



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Modeling the Factors Affecting Compressive Strength and Dry Density of Block (AAC) Using RSM Method

Amir Mabudi ^{a,*}, Seyed Mohsen Zamzami ^a, Faramarz Pashaei ^b

^a Department of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

^b Department of Materials Engineering, University of Applied Sciences, Marand, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-05-17

Revised: 2025-01-01

Accepted: 2025-01-06

Keywords:

Compressive strength;
Dry density;
Autoclaved Aerated
Concrete (AAC);
Silica purity;
Response Surface
Methodology (RSM).

ABSTRACT

This study investigates the factors influencing the compressive strength and dry density of autoclaved aerated concrete (AAC) blocks using the Response Surface Methodology (RSM). Silica purity, water content, and particle size were considered as the primary parameters in the experimental design. The results indicated that higher silica purity increases the compressive strength and product density by 26.76% and 4.1%, respectively. Conversely, increasing water content resulted in a 16.31% reduction in compressive strength, with negligible effects on density changes. Particle size showed no significant impact on compressive strength within the studied range; however, larger particles increased density due to reduced porosity. RSM optimization revealed that the optimal combination—high-purity silica, medium water content (636d cc), and small particle size ($d_{80} = 55 \mu\text{m}$)—achieved the highest compressive strength (236.37 kg/cm^2) and the lowest density (535.63 g/cm^3). This research highlights the critical role of raw material quality, particularly silica purity, and precise mix control in enhancing the mechanical and physical properties of AAC blocks. The findings provide practical solutions for producing higher-performing AAC products, contributing to cost reduction and improved efficiency in lightweight construction materials.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34166.2671>

© 2025 Published by Semnan University Press.

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

* Corresponding author.

E-mail address: mabudi@sut.ac.ir

How to cite this article:

Mabudi, A. , Zamzami, S. M. and Pashayi, F. (2025). Modeling the factors affecting compressive strength and dry density of block (AAC) using RSM method. Journal of Modeling in Engineering, 23(Special Issue 81), 235-247. doi: 10.22075/jme.2025.34166.2671

مدلسازی عوامل تاثیر گذار بر مقاومت فشاری و چگالی خشک بلوک (AAC) با استفاده از روش RSM

امیر معبودی^{۱*}، سید محسن زمزمی^۱، فرامرز پاشایی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷	این مطالعه به بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری و چگالی خشک بلوک‌های بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) با استفاده از روش طراحی سطح پاسخ (RSM) پرداخته است. خلوص سیلیس، مقدار آب مصرفی، و اندازه ذرات به‌عنوان پارامترهای اصلی در طراحی آزمایش در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که خلوص بالاتر سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری و چگالی محصول به ترتیب تا ۲۶/۷۶ درصد و ۴/۱ درصد می‌شود. در مقابل، افزایش مقدار آب مصرفی منجر به کاهش ۱۶/۳۱ درصدی مقاومت فشاری شد و همچنین تأثیری بر کاهش یا تغییر چگالی مشاهده گردید. اندازه ذرات در محدوده بررسی‌شده، تأثیری معنادار بر مقاومت فشاری نداشت اما افزایش اندازه ذرات به دلیل کاهش تخلخل، چگالی بلوک را افزایش داد. با استفاده از روش بهینه‌سازی RSM، مشخص شد که ترکیب بهینه شامل سیلیس با خلوص بالا، مقدار آب در سطح متوسط (۶۳۶ سی سی) و اندازه ذرات کوچک ($d_{80} = 55\mu m$) منجر به دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری (۲۳۶.۳۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) و کمترین چگالی (۵۳۵.۶۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌شود. این پژوهش اهمیت کیفیت مواد اولیه، به‌ویژه خلوص سیلیس و کنترل ترکیب اختلاط را در بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی بلوک‌های AAC نشان داده و راهکارهایی برای تولید محصولات با عملکرد بهتر در صنعت ساختمان ارائه می‌کند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی مواد سبک‌وزن در ساخت‌وساز کمک کند.
واژگان کلیدی: مقاومت فشاری، چگالی خشک، بلوک اتوکلاو شده، خواص سیلیس، روش طراحی پاسخ سطح.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34166.2671>

© 2025 Published by Semnan University Press.

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

۱- مقدمه

بتن یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین مصالح در صنعت ساختمان است، اخیراً بسیاری از محققان مطالعات عمیقی را برای بهبود سازگاری با محیط زیست بتن انجام داده‌اند تا آن را برای تبدیل شدن به یکی از مصالح سبز ساختمانی تبدیل کنند [۱-۲]. بتن سبک در چند دهه اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده است، زیرا ساختمان‌های

شهری اکنون در طبقات بیشتر در ارتفاع زیاد ساخته می‌شوند و کاهش وزن آنها ضروری می‌باشد. استفاده از بتن سبک همچنین می‌تواند قابلیت لرزه‌ای ساختمان را بهبود بخشد و علاوه بر این، هزینه‌ها و مشکلات حمل‌ونقل و ساخت و ساز را کاهش می‌دهد [۳-۵]. بتن هوادهی با نام‌های بتن سلولی، فوم بتن، بتن متخلخل نیز شناخته می‌شود، با ملات سیمان و آهک تولید می‌شود که در آن

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mabudi@sut.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه جامع علمی کاربردی، مرند، ایران

استناد به این مقاله:

معبودی، امیر، زمزمی، سید محسن و پاشایی، فرامرز. (۱۴۰۴). مدلسازی عوامل تاثیر گذار بر مقاومت فشاری و چگالی خشک بلوک (AAC) با استفاده از روش RSM. مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (شماره ویژه ۸۱)، ۲۴۷-۲۳۵. doi: 10.22075/jme.2025.34166.2671

