

Statistical Analysis of the Optimal Mix Design in the Production of Modified Concrete Using the Concurrent Incorporation of Molecular Sieve and PET Waste

Pouya Amjadyan¹, Nader Mokhtarani^{2*} 

1. Master's in Civil Engineering [Environmental Engineering specialization], Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor in Civil Engineering [Environmental Engineering specialization], Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

The increase in the production of industrial and plastic waste, especially molecular sieve waste and polyethylene terephthalate (PET), has created a serious challenge in the field of environmental waste management. On the other hand, the current management method for some of this waste is to bury it, which clearly shows that this approach is not appropriate for environmental standards. Molecular sieves, which mainly have a zeolitic and porous structure and are used in the oil, gas, and petrochemical industries for the absorption and separation of molecules, are classified as industrial waste after their efficiency decreases due to saturation of the pores. This research aimed to investigate the feasibility of simultaneously using molecular sieve waste and PET in the production of sustainable concrete and to evaluate their impact on the mechanical, physical, and environmental properties of concrete. The simultaneous use of molecular sieve and PET waste in concrete is an innovative approach in civil engineering. Due to its porous crystalline structure and high ability to absorb moisture, molecular sieve can increase density, adhesion, and reduce water absorption in concrete; however, its excessive use may lead to a decrease in compressive strength. On the other hand, using recycled PET waste as a partial replacement for natural aggregates helps reduce the density of concrete, reduce the weight of the structure, and optimize material consumption and transportation costs. Molecular sieve waste (synthesized HYG03C) after mechanical crushing and sieving was used as a partial replacement for cement in the range of 5 to 30% by weight, and PET after washing, grinding, and sieving was used as a partial replacement for sand in the range of 2 to 10% by weight. The experiments were designed using response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD) in Design Expert software. In this design, four variable parameters were defined including cement content (200 to 400 g), molecular sieve to cement ratio, water to cement ratio (40 to 60 %), and PET to sand ratio. It should be noted that the amount of sand and gravel in concrete mixtures is determined to be 42 and 33 percent by weight of the total concrete, respectively. Cubic specimens with dimensions of 10×10×10 cm were made in accordance with the requirements of the Iranian Concrete Code and were subjected to porosity and compressive strength tests (Standard 1608-3). Considering the research objectives of producing sustainable concrete, the optimal composition included 393 grams of cement, 21.56% molecular sieve, 2.85% PET, and a water-to-cement ratio of 0.515, which resulted in a porosity of 4.34% and a compressive strength of 34.29 MPa. The results of the slump test showed that the concrete flowability in the optimal sample was 75 mm and in all samples it was within the allowable range of 50 to 100 mm. Increasing the water-cement ratio increased the slump and increasing the amount of cement, molecular sieve waste, and PET decreased the concrete flowability. Porosity and compressive strength prediction models had high accuracy and generalizability with high coefficients of determination (R^2 equal to 0.9978 and 0.9970, respectively) and significance level (P-value less than 0.05). This research demonstrated the effectiveness of simultaneously utilizing molecular sieve and PET waste as a sustainable method for producing concrete with improved properties and reduced environmental impacts, which has widespread application in construction projects.

Review History

Received: Jan 21, 2026

Revised: May 18, 2026

Accepted: June 7, 2026

Keywords

Concrete

Molecular sieve waste

PET waste

Response Surface

Methodology

Multi-Objective

Optimization

Central composite design

* Corresponding Author Email: mokhtarani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0001-6121-019X



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی آماری طرح مخلوط بهینه در تولید بتن اصلاح شده با استفاده همزمان از پسماندهای مولکولارسیو و PET

پویا امجدیان^۱، نادر مختارانی^{۲*} 

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

افزایش انباشت پسماندهای صنعتی مولکولارسیو و ضایعات پلاستیکی PET به یکی از چالش‌های جدی مدیریت پسماند در جهان تبدیل شده است. در این پژوهش، برای نخستین بار امکان استفاده همزمان این دو نوع پسماند در تولید بتن پایدار مورد بررسی قرار گرفت. پسماند مولکولارسیو HYG03C پس از خردایش به عنوان جایگزین جزئی سیمان در بازه ۵ تا ۳۰ درصد وزنی و PET آسیاب شده به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در محدوده ۲ تا ۱۰ درصد وزنی به کار گرفته شد. بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح مرکب مرکزی (CCD) در نرم‌افزار Design Expert انجام شد. چهار متغیر مستقل شامل مقدار سیمان، نسبت مولکولارسیو به سیمان، نسبت PET به ماسه و نسبت آب به سیمان تعریف شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که ترکیب بهینه شامل ۳۹۳ گرم سیمان، ۲۱/۵۶ درصد مولکولارسیو، ۲/۸۵ درصد PET و نسبت آب به سیمان ۰/۵۱۵ است که منجر به دستیابی به مقاومت فشاری ۳۴/۲۹ مگاپاسکال، تخلخل ۴/۳۴ درصد و اسلامپ ۷۵ میلی‌متر شد. مدل‌های آماری توسعه یافته برای پیش‌بینی تخلخل و مقاومت فشاری از دقت بالایی برخوردار بودند. به گونه‌ای که مقادیر ضریب تعیین (R^2) بیش از ۰/۹۸ و مقادیر P-value کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده همزمان پسماندهای مولکولارسیو و PET می‌تواند منجر به تولید بتنی مقاوم و سازگار با محیط‌زیست شود که از نظر عملکرد فنی، قابلیت کاربرد در اعضای سازه‌ای مانند تیر، ستون و دال را دارد.

کلمات کلیدی

بتن
پسماند مولکولارسیو

پسماند PET

روش سطح پاسخ

بهینه‌سازی چند هدفه

طراحی مرکب مرکزی

۱- مقدمه

طبیعی یا سنتزی (مصنوعی) تشکیل شده‌اند، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر یکنواختی منافذ، انتخاب‌پذیری بالا و پایداری شیمیایی و حرارتی، کاربرد گسترده‌ای در فرایندهای صنعتی دارند. مولکولارسیوها نقش مهمی در جداسازی، خشک‌سازی و خالص‌سازی گازها و مایعات ایفا می‌کنند و در صنایعی مانند پتروشیمی و پالایشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [1 & 2]. در همین راستا، پسماند مولکولارسیو به موادی اطلاق می‌شود که پس

رشد فزاینده تولید پسماندهای صنعتی و پلیمری، به ویژه مواد آلومینوسیلیکاتی مانند مولکولارسیو (Molecular Sieve) و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، چالش‌های جدی در مدیریت پسماند ایجاد کرده است. مولکولارسیو ماده‌ای متخلخل با منافذ یکنواخت است که امکان جداسازی مولکول‌ها را بر اساس ابعاد و شکل آن‌ها فراهم می‌سازد. این ساختارهای بلوری، که معمولاً از زئولیت‌های

* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - mokhtarani@modares.ac.ir : 0000-0001-6121-019X

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



از استفاده مکرر در فرایندهای جذب، اشباع شده و کارایی اولیه خود را از دست داده‌اند. این پسماندها معمولاً حاوی مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین و سایر ناخالصی‌ها بوده و در رده پسماندهای ویژه و خطرناک قرار می‌گیرند. در همین راستا دفع این پسماندها نیازمند رعایت استانداردهای محیط‌زیستی است و مدیریت صحیح این پسماندها از طریق بازیافت یا انهدام کنترل شده، می‌تواند آثار محیط‌زیستی را به حداقل برساند [3] از سوی دیگر، PET به واسطه ساختار شیمیایی منحصر به فرد خود، از جمله پیوندهای استری بسیار پایدار، به عنوان یکی از مقاوم‌ترین پلیمرها در برابر تجزیه زیستی و طبیعی شناخته می‌شود. این ویژگی موجب می‌شود که PET برای مدت‌های طولانی در محیط باقی بماند و تجزیه کامل آن تحت شرایط طبیعی ممکن است صدها سال به طول انجامد [4] همچنین پسماند PET به عنوان یکی از متداول‌ترین پلیمرهای مصرفی در جهان، عمدتاً به دلیل کاربرد وسیع PET در صنایع بسته‌بندی، به ویژه بطری‌های نوشیدنی، منجر به تولید حجم بالایی از پسماند می‌شود، در سطح صنعتی، حساسیت بالای PET به شرایط فرایند مانند دما، زمان ماند و نرخ برش، می‌تواند باعث تبلور ناقص، تخریب حرارتی و ایجاد پسماندهای غیرقابل استفاده شود در حالی که نرخ بازیافت این پسماند به دلیل ضعف در تفکیک و جمع‌آوری پایین باقی مانده است [4-8] تحقیقات نشان داده است که سالانه بیش از ۸۲ میلیون تن PET در سراسر جهان تولید می‌شود و پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۵۰ تنها ۲۷ درصد آن قابل بازیافت باشد [9]. رویکردهای متداول دفع این پسماندها، مانند دفن و سوزاندن، علاوه بر ایجاد آلودگی خاک، آب و هوا، موجب اتلاف منابع ارزشمند می‌شود [10 & 11].

