بتن پودری واکنشی بررسی شده است؛ بتن شاهد از جایگزینی کامل پودر دیاتومیت به‌جای دوده سیلیسی تشکیل شده و پوکه معدنی در درصدهای مختلف جایگزین ماسه سیلیسی شد.

با توجه به وجود معادن دیاتومیت در منطقه و امکان استفاده خام و کم‌هزینه از این ماده، جایگزینی آن در بتن‌پودری‌واکنشی می‌تواند به اقتصادی‌تر شدن تولید این بتن کمک کند. همچنین، ماسه سیلیسی موجود در معدن قوم‌تپه تبریز، یک منطقه گردشگری و زیست‌بوم کویری کمیاب آذربایجان قرار دارد که استخراج آن می‌تواند آسیب‌های جدی زیست‌محیطی ایجاد کند. در مقابل، پوکه معدنی بستان‌آباد با وزن سبک‌تر، قیمت مناسب‌تر و دسترسی آسان‌تر، جایگزینی ایده‌آل برای ماسه سیلیسی به‌شمار می‌رود. این تحقیق با هدف بررسی این دو جایگزینی، در راستای کاهش هزینه‌های تولید، حفظ محیط زیست و توسعه بتن‌های پایدار و اقتصادی در شمال‌غرب ایران انجام شده‌است.

۲- مواد پژوهش

مواد تشکیل دهنده بتن‌پودری‌واکنشی شامل: سیمان، آب، دوده‌سیلیسی، ماسه کوارتزی (سیلیسی)، پودر کوارتز، فوق‌روان‌کننده و آب می‌باشد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از نتایج تحقیقات قبلی، ابتدا به جای ۱۰۰ درصد دوده سیلیسی، پودر دیاتومیت جایگزین شد. این بتن‌پودری‌واکنشی مذکور به عنوان بتن شاهد یا مبنا اختیار شده‌است. در نسبت‌های مخلوط‌های بعدی نیز از پوکه سهند (گذشته از الک ۱/۱۸ میلی‌متر و مانده روی الک ۰/۱۵ میلی‌متر) به عنوان جایگزین ماسه سلیسی با درصدهای مختلف استفاده شده‌است. در ادامه مصالح مورد استفاده در این تحقیق و مشخصات آن‌ها بررسی شده‌است.

- سیمان استفاده شده در این آزمایش سیمان پرتلند نوع ۲

کارخانه سیمان صوفیان (در نزدیکی تبریز) می‌باشد جدول (۱) مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی را نشان می‌دهد.

- ماسه سیلیسی مصرفی در این تحقیق از معدن ماسه سیلیسی صنعتی قوم‌تپه در نزدیکی شهرتبریز می‌باشد؛ وزن انبوهی آن ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب، جذب آب SSD (اشباع با سطح خشک) آن هفت دهم الی یک درصد و حداکثر قطر دانه آن ۶۰۰ میکرومتر است. ترکیبات شیمیایی ماسه مصرفی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات سیمان پرتلند نوع دو صوفیان

Table 1. Properties of Sufian cement of type two

Item	Unit	Value
Fineness (Blaine)	(cm^2/gr)	3230
Residue on 90 µ Sieve	(%)	3.86
Autoclave Expansion	(%)	0.18
Le Chatelier Expansion	(mm)	1.1
Initial Setting Time	(min)	115
Final Setting Time	(min)	185
Density	(gr/cm^3)	3.16
3 days Compressive Strength	(kgf/cm^2)	240
7 days Compressive Strength	(kgf/cm^2)	345
28days Compressive Strength	(kgf/cm^2)	465
L.O. I	(%)	1.36
Calcium oxide (CaO)	(%)	64.44
Silica (SiO_2)	(%)	21.70
Aluminum oxide (Al_2O_3)	(%)	5.22
Ferric oxide (Fe_2O_3)	(%)	3.74
Magnesium oxide (MgO)	(%)	2.22
Potassium oxide (K_2O)	(%)	0.58
Sodium oxide (Na_2O)	(%)	0.22
Chloride Ion (Cl)	(%)	0.010
Others	(%)	0.51

جدول ۲. مشخصات شیمیایی ماسه سیلیسی قوم‌تپه

Table 2. Chemical properties of silica sand of Qumtapeh

Item	Percentage
Silica (SiO_2)	61.84
Aluminium oxide (Al_2O_3)	15.20
Magnesium Oxide (MgO)	1.32
Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.92
Calcium Oxide(CaO)	3.51
SO_3	<0.05
Na_2O	4.83
K_2O	3.53
MnO	0.08
FeO	0.43
Fe_3O_4	1.37
BaO	0.11
Fei	3.73
L.O. I	3.36
P_2O_5	0.19
TiO_2	0.69

جدول ۳. مشخصات شیمیایی پودر کوارتز

Table 3. Chemical properties of Quartz powder

Item	Percentage
Calcium oxide (CaO)	0.7
Silica (SiO_2)	96.6
Aluminum oxide (Al_2O_3)	0.23
Ferric oxide (Fe_2O_3)	0.03
Magnesium oxide (MgO)	<0.1
Potassium oxide (K_2O)	0.02
Sodium oxide (Na_2O)	<0.1
SO_3	0.04
L.O. I	0.28

جدول ۴. مشخصات شیمیایی پودر دیاتومیت ممقان

Table 4. Chemical properties of Diatomite powder

Item	Percentage
Calcium oxide (CaO)	0.98
Silica (SiO_2)	90.4
Aluminum oxide (Al_2O_3)	2.15
Ferric oxide (Fe_2O_3)	0.71
Magnesium oxide (MgO)	0.64
Potassium oxide (K_2O)	0.2
Sodium oxide (Na_2O)	0.45
L.O. I	3.04

- کوارتز شکسته و له شده (گرد بسیار ریزی که با کوبیدن دانه‌های ریز در داخل هاون می‌توان مشاهده کرد) یک جزء اصلی در بتن‌پودری‌واکنشی می‌باشد. قطر ذرات آن بین ۵ تا ۳۵ میکرون است. پودر کوارتز به کار رفته در این پژوهش از معدن‌گوهران اصفهان تهیه شده که مشخصات آن مطابق جدول (۳) می‌باشد.
- یکی از غنی‌ترین معادن دیاتومیت شمال‌غرب کشور، معدن ممقان واقع در کیلومتر ۳۵ جاده تبریز- مراغه می‌باشد؛ در این پژوهش دیاتومیت مورد استفاده از این معدن تهیه شده که مشخصات شیمیایی آن در جدول (۴) قابل مشاهده‌است.
- پوکه معدنی مصرفی در این آزمایش پوکه معدنی سهند (بستان آباد) می‌باشد که دارای وزن مخصوص انبوهی ۰/۶۶۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب می‌باشد. این پوکه ابتدا از الک ۱/۱۸ میلی‌متر گذارنده شده و سپس از پوکه‌های مانده روی الک ۱۰۰ استفاده شده‌است؛ مواد عبوری از الک ۱۰۰ که ممکن بود به صورت پوزلان عمل کنند دور ریخته شد. مشخصات شیمیایی آن نیز مطابق جدول (۵) می‌باشد.

