

The Effect of Simultaneous Use of Bentonite and Zeolite on the Behavior and Durability of SCC Concrete

Leila Shahryari^{1*}, Abbas Azimi², Ghazaleh Ghodoumizadeh³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

2- Master's degree in Civil Engineering, Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sepidan, Iran

3- Master's degree in Civil Engineering, Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sepidan, Iran

ABSTRACT

One of the future problems of humans is environmental pollution. Negligence and lack of management of greenhouse gas production threatens human life on the planet. Considering the emission of CO₂ gas due to the production of cement, it is important to find a way to reduce the consumption of cement in concrete as the most consumed building material. The use of pozzolans to make strong and durable concretes has become very important in the past years. In this research, two widely used pozzolans, namely zeolite and bentonite, were tried to improve the behavior and durability of SCC concrete. Therefore, the combination of zeolite and bentonite in weight ratios of 2.5%, 5%, 7.5% and 10% was used instead of cement. The tests performed include slump flow, concrete viscosity, compressive strength, and durability of concrete against melting and freezing cycles at different ages. The results of this research showed that the use of these pozzolans will reduce the strength in the early ages of concrete, but this problem will be solved with the increase in the age of concrete. So that using a combination of 5% zeolite and 5% bentonite can increase the final compressive strength (90 days) of concrete up to 8.6%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 March 2023

Revise Date: 29 April 2023

Accept Date: 14 May 2023

Keywords:

Bentonite

Zeolite

Pozzolan

Green Concrete

Environment

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.390580.3071>

*Corresponding author: Leila Shahryari
Email address: Leila.shahryari@iau.ac.ir

تأثیر استفاده همزمان از پوزولان‌های طبیعی بنتونیت و ژئولیت در نسبت‌های مختلف

حجمی بر روی رئولوژی، مقاومت فشاری و دوام یخ زدگی بتن خودتراکم

لیلا شهریاری^{۱*}، عباس عظیمی^۲، غزاله قدومی زاده^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران

چکیده

یکی از بحران‌های پیش روی بشر آسیب به محیط زیست است. عدم مدیریت و توجه کافی به انتشار گازهای گلخانه‌ای حیات انسان را بر کره زمین تهدید می‌کند. با توجه به انتشار گاز گلخانه‌ای CO_2 ناشی از تولید سیمان، یافتن راهی جهت کاهش حجم سیمان مصرفی برای تولید بتن که بعنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی شناخته می‌شود، اولویت دارد. استفاده از پوزولان‌ها به منظور ساخت بتن‌هایی با خصوصیات مکانیکی و دوام مناسب در دهه‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای یافته است. در این تحقیق با بهره‌گیری از دو نوع پوزولان طبیعی و پرمصرف، یعنی ژئولیت و بنتونیت تلاش گردید تا مقاومت و دوام بتن خودتراکم را افزایش داد. برای تحقق این هدف از ترکیب ژئولیت و بنتونیت بطور همزمان در نسبت‌های وزنی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ به جای سیمان استفاده شد. آزمایشات انجام شده شامل جریان اسلامپ، ویسکوزیته بتن، مقاومت فشاری، و بررسی دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد در سنین مختلف می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده همزمان از بنتونیت و ژئولیت در بتن خودتراکم بدلیل جذب آب بالا، میزان جریان اسلامپ و ویسکوزیته بتن را کاهش می‌دهند. همچنین استفاده از ترکیب ۵٪ ژئولیت و ۵٪ بنتونیت توانست تا ۸/۶٪ مقاومت فشاری نهایی (۹۰ روزه) بتن را افزایش دهد که این طرح با شاخص اقتصادی ۴/۸، مقرون به صرفه‌ترین طرح اختلاط مورد آزمایش انتخاب شد. در ادامه نتایج آزمایش دوام بتن در برابر چرخه یخ زدگی نشان داد که استفاده از ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ بنتونیت و ژئولیت می‌تواند میزان مقاومت فشاری را به ترتیب به میزان ۱۲/۸، ۱۳/۴، ۱۳/۹، ۱۴/۴٪ کاهش دهد.