در همین راستا، کاربرد استفاده همزمان پسماندهای مولکولارسیو و PET در بتن، رویکردی نوآورانه در مهندسی عمران به شمار می‌رود. صنعت بتن ظرفیت بالایی برای پذیرش پسماندهای مختلف دارد و این رویکرد می‌تواند بستری برای کاهش مصرف سیمان و سنگدانه طبیعی، تثبیت آلاینده‌ها و افزایش ارزش افزوده پسماندهای صنعتی را فراهم آورد. به عبارتی مولکولارسیو به دلیل ساختار بلوری متخلخل و توانایی بالا در جذب رطوبت، می‌تواند موجب افزایش تراکم، چسبندگی و کاهش تخلخل در بتن شود؛ با این حال، مصرف بیش از اندازه آن ممکن

است به کاهش مقاومت فشاری بینجامد. همچنین، مولکولارسیو مصرف‌شده به دلیل ترکیبات آلومینوسیلیکاتی و ویژگی‌های پوزولانی، قابلیت مشارکت در تشکیل فازهای C-S-H را دارد [2]. به موازات آن، استفاده از پسماند PET به عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌های طبیعی، ضمن کاهش چگالی بتن، به کاهش وزن سازه نیز کمک می‌کند. PET خرد شده می‌تواند به عنوان سنگدانه سبک و پایدار در ترکیبات بتن مؤثر باشد [9, 12 & 13] با این حال، تأثیر PET بر ویژگی‌های مکانیکی بتن وابسته به عواملی همچون درصد جایگزینی، اندازه و شکل ذرات و شرایط عمل‌آوری است [14].

از جمله مزایای دیگر این رویکرد می‌توان به کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده مجدد از مواد پلیمری و معدنی زائد، و افزایش عمر مفید سازه‌ها اشاره کرد. با این حال، چالش‌هایی مانند ارزیابی دقیق سازگاری این مواد با سایر اجزای مخلوط بتن، احتمال افت مقاومت فشاری بتن، و تأثیر احتمالی بر ویژگی‌های رئولوژیکی نظیر روانی بتن، از ملاحظات کلیدی این روش به شمار می‌روند [15].

لازم به ذکر است که با وجود مطالعات متعدد در زمینه استفاده جداگانه از مولکولارسیو یا PET، بررسی هم‌زمان این دو جریان بزرگ پسماند در بتن بسیار محدود است. تاکنون پژوهش‌های جامعی که آثار توأم این دو ماده را بر تخلخل، مقاومت فشاری و ریزساختار بتن تحلیل کند، انجام نشده است. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات گذشته فاقد رویکردهای آماری مبتنی بر طراحی آزمایش هستند و از روش‌های نوینی همچون روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology-RSM) و طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design-CCD) برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه طرح مخلوط بهره نبرده‌اند. این خلأ علمی، ضرورت انجام پژوهشی جامع را برای تحلیل برهم‌کنش متغیرها و توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده معتبر برجسته می‌سازد، پس در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی رفتار سیستم، بهینه‌سازی فرایند، صرفه‌جویی در منابع و زمان، و دستیابی به نتایجی دقیق و مبتنی بر شواهد علمی، از مدل‌سازی و طراحی آزمایش استفاده شده است. طراحی دقیق آزمایش‌ها و فرایند مدل‌سازی، مستلزم در اختیار داشتن داده‌های معتبر درباره رفتار مواد و تعاملات احتمالی آن‌ها درون سیستم است. اطلاعات گردآوری‌شده باید امکان شناسایی تغییرات ناشی از عوامل مؤثر و تحلیل تأثیر آن‌ها بر مقادیر

اندازه‌گیری شده را فراهم سازند. نکته کلیدی در این مسیر، تشخیص معناداری این تغییرات و تفسیر دقیق داده‌ها برای دستیابی به نتایج علمی و قابل اعتماد است [16].

در همین راستا هدف اصلی این پژوهش، بررسی امکان‌سنجی استفاده همزمان از پسماندهای مولکولارسیو و PET در بتن و بهینه‌سازی طرح مخلوط با رویکرد چندهدفه و آماری است.

۲- مواد و روش انجام کار

۲-۱- روش انجام کار

پسماند بطری‌های PET به منظور استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی، پس از شستشوی ۱۵ دقیقه‌ای با آب داغ (۹۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و خشک‌سازی، در بازه دانه‌بندی ۲/۳۶ تا ۴/۷۵ میلی‌متر با استفاده از دستگاه خردکن صنعتی شرکت الیاف کاوه آسیاب و آماده‌سازی شد. انتخاب این محدوده بر اساس لزوم آب و ACI و با هدف جایگزینی مناسب با ماسه انجام گرفت. در ادامه، این ذرات به طرح مخلوط افزوده شدند. به‌طور همزمان، فرآیند خردایش پسماند مولکولارسیو با آسیاب گلوله‌ای به مدت ۵۰ دقیقه صورت گرفت. این زمان‌بندی، حاصل تکرار آزمایش‌ها و دستیابی به مشخصات دانه‌بندی مطلوب بود که هدف از آن، افزایش ریزدانی و فراهم‌سازی امکان جایگزینی جزئی با سیمان بود. پسماند اولیه با ابعاد اولیه ۲ میلی‌متر قطر و ۲ تا ۷ میلی‌متر طول، پس از آسیاب‌کاری به دانه‌بندی ۲۰ تا ۲۵ میکرومتر رسید. این نتیجه از طریق عبور مواد از الک شماره ۵۰۰ و باقی ماندن آن‌ها روی الک شماره ۶۲۵ (مش) به دست آمد. این دانه‌بندی نهایی، از نظر ابعادی، با ذرات سیمان پرتلند تیپ ۲ همخوانی داشته و امکان اختلاط و برهم‌کنش مؤثر با فاز خمیری سیمان را میسر می‌سازد. در طول فرآیند خردایش، پدیده‌ی گلوله‌شدگی مشاهده نشد. چگالی این پسماند با استفاده از روش بالن لوشاتلیه تعیین شد.

به منظور تولید نمونه‌های بتنی در قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر، پارامترهای مستقل مؤثر بر خواص بتن، شامل عوامل و حدود مصرف آن‌ها، با استناد به مبانی آیین‌نامه بتن ایران (مطابق با استانداردهای بین‌المللی ACI و BS) و نتایج حاصل از مطالعات مقدماتی (آزمون‌های اولیه به‌کارگیری جداگانه پسماندها)، تعیین و مشخص شد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert (نسخه ۱۳) و با به‌کارگیری روش سطح

پاسخ (RSM) مبتنی بر طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. در مجموع، ۳۰ آزمایش طراحی شد که شامل ۶ تکرار در نقطه مرکزی بود. به منظور افزایش دقت و کاهش خطای آزمایشگاهی، هر یک از طرح‌های مخلوط، سه بار به صورت مستقل اجرا شد.

در فرایند ساخت، مقادیر تعیین شده پسماند مولکولارسیو و PET به ترتیب جایگزین سیمان و ماسه شده و با سایر اجزا مخلوط شد. قالب‌ها پیش از بتن‌ریزی روغن‌کاری شدند. بتن در سه لایه در قالب ریخته شد و هر لایه مطابق لزوم ASTM C192 با ۲۰ ضربه میله کوبنده متراکم شد. استفاده از میله کوبنده، مطابق با استاندارد ASTM C192 برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بتن، روشی استاندارد برای تراکم یکنواخت و حذف هوای اضافی در حجم‌های کوچک بتن است. در ادامه، فرایند آزمون اسلامپ روی خمیر بتنی مطابق با استاندارد ملی ایران (ISIRI 3203-2) انجام شد. پس از گذشت ۲۴ ساعت و اطمینان از گیرش اولیه، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج و به مرحله‌ی عمل‌آوری منتقل شدند. در این مرحله، نمونه‌ها به منظور حفظ رطوبت کافی و تداوم واکنش‌های هیدراتاسیون، به مدت ۲۸ روز در ظروف پلاستیکی در دمای آزمایشگاه (۲۳±۲ °C) نگهداری شدند. انتخاب این رویکرد (مطابق با الزامات استانداردهای ASTM C192 و ASTM C511)، با هدف پیشگیری از تبخیر سریع آب و کنترل فرآیندهای تبادل یونی بین محیط عمل‌آوری و ترکیبات شیمیایی موجود در پسماندها صورت پذیرفت. این رویکرد تضمین‌کننده پایداری ترکیب شیمیایی خمیر سیمان در طول دوره عمل‌آوری بوده و امکان حصول نتایج دقیق‌تر در آزمون‌های بعدی را فراهم می‌آورد. در ادامه، نمونه‌های بتنی با هدف ارزیابی تأثیر شرایط مختلف بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن در شرایط مختلف از جمله وزن اولیه نمونه‌ها پس از خارج‌سازی از پوشش پلاستیکی و اندازه‌گیری وزن خشک پس از قرارگیری در کوره با دمای ۱۰۵±۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت توزین شدند. پس از انجام این مراحل، نمونه‌ها برای تعیین مقاومت فشاری تحت بارگذاری قرار گرفتند. داده‌های حاصل برای تحلیل آماری، ارزیابی دقیق تأثیر متغیرهای طراحی و استخراج طرح مخلوط بهینه با بهره‌گیری از ابزار تابع مطلوبیت به نرم‌افزار منتقل شده و مورد پردازش قرار گرفت.