جدول ۵. مشخصات شیمیایی پوکه معدنی سهند

Table 5. Chemical properties of Sahand Pumice

Item	Percentage
Calcium oxide (CaO)	7.28
Silica (SiO_2)	63.76
Aluminum oxide (Al_2O_3)	19.60
Ferric oxide (Fe_2O_3)	4.30
Magnesium oxide (MgO)	0.50
L.O. I	4.14

جدول ۶. مشخصات فنی فوق روان‌کننده

Table 6. Physical and chemical properties of the superplasticizer

Colour	yellow
Physical state	Liquid
Density	$0.02(gr/cm^3)\pm1.1$
Chloride content	< 1.5 %
Na_2O	< 0.1 %
PH	5-7

- فوق‌روان‌کننده مصرفی از کارخانه البرز شیمی تهیه شده که بر پایه کربوکسیلات اتر می‌باشد. مشخصات آن در جدول (۶) قابل مشاهده است.
- طبق بیشتر استانداردها، آبی که برای بتن مناسب است، همان آب شرب است؛ از این رو در این تحقیق، از آب آشامیدنی برای تولید بتن استفاده شده است.

۳- روش پژوهش

هدف از این پژوهش جایگزینی پوکه معدنی در ۸ گام با نسبت‌های ۰٪، ۱۵٪، ۳۰٪، ۴۵٪، ۶۰٪، ۷۵٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪ به جای ماسه سیلیسی در نوعی بتن‌پودری‌واکنشی که در آن به جای دوده سیلیسی از پودر دیاتومیت استفاده شده، می‌باشد. برای این منظور نسبت‌های مخلوط‌های بتن در هشت نوع ارائه شد که از هر نسبت، سه نمونه برای هر سن ساخته شد. نتایج آزمایش ارائه شده، میانگین نتایج هر سه نمونه‌است. برای شبیه بودن عمل‌آوری به شرایط کارگاهی و نرمال فصل بتن‌ریزی، از اتوکلاو استفاده نشده و عمل‌آوری نمونه‌های ساخته‌شده، در داخل حوضچه‌آب در دمای ۲۵ درجه‌سانتی‌گراد انجام شد. متغیرهای مهم مانند نسبت آب به سیمان، یکنواختی مواد و شرایط عمل‌آوری یکسان نگه داشته شد.

۳-۱- نسبت‌های مخلوط‌ها

بعد از تهیه مصالح مورد نظر با سعی و خطا بتن شاهدی که تا حد امکان با عیار سیمان کم‌تر و مقاومت بیش‌تری باشد بدست آمد، که در ردیف اول جدول (۷) قابل مشاهده است. سپس پوکه معدنی به تدریج جایگزین ماسه سیلیسی شده‌است و ۷ نسبت‌های مخلوط‌های دیگر، مطابق جدول (۷) بدست آمد. لازم به توضیح می‌باشد که پوکه از الک ۱,۱۸ میلی‌متر عبور داده شده و برای اینکه مواد پودری خیلی ریز در روند کار مشکل ایجاد نکند، مجددا با الک شماره ۱۰۰ الک و از مواد مانده روی الک به صورت SSD استفاده شد. همچنین قابل ذکر است که جایگزین نمودن دانه‌های پوکه (گذشته از الک ۱,۱۸ میلی‌متر) به جای ماسه سیلیسی (با حداکثر اندازه ۰/۶ میلی‌متر) نمی‌تواند به صورت وزنی باشد؛ بلکه باید طوری انجام بگیرد که دانه‌های جایگزین شده، همان حجم دانه‌های حذف شده را پر کند. باتوجه به اینکه وزن مخصوص پوکه کم‌تر است، بنابراین وزن مقدار جایگزین شده کم‌تر از وزن مقدار حذف شده خواهد بود.

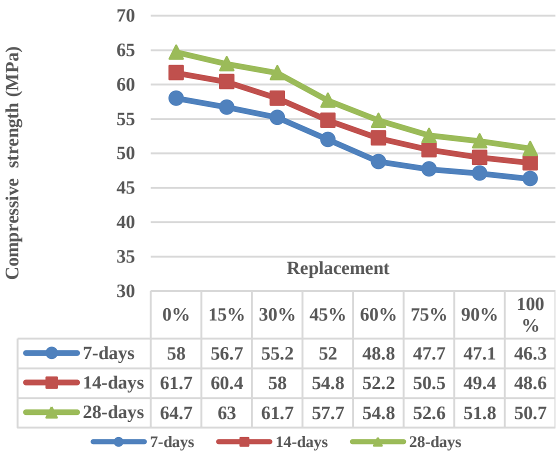
۳-۲- آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها

برای مخلوط کردن بتن‌پودری‌واکنشی از بتونیر استفاده شده است که به صورت کاملاً همگن بتن را مخلوط می کند. طبق نیاز و شرایط مصالح، از روش سه مرحله‌ای برای مخلوط کردن استفاده شده‌است. ابتدا ۲۰ درصد از هر کدام از مصالح خشک یعنی ماسه، پودر کوارتز، دیاتومیت، پوکه معدنی و سیمان داخل مخزن بتونیر ریخته شد (ماسه و پوکه به صورت SSD استفاده شده است)؛ این کار ۵ بار تکرار شد تا مصالح لایه‌لایه و پشت سر هم در دیگ بتونیر ریخته شده و راحت‌تر مخلوط شوند. سپس به مدت۵ دقیقه اختلاط خشک انجام شد. بعد از آن آب با فوق‌روان‌کننده مخلوط شده و نصف آن به مخلوط خشک اضافه و باهم ۹ دقیقه مخلوط شدند. در آخر باقی‌مانده مخلوط آب و فوق‌روان‌کننده به مخزن اضافه شده و ۷ دقیقه دیگر هم زدن ادامه یافت. بعد از مخلوط کردن بتن، ابتدا آزمایش میز جریان برای تعیین روانی بتن انجام شد. سپس بتن در قالب‌های از قبل آماده و روغن کاری شده در سه مرحله ریخته و با میله کوبی متراکم شد. این کار باعث می‌شود حباب‌های اتفاقی داخل بتن کاهش یابد.