حفره‌های هوا با فرآیند تشکیل گاز یا کف‌سازی ایجاد می‌شود و سپس به دام می‌افتد و این کار باعث کاهش وزن مواد می‌شود. با این حال، حفره‌های هوا در بتن هوادهی شده استحکام مکانیکی را کاهش می‌دهد و معمولاً برای رفع این نقص از فرآیند عمل‌آوری اتوکلاو استفاده می‌شود. در شرایط بخار پرفشار برای عمل‌آوری، هیدرات‌های سیلیکات کلسیم ژل تایپ (CSH) تبدیل به توپ‌مورایت کریستالی می‌شود که سپس استحکام مکانیکی ماده را افزایش می‌دهد. ماده به دست آمده بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC)، بتن سبک اتوکلاو شده یا بتن سلولی اتوکلاو نامیده می‌شود [۶]. مواد اولیه AAC شامل ماسه سیلیس، پودر آهک و سیمان است. در سال‌های اخیر، برخی از مواد جایگزین و محصولات جانبی صنعتی، مانند خاکستر بادی و خاکستر با سوخت زغال سنگ، باطله سیلیس، باطله معدن و سرباره آهن مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که تنوع گسترده در ترکیبات مخلوط خام توسط نویسندگان مختلف پیشنهاد شده است [۷-۱۱]. بسیاری از عوامل می‌توانند بر دوام سازه‌های بتنی تأثیر منفی بگذارند مانند طراحی ضعیف، نظارت ضعیف، ناخالصی‌ها مانند خاک رس و غیره [۱۲-۱۳]. سنگدانه‌های بتن گاهی اوقات می‌توانند حاوی ناخالصی‌هایی مانند ذرات خاک رس باشند که می‌تواند بر خواص بتن تأثیر بگذارد. اثرات خاک رس بر مواد مبتنی بر سیمان برای سال‌های زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور سنتی، خاک رس به عنوان یک ناخالصی مضر در سنگدانه‌های بتنی در نظر گرفته می‌شود که بسیاری از تولیدکنندگان سنگدانه را مجبور می‌کند تا ماسه‌های خود را بشویند تا نیازهایی مانند ASTM C33 را برآورده کنند [۱۴-۱۵]. پوشش‌های رسی از ذرات رسی تشکیل شده‌اند که به طور محکم روی سطح سنگدانه نگه داشته می‌شوند. از آنجایی که این ماده معمولاً حتی پس از مخلوط شدن بتن به سنگدانه می‌چسبد، اعتقاد بر این است که با پیوند سنگدانه و خمیر سیمان تداخل دارد [۱۶]. از آنجایی که ذره‌های خاک رس توسط نیروهای الکترواستاتیکی به سنگدانه متصل می‌شوند، بسیاری از محققان پیشنهاد می‌کنند که پوشش‌های رسی پیوند سنگدانه-دوغاب سیمان را مختل می‌کنند [۱۷]. اگر پیوند بین خمیر سیمان و پوشش رس، قوی‌تر از پیوند بین پوشش و سنگدانه باشد، ممکن است یک ناحیه ضعیف در سطح مشترک پوشش و سنگدانه ایجاد شود و به طور قابل توجهی مقاومت و دوام بتن را

کاهش دهد [۱۸]. کانی‌های رسی توانایی جذب مولکول‌های آب را دارند. یک پدیده سطحی به نام جذب خاک رس به دلیل سطح وسیع و ساختار شیمیایی خود میل زیادی به آب دارند و همچنین می‌توانند آن را در ریزساختار خود جذب کنند. سطح ویژه تقریبی برای کائولن ۲۰-۱۰ متر مربع بر گرم و برای مونت موریلونیت ۸۰۰ متر مربع بر گرم است [۱۹]. کانی‌های رسی توانایی جذب مولکول‌های آب را دارند. دو عملکرد ضروری آب در یک مخلوط عبارتند از هیدراته کردن سیمان و ایجاد کارایی کافی. با خاک رس موجود در مخلوط، مقدار آب مورد نیاز برای کارایی خوب می‌تواند به طور قابل توجهی بیشتر از آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون باشد (به میزان بیشتر از بتن معمولی). بنابراین، هنگامی که بتن عمل‌آوری می‌شود و بخشی از آب توسط هیدراتاسیون به صورت شیمیایی متصل می‌شود، باقیمانده بیشتر از حد معمول تبخیر می‌شود و محتوای فضای خالی (تخلخل مویرگی) در مجموعه هیدراته شده را افزایش می‌دهد و مقاومت ماده را کاهش می‌دهد [۲۰]. علاوه بر واکنش سیمانی، برهمکنش شیمیایی سیمان و ذرات خاک رس ممکن است بر خواص بتن تأثیر بگذارد و ممکن است نشان دهد که چرا بتن‌های حاوی خاک رس خواص فیزیکی متفاوتی دارند [۲۱]. محققان به این نتیجه رسیدند که خاک رس اگر به صورت پوشش سطحی در اطراف دانه‌های ماسه وجود داشته باشد، برای مقاومت بتن بسیار مضرتر از زمانی است که به طور مساوی در سراسر جرم توزیع شود [۲۲]. هنگامی که خاک رس چنین پوشش سطحی را تشکیل می‌دهد، فقط توسط نیروهای الکترواستاتیک ضعیف محدود می‌شود، که بسیاری از محققان را بر آن داشت تا پیشنهاد کنند که ذرات خاک رس با پیوند بین ذرات ماسه و ماتریس پالپ سیمان تداخل می‌کنند [۲۳-۲۶]. هنگامی که مخلوط در حالت تازه است، اثرات تبادل کاتیونی و لخته‌سازی رخ می‌دهد که باعث تثبیت ساختاری خاک رس می‌شود [۲۷]. در طول سخت شدن مخلوط خاک رس و سیمان، هیدراتاسیون سیمان صورت می‌گیرد و محصولات معمول هیدراتاسیون سیمان شامل هیدرات‌های سیلیکات کلسیم، هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 و آلومینات‌های هیدراته را تشکیل می‌دهد [۲۸]. هیدروکسید کلسیم تشکیل شده در فاز اولیه، همراه با قلیایی‌های محلول آزاد شده در طول هیدراتاسیون سیمان که PH محلول منفذی را به بیش از ۱۳ افزایش می‌دهد،

می‌تواند شروع واکنش به ذرات رس و همچنین باعث تجزیه آلومینای آمورف و سیلیس شود که سپس می‌تواند با یون‌های کلسیم آزاد شده از هیدرولیز سیمان ترکیب شود و یک ماده سیمانی ثانویه را تشکیل دهد [۲۹].

در بتن تازه، رس با اتصال سنگدانه‌ها به سیمان تداخل خواهد داشت. در بتن سخت شده، اگر خاک در حفره‌های هوا با آب تماس پیدا کند، می‌تواند منقبض یا متورم شود، یا ایجاد فشار داخلی (تورم) یا ایجاد حفره‌های بزرگتر و ضعیف شدن بتن (کوچک شدن). رس بسیار ریزتر از سنگدانه‌های ریز است و دارای خاصیت غیر چسبندگی است که به این دلیل با سیمان، سنگدانه‌های ریز واکنش نمی‌دهد و با آب شروع به واکنش مانند انقباض و متورم شدن می‌کند اما همچنان در بتن وجود دارد که باعث ایجاد خط مویی ناخواسته یا گاهی اوقات ترک‌های بزرگ می‌شود. در بتن بسته به درصد رس که نباید بیش از ۴ درصد باشد [۳۰]. سوسپانسیون‌های رسی دارای خواص تیکسوتروپیک هستند که عمدتاً به بارهای متفاوت روی سطوح ذرات رس نسبت به لبه‌های آنها نسبت داده می‌شود [۳۱]. به طور کلی، مشخص شده است که رس‌ها هنگام وارد شدن به سیستم‌های مبتنی بر سیمان، تنش تسلیم و ویسکوزیته را افزایش می‌دهند. افزایش ویسکوزیته در دوغاب سیمان باعث می‌شود که توزیع گازها در داخل بتن یکنواخت نباشد و در نتیجه موجب متفاوت شدن چگالی در بخش‌های مختلف بتن خواهد شد و در نهایت باعث ناهمگونی در ریزساختار فرآورده و تاثیرات منفی بر روی تمامی خواص فرآورده تولیدی از جمله ویژگی آکوستیک، ضریب هدایت حرارتی و مقاومت فشاری خواهد شد [۳۲]. توزیع ذرات سنگدانه درشت به شدت بر خواص بتن تازه و سخت شده تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، انتخاب هر دو نوع توزیع محتوا و اندازه ذرات برای مخلوط بتن موضوع مهمی در رابطه با عملکرد پیش‌بینی‌شده بتن است. از آنجایی که تقریباً ۷۵ درصد حجم بتن توسط سنگدانه‌ها اشغال می‌شود، فرض بر این است که خواص سنگدانه تا حد زیادی بر دوام و عملکرد ساختاری مصالح بتن تأثیر می‌گذارد [۳۳]. محققان مشاهده کرده‌اند که افزایش مقاومت برای افزایش معینی در محتوای سیمان بستگی به نوع سنگدانه مورد استفاده و خود سیمان دارد [۳۴]. مقاومت فشاری بتن با افزایش حداکثر اندازه