جدول ۱. سطوح تغییرات پارامترها

Table 1. Parameter change levels

Factor	Unit	+ α	Level Level Level	Level Level Level	- α
		(+1)	(0)	(-1)	
Cement content (A)	g	200	250	300	350
Molecular sieve / Cement ratio (B)	%	5	11.25	17.5	23.75
PET / Sand ratio (C)	%	2	4	6	8
Water-to-cement ratio (D)	%	40	45	50	55

۲-۲- مدل سازی و طراحی آزمایش

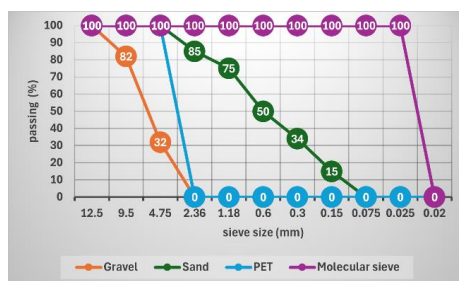
فرایند طراحی آزمایش‌ها با شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر اساس مطالعات پیشین، داده‌های تجربی و آزمون‌های مقدماتی و تعیین فضای طراحی مناسب آغاز شد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش RSM و طرح CCD در نرم‌افزار Design Expert (نسخه ۱۳) انجام شد. در این طرح، مقدار پارامتر α برابر با ۲ در نظر گرفته شد؛ این انتخاب، مطابق با راهنمای نرم‌افزار و استاندارد طرح‌های CCD چهارعاملی، ضمن حفظ محدوده عملی متغیرها، امکان برآزش دقیق مدل درجه دوم را فراهم می‌آورد و بررسی آثار خطی، درجه دوم و متقابل عوامل مستقل را میسر می‌سازد. چهار متغیر مستقل شامل مقدار سیمان (A)، نسبت مولکولارسیو به سیمان (B)، نسبت PET به ماسه (C) و نسبت آب به سیمان (D) و دو پاسخ مقدار تخلخل و مقاومت فشاری به‌عنوان عوامل اصلی طراحی انتخاب شدند.

مقدار سیمان در محدوده ۲۰۰ تا ۴۰۰ گرم بر اساس دامنه متداول مصرف سیمان در بتن‌های مشابه و نیز ارزیابی‌های زیست‌محیطی پژوهش تعیین شد. برای نسبت مولکولارسیو، با وجود آنکه آیین‌نامه بتن ایران (آبا) بازه ۵ تا ۱۵ درصد را برای مواد پوزولانی مشابه توصیه می‌کند، محدوده ۵ تا ۳۰ درصد انتخاب شد تا امکان بررسی آثار فراتر از حدود آیین‌نامه‌ای و ارزیابی ظرفیت پوزولانی این ماده فراهم شود. محدوده ۲ تا ۱۰ درصد برای جایگزینی PET نیز بر مبنای مطالعات گذشته و نتایج آزمون‌های اولیه انتخاب شد؛ به‌طوری‌که مقادیر کمتر از ۲ درصد اثر محسوسی بر خواص بتن ندارند و مقادیر بیش از ۱۰ درصد موجب افت شدید مقاومت فشاری به دلیل افزایش حفرات و کاهش چسبندگی در ماتریس سیمانی می‌شوند [9, 12 & 13]. همچنین نسبت آب به سیمان در دامنه ۴۰ تا ۶۰ درصد بر مبنای محدوده رایج در بتن‌های سازه‌ای و به منظور بررسی هم‌زمان تأثیر این نسبت بر مقاومت و دوام انتخاب شد. این بازه‌ها از نظر علمی معتبر بوده و پوشش‌دهنده دامنه رفتاری مطلوب برای فرایند

بهینه‌سازی هستند. هر یک از این متغیرها در پنج سطح کدگذاری شده ($-\alpha$ ، -1 ، 0 ، $+1$ و $+\alpha$) مورد بررسی قرار گرفتند. مقادیر کمی سطوح متغیرهای مستقل در جدول (۱) ارائه شده است. در همین راستا، تعداد ۳۰ آزمایش که شامل ۶ تکرار در نقطه مرکزی بود، تنظیم، طراحی و اجرا شد.

۲-۳- ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

به منظور محاسبات طرح مخلوط و ارزیابی اثر پسماندها بر مشخصه‌های بتن، چگالی پسماند مولکولارسیو با استفاده از بالن لوشاتلیه اندازه‌گیری شد که برابر با $2/43 \text{ g/cm}^3$ به‌دست آمد. چگالی پسماند PET نیز $1/40 \text{ g/cm}^3$ تعیین شد. مقادیر چگالی سیمان پرتلند ($3/15 \text{ g/cm}^3$) و ماسه طبیعی ($2/25 \text{ g/cm}^3$) مطابق با استانداردهای رایج در نظر گرفته شد. پارامترهای طرح مخلوط بر اساس طرح‌های پیشنهادی نرم‌افزار Design Expert تنظیم شد. در این طرح‌ها، سهم سنگدانه‌های درشت (شن با دانه‌بندی ۴/۷۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر) و سنگدانه‌های ریز (ماسه با اندازه کمتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) به‌ترتیب ۴۲ و ۳۳ درصد از کل وزن بتن تعیین شد. شکل (۱)، منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی بر مبنای روش ملی طرح مخلوط ایران را نشان می‌دهد. در این نمودار، درصد عبوری و مانده ترکیبات بر اساس الک‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه، برای سنگدانه‌های درشت (شن)، مقادیر کمتر از ۴/۷۵ میلی‌متر به دلیل عدم حضور در ترکیب واقعی بتن، صفر لحاظ شده‌اند. در ادامه، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در ظروف پلاستیکی، نمونه‌ها در حالت‌های مختلف از قبیل وزن اولیه پس از خروج از پوشش پلاستیکی و وزن اشباع پس از غوطه‌وری در آب توزین شدند. این مقادیر مبنای محاسبه شاخص‌های فیزیکی بتن قرار گرفتند.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها و پسماندهای مولکولارسیو و PET
Fig. 1. Gradation Curve of Aggregates and Molecular Sieve & PET Wastes

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان

Table 2. Chemical characteristics of cement

Chemical composition	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Content (%)	0.54	0.22	1.71	1.96	63.1	3.56	3.38	21.25

۲-۴- آزمایشات انجام شده

۲-۴-۱- مقاومت فشاری تک محوره

آزمایش مقاومت فشاری تک محوره مطابق با استاندارد ۳-۱۶۰۸ آیین نامه بتن ایران با هدف بررسی ظرفیت نمونه ها در تحمل تنش های فشاری و ارزیابی عملکرد آن ها در فرایند تثبیت و جامدسازی مواد زائد انجام شد. در این پژوهش، به دلیل استفاده از پسماند خطرناک مولکولارسیو که حاوی مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین بوده است، ملاک ارزیابی بر اساس دستورالعمل های سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) انتخاب شد. بر اساس معیارهای EPA، حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای مواد تثبیت و جامدسازی شده که به منظور دفن ایمن در محل های دفع پسماند استفاده می شوند، برابر با ۰/۳۵ مگاپاسکال است.

۲-۴-۲- تعیین اسلامپ نمونه های بتنی

آزمون اسلامپ (Slump Test) بتن به عنوان روشی استاندارد برای ارزیابی کارایی بتن تازه پیش از استفاده در سازه های بتنی مطابق با استاندارد ملی ایران (ISIRI 3203-2) انجام شد. قالب اسلامپ با ارتفاع ۳۰۰ میلی متر و قطرهای دهانه بالایی ۱۰۰ میلی متر و پایینی ۲۰۰ میلی متر مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا، بتن در سه لایه متوالی داخل قالب اسلامپ ریخته شد و هر لایه با اعمال ۲۵ ضربه یکنواخت توسط کوبنده متراکم شد. پس از تکمیل فرایند تراکم، قالب در بازه زمانی ۵ تا ۱۰ ثانیه به صورت عمودی برداشته شد و مقدار افت اسلامپ با دقت ۱۰ میلی متر اندازه گیری شد.