جدول ۷. نسبت‌های مخلوط‌های نمونه‌های بتنی

Table 7. concrete mix-ratios for the types of samples

Material / Mix -Ratios Number	Replacement of pumice (%)	Cement (kg/m^3)	Water (kg/m^3)	Diatomite powder (kg/m^3)	Quartz powder (kg/m^3)	Pumice SSD (kg/m^3)	Silica sand SSD (kg/m^3)	Super-plasticizer (kg/m^3)
Mix.1(Control concrete)	0	750	200	150	150	0	860	30
Mix.2	15	750	200	150	150	74.3	731	30
Mix.3	30	750	200	150	150	148.6	602	30
Mix.4	45	750	200	150	150	223	473	30
Mix.5	60	750	200	150	150	297.2	344	30
Mix.6	75	750	200	150	150	371.5	215	30
Mix.7	90	750	200	150	150	445.8	86	30
Mix.8	100	750	200	150	150	495.3	0	30



شکل ۱. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

Fig. 1. Compressive strength of RPC specimens

۴- نتایج و بحث

برای نمونه‌های ساخته شده مشخصه‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب حین عمل‌آوری، جذب آب به روش ASTM C642، قطر پخش‌شدگی در میز جریان و وزن مخصوص بدست آمد. همچنین مقایسه‌ای در مورد هزینه تولید نمونه‌ها انجام شد.

۴-۱- آزمون‌مقاومت‌فشاری

برای این آزمایش نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری در سنین ۷، ۱۴و ۲۸روزه که در دمای ۲۵ درجه سلسیوس داخل حوضچه آب عمل‌آوری شدند، مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت. برای هر درصد جایگزینی در هر سن، سه نمونه در دستگاه بتن‌شکن هیدرولیکی تا مرحله خراب شدن تحت آزمایش فشار قرار گرفته و سپس میانگین گرفته شده‌است. نتایج آزمایش فشاری در شکل (۱)، نشان می‌دهد که با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. باتوجه نتایج، ملاحظه شود که افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن شاهد نسبت به مقاومت ۷ روزه آن حدودا ۱۱٪ می‌باشد؛ علت این امر آن است که بتن‌پودری‌واکنشی، بتنی پر سیمان است و به همین خاطر روند هیدراتاسیون در روزهای اول بیش‌تر بوده و در سن‌های بالا کندتر می‌شود.

همچنین از نتایج می‌توان دریافت که با افزایش درصدهای جایگزینی پوکه معدنی به جای ماسه سیلیسی، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. حداکثر کاهش مقاومت فشاری ۲۱ درصد است که در حداکثر جایگزینی یعنی در جایگزینی ۱۰۰درصد اتفاق افتاده‌است. بطوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن شاهد برابر۶۴/۷ مگا پاسکال و در ۱۰۰٪ جایگزنی پوکه معدنی به جای ماسه سیلیسی مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن برابر ۵۰/۷ مگاپاسکال می‌باشد. اما با وجود این کاهش، این بتن همچنان یک بتن پر مقاومت محسوب می‌شود (طبق مقررات ملی ساختمان ایران مبحث ۵ ویراش ۱۳۹۶، بتن پر مقاومت به بتنی گفته می‌شود که مقاومت ۲۸ روزه آن بیش‌تر از ۵۰ مگاپاسکال باشد).

۴-۲- آزمون مقاومت کششی

برای بدست آوردن مقدار مقاومت کششی، ۹ عدد نمونه‌استوانه‌ای برای هر نسبت مخلوط، با ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی‌متر تهیه و داخل حوضچه آب با دمای ۲۵ درجه سیلسیوس، عمل‌آوری شد. این نمونه‌ها در سنین ۷، ۱۴و ۲۸ روزه تحت آزمایش دو نیم شدن (کشش برزیلی) قرار گرفتند، که نتایج آن در شکل (۲) مشاهده می‌شود. باتوجه به نتایج، مشخص شد که با افزایش درصد جایگزینی پوکه معدنی به جای ماسه سیلیسی،

مقاومت کششی نمونه‌ها نیز همانند مقاومت فشاری کاهش می‌یابد، بـه طـوری کـه مقاومـت کششـی ۲۸ روزه بـتن شـاهد برابـر۶/۵ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۲۸ روزه بـا ۱۰۰٪ جـایگزینی پوکـه سهند به جای ماسه سیلیسی برابر ۳/۹ مگاپاسکال شده‌است.

۴-۳- جذب آب هنگام عمل‌آوری

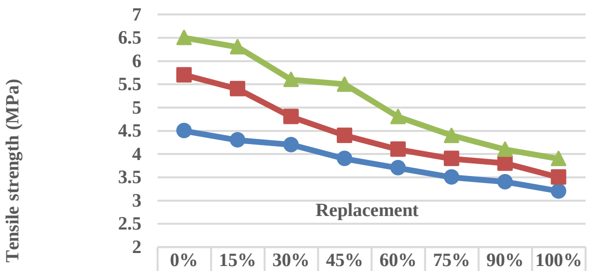
هدف از انجام ایـن آزمـایش، نشـان دادن رونـد هیدراتاسـیون می‌باشد. برای این منظور بعد از ساخت هـر نسـبت مخلـوط و پـر کردن قالب‌ها، ۲۴ ساعت بعد نمونه‌هـا از قالـب خـارج شـده و بـا ترازوی دیجیتال وزن آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس نمونـه‌هـا برای عمل‌آوری داخل حوضچه آب قـرار گرفتنـد. بعـد از ۷، ۱۴و ۲۸ روز نمونه‌ها از آب خارج شده و بعد از خشـک کـردن سـطح نمونه، در حالت اشباع با سطح خشک توزین شدند. این کار بـرای هر نسبت مخلوط تکرار شد. نتایج حاصل از این توزین‌ها در رابطه (۱) قرار داده شد و جذب آب هنگام عمل‌آوری بدست آمـد [28]؛ که نتایج آن در شکل (۳) نشان داده شده‌است.

$$\text{جذب آب حین عمل‌آوری} = \frac{(\text{جرم قبل از عمل‌آوری} - \text{جرم بعد از عمل‌آوری})}{\text{جرم قبل از عمل‌آوری}} \times 100 \quad (۱)$$