سنگدانه از ۴۰ تا ۸۰ درصد افزایش می‌یابد و در سایر مقادیر کاهش می‌یابد [۳۳].

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی مفید برای مدلسازی و تجزیه و تحلیل مسائل است که در آن یک پاسخ مورد علاقه تحت تاثیر چندین متغیر است و هدف بهینه‌سازی این پاسخ است. در اکثر مسائل RSM، شکل رابطه بین متغیرهای وابسته و مجموعه متغیرهای مستقل ناشناخته است. بنابراین، اولین گام در RSM یافتن یک تقریب مناسب برای رابطه عملکردی بین متغیرهای وابسته و مستقل است. معمولاً از یک چند جمله‌ای مرتبه پایین در برخی ناحیه از متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. اگر انحنایی در سیستم وجود داشته باشد، از چند جمله‌ای درجه بالاتر استفاده می‌شود. مدل‌های مرتبه دوم به طور گسترده در روش سطح پاسخ استفاده می‌شوند زیرا دارای چندین مزیت هستند. آنها بسیار منعطف هستند و می‌توانند انواع مختلفی از اشکال عملکردی را به خود بگیرند، بنابراین آنها به خوبی به عنوان یک تقریبی به سطح پاسخ واقعی عمل خواهند کرد. علاوه بر این، تخمین پارامترها در یک مدل مرتبه دوم با استفاده از روش حداقل مربعات آسان است. طراحی مرکب مرکزی CCD^۲ به طور گسترده در ساخت مدل‌های سطح پاسخ مرتبه دوم استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین طرح‌های آزمایشی مورد استفاده در مطالعات بهینه‌سازی فرآیند است [۳۵-۳۹]. اخیراً تحقیقات بر روی مقاومت فشاری بلوک‌های سبک و بتن با استفاده از روش‌های طراحی کامپوزیت مرکزی و روش پاسخ سطح توسط محققان صورت گرفته است [۴۰-۴۴]. با توجه به مطالب که شرح داده شد، در این بررسی به رفتار مقاومت بلوک و چگالی محصول نهایی در مقادیر مختلف پارامترها بررسی گردید. تاثیر سه عامل عیار سیلیس، نسبت آب به سیمان و توزیع دانه‌بندی سیلیس به عنوان ورودی استفاده می‌شوند و مقاومت فشاری و چگالی قطعات بتنی هوادار اتوکلاو شده به عنوان پاسخ با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش بررسی گردید. نتایج بدست آمده از آزمون‌ها توسط نرم افزار مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت که در نهایت منطقه بهینه فاکتورها مشخص گردید. با تکرار آزمایش در مقادیر بهینه، بیشترین مقاومت با حداقل چگالی بدست آمد.

² Central Composite Design

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد مصرفی

مواد مصرفی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	CO ₂	H ₂ O	LOI
سیلیس کم عیار	۷۰	۱۴/۵	۰/۷	*	۱/۸	*	*	*	۸/۰
سیلیس پرعیار	۹۵/۲	۲/۴۳	۰/۳۲	*	۰/۵۵	*	*	*	۰/۱۸
سیمان	۲۱/۴۳	۴/۹۶	۳/۸۵	۲/۴۴	۶۳/۸	۲/۰۱	*	*	۴/۷۳
گچ خام	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۰۹	۰/۳۵	۳۲/۷۶	۴۴/۹۲	۰/۴۷	۲۰/۸۵	*

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد اولیه

مواد مصرفی برای این بررسی از شرکت‌های مختلف تهیه گردید که در شکل (۱) نشان داده شده است. آنالیز شیمیایی مواد مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر خاک رس بر مقاومت فشاری بلوک، سیلیس با ۲۵ درصد خاک رس ترکیب گردید. سیلیس مورد استفاده در این بررسی در دو نوع H (مقدار رس بالا) و L (مقدار رس پایین) تهیه گردید. آنالیز مینرالی سیلیس مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج آنالیز شیمیایی سیلیس کم عیار و پرعیار نشان می‌دهد که سیلیس کم عیار به مقدار ۱۴/۵ درصد Al₂O₃ دارد که بیانگر وجود رس در ترکیب سیلیس کم عیار می‌باشد. بررسی آنالیز مینرالی سیلیس کم عیار و پرعیار نشان می‌دهد که مقدار کانی کائولینیت در نوع کم عیار به مقدار ۳۵٪ می‌باشد.



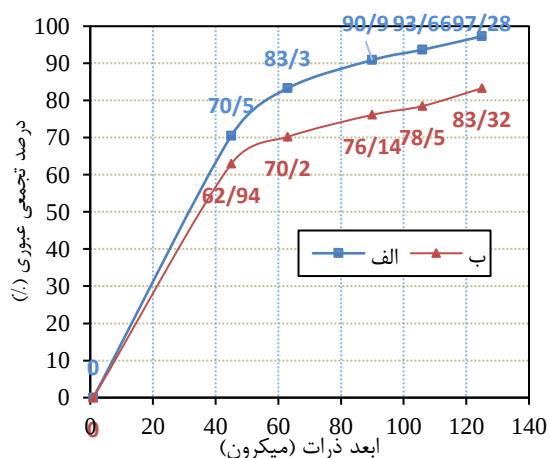
شکل ۱- تصاویر مواد اولیه و پودر آلومنیوم

پرعیار دانه‌درشت، دانه‌ریز و متوسط و همچنین کم عیار دانه‌درشت، دانه‌ریز و متوسط که توزیع دانه‌بندی بخش دانه‌ریز (الف) و دانه‌درشت (ب) در نمودار شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- آنالیز مینرالی سیلیس کم عیار و پرعیار

مواد مصرفی	کوارتز	کائولینیت	کلسیت
سیلیس کم عیار	۵۵	۳۵	۳/۵
سیلیس پرعیار	۹۰/۲	۷/۵	۰/۸