۲-۴-۳- تعیین تخلخل نمونه های بتنی

تخلخل نقش تعیین کننده ای در دوام، مقاومت مکانیکی و نفوذپذیری بتن دارد. در این پژوهش، درصد تخلخل نمونه های بتنی با استفاده از روش اشباع خشک تعیین شد. بدین منظور، نمونه ها ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای 105 ± 5 درجه سانتی گراد خشک شدند تا تمامی رطوبت آزاد و جذب شده حذف

شود. پس از رسیدن نمونه ها به دمای محیط، وزن خشک آن ها (W_d) با ترازوی دیجیتال اندازه گیری شد. در مرحله بعد، نمونه های خشک شده به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه ور شدند تا منافذ باز موجود در ساختار بتن به طور کامل اشباع شود. پس از خروج از آب، رطوبت سطحی نمونه ها حذف شده و وزن اشباع (W_s) ثبت شد. حجم کل نمونه (V_t) با توجه به شکل هندسی مکعبی آن و مطابق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$V_t = a^3 = 10^3 = 1000 \text{ cm}^3 \quad (1)$$

حجم منافذ (V_v)، که معادل حجم آب جذب شده توسط نمونه است، از اختلاف وزن نمونه در حالت اشباع و خشک و بر اساس چگالی آب، مطابق رابطه (۲) به دست آمد:

$$V_v = \frac{(W_s - W_d)}{\rho_w} \quad (2)$$

که در آن، چگالی آب (ρ_w) برابر با ۱ گرم بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته شد.

در نهایت، درصد تخلخل نمونه های بتنی (P) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$P = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (3)$$

۲-۵- مواد اولیه

در این پژوهش، مواد مصرفی مختلفی به کار گرفته شد که شامل پسماند مولکولارسیو نوع A با نام تجاری HYG03C تهیه شده از پتروشیمی مروارید، پسماند بطری های PET، سیمان استاندارد پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان فیروزکوه (ترکیب شیمیایی آن در جدول (۲) ارائه شده است)، شن و ماسه طبیعی و روغن (به منظور عایق کاری قالب ها) بود. آب و آب مقطر نیز به عنوان اجزای دیگر این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۵-۱- پسماند مولکولارسیو HYG03C

پسماند مورد استفاده در این پژوهش، Molecular Sieve HYG03C است که بیشتر به عنوان ژئولیت سنتزی نوع A با پایه

پتاسیم-سدیم در واحد خشک‌سازی گاز در پتروشیمی مروراید عسلویه به کار گرفته می‌شد. این ماده پس از پایان عمر مفید خود جمع‌آوری شد. بر اساس اطلاعات فنی ارائه شده توسط سازنده، مولکولارسیو HYG03C دارای مشخصات زیر است:

- نوع: ژئولیت سنتزی نوع A
- ساختار کریستالی: پتاسیم-سدیم
- کاربرد اصلی: آبگیری (جذب رطوبت) جریان‌های هیدروکربنی غیراشباع در واحدهای صنعتی.
- اندازه ذرات (قطر): ۲ mm (برای کاربرد اصلی جذب رطوبت)
- چگالی حجمی فشرده (Bulk Density): $\leq 0.66 \text{ g/ml}$ (مطابق با ASTM D 4164)
- مقاومت در برابر خرد شدن (Crush Strength): $\leq 40 \text{ N}$ (مطابق با ASTM D 4179)
- ظرفیت جذب آب در حالت تعادل (Equilibrium Water Uptake): $\leq 20\%$ درصد وزنی (در ۵۰ درصد رطوبت نسبی و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، مطابق با ASTM E 104)
- محتوای رطوبت (Moisture Content): $\geq 1\%$ درصد وزنی (پس از حرارت‌دهی به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد، مطابق با BS 3482-2)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایشات مکانیکی

در ابتدا، کارایی مخلوط‌های بتنی با انجام آزمون اسلامپ ارزیابی شد. مقدار اسلامپ تمامی نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر مطابق جدول (۳) قرار گرفتند که نشان‌دهنده روانی مناسب برای دستیابی به تراکم مطلوب و یکنواخت است. افزایش نسبت آب به سیمان، مطابق انتظار، منجر به افزایش روانی و اسلامپ شد. همچنین، افزودن پسماند مولکولارسیو تا ۱۵ درصد وزنی سیمان و ۴ درصد وزنی PET (نسبت به ماسه)، ضمن تأثیر بر سایر خواص، اسلامپ را در محدوده قابل قبولی حفظ کرد و حتی در مواردی نسبت به نمونه‌های شاهد، بهبود بخشید. یک مشاهده دارای اهمیت در خصوص پسماند مولکولارسیو، کاهش قابل توجه ظرفیت جذب آب آن بود. این پسماند صنعتی، با وجود ماهیت جاذب رطوبت مولکولارسیو، به دلیل کاربرد قبلی در صنایع پتروشیمی و

فرآیندهای پس از آن، خاصیت جذب رطوبت خود را به شدت از دست داده بود. این یافته در بررسی‌های اولیه، از جمله آزمون الک تر که به دلیل جذب ناکافی آب نتایج دقیقی ارائه نداد، تأیید شد. این کاهش جذب آب به این معنی است که پسماند، آب آزاد مخلوط بتن را به میزان ناچیزی مصرف کرده است. بنابراین، مقادیر اسلامپ مشاهده شده منطقی بوده و روانی کافی برای تراکم مؤثر را تضمین می‌کند. این وضعیت، نیاز به افزودنی‌های روان‌کننده را مرتفع ساخته و ضمن اطمینان از تکمیل واکنش‌های هیدراسیون سیمان، دستیابی به تراکم مناسب را تسهیل می‌نماید. مهم‌تر از آن، از بروز مشکلات احتمالی ناشی از جذب آب بیش از حد پسماند (مانند کاهش شدید اسلامپ، دشواری تراکم، افزایش تخلخل و کاهش مقاومت فشاری) جلوگیری می‌کند.

نتایج آزمون‌های تخلخل و مقاومت فشاری (که جزئیات آن‌ها در بخش‌های پیشین و جدول (۳) ارائه شده است) عملکرد مطلوب نمونه‌ها را تأیید می‌کنند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که پسماند مولکولارسیو HYG03C، با وجود کاهش ظرفیت جذب آب، بدون ایجاد اختلال در کارایی (اسلامپ) یا تضعیف خواص مکانیکی نهایی، با موفقیت در بتن مورد استفاده قرار گرفته و پتانسیل بهبود خواص بلندمدت را از طریق افزایش سطح مؤثر ذرات برای واکنش‌های هیدراسیون فراهم می‌آورد.

۳-۲- تجزیه و تحلیل مدل و داده‌های آماری

در مدلسازی این پژوهش، تخلخل و مقاومت فشاری به عنوان پاسخ‌های اصلی نرم‌افزار در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به احتمال همبستگی بالا بین چگالی و تخلخل، بررسی تخلخل به عنوان شاخصی مؤثر در دوام بلند مدت بتن در اولویت قرار گرفته است. جدول (۳) نتایج برخی از آزمایش‌هایی را که روی نمونه‌های بتنی و با بهره‌گیری از روش RSM انجام شده‌اند را ارائه می‌کند.

۳-۲-۱- بررسی اعتبار مدل‌ها با استفاده از ضرایب تعیین

اعتبار مدل‌های پیشنهادی با استفاده از ضرایب تعیین و شاخص‌های رگرسیونی ارزیابی شده است تا میزان تطابق بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده بررسی شود. جدول ۴، آمار برازش و مقادیر ضرایب تعیین مربوط به مدل‌های پیش‌بینی تخلخل و مقاومت فشاری را ارائه می‌دهد.

Comment [WU 1]: این نوشته ها با دقت بررسی شود. به هم نریخته باشد؟

جدول ۳. نتایج آزمایشات انجام شده به روش سطح پاسخ

Table 3. Results of tests conducted using the response surface method

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Response 1	Response 2	
Run	A:Cement gr	B:Molecular sieve/Cement %	C:PET/Sand %	D:Water/Cement %	porosity %	Compressive strength MPa	Slump mm
1	250	11.25	4	55	5.65	21.9	90
2	250	11.25	8	45	6.4	19.94	81
3	350	23.75	4	55	5.25	29.5	85
4	300	17.5	6	50	4.8	25.8	86
5	350	23.75	8	45	6.1	25.5	73
6	350	11.25	8	55	5.72	27.5	94
7	250	23.75	4	45	5.8	22.5	85
8	350	11.25	4	45	4.39	31.1	50
9	250	23.75	8	55	7.47	16.5	100
10	300	17.5	6	50	4.8	25.5	85
11	350	11.25	8	45	5.37	27.57	66
12	250	11.25	8	55	6.52	18.34	96
13	300	17.5	6	50	4.6	26.4	87
14	350	23.75	8	55	6.3	26.6	90
15	350	11.25	4	55	4.25	33.3	70
16	250	11.25	4	45	5	23.7	75
17	350	23.75	4	45	4.7	28.8	64
18	250	23.75	4	55	6.38	21.79	98
19	250	23.75	8	45	6.8	20.9	91
20	300	17.5	6	50	4.5	26.6	85
21	400	17.5	6	50	4.45	33.8	72
22	200	17.5	6	50	6.3	16.41	85
23	300	17.5	6	40	6.5	25.4	83
24	300	17.5	2	50	4.2	28	75
25	300	17.5	6	60	7.2	24.5	99
26	300	17.5	6	50	4.71	26	84
27	300	5	6	50	5	26.12	75
28	300	17.5	6	50	4.75	26.2	88
29	300	30	6	50	6.5	23.4	97
30	300	17.5	10	50	6.68	20	95