کلمات کلیدی: بنتونیت، ژئولیت، پوزولان، بتن سبز، محیط زیست.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۲/۰۱/۰۴	۱۴۰۲/۰۲/۰۹	۱۴۰۲/۰۲/۲۴	۱۴۰۲/۰۲/۲۴	۱۴۰۲/۱۱/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.390580.3071
*نویسنده مسئول:		لیلا شهریاری			
پست الکترونیکی:		Leila.shahryari@iaua.ac.ir			

۱- مقدمه

تولید سیمان جزء صنایعی است که بیشترین آلودگی زیست محیطی کره زمین را در پی دارد. در سال ۲۰۱۹ میلادی تخمین زده شد که تولید سیمان حدود ۸٪ از دی اکسید کربن جهان را منتشر کرده و از این حیث صنعت سیمان سومین منتشرکننده بزرگ گازهای گلخانه‌ای در جهان می‌باشد [۱]. انتظار می‌رود که این مقدار در دهه‌های آینده با رشد اقتصادی و توسعه سریع شهرنشینی در جنوب شرقی آسیا و کشورهای جنوب صحرای آفریقا افزایش یابد. طبق گزارش‌های آژانس بین المللی انرژی و شورای جهانی توسعه پایدار صنعت سیمان، تا سال ۲۰۵۰ میلادی تولید سیمان می‌تواند تا ۲۳٪ افزایش یابد [۲]. این وضعیت یک چالش مهم برای مبارزه با تغییرات آب و هوا است. همچنین این شورا در سال ۲۰۱۸ میلادی تخمین زد که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای متعلق به تولید سیمان باید تا سال ۲۰۳۰ میلادی حداقل ۱۶٪ کاهش یابد [۳]. در حالیکه این فرآیند، از زمان اختراع سیمان یعنی حدود دو قرن پیش تغییرات اندکی داشته است [۴]. ایران در حال حاضر پانزدهمین کشور تولیدکننده سیمان در جهان به شمار می‌آید و رتبه اول را به عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده سیمان در منطقه خاورمیانه در اختیار دارد. مطابق آخرین آمار در ایران ۷۷ کارخانه تولید سیمان وجود دارد و تخمین زده می‌شود که تا پایان سال ۱۴۰۴ تولید سیمان در کشور به ۱۲۰ میلیون تن در سال برسد [۴۹]. گسترش شهرنشینی و نیاز به مسکن در دهه‌های اخیر منجر به برطرف کردن نیازها در صنعت ساخت و ساز، در پی استفاده از مصالحی است که هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد و هم کمترین آسیب را به محیط زیست برساند. حفاظت از محیط زیست برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه مورد بحث و بررسی می‌باشد. برای تولید سیمان ابتدا سوخت‌های فسیلی برای گرم کردن کوره با دمای مورد نیاز برای تجزیه مواد، سوخته می‌شوند و در این فرآیند کربن منتشر می‌شود. علاوه بر این، فرآیند تجزیه حرارتی به خودی خود منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، زیرا کربن به دام افتاده در سنگ آهک با اکسیژن موجود در هوا ترکیب می‌شود تا دی اکسید کربن به عنوان یک محصول فرعی ایجاد شود. تقریباً دو سوم از انتشار کربن مرتبط با سیمان ناشی از این واکنش می‌باشد [۵]. البته تولیدکنندگان سیمان هم برای کاهش انتشار گازها اقداماتی انجام داده‌اند. به لطف پیشرفت در بهره‌وری انرژی و ترفندهای مربوط به مخلوط‌های بتنی، میانگین حدود دی اکسید کربن حاصل از تولید سیمان طی ۲۰ سال گذشته ۱۸٪ در سطح جهان کاهش یافته است [۶]. بطوریکه برخی از تولیدکنندگان سیمان، فناوری‌هایی را برای جلوگیری از ورود و انتشار دی اکسید کربن به هوا بکار می‌برند، اما چنین سیستم‌هایی در مقیاس زیاد نمی‌تواند تأثیرگذاری قابل توجهی داشته باشد. بنابراین آنچه صنعت سیمان باید انجام دهد، سرمایه‌گذاری و تلاش برای تولید مواد جدید یا جایگزین سیمان است که نیازی به کلینکر نداشته باشد. این تنها روشی است که می‌تواند به مسئله انتشار گازهای بالادست CO₂ ناشی از تولید سیمان موثر واقع شود [۷]. در یک دهه اخیر استفاده از مواد مکمل سیمانی برای مدیریت گرمایش جهانی و کمبود انرژی به دلیل استفاده بیش از حد از منابعی که تجدیدناپذیر افزایش یافته است [۸]. بنابراین محققان در پی یافتن پوزولان‌هایی ارزان قیمت و مقرون به صرفه هستند که باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شوند. منبع این پوزولان‌ها و مواد مکمل می‌تواند موادی طبیعی یا زباله‌های صنعتی باشند که برای تولید آن‌ها انرژی زیادی صرف نمی‌شود [۹].