شایان ذکر است که بخش متوسط ابعادی ذرات، در آزمایشگاه تهیه گردید. نمودار دانه‌بندی نشان می‌دهد که ۹۰/۹ درصد از ذرات سیلیس دانه‌ریز و ۶۷/۱۴٪ ذرات سیلیس دانه‌درشت کوچکتر از ۹۰ میکرون می‌باشد. سیمان مصرفی در این بررسی از نوع تیپ ۱ تهیه گردید. اندازه‌گیری سطح ویژه ذرات سیمان نشان می‌دهد که هر گرم از سیمان در حدود ۳۶۵۰ سانتیمتر مربع سطح دارد که نشان دهنده نرمی و بلین خوب سیمان می‌باشد. مشخصات فیزیکی سیمان در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی سیلیس در دو نوع دانه‌درشت و دانه‌ریز

با توجه به اینکه دانه‌بندی ماسه از پارامترهای موثر در فرآیند تهیه بتن و همچنین از فاکتورهای موثر در این بررسی می‌باشد لذا سیلیس در ۳ حالت دانه‌درشت، متوسط و دانه‌ریز مورد استفاده قرار گرفت که برای تهیه سیلیس با ابعاد متوسط ۵۰٪ از سیلیس دانه درشت و ۵۰٪ از سیلیس دانه‌ریز در دو حالت کم عیار و پرعیار باهم ترکیب شد. عبارتی ۶ نوع سیلیس برای این بررسی تهیه گردید که

است، بخشی از مواد اولیه که برای تهیه دوغاب مقدار آن در همه آزمایش‌ها ثابت است در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقادیر مصرف مواد اولیه

مقدار مواد (گرم)	نوع مواد
۵۵۰	سیلیس
۱۷۰	آهک
۳۴۰	سیمان
۱	پودر آلومینیوم
۱۵	گچ

در آزمایش‌هایی که مقدار عیار سیلیس در حد متوسط قرار دارد، ۵۰٪ از سیلیس پرعیار با ۵۰٪ از سیلیس کم عیار ترکیب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت همزنی در طول تهیه دوغاب در همه آزمون‌ها به صورت ثابت و در دور ۱۸۰۰ دور در دقیقه تنظیم گردید. دوغاب تهیه شده در قالب‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۱۲/۵ سانتیمتر و ارتفاع ۱۵ سانتیمتر ریخته شد که شکل قالب و بلوک تهیه شده در شکل (۳) نشان داده شده است.



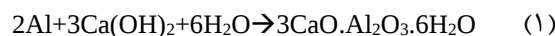
شکل ۳- قالب استوانه ای به جهت ریخته گری دوغاب.

برای عمل‌آوری اولیه، قالب‌ها به خشک‌کن با دمای ۶۰ درجه منتقل گردید و بعد از ۳ ساعت از خشک‌کن خارج گردید و جهت عمل‌آوری مجدد به اتوکلاو منتقل گردید. نمونه‌ها در اتوکلاو به مدت ۱۲ ساعت در فشاربخار ۱۲ بار و دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد در شرایط یکسان قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از برش در سایز ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر به جهت کاهش رطوبت به خشک‌کن با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد منتقل گردید و بعد از ۴۸ ساعت، آزمون مقاومت فشاری و اندازه گیری چگالی محصول بر روی قطعات مکعبی انجام گرفت. بلوکهای برش داده شده در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات فنی سیمان

نتیجه آزمون	آیتم آزمون
۳۶۵۰ (cm ² /g)	سطح ویژه ذرات
۰/۹٪	مانده روی الک ۹۰ میکرون
۳/۱۵ gr/cm ³	دانسیته پودر سیمان

بررسی مشخصات آهک مصرفی نشان می‌دهد که ۸۵ درصد ذرات کوچکتر از ۹۰ میکرون می‌باشد همچنین سرعت واکنش با آب آهک مذکور نشان می‌دهد که بعد از ۱۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه به دمای ۶۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. مقدار CaO آهک پخته شده بر اساس نتایج آنالیز شیمی تر در حدود ۹۴ درصد می‌باشد. گچ استفاده شده در این آزمون به صورت خام و خرد شده تا ابعاد زیر ۱۲۵ میکرون تهیه گردید. برای ایجاد تخلخل در بتن، از پودر آلومینیوم استفاده می‌شود. واکنش پودر آلومینیوم منجر به آزاد شدن گاز هیدروژن می‌گردد و باعث می‌شود که در فضای داخلی بتن حفره‌هایی ایجاد گردد که کاهش وزن بتن را به همراه دارد. هنگامی که ماده اولیه با پودر آلومینیوم واکنش می‌دهد، حباب هوا که در اثر واکنش بین هیدروکسید کلسیم، آلومینیوم و آب ایجاد می‌شود و گاز هیدروژن آزاد می‌شود که فرمول ۱ نشان داده شده است.



مشخصات پودر آلومینیوم در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- مشخصات فنی پودر آلومینیوم

نتیجه آزمون	آیتم آزمون
۰/۵٪	مواد فرار
۸۹٪	محتوای آلومینیوم فلزی
۰/۱۳ - ۰/۲ (g/cc)	دانسیته
۱۵ میکرون	میانگین سایز ذرات
۱٪	مانده روی الک ۱۸۰ میکرون
کمتر از ۸۸٪	مانده روی الک ۱۵ میکرون
۱۶۰۰ cm ² /gm	بلین
۱۰۰٪	قابلیت اختلاط آب

۲-۲- تجهیزات

برای انجام آزمون‌های مربوطه تجهیزات مورد استفاده شامل ترازو، همزن با دور متغیر، بتن شکن، الک، خشک‌کن و دماسنج، پیکنومتر و ویسکوزیته‌متر رینکی می‌باشد.

۳-۲- روش آزمون

با توجه به الگوی آزمایش که توسط نرم افزار پیشنهاد شده

۱۶ آزمایش با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی طراحی شد. نتایج در نرم افزار "Modde" وارد شده و یک مدل درجه دوم از چندین مدل انتخاب و با نتایج برازش شده است. نرم افزار ماد در راستای طراحی آزمایشها مورد استفاده قرار می گیرد، با استفاده از این نرم افزار می توان طرح های مرکب مرکزی، طرح تاگوچی، طرح های اختلاط و ... را اجرا کرد. تحلیل های آماری و جداول واریانس و استنتاج نمودارهای رگرسیون و ... در تحلیل نتایج آزمون ها و یافتن نقاط بهینه فرآیند می تواند مفید و موثر واقع می شود. دو مدل برای مقاومت فشاری و چگالی بلوک تهیه شده است. مدل های درجه دوم که برای پیش بینی متغیرهای پاسخ کافی هستند با معادلات ۳ و ۴ ارائه می شوند. در این مدل ها همه متغیرها در مقادیر کدگذاری شده هستند که در اینجا A نوع سیلیس مصرفی، B مقدار آب مصرفی و C نیز دانه بندی ذرات سیلیس مصرفی می باشد و AB و AC برهمکنش پارامترهای اصلی است.

$$(۳) \quad 1.48 + 0.052A - 0.026B + 0.001C - 0.008AB - 0.007AC$$

$$(۴) \quad 2.72 + 0.08A - 0.005B + 0.003C + 0.001AB + 0.0003AC$$

شرایط آزمایش و پاسخ آنها در جدول ۷ نشان داده شده است.