جدول ۴. آمار برازش

Table 4. Fit Statistics

Factor	Porosity	Compressive strength
R ²	0.9978	0.9970
Adjusted R ²	0.9954	0.9937
Predicted R ²	0.9845	0.9764
C.V. %	1.2700	1.1400
Adeq Precision	65.3228	63.0023

رگرسیون را در پیش‌بینی تخلخل و مقاومت فشاری تأیید می‌کند. مقدار نزدیک به عدد یک R^2 ، $Adjusted R^2$ و $Predicted R^2$ برای پاسخ‌ها، به ترتیب نشان‌دهنده تطابق بالای مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی و توانایی آن‌ها در توضیح واریانس موجود در داده‌ها، بیش‌برازش (Overfitting) نشدن مدل‌ها و برخورداری از قابلیت مدل‌ها در پیش‌بینی داده‌های جدید می‌باشد. مقادیر پایین ضریب تغییرات (Coefficient of Variation-C.V.) نشان‌دهنده‌ی پراکندگی کم داده‌ها و دقت بالای مدل‌ها در برآورد پاسخ‌های

نتایج ارائه شده در جدول (۴)، عملکرد دقیق و کارآمد مدل‌های

مستقل بر پاسخ‌ها انجام شد. این روش، میزان تطابق مدل با داده‌های آزمایشگاهی را مشخص کرده و اعتبار پیش‌بینی‌های انجام شده را ارزیابی می‌کند. مهم‌ترین شاخص در آنالیز واریانس، مقدار احتمال P-value (Probability value) است که احتمال رخداد یک داده تحت فرضیه باطل را نشان می‌دهد. در مدل‌هایی با اطمینان بالا (از جمله مدل پژوهش حاضر)، مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ است که به معنای تأثیر معنادار پارامترهای مربوطه بر پاسخ‌های مدل با سطح اطمینان بالاتر از ۹۵ درصد است. نتایج ANOVA مربوط به مدل‌های پیش‌بینی تخلخل و مقاومت فشاری در جدول (۵) ارائه شده‌اند.

مطابق این جدول، مدل به خوبی داده‌ها را برازش کرده و هیچ مشکل معناداری در تطابق مدل با داده‌های تجربی وجود ندارد. به عبارتی مدل‌ها از نظر آماری معنادار بوده و مقادیر P-value کمتر از ۰/۰۵ و F-Value بالا نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل‌ها و تأثیر معنادار فاکتورها بر پاسخ‌ها است. تمامی فاکتورهای اصلی A، B، C و D تأثیر معناداری بر پاسخ‌ها دارند و علاوه بر آن، آثار درجه دوم

آزمایشی است. علاوه بر این، مقدار شاخص کفایت سیگنال (Adeq Precision) نشان‌دهنده قدرت بالای مدل‌ها در تفکیک سیگنال از نویز و قابلیت اعتماد آن‌ها در تحلیل داده‌ها است. در همین راستا بررسی آنالیز نرمالیتی باقی‌مانده‌ها نشان داد که نقاط داده در امتداد خط نرمال قرار گرفته‌اند و این موضوع بیانگر نرمال بودن خطاها و رعایت الزامات مدل رگرسیونی است. انطباق نزدیک مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده نیز نشان داد که مدل RSM توانایی بالایی در پیش‌بینی رفتار بتن دارد و پراکندگی اندک نقاط حول خط ۴۵ درجه (شکل آن در متن آورده نشده است) مؤید دقت مدل است. علاوه بر این، الگوی پراکندگی باقی‌مانده‌ها حاکی از آن بود که خطاها فاقد الگوی سیستماتیک بوده و مدل در کل محدوده متغیرها پایدار است.

۳-۲-۲- بررسی اعتبار مدل‌ها به کمک آنالیز واریانس‌ها (ANOVA)

آنالیز واریانس (Analysis of Variance-ANOVA) به منظور بررسی معناداری مدل‌ها و ارزیابی میزان اثرگذاری متغیرهای

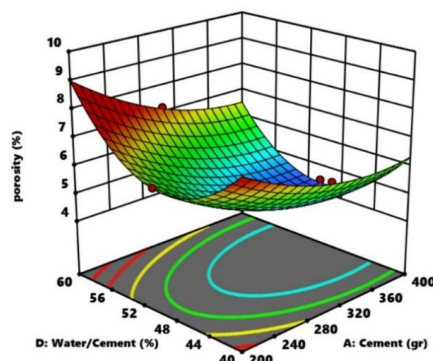
جدول ۵. آنالیز واریانس جهت بررسی تخلخل و مقاومت فشاری به روش سطح پاسخ

Table 5. Analysis of variance to investigate porosity and compressive strength using the response surface method

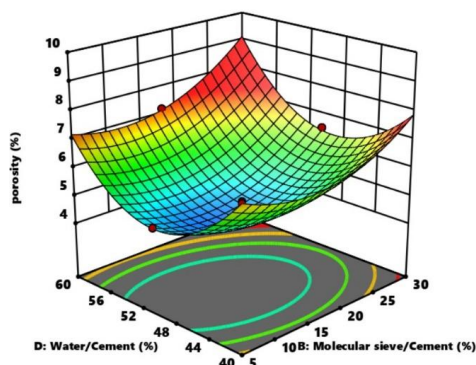
Source	Porosity					Compressive strength					
	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-value	p-value	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-value	p-value	
Block	0.2449	2	0.1224			3.41	2	1.71			
Model	26.61	14	1.90	420.95	< 0.0001	535.59	14	38.26	306.12	< 0.0001	significant
A-Cement	5.65	1	5.65	1250.15	< 0.0001	409.04	1	409.04	3272.98	< 0.0001	
B-Molecular sieve/Cement	3.01	1	3.01	666.65	< 0.0001	11.62	1	11.62	92.98	< 0.0001	
C-PET/Sand	8.43	1	8.43	1865.76	< 0.0001	87.17	1	87.17	697.53	< 0.0001	
D-Water/Cement	0.7993	1	0.7993	177.01	< 0.0001	1.70	1	1.70	13.57	0.0028	
AB	0.0042	1	0.0042	0.9356	0.3511	2.96	1	2.96	23.67	0.0003	
AC	0.0182	1	0.0182	4.04	0.0658	0.1089	1	0.1089	0.8714	0.3676	
AD	0.0702	1	0.0702	15.55	0.0017	9.67	1	9.67	77.39	< 0.0001	
BC	0.0020	1	0.0020	0.4484	0.5148	0.7921	1	0.7921	6.34	0.0257	
BD	0.0650	1	0.0650	14.40	0.0022	0.2601	1	0.2601	2.08	0.1728	
CD	0.0056	1	0.0056	1.25	0.2846	1.80	1	1.80	14.37	0.0022	
A²	0.6519	1	0.6519	144.36	< 0.0001	1.62	1	1.62	12.93	0.0033	
B²	1.69	1	1.69	373.32	< 0.0001	2.97	1	2.97	23.75	0.0003	
C²	0.7966	1	0.7966	176.40	< 0.0001	7.39	1	7.39	59.11	< 0.0001	
D²	7.50	1	7.50	1660.87	< 0.0001	2.17	1	2.17	17.39	0.0011	
Residual	0.0587	13	0.0045			1.62	13	0.1250			
Lack of Fit	0.0529	10	0.0053	2.74	0.2205	1.54	10	0.1540	5.43	0.0952	not significant
Pure Error	0.0058	3	0.0019			0.0850	3	0.0283			
Cor Total	26.92	29				540.62	29				

کاهش یافته و ساختار بتن متراکم و کم تخلخل می شود. این رفتار با یافته ها LeBow در سال 2018 همخوانی دارد، که نشان داد افزایش سیمان در محدوده بهینه موجب کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری می شود، در حالی که نسبت بالای آب به سیمان تخلخل را افزایش داده و عملکرد مکانیکی بتن را کاهش می دهد [17].