باتوجـه بـه نتـایج مشـاهده مـی‌شـود کـه بـا افـزایش درصـد جایگزینی، جذب آب حین عمل‌آوری افزایش یافته است به همـین خاطر انواع واکنش‌های هیدراتـاسیون افزایش یافتـه‌اسـت؛ ایـن امـر رشد کریستال‌ها و تویری بتن را به مرور زمان افزایش می‌دهد. این تویری مربوط به فازخمیری بتن می‌شود؛ اما دانه‌های پوکه معـدنی، منافـذ داخلـی خیلـی زیـادی دارنـد و در حالـت SSD آب خیلـی بیش‌تری نسبت به دانه‌های ماسه سیلیسی در حالت SSD دارند، از این لحاظ تویری بتن کـاهش خواهـد یافـت. در نهایـت بـا رشـد کریستال‌ها در فاز خمیـری، مقـداری از کـاهش مقاومـت ناشـی از کاهش تویری فاز دانه‌ای بـتن، جبـران مـی‌شـود. لازم بـه توضـیح می‌باشد که این افزایش واکنش‌هـای هیدراتاسـیون در تمـام سـنین مشاهده شد و ملاحظه شد که با افـزایش درصـد جـایگزینی پوکـه معـدنی، جـذب آب حـین عمـل‌آوری و در نتیجـه واکـنش‌هـای هیدراتاسیون افزایش یافته‌است.

۴-۴- آزمایش میز جریان

پودر دیاتومیـت جـذب آب زیـادی دارد و قـبلا دیاتومیت بـا درصدهای مختلف به جای دوده سیلیسی در مطالعـات گذشـته در بتن‌پودری‌واکنشی اسـتفاده شـده [10]، کـه نشـان داده بـا افـزایش درصد جایگزینی دیاتومیت باعث کاهش روانی بتن می‌شود. از این رو در این تحقیق میزان آب و فوق‌روان‌کننده بیش‌تـری نسـبت بـه تحقیقات قبلی در بتن شاهد استفاده شد؛ همچنین ماسه سیلیسی به صورت SSD و پوکه معدنی نیز به حالت SSD استفاده شد. نهایت دقت در الک کردن پوکه انجام شد به شکلی که بعد از گذرانـدن از الک ۱٫۱۸ میلی‌متر، با الک شماره ۱۰۰ نیز دوباره الـک شـد؛ مـواد خیلی ریز که ممکن بود بـه صـورت پـوزلان عمـل کنـد و باعـث کاهش روانی شود، دور ریختـه شـد. بعـد از انجـام آزمـایش میـز جریان مشاهده شد که مطابق شکل (۴)، روانی نمونه‌ها بـا افـزایش درصد جایگزینی افزایش می‌یابد.

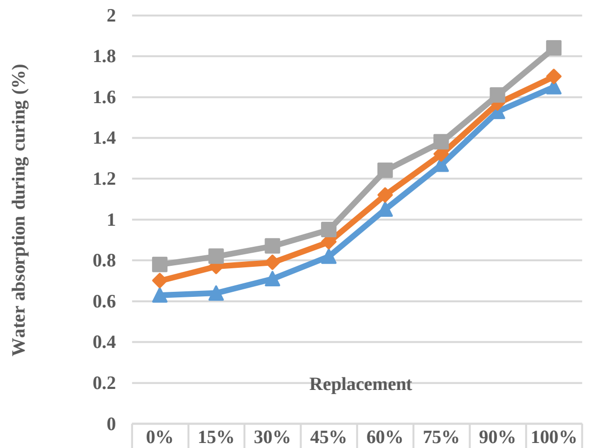


	0%	15%	30%	45%	60%	75%	90%	100%
7-days	4.5	4.3	4.2	3.9	3.7	3.5	3.4	3.2
14-days	5.7	5.4	4.8	4.4	4.1	3.9	3.8	3.5
28-days	6.5	6.3	5.6	5.5	4.8	4.4	4.1	3.9

7-days 14-days 28-days

شکل۲. مقاومت کششی نمونه‌های بتنی

Fig. 2. Tensile Strength of RPC Samples

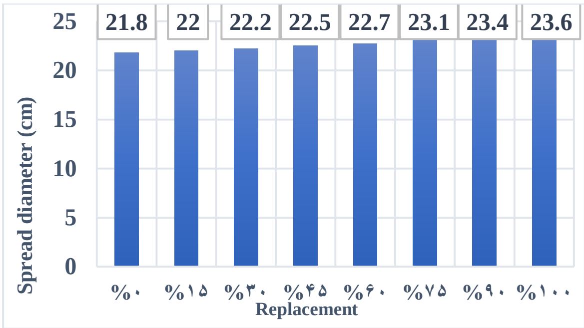


	0%	15%	30%	45%	60%	75%	90%	100%
7days	0.63	0.64	0.71	0.82	1.05	1.27	1.53	1.65
14days	0.7	0.77	0.79	0.89	1.12	1.32	1.57	1.7
28days	0.78	0.82	0.87	0.95	1.24	1.38	1.61	1.84

7days 14days 28days

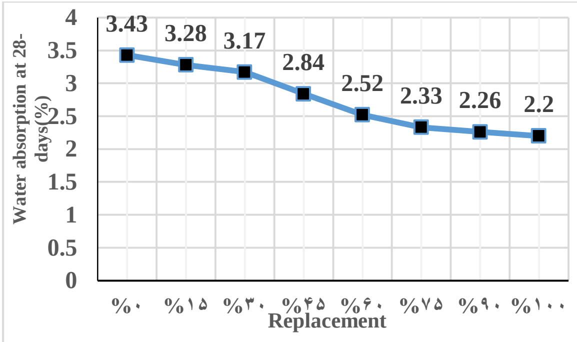
شکل۳. نمودار جذب آب حین عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