۳-۲- بررسی مدل از نظر آماری

به جهت بررسی آماری مدل، نمودار خلاصه انطباق داده ها در شکل (۵) نشان داده شده است. بالا بودن مقدار R_2 و Q_2 انطباق خوب داده های خام با مدل رگرسیون و قابل استفاده بودن مدل را نشان می دهد. همچنین بالا بودن اندیس Model validity و Reproducibility معتبر بودن مدل و قابلیت تکرار و تولید مدل را نشان می دهد. نمودار رگرسیون فاکتورها در شکل (۶) نشان داده شده است.

نتایج نشان می دهد که نوع سیلیس بر مقاومت فشاری و چگالی محصول تاثیر بیشتری نسبت به سایر فاکتورها دارد. بعد از فاکتور نوع سیلیس، مقدار آب مصرفی از فاکتورهای موثر بر مقاومت فشاری و چگالی محصول می باشد. نتایج نشان می دهد که ابعاد ذرات در محدوده انتخاب شده تاثیر حائز اهمیتی بر روی پاسخ مقاومت فشاری ندارد.



شکل ۴- تصویر بلوکهای برش داده شده برای آزمون.

۲-۴- طرح مرکب مرکزی و RSM

طرح های ترکیب مرکزی، Box Bunker و Doehlert از جمله روش های پاسخ سطح اصلی مورد استفاده در طراحی آزمایشی هستند. محبوب ترین روش سطح پاسخ، طراحی مرکب مرکزی است [۳۵-۳۹]. با استفاده از این سطوح، می توان اطلاعات کافی برای تناسب با یک چند جمله ای مرتبه دوم به نام «کوادراتیک» تولید کرد. نرم افزار آماری استاندارد می تواند برازش واقعی مدل را محاسبه کند. با استفاده از طراحی آزمایشها بر اساس RSM، شرایط اختلاط بهینه با عملکرد رضایت بخش را می توان با حداقل تعداد آزمایش بدون نیاز به مطالعه تجربی همه ترکیب های ممکن به دست آورد. علاوه بر این، سطوح ورودی متغیرهای مختلف برای یک سطح خاص از پاسخ نیز می تواند تعیین شود. برای تعیین یک نقطه بحرانی (ماکزیمم، مینیمم یا اپتیمم)، لازم است تابع چند جمله ای طبق معادله زیر دارای عبارت درجه دوم باشد:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon \quad (۲)$$

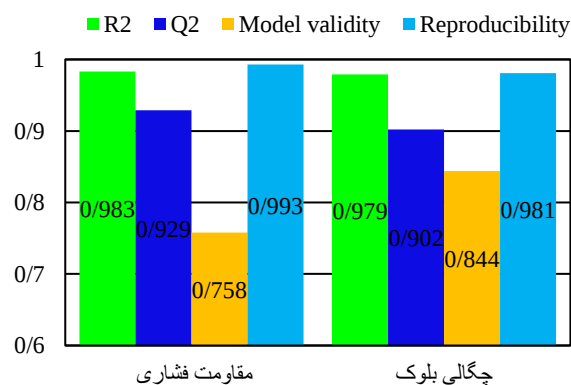
که در آن β_0 ، β_i ، β_{ij} ، β_{ii} ، X_i و ε به ترتیب تعداد جمله ثابت، متغیرها، ضرایب پارامترهای خطی، ضرایب پارامتر درجه دوم، ضرایب پارامترهای تعامل و باقیمانده مربوط به آزمایشها را نشان می دهند [۴۲]. سطح فاکتورهای کنترلی انتخاب شده شامل نوع سیلیس از لحاظ عیار، نسبت آب به جامد و اندازه ذرات در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- جدول شرایط آزمایش برای طراحی CCD

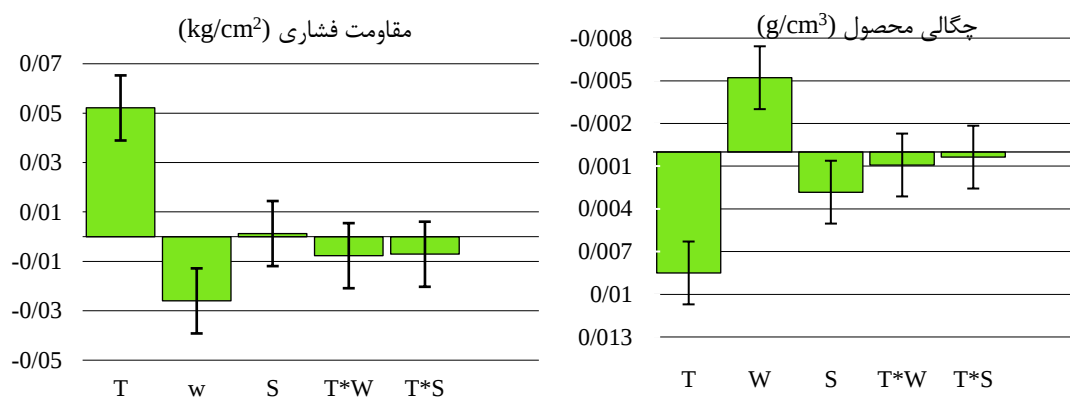
فاکتورها			
ابعاد ذرات	مقدار آب (CC)	عیار سیلیس (%)	فاکتورها
H	۷۸۷	۹۰	سطح بالا (+۱)
C	۶۸۷	۷۲/۲	سطح مرکزی (۰)
L	۵۸۷	۵۵	سطح پایین (-۱)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- معادلات مدل



شکل ۵- نمودار خلاصه انطباق داده‌ها



T = نوع سیلیس

S = ابعاد ذرات

W = مقدار آب

شکل ۶- نمودار رگرسیون پاسخ‌ها.