شکل (۳) اثر برهم کنش نسبت مولکولارسیو به سیمان و نسبت آب به سیمان بر تخلخل بتن را نشان می دهد. نتایج بیانگر آن است که تخلخل بتن به طور هم زمان تحت تأثیر مقدار مولکولارسیو و نسبت آب به سیمان قرار دارد و کمینه تخلخل تنها در یک ناحیه بهینه از فضای طراحی حاصل می شود. در این ناحیه، که متناظر با



شکل ۲. نمودار سه بعدی اثر متقابل سیمان و نسبت آب به سیمان بر تخلخل
Fig. 2. Three-dimensional diagram of the interaction effect of cement and water-to-cement ratio on porosity



شکل ۳. نمودار سه بعدی اثر متقابل نسبت مولکولارسیو به سیمان و نسبت آب به سیمان بر تخلخل
Fig. 3. Three-dimensional diagram of the interaction effect of molecular sieve to cement ratio and water to cement ratio on porosity

(A^2 , B^2 , C^2 , D^2) و برخی تعاملات مانند AD نیز معنادار هستند. این موضوع نشان دهنده وجود تعاملات غیرخطی میان فاکتورها است که می تواند نقش مهمی در تغییرات تخلخل و مقاومت فشاری ایفا کند. مقدار Residual برای تخلخل و مقاومت فشاری پراکندگی کم داده های باقی مانده را نشان می دهد و تأیید می کند که مدل برازش دقیقی با داده های آزمایشگاهی دارد. مقدار Lack of Fit با F-Value معادل $2/74$ برای تخلخل و $5/43$ برای مقاومت فشاری و P-value برابر با $0/2205$ برای تخلخل و $0/0952$ برای مقاومت فشاری نیز نشان می دهد که مدل از دقت و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است.

در همین راستا، مدل نهایی حاصل از تحلیل رگرسیون بر پایه مقادیر کد شده عوامل آزمایشگاهی، پس از اعمال تحلیل معناداری آماری و حذف متغیرهای فاقد اثر معنادار، به صورت رابطه ۴ و ۵ به دست آمد.

$$\text{Porosity} = 4.69 - 0.485A + 0.354B + 0.593C + 0.183D - 0.066AD + 0.064BD + 0.154A^2 + 0.248B^2 + 0.170C^2 + 0.523D^2 \quad (4)$$

$$\text{Compressive Strength} = 26.08 + 4.13A - 0.70B - 1.91C - 0.27D - 0.43AB + 0.78AD + 0.22BC - 0.34CD - 0.24A^2 - 0.33B^2 - 0.52C^2 - 0.28D^2 \quad (5)$$

تحلیل این روابط نشان می دهد که با افزایش یا کاهش مقدار متغیرهای طراحی، هر کدام از پاسخ ها به صورت معناداری افزایش و یا کاهش می یابند. به عبارتی، ضرایب مثبت متغیرها حاکی از اثر افزایشی و ضرایب منفی آن ها حاکی از اثر کاهششی بر پاسخ ها هستند.

۳-۳- تحلیل برهم کنش پارامترهای اثرگذار بر تخلخل بتن

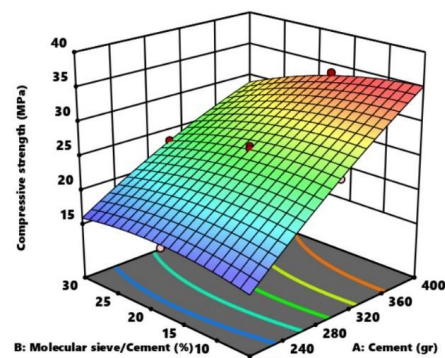
شکل (۲) اثر متقابل مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان را بر تخلخل بتن نشان می دهد. در مقادیر پایین سیمان ($200-280$ کیلوگرم بر مترمکعب) و نسبت آب به سیمان بالا ($0/56-0/60$)، تخلخل به بیشترین مقدار خود می رسد که ناشی از عدم وجود خمیر سیمان کافی برای پر کردن خلل و فرج و تبخیر آب اضافی پس از گیرش اولیه است و در امتداد آن چالش هایی برای هیدراتاسیون مؤثر سیمان و تشکیل فازهای چسبنده C-S-H و بهبود پیوستگی ماتریس سیمانی را به همراه دارد. در مقابل، در مقادیر بالای سیمان ($320-400$ کیلوگرم بر مترمکعب) و نسبت آب به سیمان پایین ($0/40-0/48$)، تخلخل به کمترین مقدار خود

۳-۴- رفتار مقاومت فشاری

تحلیل نتایج شکل (۴) نشان‌دهنده تأثیر غالب مقدار سیمان بر مقاومت فشاری بتن است؛ افزایش میزان سیمان به طور مستقیم با افزایش شدت واکنش‌های هیدراسیون، تشکیل فازهای C-S-H، بهبود پیوستگی ماتریس سیمانی و کاهش تخلخل همراه بوده و منجر به افزایش قابل توجه مقاومت می‌شود. در مقابل، نسبت جایگزینی سیمان با پسماند مولکولاریسیو اثر غیرخطی از خود بروز می‌دهد. درصدهای جایگزینی تا ۱۰-۱۵ درصد، تغییر محسوسی در مقاومت ایجاد نکرده و حتی پتانسیل اثر پوزولانی (Pozzolanic effect) این ماده را با تشکیل فازهای C-S-H ثانویه و بهبود ریزساختار خمیر سیمان، نمایان می‌سازد. این رفتار تا حدودی با یافته‌های (Shi و همکاران (۲۰۲۲)، Farzaneh و همکاران (۲۰۱۹) و Golshan و همکاران (۲۰۲۴)) مطابقت دارد [19, 20, &21]. با این حال، افزایش نسبت مولکولاریسیو به بیش از ۱۵-۲۰ درصد منجر به کاهش معنادار مقاومت فشاری می‌شود. این افت عملکرد به عواملی چون کاهش سهم فازهای فعال سیمانی، محدودیت در تشکیل محصولات هیدراتاسیون و افزایش تخلخل ذاتی ذرات مولکولاریسیو و ضعف در فصل مشترک (Interfacial Transition Zone - ITZ) نسبت داده می‌شود. تشدید این کاهش مقاومت با نسبت آب به سیمان بالا شکل (۹) مؤید اهمیت کنترل تخلخل و کیفیت ITZ است.

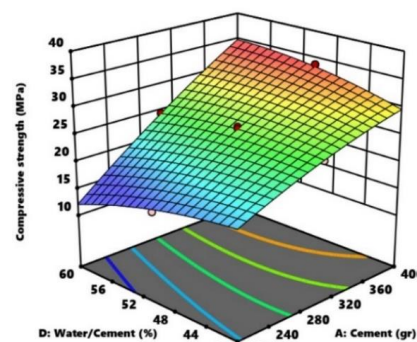
در همین راستا، بهینه‌سازی طرح مخلوط، که در بخش ۳-۵ تشریح شده، کمینه‌سازی تخلخل را به عنوان یک معیار کلیدی برای تضمین مقاومت فشاری و پایداری بلندمدت بتن در نظر گرفته است. نتایج نشان داد که بیشینه مقاومت فشاری بتن در محدوده مصرف ۳۰۰ تا ۴۰۰ گرم سیمان و با جایگزینی کمتر از ۱۵ درصد پسماند مولکولاریسیو حاصل می‌شود. با وجود کاهش مقاومت در درصدهای بالاتر جایگزینی، ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از کاهش مصرف سیمان، استفاده از مقادیر بالاتر مولکولاریسیو را در کاربردهای غیرسازه‌ای یا بتن سبک توجیه‌پذیر می‌سازد.

نتایج شکل (۵) بیانگر آن است که افزایش نسبت آب به سیمان موجب کاهش محسوس مقاومت فشاری می‌شود؛ به طوری که در نسبت‌های بالای آب به سیمان، آب آزاد اضافی پس از تبخیر منجر به افزایش تخلخل، کاهش تراکم ژل C-S-H و تضعیف پیوستگی



شکل ۴. نمودار سه بعدی اثر متقابل سیمان و نسبت مولکولاریسیو به سیمان بر مقاومت فشاری

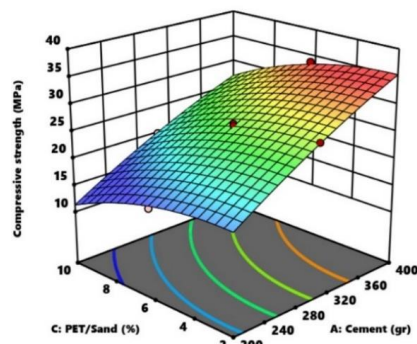
Fig. 4. Three-dimensional diagram of the interaction effect of cement and molecular sieve to cement ratio on compressive strength



شکل ۵. نمودار سه بعدی اثر متقابل سیمان و نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری

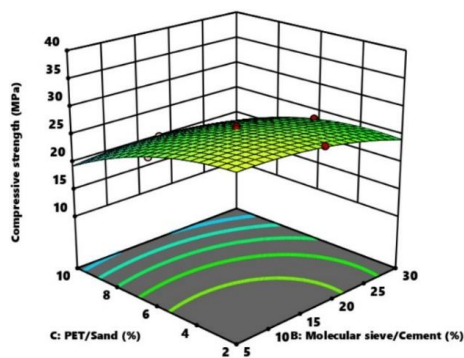
Fig. 5. Three-dimensional diagram of the interaction effect of cement and water-to-cement ratio on compressive strength

مقادیر نسبتاً پایین مولکولاریسیو (حدود ۱۰-۱۵ درصد) و نسبت آب به سیمان در بازه ۰/۴۸-۰/۵۲ است، ساختار بتن متراکم‌تر بوده و پیوستگی ماتریس سیمانی در وضعیت مطلوبی قرار دارد. در این شرایط، حضور محدود ماده متخلخل در کنار کنترل آب آزاد موجب کاهش فضاهای خالی، بهبود هیدراتاسیون مؤثر سیمان و در نتیجه کاهش تخلخل کل می‌شود. این رفتار با نتایج گزارش‌شده توسط Jierula و همکاران (۲۰۲۴)، Shi و همکاران (۲۰۲۲) و Zheng و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد که کاهش تخلخل را به تعادل مناسب میان مواد متخلخل و خمیر سیمان نسبت داده‌اند [16, 18, &19].