Fig. 3. Water absorption during curing of RPC samples



شکل ۴. نتایج میز جریان: قطر پخش‌شدگی نمونه‌های بتنی

Fig. 4. Flow Table Results



شکل ۵. جذب آب طبق استاندارد ASTM C642

Fig. 5. Water absorption according to ASTM C642

۴-۵- آزمایش جذب آب طبق استاندارد ASTM C642

جذب آب بتن بلوغ یافته اگر زیاد باشد، می‌تواند تاثیر منفی روی مقاومت نهایی بتن و همچنین مقاومت یخبندان آن داشته باشد؛ برای یافتن مقدار جذب هر نسبت مخلوط، آزمایش میزان جذب آب طبق استاندارد ASTM C642 انجام شد. برای اینکار نمونه ۲۸ روزه به مدت ۲۴ ساعت داخل دستگاه آون در دمای ۱۱۰ سانتی‌گراد گذاشته و سپس وزن شد. اینکار مجددا انجام شد و اگر کاهش وزن بین دو روز متوالی کم‌تر از ۰/۵ ٪ بود، آن نمونه، بتن خشک در نظر گرفته شد. اگر تفاضل عدد بدست آمده با عدد قبلی بیش‌تر از ۰/۵٪ بود، دوباره مراحل تکرار شد تا وزن بتن خشک شده بدست آید. سپس بتن خشک شده داخل آب تمیز با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفته و بعد از خارج کردن از آب و خشک نمودن سطح آن با پارچه، مجددا توزین شد تا درصد جذب آب محاسبه شود. این مولفه در واقع نشان‌دهنده تخلخل داخل بتن می‌باشد. نتایج بدست آمده در شکل (۵) قابل مشاهده است.

نتایج نشانگر آن است که با افزایش درصد جایگزینی پوکه معدنی به‌جای ماسه سیلیسی، میزان جذب آب، به تدریج کاهش می‌یابد؛ با توجه به اینکه روند این آزمایش، میزان تخلخل (شامل حجم لوله‌های موئینه به علاوه حباب‌های اتفاقی) را نشان می‌دهد، روند نزولی نمودار با افزایش درصد جایگزینی، حاکی از کاهش تخلخل است. این نتیجه از آنجایی جالب توجه‌است که دانه‌های پوکه منافذ داخلی بیش‌تری نسبت به دانه‌های ماسه سیلیسی دارد و در حالت SSD آب خیلی بیش‌تری نسبت به ماسه سیلیسی در خود دارد، برای همین انتظار می‌رفت که در نهایت تخلخل داخلی بتن با افزایش درصد جایگزینی افزایش یابد؛ در حالی که از ملاحظه نمودار مشخص می‌شود که جذب آب طبق استاندارد ASTM C642 و در نتیجه تخلخل کاهش یافته‌است. احتمالا علاوه‌بر واکنش‌های هیدراتاسیون دانه‌های سیمان و واکنش پوزولانیِ مابین دیاتومیت، سیمان و آب، واکنش‌های پوزولانی دیگری مابین این مواد سیمانی با سطوح دانه‌های پوکه انجام گرفته‌است.

دانه‌های پوکه سست بوده و در هنگام اختلاط، خرد می‌شوند. پس در نهایت پوکه سهند مصرفی، شامل دانه‌های بسیار ریز و دانه‌های کمی درشت‌تر خواهد بود. دانه‌های بسیار ریز خاصیت پوزولانی دارند و با سیمان و پودر دیاتومیت در مجاورت آب واکنش‌های پوزولانی انجام داده و مجموع آن‌ها خمیرچسباننده را به‌وجود می‌آورند؛ پس خمیر چسباننده کمی افزایش یافته و این واکنش‌های پوزولانی جدید، نفوذپذیری بتن را کاهش داده است (افزایش جذب آب حین عمل آوری نشان‌دهنده افزایش انواع واکنش‌های هیدراتاسیون می‌باشد).از طرف دیگر دانه‌هایی از پوکه که کمی درشت‌تر هستند، در واکنش‌های پوزولانی شرکت نمی‌کنند و صرفا پرکننده هستند. چون چگالی این دانه‌ها (که جایگزین ماسه‌سیلیسی شده‌اند) از دانه‌های ماسه‌سیلیسی کم‌تر است، پس مقاومت فشاری کم‌تری داشته و در نهایت موجب اندکی کاهش در مقاومت فشاری بتن‌پودری‌واکنشی شده‌اند. این دو روند در خلاف جهت هم عمل می‌کنند. فاز خمیری توپرتر، نفوذناپذیرتر و مقاوم‌تر می‌شود و فاز دانه‌ای سست‌تر شده و مقاومت آن کاهش می‌یابد. در مجموع چون نفوذپذیری و جذب آب به روش ASTM C642، بیشتر به فاز خمیری مربوط است، کاهش پیدا می‌کند؛ ولی مقاومت بتن در مجموع اندکی کاهش می‌یابد. لازم‌به‌ذکر است که همه نمونه‌ها بالاتر از ۵۰ مگاپاسکال

مقاومت دارند و جزو بتن‌های با مقاومت بالا محسوب می‌شوند.

ملاحظه می‌شود که میزان جذب آب به روش ASTM C642 کاهش یافته‌است یعنی تخلخل بتن بدست آمده کم‌تر است. به همین خاطر نتیجه خیلی فوق العاده‌ای بدست‌آمد که هم سبک‌سازی انجام گرفته، مقاومت خوبی دارد و در نهایت نیز تخلخل و نفوذپذیری بتن در حالت بلوغ یافته کاهش یافته‌است.

۴-۶- اندازه گیری وزن مخصوص

با توجه به نمودار شکل (۶)، با افزایش درصد جایگزینی پوکه سهند به جای ماسه سیلیسی، وزن مخصوص نمونه‌ها به تدریج کاهش یافت. به طوری که در ۱۰۰٪ جایگزینی، وزن مخصوص به ۱۷۶۴ گرم‌برلیتر رسید که نسبت به بتن شاهد ۱۳/۵٪، کاهش دارد. در مقررات ملی ساختمان ایران مبحث ۵ ویرایش ۱۳۹۶، بتن سبک سازه‌ای به بتنی گفته می‌شود که کاربرد آن در اعضای سازه‌ای مجاز شمرده شده و وزن مخصوص آن‌ها بین ۱۴۰۰ تا ۱۹۰۰ گرم‌برلیتر بوده و دارای حداقل مقاومت فشاری ۱۷ مگاپاسکال باشد. در این پژوهش مشاهده شد که در ۱۰۰٪ جایگزینی پوکه به‌جای ماسه سیلیسی با وزن مخصوص به ۱۷۶۴ گرم‌برلیتر، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن ۵۰/۷ مگاپاسکال رسید؛ پس می‌توان این بتن را هم به عنوان بتن پرمقاومت و هم بتن سبک سازه‌ای معرفی نمود.