جدول ۷- فاکتورهای ورودی و نتایج آزمایش

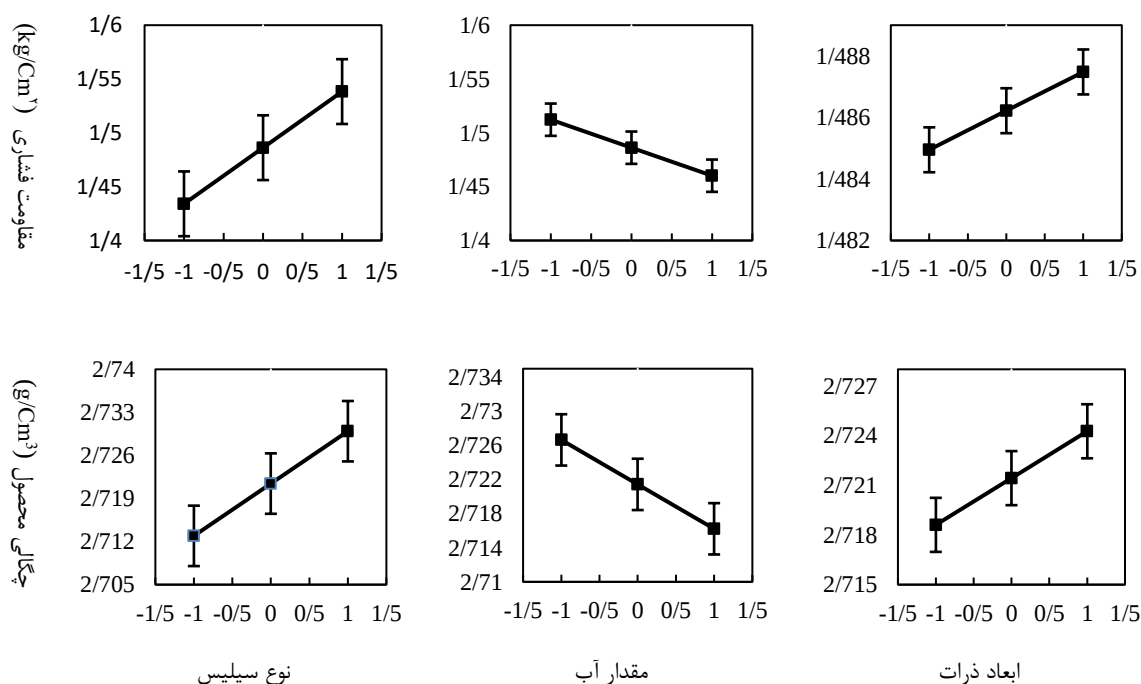
شماره آزمایش	نوع سیلیس (عیار)	مقدار آب	ابعاد ذرات	مقاومت فشاری	چگالی محصول
۱	-۱	-۱	-۱	۲۷/۷	۵۲۰
۲	۱	-۱	-۱	۳۸/۵	۵۴۰
۳	-۱	۱	-۱	۲۵/۹	۵۰۶
۴	۱	۱	-۱	۳۲/۲	۵۲۵
۵	-۱	-۱	۱	۲۹/۲	۵۲۷
۶	۱	-۱	۱	۳۶/۵	۵۴۴
۷	-۱	۱	۱	۲۶/۸	۵۱۲
۸	۱	۱	۱	۳۲/۵	۵۳۸
۹	-۱	۰	۰	۲۶/۹	۵۱۶
۱۰	۱	۰	۰	۳۴/۱	۵۳۷
۱۱	۰	-۱	۰	۳۲/۸	۵۳۳
۱۲	۰	۱	۰	۲۸/۲	۵۲۰
۱۳	۰	۰	-۱	۳۰/۷	۵۲۶
۱۴	۰	۰	۱	۳۰/۲۸	۵۳۰
۱۵	۰	۰	۰	۳۰/۶	۵۲۵
۱۶	۰	۰	۰	۳۰/۲	۵۲۷

۳-۳- تاثیر فاکتورهای اصلی

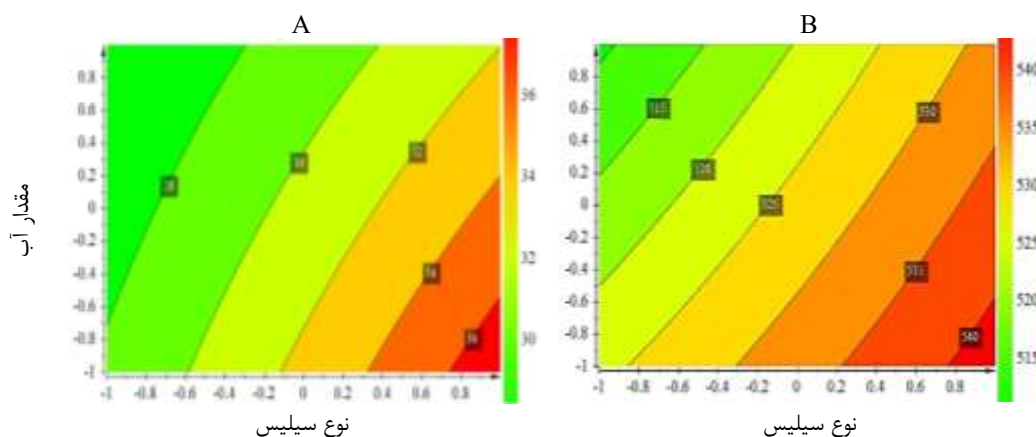
همانطور در شکل (۷) نشان داده شده است، نتایج نشان می‌دهد که افزایش خلوص سیلیس مقاومت فشاری محصول را افزایش می‌دهد که این نتیجه با یافته‌های محققان انطباق دارد [۲۳-۲۶]. بالا بودن چگالی محصول نیز به جهت بالا بودن چگالی حقیقی سیلیس از رس می‌باشد لذا به جهت کاهش رس در سیلیس خلوص بالا افزایش چگالی محصول را دنبال دارد. بررسی مقادیر آب مصرفی برای تهیه دوغاب سیمان نشان می‌دهد که افزایش مقدار آب کاهش مقاومت فشاری و چگالی محصول را به همراه دارد چرا که آب بیشتر از حد معمول در زمان عمل‌آوری تبخیر می‌شود و محتوای فضای خالی (تخلخل مویرگی) در مجموعه هیدراته شده را افزایش می‌دهد و موجب کاهش مقاومت ماده می‌گردد [۲۰]. با توجه نمودار تاثیر دانه‌بندی و سایز ذرات بر روی مقاومت فشاری و چگالی بلوک، مشخص است که سایز ذرات تاثیر حائز اهمیتی بر روی مقاومت فشاری ندارد ولی بر روی چگالی بلوک تاثیر گذار است، بطوریکه افزایش سایز ذرات موجب افزایش چگالی می‌گردد. با توجه به اینکه فضای بتن هوادار اتوکلاو شده ترکیبی از سیمان، حباب هوا و ذرات ماسه می‌باشد لذا دانه درشت بودن ذرات موجب می‌شود که سطح بیشتری از بتن توسط ذرات دانه درشت اشغال شود که موجب افزایش چگالی محصول می‌گردد.