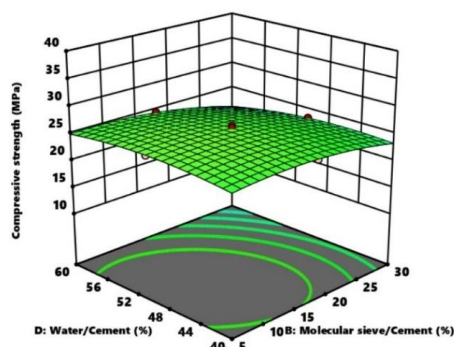
شکل ۶. نمودار سه بعدی اثر متقابل سیمان و نسبت PET به ماسه بر مقاومت فشاری

Fig. 6. Three-dimensional diagram of the interaction effect of cement and PET to sand ratio on compressive strength



شکل ۷. نمودار سه بعدی اثر متقابل نسبت مولکولارسیو به سیمان و نسبت PET به ماسه بر مقاومت فشاری

Fig. 7. Three-dimensional diagram of the interaction effect of molecular sieve to cement ratio and PET to sand ratio on compressive strength



شکل ۸. نمودار سه بعدی اثر متقابل نسبت مولکولارسیو به سیمان و نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری

Fig. 8. Three-dimensional diagram of the interaction effect of molecular sieve to cement ratio and water to cement ratio on compressive strength

ماتریس سیمانی می‌شود. بیشترین مقاومت فشاری در ترکیب مقدار سیمان بالا و نسبت آب به سیمان پایین مشاهده می‌شود، در حالی که کمترین مقاومت مربوط به مقادیر پایین سیمان همراه با نسبت‌های بالای آب به سیمان است. این نتایج با یافته‌های Lebow (۲۰۱۸)، Jierula و همکاران (۲۰۲۴) و Zheng و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد؛ در این مطالعات نیز گزارش شده است که کنترل نسبت آب به سیمان و تأمین مقدار بهینه سیمان، موجب کاهش تخلخل، بهبود ریزساختار و افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود [18-16].

نتایج شکل (۶) بیانگر آن است که با افزایش نسبت PET به بیش از حدود ۶ تا ۸ درصد، مقاومت فشاری بتن به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این کاهش به ضعف چسبندگی ذرات PET با ماتریس سیمانی و ایجاد ناپوستگی در ناحیه انتقالی بین فازهای آلی و معدنی نسبت داده می‌شود. افزایش مقدار سیمان اثر غالب و تقویت‌کننده‌ای بر مقاومت فشاری دارد. بیشترین مقاومت فشاری در ترکیب مقدار سیمان ۳۶۰ تا ۴۰۰ گرم و نسبت PET کمتر از ۶ درصد حاصل می‌شود، در حالی که کمترین مقاومت مربوط به مقادیر پایین سیمان همراه با درصدهای بالای PET است. این نتایج با مطالعات پیشین همخوانی دارد؛ Qaidi و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که جایگزینی بالای PET موجب افزایش تخلخل و افت قابل توجه مقاومت فشاری می‌شود، در حالی که مقادیر محدود آن بدون آسیب جدی به عملکرد مکانیکی قابل استفاده است [14-16]. همچنین، مرور جامع Chong و Shi (۲۰۲۳) بیان می‌کند که کاهش مقاومت بتن در حضور PET اجتناب‌ناپذیر است، اما در سطوح پایین جایگزینی، مقاومت قابل قبول باقی می‌ماند [15].

بررسی شکل (۷) بیانگر آن است که بیشینه مقاومت فشاری در محدوده مولکولارسیو ۱۰-۱۵ درصد و نسبت PET کمتر از ۵ درصد حاصل می‌شود که نشان‌دهنده امکان استفاده کنترل‌شده از این افزودنی‌ها بدون تضعیف ماتریس سیمانی است. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین در رابطه با اثر افزودنی‌ها در بتن همخوانی دارد [14, 15, & 17].

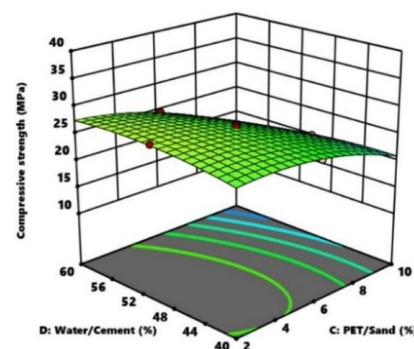
شکل (۸) نشان می‌دهد که اثر نسبت مولکولارسیو به سیمان غیرخطی است؛ جایگزینی در محدوده ۱۵ درصد، باعث بهبود نسبی مقاومت می‌شود که به واکنش پوزولانی و تشکیل C-S-H ثانویه مربوط است، اما مقادیر بالاتر مقاومت را کاهش می‌دهند.

۳-۵- بهینه سازی

طرح مخلوط بتن با استفاده از تابع مطلوبیت، با هدف کمینه سازی تخلخل و بیشینه سازی مقاومت فشاری بهینه سازی شد. تخلخل نقش کلیدی در دوام، پایداری بلندمدت بتن و تثبیت آلاینده های پسماند مولکولارسیو دارد. در این فرآیند، چهار متغیر مستقل ذکر شده در بخش های پیشین در بازه های طراحی شده مورد بررسی قرار گرفتند. در تابع مطلوبیت، کمینه سازی تخلخل با درجه اهمیت ۴ و بیشینه سازی مقاومت فشاری با درجه اهمیت ۳ به عنوان اهداف اصلی در نرم افزار Design Expert تعریف شدند. از میان ترکیبات پیشنهادی مدل، ترکیب بهینه بر اساس دستیابی هم زمان به حداقل مقدار تخلخل و بیشترین مقدار مقاومت فشاری انتخاب شد؛ به گونه ای که ضمن حفظ عملکرد مکانیکی مناسب، مصرف سیمان کاهش یابد و کمترین نسبت آب به سیمان با بیشینه استفاده از پسماندهای مولکولارسیو و PET حاصل شود. این رویکرد چندهدفه امکان دستیابی به طرح مخلوطی متعادل از نظر خواص مکانیکی، دوام و ملاحظات زیست محیطی را فراهم ساخت. نتایج بهینه سازی نشان داد که ترکیب بهینه با مطلوبیت بالا شامل ۳۹۳ گرم سیمان، ۲۱/۵۶ درصد مولکولارسیو، ۲/۸۵ درصد PET و نسبت آب به سیمان ۰/۵۱۵ است. نمونه بهینه در سه تکرار ساخته شد و تحت آزمون های آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج اسلامپ اندازه گیری شده برابر با ۷۵ میلی متر به دست آمد. نتایج آزمایشگاهی مربوط به تخلخل و مقاومت فشاری (۲۸ روزه) نمونه مذکور در جدول (۶) ارائه شده است. مقایسه مقادیر تجربی با نتایج پیش بینی شده توسط نرم افزار، تطابق قابل قبولی را نشان داد که درستی فرآیند بهینه سازی و دقت مدل آماری را تأیید می کند.

۴- نتیجه گیری

- این پژوهش برای نخستین بار نشان داد که استفاده همزمان پسماندهای مولکولارسیو و PET نه تنها بتنی با مقاومت سازه ای و کارایی مطلوب تولید می کند، بلکه:
- قابلیت استفاده همزمان از پسماندهای مولکولارسیو و PET در بتن به عنوان مصالح جایگزین، از نظر عملی و اجرایی قابل تحقق بوده و در شرایط بهینه، هیچ اختلال ساختاری در بتن ایجاد نمی کند.
 - بهبود خواص فیزیکی نمونه های بتن در ترکیب بهینه مشهود



شکل ۹. نمودار سه بعدی اثر متقابل نسبت PET به ماسه و نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری

Fig. 9. Three-dimensional diagram of the interaction effect of PET to sand ratio and water to cement ratio on compressive strength

جدول ۶. نتایج ارزیابی معیارهای اصلی در نمونه های بهینه

Table 6- Results of evaluation of main criteria in optimal samples

Porosity (%)	Compressive strength (MPa)
4.38	33.95
4.35	34.26
4.31	34.68

نتایج این بخش با پژوهش های پیشین همسو است. Shi و همکاران (۲۰۲۲) افزایش مقاومت و کاهش جمع شدگی خشک با حدود ۱۰ درصد مولکولارسیو را نشان دادند [19]. Farzaneh و همکاران (۲۰۱۹) نیز بیان کردند که مصرف محدود پسماندهای مولکولارسیو خواص مکانیکی بتن را بدون آثار منفی محیط زیستی بهبود می دهد [20]. همچنین، Golshan و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند ترکیب زئولیت و مواد مشابه مولکولارسیو دوام و مقاومت بتن خودتراکم را افزایش می دهد [21].