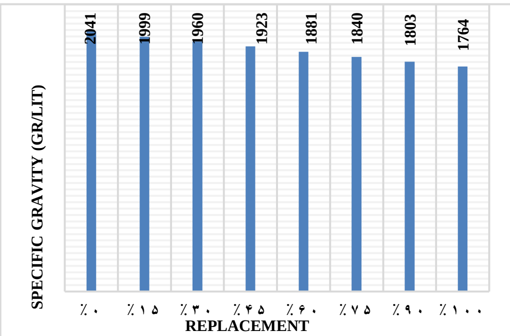
۴-۷- بررسی هزینه‌های تولید

در این پژوهش، دو اجزای اصلی بتن‌پودری‌واکنشی (دوده سیلیسی و ماسه سیلیسی) به ترتیب با پودر دیاتومیت و پوکه معدنی جایگزین شده‌است. هدف از این کار علاوه بر افزایش ظرفیت منابع در دسترس برای تولید بتن‌پودری‌واکنشی، کاهش قیمت تمام‌شده نمونه‌های بتنی نیز می‌باشد. در ادامه مقایسه قیمت بین نمونه‌های بتنی با قیمت‌های مربوط به پائیز سال ۱۴۰۳ انجام شده و به صورت درصد بیان شده‌است. قیمت دوده سیلیسی و ماسه سیلیسی نسبت به پودر دیاتومیت و پوکه معدنی بیش‌تر است. به همین خاطر در ابتدا در بتن شاهد از ۱۰۰٪ پودر دیاتومیت به‌جای دوده سیلیسی استفاده شد. قیمت تولید بتن شاهد با هر دو ماده محاسبه شد و مقایسه نتایج نشان داد وقتی دیاتومیت جایگزین دوده سیلیسی شد، قیمت نهایی بتن بیش‌تر از حدود ۱۰٪ در مترمکعب کاهش یافت. در گام بعدی، پوکه معدنی با درصدهای مختلف جایگزین ماسه سیلیسی شد. در شکل (۷) روند کاهش قیمت نمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی پوکه به جای ماسه سیلیسی، نسبت به بتن شاهد که در آن ۱۰۰٪ دیاتومیت با دوده سیلیسی جایگزین شده، نشان داده شده است.

بررسی‌ها نشان داد با افزایش درصدهای جایگزینی پوکه به جای ماسه سیلیسی قیمت تمام شده نمونه‌ها کاهش می‌یابد به‌طوری که در ۱۰۰٪ جایگزینی پوکه به‌جای ماسه سیلیسی، قیمت نهایی بتن نسبت به بتن شاهد حدودا ۱۹٪ در هر مترمکعب کاهش می‌یابد. در نتیجه با جایگزینی مصالح بومی، در دسترس و ارزان قیمت (یعنی دیاتومیت و پوکه معدنی) به ترتیب ۱۰٪ در بتن شاهد و ۱۹٪ در گام بعدی، کاهش قیمت رخ داد که موجب اقتصادی‌تر شدن بتن‌پودری‌واکنشی است.

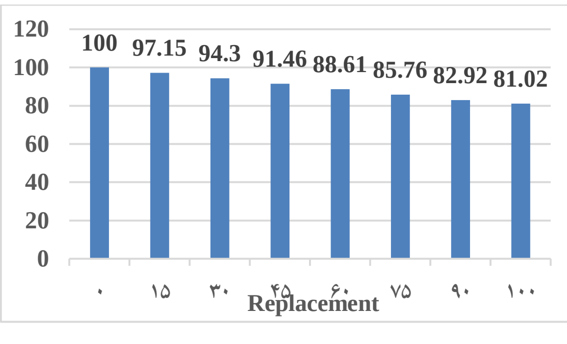
۵- ارائه یک مدل ریاضی برای f'_c بر اساس نتایج تجربی

در ادامه بر اساس مقادیر بدست‌آمده از آزمایش مقاومت فشاری برای سن ۲۸ روزه، یک معادله درجه دوم مطابق رابطه (۲) برای تعیین f'_c برای بتن‌پودری‌واکنشی با مقدار جایگزینی مورد نظر، ارائه شد.



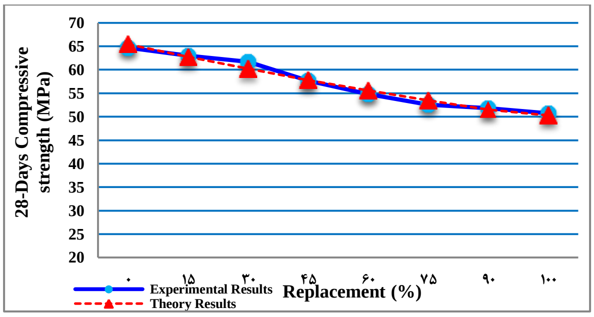
شکل ۶. وزن مخصوص نمونه‌های بتنی

Fig. 6. the Specific Weight of RPC Samples



شکل ۷. روند کاهش قیمت با افزایش درصد جایگزینی پوکه سهند

Fig. 7. Trend of RPC Price Reduction with Increasing Percentage of Sahand Pumice Replacement



شکل ۸. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست‌آمده از رابطه (۲)

Fig. 8. Comparison of experimental results with those obtained from the proposed formula

$$f'_C = 65.42 - 18.35\,X - 3.22X^2 \qquad (۲)$$

در این رابطه f'_C برابر مقامت فشاری ۲۸ روزه و x برابر مقدار جایگزینی پوکه معدنی سهند به جای ماسه سیلیسی است. به عنوان نمونه برای جایگزینی ۱۵ درصد مقاومت فشاری تئوری به ترتیب زیر بدست می‌آید:

$$f'_C = 65.42 - 18.35\times0.15 - 3.22\times(0.15)^2 = 62.74 \qquad (۳)$$

در شکل (۸) میزان هماهنگی نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست‌آمده از فرمول پیشنهادی مشاهده می‌شود.

۶- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش امکان‌سنجی جایگزینی پوکه معدنی به جای ماسه سیلیسی در نوعی بتن‌پودری‌واکنشی بود که در آن به جای دوده سیلیسی از پودر دیاتومیت استفاده شده است؛ در این راستا جایگزینی تدریجی پوکه سهند به جای ماسه سیلیسی، از صفر تا ۱۰۰٪ انجام گرفت. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مصالح بومی می‌باشد، پس ممکن است که با نتایج سایر پژوهشگران متفاوت باشد؛ ولی در زمان انجام آزمایش نهایت دقت برای رسیدن به نتایجی با کم‌ترین میزان خطا انجام گرفته‌است. همچنین در آزمایش‌های انجام شده، از عمل آوری با اتوکلاو استفاده نشده تا شرایط عمل آوری شبیه شرایط نرمال کارگاهی بتن‌ریزی باشد و نتایج بدست‌آمده قابل‌استفاده‌تر و کاربردی‌تر باشند. مهمترین نتایج بدست آمده از بررسی‌های انجام شده به شرح زیر می‌باشد:

۱- با افزایش سن نمونه‌ها مانند سایر بتن‌ها مقاومت فشاری بتن‌پودری‌واکنشی افزایش می‌یابد.