۳-۴- بهینه‌سازی فرآیند

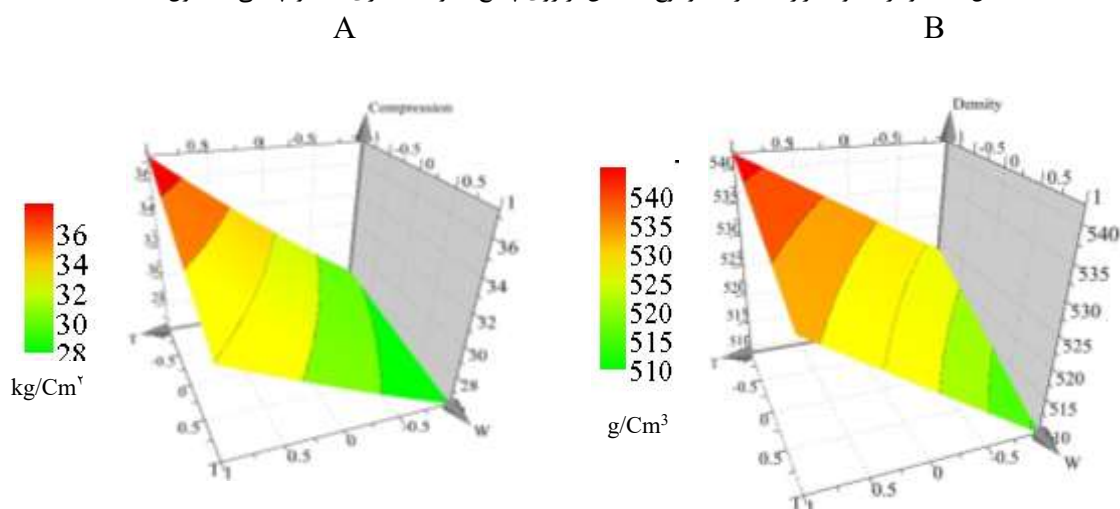
هدف از بهینه‌سازی سطح پاسخ، یافتن مکان مطلوب در فضای طراحی است. این می‌تواند حداکثر، حداقل یا ناحیه ای باشد که در آن پاسخ در طیفی از عوامل پایدار است. در این تحقیق از تکنیک بهینه‌سازی همزمان (توسط نرم افزار Modde) برای بهینه‌سازی پاسخ‌های چندگانه استفاده شد. سطوح تولید شده توسط مدل‌های خطی می‌تواند برای نشان دادن جهتی که طرح اصلی باید در آن جابجا شود تا به شرایط مطلوب دست یابد، استفاده شود. با این حال، اگر منطقه آزمایشی به دلایل فیزیکی یا ابزاری قابل جابجایی نباشد، تحقیق باید با بازرسی بصری بهترین شرایط عملیاتی را در داخل شرایط آزمایشی مورد مطالعه پیدا کند. برای مشخص کردن منطقه بهینه با استفاده از نرم افزار Modde مشخص گردید که اگر هدف بیشترین مقدار مقاومت فشاری و کمترین مقدار چگالی محصول باشد مدل در نقطه ای بهینه می‌گردد که نوع سیلیس +۱، مقدار آب ۰/۴۹- و سایز ذرات در محدوده ۱- باشد که در این شرایط مقاومت فشاری برابر با $36/37 \text{ kg/cm}^2$ و چگالی محصول برابر با $535/63 \text{ g/cm}^3$ می‌باشد که با نتایج تکرار آزمایش در محدوده بهینه تشابه زیادی دارد. برای بررسی بیشتر شرایط بهینه مدل، نمودار خطوط همتراز در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷- نمودار تاثیر فاکتورهای اصلی بر پاسخ‌ها



شکل ۸- نمودار خطوط تراز مقادیر آب و نوع سیلیس بر روی پاسخ مقاومت فشاری (A) و چگالی محصول (B)



شکل ۹- نمودار سه بعدی پاسخ سطح با تاثیر نوع سیلیس و مقدار آب در محدوده مرکزی ذرات سیلیس بر مقاومت فشاری (A) و چگالی بلوک (B)

سیلیس در دو نوع دانه ریز و دانه درشت نشان می‌دهد که ۹۰.۹ درصد از ذرات سیلیس دانه ریز و ۶۷.۱۴ درصد ذرات سیلیس دانه درشت کوچکتر از ۹۰ میکرون می‌باشد. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که سیلیس پرعیار به مقدار ۹۵/۲٪ و سیلیس کم عیار ۷۰٪ درصد SiO_2 دارد که نشان دهنده مقدار کوارتز در ترکیب سیلیس می‌باشد.

با استفاده از نرم افزار Modde و روش طراحی آزمایش‌ها مشخص گردید که نوع سیلیس از فاکتورهای تاثیر گذار بر روی مقاومت فشاری و چگالی محصول و همچنین فاکتور مقدار آب نیز از فاکتورهای تاثیر گذار می‌باشد. سائز ذرات بر روی مقاومت فشاری بلوک تاثیر چندانی نداشت ولی بر پاسخ چگالی تاثیر با اهمیتی داشت که کاهش سائز ذرات کاهش چگالی بلوک را بدنبال داشت.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند، که از واحد پژوهش

محور Y نمودار مقدار آب و محور X نمودار نوع سیلیس را نشان می‌دهد که در این شرایط سائز ذرات در محدوده مرکزی ثابت در نظر گرفته شده است. با بررسی نمودار A شکل (۸) مشخص می‌گردد که برای رسیدن به مقاومت بیشتر، باید فاکتور نوع سیلیس در سطح بالا و مقدار مصرف آب در سطح پایین باشد. نمودار B شکل (۸) نشان می‌دهد که کمتر مقدار چگالی زمانی بدست می‌آید که فاکتور سیلیس در سطح پایین و مقدار مصرف آب در سطح بالا باشد که چگالی ۵۱۵ g/cm^3 را نشان می‌دهد. در شکل (۹) پاسخ مدل به صورت سه بعدی نشان داده شده است که مقادیر بهینه مقدار آب و نوع سیلیس برای رسیدن به بیشترین مقاومت فشاری و کمترین چگالی را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که دانه بندی

مشارکت های نویسندگان

سید محسن زمزمی: انجام مطالعات تجربی، نوشتن درفت اولیه مقاله

امیر معبودی: ایده پردازی، نظارت بر انجام مطالعات، نظارت بر نوشتن مقاله و بازنویسی نهایی مقاله
فرامرز پاشایی: جمع آوری داده، نظارت بر انجام مطالعات، همکاری در نوشتن درفت اولیه مقاله

منابع مالی

در انجام پژوهش هیچ منابع مالی مورد استفاده قرار نگرفته است.

دانشگاه صنعتی سهند تبریز و مجتمع خاک چینی زنوز که بستر مناسبی برای انجام پژوهش مورد نظر ایجاد نمودند، تقدیر و تشکر نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله هیچگونه تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان مقاله متعهد می شوند که نتایج حاصل از این تحقیق را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مراجع