شکل (۹) اثر متقابل نسبت PET به ماسه و نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن را نشان می دهد. بیشترین کاهش مقاومت زمانی رخ می دهد که مقادیر بالای PET با نسبت آب به سیمان زیاد همراه شوند، که ناشی از افزایش تخلخل، کاهش پیوستگی خمیر سیمان و ضعف چسبندگی PET است. افزایش هر یک از این نسبت ها به طور مستقل یا همزمان باعث افت مقاومت می شود. در همین راستا، Qaidi و همکاران (۲۰۲۳) و Chong و Shi (۲۰۲۳) گزارش کردند که جایگزینی درصد بالای PET مقاومت فشاری را کاهش می دهد، اما مقادیر پایین آن اثر قابل توجهی ندارد [14, 15].

- استفاده از پسماند مولکولارسیو به عنوان جایگزین جزئی سیمان، امکان کاهش بیش از ۲۰ درصد مصرف سیمان را با حفظ مقاومت فشاری و دوام بتن فراهم کرد و در عین حال مصرف منابع و انتشار CO₂ را کاهش داد.

قدردانی

در صورت استفاده یا عدم حمایت از سوی مراکز یا دانشگاه‌ها به آن اشاره شود.

تعارض منافع

در این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافع وجود ندارد.

نقش نویسندگان

نقش هر یک از نویسندگان مشخص شود بر اساس استاندارد

CRediT

منابع مالی

در صورت استفاده از منابع مالی، بدان اشاره شود. در صورت عدم استفاده از منابع مالی، نیز ذکر شود.

هوش مصنوعی

در صورت استفاده یا عدم استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی به آن اشاره شود.

WU [Comment 2]: ویرایش کنید

- بود؛ به طوری که با کاهش تخلخل، مقاومت فشاری در سطح بالایی حفظ شد.
- جایگزینی بخشی از ماسه با PET باعث کاهش وزن مخصوص بتن شد که می‌تواند در سازه‌های سبک، مورد توجه قرار گیرد.
- افزودن درصدهای مناسب مولکولارسیو، به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی این ماده، منجر به اصلاح ساختار ماتریس سیمانی و کاهش تخلخل شد.
- اسلامپ بتن در محدوده مطلوب قرار داشته و کارایی آن برای استفاده در کاربردهای رایج سازه‌ای مانند تیر، ستون و دال مناسب بوده است.
- مدل‌سازی آماری و طراحی آزمایش با نرم‌افزار Design Expert، پیش‌بینی قابل‌اعتمادی از رفتار نمونه‌ها ارائه داد (مقادیر R² و P-value در بیشتر پاسخ‌ها در محدوده مطلوب بودند).
- از نظر شاخص‌های مهندسی و محیط‌زیستی، ترکیب بهینه توانست بهترین تعادل میان عملکرد فنی و پایداری محیط‌زیستی را ارائه دهند.
- افزودن جداگانه هر یک از پسماندهای مولکولارسیو و PET در نسبت‌های پایین (تا ۱۵ درصد مولکولارسیو و تا ۴ درصد PET) موجب حفظ خواص مکانیکی در محدوده معیارهای مطلوب شد.

References

- [1] Encyclopaedia Britannica, n.d. Molecular sieve. *Encyclopaedia Britannica*. Available at: <https://www.britannica.com/science/molecular-sieve> (Accessed: 15 April 2025).
- [2] Sherman, J.D., 1999. Synthetic zeolites and other microporous oxide molecular sieves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7), pp.3471–3478. doi: 10.1073/pnas.96.7.3471.
- [3] Mokhtarani, B., Alavi Moghaddam, M.R., Mokhtarani, N. and Jomeh Khaledi, H., 2006. Report: Future industrial solid waste management in Pars Special Economic Energy Zone (PSEEZ), Iran. *Waste Management & Research*, 24(3), pp.283–288. doi: 10.1177/0734242X06063641.
- [4] Jadaun, J.S., Bansal, S., Sonthalia, A., Rai, A.K. and Singh, S.P., 2022. Biodegradation of plastics for sustainable environment. *Bioresource Technology*, 347, 126697. doi: 10.1016/j.biortech.2022.126697.
- [5] Cooper, T.A., 2013. Developments in plastic materials and recycling systems for packaging food, beverages and other fast-moving consumer goods. In: Fitzgerald, R.W., ed. *Trends in Packaging of Food, Beverages and Other Fast-Moving Consumer Goods (FMCG)*. Woodhead Publishing, pp.58–107. doi: 10.1533/9780857098979.58.
- [6] Di Lorenzo, M.L., 2024. Crystallization of poly(ethylene terephthalate): A review. *Polymers*, 16(14), 1975. doi: 10.3390/polym16141975.
- [7] Fried, J.R., 2014. *Polymer Science and Technology*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- [8] Sperling, L.H., 2006. *Introduction to Physical Polymer Science*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [9] Bharadwaj, C., Purbey, R., Bora, D., Chetia, P., Maheswari R, U., Duarah, R., Dutta, K., Sadiku, E.R., Varaprasad, K. and Jayaramudu, J., 2024. A review on sustainable PET recycling: Strategies and trends. *Materials Today Sustainability*, 27, 100936. doi: 10.1016/j.mtsust.2024.100936.
- [10] Hoornweg, D. and Bhada-Tata, P., 2012. *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*.

- Washington, DC: World Bank.
- [11] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. and Van Woerden, F., 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank. doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [12] Qaidi, S., Al-Kamaki, Y., Hakeem, I., Dulaimi, A.F., Özkılıç, Y., Sabri, M. and Sergeev, V., 2023. Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*, 10, 1101146. doi: 10.3389/fmats.2023.1101146.
- [13] Chong, B.W. and Shi, X., 2023. Meta-analysis on PET plastic as concrete aggregate using response surface methodology and regression analysis. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4(1), 2. doi: 10.1186/s43065-022-00069-y.
- [14] Akkouri, N., Bourzik, O., Baba, K. and Tayeh, B.A., 2022. Thermophysical characteristics of eco-friendly mortars containing recycled PET as partial sand replacement in dry and wet conditions. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4), 238. doi: 10.1007/s41062-022-00838-4.
- [15] Resende, D.M., de Carvalho, J.M.F., Paiva, B.O., Gonçalves, G.d.R., Costa, L.C.B. and Peixoto, R.A.F., 2024. Sustainable structural lightweight concrete with recycled polyethylene terephthalate waste aggregate. *Buildings*, 14(3), 609. doi: 10.3390/buildings14030609.
- [16] Zheng, R., Xia, J., Liu, E., Zhou, Q. and Wang, H., 2025. A high water-cement ratio aerated concrete using carbon dioxide as the foaming agent: Mix design, pore structure and hydration products. *Journal of Building Engineering*, 108, 112926. doi: 10.1016/j.jobbe.2025.112926.
- [17] LeBow, C.J., 2018. *Effect of Cement Content on Concrete Performance*. Master's thesis. University of Arkansas, Fayetteville.
- [18] Jierula, A., Li, H., Chen, Y., Wu, C., Wu, X. and Yin, H., 2024. Study on the influence of density and water-cement ratio on the cement utilization, fluidity, mechanical properties, and water absorption of foam concrete. *Buildings*, 14(11), 3550. doi: 10.3390/buildings14113550.
- [19] Shi, P., Li, Z., Chen, X., Zeng, L. and Hu, R., 2022. Effect of industrial waste molecular sieves on internally cured cement-based materials. *Frontiers in Materials*, 9, 1003556. doi: 10.3389/fmats.2022.1003556.
- [20] Farzaneh, A., Mirabi, M., Jalili Ghazizadeh, M. and Abbasi, M., 2019. Identification and classification of molecular sieve waste and catalyst waste produced in petrochemical complexes and feasibility of their recycling capability. *Environmental Sciences Quarterly*, 17(1), pp.25–40. doi: 10.29252/envs.17.1.25.
- [21] Golshan, M., Avaznezhad, F. and Bazaee, A., 2024. Investigating the composition of zeolite and ceramic waste on the resistance and durability of SCC concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(2), pp.104–124. doi: 10.22065/jsce.2023.396699.3112.

Reference

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