۲- با افزایش درصد جایگزینی پوکه به جای ماسه سیلیسی مقاومت فشاری به تدریج کاهش می‌یابد؛ به عنوان نمونه در نمونه‌های ۲۸ روزه با جایگزینی‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد، کاهش مقاومت فشاری به ترتیب ۴/۶۳، ۱۵/۳۰، ۱۹/۹۳ و ۲۱/۶۳ درصد می‌باشد. به بیان دیگر مقاومت فشاری بتن شاهد که ۷.۶۴ مگاپاسکال بوده در جایگزینی ۱۰۰ درصد پوکه به جای ماسه سیلیسی ۵۰/۷ مگاپاسکل رسیده‌است؛ اما طبق مقررات ملی ساختمان ایران مبحث۵ ویرایش ۱۳۹۶، چون همچنان دارای مقاومتی بالاتر از ۵۰ مگاپاسکال است، جزو بتن‌های پرمقاومت محسوب می‌شود.

۳- روانی بتن با افزایش درصد جایگزینی افزایش می‌یابد (البته باید توجه نمود که پوکه معدنی مورد استفاده و ماسه سیلیسی هر دو به حالت SSD مورد استفاده قرار گرفت). به طوری‌که قطر پخش‌شدگی بتن شاهد ۲۱/۸ سانتی‌متر و قطر پخش‌شدگی مربوط به بتن با ۱۰۰ جایگزینی پوکه به جای ماسه سیلیسی به ۲۳/۶ سانتی‌متر به دست آمد.

۴- نتایج نشان داد که پوکه معدنی و پودر دیاتومیت باهم می‌توانند به ترتیب جایگزین مناسبی برای ماسه سیلیسی و دوده سلیسی باشند؛ این امر باعث اقتصادی‌تر شدن این نوع بتن‌پودری‌واکنشی در آذربایجان می‌شود.

۵- با افزایش درصد جایگزینی، کاهش در مقاومت کششی مشاهده شد. به طوری که در نمونه‌های ۲۸ روزه با جایگزینی ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۰۰٪ کاهش مقاومت کششی نسبت به بتن شاهد، به ترتیب برابر ۱۳/۸۴، ۲۶/۱۵، ۳۶/۹۲ و ۴۰ درصد می‌باشد.

۶- استفاده از پوکه معدنی سهند (بستان آباد)، ضمن افزایش ظرفیت منابع در دسترس برای بتن‌پودری‌واکنشی، موجب سبک‌سازی بتن و در نتیجه کاهش بار مرده می‌شود. بطوری که کاهش وزن نمونه‌ها نسبت به بتن شاهد در نمونه‌های ۲۸ روزه، با جایگزینی ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب برابر ۳/۹۶، ۷/۸۳، ۱۱/۶و ۱۳/۵ درصد می‌باشد.

۷- باتوجه به کاهش تدریجی جذب آب به روش ASTM C642، با افزایش درصد جایگزینی پوکه معدنی به‌جای ماسه سیلیسی، می‌توان نتیجه گرفت واکنش‌های پوزلانی مابین دانه‌های سیمان، پوکه معدنی و پودر دیاتومیت انجام گرفته که نفوذپذیری را کاهش داده است. در عین حال چون پوکه به‌جای ماسه سیلیسی (با وزن مخصوص بالا) جایگزین شده‌است، وزن مخصوص بتن به تدریج کاهش یافته و در ۱۰۰٪ جایگزینی به ۱۷۶۴ گرم‌برلیتر

رسیده است. این نتیجه بسیار اهمیت دارد، که در عین حال هم وزن مخصوص کاهش یافته و هم نفوذپذیری کم‌تر شده است؛ همچنین با وجود کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی، این بتن طبق مبحث۵ مقررات ملی ساختمان ایران ویراش ۱۳۹۶، جزو بتن‌های پرمقاومت و بتن سبک سازه‌ای محسوب می‌شود.

۸- در این تحقیق از پوکه سهند از دانه‌های مابین الک‌های نمره ۱۰۰ و نمره ۱۶ استفاده شده است. یعنی اندازه دانه های پوکه سهند مورد استفاده ۰/۱۵ الی ۱/۱۸ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین در ابتدا دانه‌های بسیار ریز پوکه سهند حذف شده اند. اما دانه های پوکه سست بوده و در هنگام اختلاط، خرد می‌شوند. بنابراین در نهایت پوکه سهند مصرفی، شامل دانه‌های بسیار ریز و دانه‌های کمی درشت‌تر خواهد بود. دانه‌های بسیار ریز خاصیت پوزولانی دارند و با سیمان و پودر دیاتومیت در مجاورت آب واکنش‌های پوزولانی انجام داده و مجموع آن‌ها خمیرچسباننده را به‌وجود می‌آورند؛ پس خمیر چسباننده کمی افزایش یافته و این واکنش‌های پوزولانی جدید، نفوذپذیری بتن را کاهش داده است (افزایش جذب آب حین عمل آوری نشان‌دهنده افزایش انواع واکنش‌های هیدراتاسیون می‌باشد).از طرف دیگر دانه‌هایی از پوکه که کمی درشت‌تر هستند، در واکنش‌های پوزولانی شرکت نمی‌کنند و صرفا پرکننده هستند. چون چگالی این دانه‌ها (که جایگزین ماسه‌سیلیسی شده‌اند) از دانه‌های ماسه‌سیلیسی کم‌تر است، پس مقاومت فشاری کم‌تری داشته و در نهایت موجب اندکی کاهش در مقاومت فشاری بتن‌پودری‌واکنشی شده‌اند.

۹- نسبت‌های مخلوط بتن پیشنهادی، با جایگزینی کل دوده سیلیسی با پودر دیاتومیت و جایگزینی کل ماسه سیلیسی با پوکه سهند، حدود سی درصد قیمت تولید کم‌تری دارد.

قدردانی نویسندگان

این تحقیق در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان انجام گرفته است و از همکاری همه مسئولین مربوطه، مخصوصا کارشناس محترم آزمایشگاه تشکر و قدردانی می گردد.