- [1] D. Le Cornec, Q. Wang, L. Galois, G. Renaudin, L. Izoret, and G. Calas. "Greening effect in slag cement materials." *Cement and Concrete Composites* 84 (2017): 93-98.
- [2] R. Maddalena, J.J. Roberts, and A. Hamilton. "Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements." *Journal of cleaner production* 186 (2018): 933-942.
- [3] E. Yasar, C. Duran Atis, A. Kilic, and H. Gulsen. "Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash." *Materials Letters* 57, no. 15 (2003): 2267-2270.
- [4] H.K. Kim, J.H. Jeon, and H.K. Lee. "Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air." *Construction and Building Materials* 29 (2012): 193-200.
- [5] H.J. Chen, C.H. Huang, and C.W. Tang. "Dynamic properties of lightweight concrete beams made by sedimentary lightweight aggregate." *Journal of Materials in Civil Engineering* 22, no. 6 (2010): 599-606.
- [6] E.K. Nambiar, and K. Ramamurthy. "Air-void characterisation of foam concrete." *Cement and Concrete Research* 37, no. 2 (2007): 221-230.
- [7] H.A.L.D.U.N Kurama, İ.B. Topçu, and C. Karakurt. "Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash." *Journal of Materials Processing Technology* 209, no. 2 (2009): 767-773.
- [8] K. Ramamurthy, and N. Narayanan. "Factors influencing the density and compressive strength of aerated concrete." *Magazine of Concrete Research* 52, no. 3 (2000): 163-168.
- [9] W. Wongkeo, and A. Chaipanich. "Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume." *Materials Science and Engineering: A* 527, no. 16-17 (2010): 3676-3684.
- [10] X.Y. Huang, W. Ni, W.H. Cui, Z.J. Wang, and L.P. Zhu. "Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag." *Construction and Building Materials* 27, no. 1 (2012): 1-5.
- [11] B.G. Ma, L.X. Cai, X.G. Li, and S.W. Jian. "Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products." *Journal of Cleaner Production* 127 (2016): 162-171.
- [12] V.K. Nagarajan, S.A. Devi, S.P. Manohari, and M.M. Santha. "Experimental study on partial replacement of cement with coconut shell ash in concrete." *International Journal of Science and Research* 3, no. 3 (2014): 651-661.
- [13] L.M. Olanitori, and A.O. Olotuah. "The effect of clayey impurities in sand on the crushing strength of concrete (a case study of sand in Akure metropolis, Ondo State, Nigeria)." In *30th Conference on our World in Concrete and Structures, Singapore*, pp. 23-24. 2005.

- [14] T.J. Désiré, and M. Léopold. "Impact of clay particles on concrete compressive strength." *International Research Journal on Engineering* 1, no. 2 (2013): 049-056.
- [15] S. Kawashima, K. Wang, R.D. Ferron, J.H. Kim, N. Tregger, and S. Shah. "A review of the effect of nanoclays on the fresh and hardened properties of cement-based materials." *Cement and Concrete Research* 147 (2021): 106502.
- [16] J.W. Schmitt. "Effects of mica, aggregate coatings, and water-soluble impurities on concrete." *Concrete International* 12, no. 12 (1990): 54-58.
- [17] L. Dolar-Mantuani. "Handbook of concrete aggregates: A petrographic and technological evaluation." (No Title) (1983).
- [18] S.W. Forster. "Soundness, deleterious substances, and coatings." In *Significance of Tests And Properties Of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International, 2006.
- [19] V.A. Fernandes, P. Purnell, G.T. Still, and T.H. Thomas. "The effect of clay content in sands used for cementitious materials in developing countries." *Cement and Concrete Research* 37, no. 5 (2007): 751-758.
- [20] A.M. Neville, and J.J. Brooks. *Concrete Technology*. Vol. 438. England: Longman Scientific & Technical, 1987.
- [21] A. Herzog, and J.K. Mitchell. "X-ray evidence for cement-clay interaction." *Nature* 195, no. 4845 (1962): 989-990.
- [22] D.A. Parsons, *Strength of Concrete*, Res. Natn Bur Standard, vol. 10, 1933, p. 257.
- [23] A.T. Goldbeck, The nature and effects of surface coatings on coarse aggregates, proceedings, Highw. Res. Board 12 (1) (1932) 305-319.
- [24] L. Dolar-Mantuani. "Handbook of concrete aggregates: A petrographic and technological evaluation." (No Title) (1983).
- [25] J.W. Schmitt. "Effects of mica, aggregate coatings, and water-soluble impurities on concrete." *Concrete International* 12, no. 12 (1990): 54-58.
- [26] S.W. Forster. "Soundness, deleterious substances, and coatings." In *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International, 2006.
- [27] S.A.N.K.A.R Bhattacharja, J.I. Bhatti, and H. ALAN Todres. "Stabilization of clay soils by Portland cement or lime—a critical review of literature." *PCA R&D Serial* 60, no. 1 (2003): 124-133.
- [28] M.S. Morsy, S.A. El-Enein, and G.B. Hanna. "Microstructure and hydration characteristics of artificial pozzolana-cement pastes containing burnt kaolinite clay." *Cement and Concrete Research* 27, no. 9 (1997): 1307-1312.
- [29] A. Herzog, and J.K. Mitchell. "X-ray evidence for cement-clay interaction." *Nature* 195, no. 4845 (1962): 989-990.
- [30] F.O. Ayodele, and I.S. Ayeni. "Analysis of influence of silt/clay impurities present in fine aggregates on the compressive strength of concrete." *International Journal of Engineering Research and Science and Technology* 15, no. 4 (2015): 6.
- [31] E. Cao, R. Bryant, and D.J. Williams. "Electrochemical properties of Na-attapulgite." *Journal of Colloid and Interface Science* 179, no. 1 (1996): 143-150.
- [32] I. Dejaeghere, M. Sonebi, and G.D. Schutter. "Influence of nano-clay on rheology, fresh properties, heat of hydration and strength of cement-based mortars." *Construction and Building Materials* 222 (2019): 73-85.
- [33] M.S. Meddah, S. Zitouni, and S. Belâabes. "Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete." *Construction and Building Materials* 24, no. 4 (2010): 505-512.
- [34] T. Özturan, and C. Çeçen. "Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths." *Cement and Concrete Research* 27, no. 2 (1997): 165-170.
- [35] D.C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & sons, 2017.
- [36] R.H. Myers, D.C. Montgomery, and C.M. Anderson-Cook. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, 2016.

- [37] M. Mokhtarian Asl, and A. Alipour. "Application of response surface method to the prediction of TBM penetration rate." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 55 (2018): 299-310. (in Persian)
- [38] Me. Nikooei Mahani, A. Mahmoodzadeh, M. Emamgholi. "Generating Random Samples Using Response Surface Methodology without need to Distribution of Parameters." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 54 (2018): 139-152. (in Persian)
- [39] M.J. Anderson. *DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation*. CRC press, 2017.
- [40] H. Ma, Z. Sun, and G. Ma. "Research on compressive strength of manufactured sand concrete based on response surface methodology (RSM)." *Applied Sciences* 12, no. 7 (2022): 3506.
- [41] M. Ali, A. Kumar, A. Yvaz, and B. Salah. "Central composite design application in the optimization of the effect of pumice stone on lightweight concrete properties using RSM." *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023): e01958.
- [42] M.A. Bezerra, R.E. Santelli, E.P. Oliveira, L.S. Villar, and L.A. Escalera. "Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization In Analytical Chemistry." *Talanta* 76, no. 5 (2008): 965-977.
- [43] M. Mardalizadeh, M.R. Soleymani Yazdi, and M.A. Safarkhanian. "Experimental modeling and the effect analysis of friction stir welding parameters of 5456 aluminum alloy using response surface method." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 12 (2014): 103-116. (in Persian)
- [44] A. Haghighi Asl, A. Ahmadpour, and N. Fallah. "Modeling of Petrochemical industries wastewater COD Removal with DOE&ANN." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 54 (2018): 295-307. (in Persian)