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای رضا ضیائی خسروشاهی با عنوان "بررسی جایگزینی ماسه سیلیسی با پوکه سهند در بتن پودری واکنشی حاوی ۱۰۰٪ پودر دیاتومیت به جای دوده سیلیسی" که با راهنمایی دکتر" بهمن شروانی تبار" می‌باشد در دانشگاه شهید مدنی آذربایجان انجام گرفته است.

تعارض منافع

تعارض منافع بین هیچ یک از عوامل مشارکت کننده در تولید این مقاله وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم هر دو نویسنده با هم برابر و ۵۰٪ می‌باشد.

منابع مالی

هزینه های پژوهش منتج به این مقاله از گرنت استاد راهنما از طریق دانشگاه تامین شده است.

References

[1] Emami Korandeh, M., Farrokhzadeh, S. and Ganjidoust, H., 2024. Sensitivity analysis in modeling compressive strength of green concrete with incineration ash using deep learning methods. *Civil Engineering and Modern Technologies*, 3(3). (In Persian).

[2] Mansourqanai, M.H., Beik Larian, M. and Mardokhpour, A., 2022. Investigation of impact resistance, microstructure, and weight loss in pozzolanic geopolymer concrete containing fibers under high temperatures. *Passive Defense Quarterly*, 13(3), pp.11–23. (In Persian).

[3] Richard, P. and Cheyrezy, M., 1995. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), pp.1501–1511.

[4] Fragoulis, D., Chaniotakis, E. and Katsioti, M., 2005. The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), pp.205–209.

[5] Ergün, A., 2011. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp.806–812.

[6] Li, X., Sanjayan, J.G. and Wilson, J.L., 2014. Fabrication and stability of form-stable diatomite/paraffin phase change material composites. *Energy and Buildings*, 76, pp.284–294.

[7] Karaman, S., Oztoprak, B. and Sisman, C.B., 2015. Usage possibilities of diatomite in the concrete production for agricultural buildings. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 11, p.31.

[8] Letelier, V., Tarela, E. and Moriconi, G., 2016. Assessment of the mechanical properties of a concrete

made by reusing both: brewery spent diatomite and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 114, pp.492–498.

[9] Saidi, T., Zidani, C. and Achour, T., 2020. Mix design and properties of reactive powder concrete with diatomaceous earth as cement replacement. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 960. IOP Publishing, p.032038.

[10] Chakhrlou, J. and Sharvani Tabar, B., 2019. Investigating the effect of replacing diatomite powder with silica fume in reactive powder concrete. *Concrete Research*, 12(1), pp.119–132. (In Persian).

[11] Lauermannová, A.M., Lojka, M., Jankovský, O., Faltysová, I. et al., 2021. High-performance magnesium oxychloride composites with silica sand and diatomite. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, pp.957–969.

[12] Lee, M.G., Hsieh, S.C., Chen, C.H. and Yang, T.H., 2023. Mechanical and thermal insulation performance of waste diatomite cement mortar. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, pp.4739–4748.

[13] Crangle, R.D., 2024. Pumice and pumicite. *Minerals Engineering*, 70, pp.78–79.

[14] Uzun, O., Gokalp, Z., Irik, H.A., Varol, I.S. and Kanarya, F.O., 2021. Zeolite and pumice-amended mixtures to improve phosphorus removal efficiency of substrate materials from wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 317, p.128144.

[15] Maryan, A.S. and Montazer, M., 2013. A cleaner production of denim garment using one step treatment with amylase/cellulase/laccase. *Journal of Cleaner Production*, 57, pp.320–326.

[16] Das, S. and Juneja, D.K., 2024. Improving the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1327(1), p.012006.

[17] Jayadurgalakshmi, M. and Kandasamy, S., 2024. Behavior of chemosphere and pumice powder as partial cement substitute material in the sustainable production of concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9, p.47.

[18] Karatas, M., Benli, A. and Ergin, A., 2017. Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 150, pp.467–479.

[19] Zeyad, A.M., Tayeh, B.A. and Yusuf, M.O., 2019. Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder based high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 216, pp.314–324.

[20] Mehedi, M.T., Sobuz, M.H.R., Hasan, N.M.S., Jabin, J.A. et al., 2024. High-strength fiber reinforced concrete production with incorporating volcanic pumice powder and steel fiber: sustainability, strength, and machine learning technique. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(9), pp.6171–6187.

[21] Adil, W., Ur Rahman, F., Abdullah, G.M.S., Tayeh, B.A. and Zeyad, A.M., 2022. Effective utilization of textile industry waste-derived and heat-treated pumice powder in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 351, p.128966.

[22] Rahman, F., Adil, W., Raheel, M., Saberian, M., Li, J. and Maqsood, T., 2022. Experimental investigation of high replacement of cement by pumice in cement mortar: a mechanical, durability, and microstructural study. *Journal of Building Engineering*, 49, p.104037.

[23] Cabrera-Luna, K., Maldonado-Bandala, E.E., Nieves-Mendoza, D., Castro-Borges, P. and García, J.E., 2020. Novel low emissions supersulfated cements of pumice in concrete; mechanical and electrochemical characterization. *Journal of Cleaner Production*, 272, p.122520.

[24] Anwar Hossain, K.M., 2004. Properties of volcanic pumice-based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), pp.283–291.

[25] Kurt, M., Gül, M.S., Gül, R., Aydin, A.C. and Kotan, T., 2016. The effect of pumice powder on the self-compatibility of pumice aggregates lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 103, pp.36–46.

[26] Tanyıldızı, M. and Gökalp, İ., 2023. Utilization of pumice as aggregate in the concrete: a state of art. *Construction and Building Materials*, 377, p.131102.

[27] Tsintskaladze, G., Kordzakhia, T., Skhvitaridze, R., Sharashenidze, T. et al., 2024. Physical and chemical characteristics of pumice from some regions of Georgia and the prospects for its use in lightweight concrete with environmental advantages. In: *Environmental Technology and Sustainability*. 1st ed. Palm Bay, FL: Apple Academic Press, pp.1–10.

[28] Shervani Tabar, B. and Asadi Melerdi, M., 2022. Experimental investigation of the effects of curing temperature and amount of silica fume on properties of reactive powder concrete made from local materials. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(2), pp.191–212. (In Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Shervani Tabar, B. and Ziaei Khosroshahi, R., 2026. Investigation of the Effect of Replacing Silica Sand with Sahand Pumice in Reactive Powder Concrete Containing 100% Diatomite Powder instead of Silica Fume, *Modares Civil Engineering journal*, 26(1). doi: 10.48311/mcej.2025.99136.0