مواد پوزولانی انواع مختلفی دارد که منشأ آن‌ها طبیعی، صنعتی و شیمیایی می‌باشد. مطابق با تعریف استاندارد ASTM-C618، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و استاندارد ملی بتن ایران (آبا)، نیز پوزولان‌ها ماده‌ای سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی هستند که به تنهایی خاصیت چسبندگی ندارند، اما به شکل ذرات بسیار ریز در مجاورت رطوبت با درجات حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم، واکنش شیمیایی داشته و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی خمیر بتن را افزایش می‌دهند [۸-۵]. از نظر زمین شناسی پوزولان‌ها حاصل انفجار آتشفشانی یا ساختار سیلیسی هستند که میل به ترکیب با آهک و مواد قلیایی دارند [۱۱]. پوزولان در ایران در سال ۱۳۲۰ کشف شد [۱۵]. از پوزولان‌های طبیعی ایران می‌توان تراس، توف، پومیس، خاک سرخ، پوکه، بنتونیت و زئولیت را نام برد. دامنه کوه‌های سبلان، سه‌پند، دماوند، تفتان، استان کرمان و سمنان نیز از جمله مکان‌های دارای معادن پوزولان‌های طبیعی در ایران می‌باشند [۱۴].

تاکنون مطالعات زیادی بر روی تاثیر استفاده از پوزولان‌های طبیعی بعنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن انجام گرفته است. ژانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۰ میلادی به بررسی استفاده از بنتونیت به جای بخشی از سیمان در بتن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۵٪ بنتونیت در بتن، باعث افزایش ۸٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه کنترل می‌شود [۱۲]. هلمس^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی به بررسی خصوصیات مکانیکی و نفوذپذیری بتن دارای متاکائولن، زئولیت و خاکستر بادی به صورت ترکیب دوگانه و سه‌گانه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین میزان مقاومت فشاری بدست آمده مربوط به ترکیب سه‌گانه پوزولان‌ها به میزان جایگزینی ۱۵٪ بود و استفاده از مقادیر بیش از آن باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد [۱۳]. کارمو^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی به بررسی اثر میکروسلیس و زئولیت بر رفتار میان مدت بتن خودتراکم پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده همزمان از ۵٪ زئولیت و ۵٪ میکروسلیس در بتن باعث افزایش ۲۴٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه، افزایش ۱۲٪ مقاومت کششی و افزایش ۳٪ مقاومت خمشی بتن می‌شود [۱۴]. لویز^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی میزان نفوذپذیری و مقاومت بتن دارای دوده سیلیسی، زئولیت و خاکستر بادی پرداختند. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری نشان داد که پوزولان‌های مورد استفاده در این تحقیق باعث کاهش میزان منافذ نفوذپذیر و افزایش تراکم نمونه‌ها می‌شوند. همچنین گزارش شد که دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها و زئولیت و خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود [۱۷]. زرگر و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی و ارزیابی الیاف کاه بر روی مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی زئولیت و بنتونیت پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین ترکیب حاوی ۶٪ زئولیت، ۶٪ بنتونیت و یک درصد الیاف کاه بوده که توانسته به ۹۸٪ مقاومت خمشی نسبت به نمونه کنترل دست یابد [۱۸]. ساجدی و همکاران در سال ۱۴۰۰ به بررسی فنی و اقتصادی بتن‌های بازیافتی حاوی پوزولان‌های طبیعی پرداختند. بطوریکه برای افزایش کیفیت بتن‌های بازیافتی از پوزولان‌های میکروسلیس، خاکستر بادی و زئولیت طبیعی به صورت جداگانه جایگزین بخشی از سیمان گردیده است. نتایج این تحقیق نشان داد که بتن دارای ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی، ۱۰٪ میکروسلیس و ۱۰٪ زئولیت طبیعی از مطلوبیت فنی و اقتصادی بیشتری نسبت به بتن شاهد برخوردار است [۳۷].

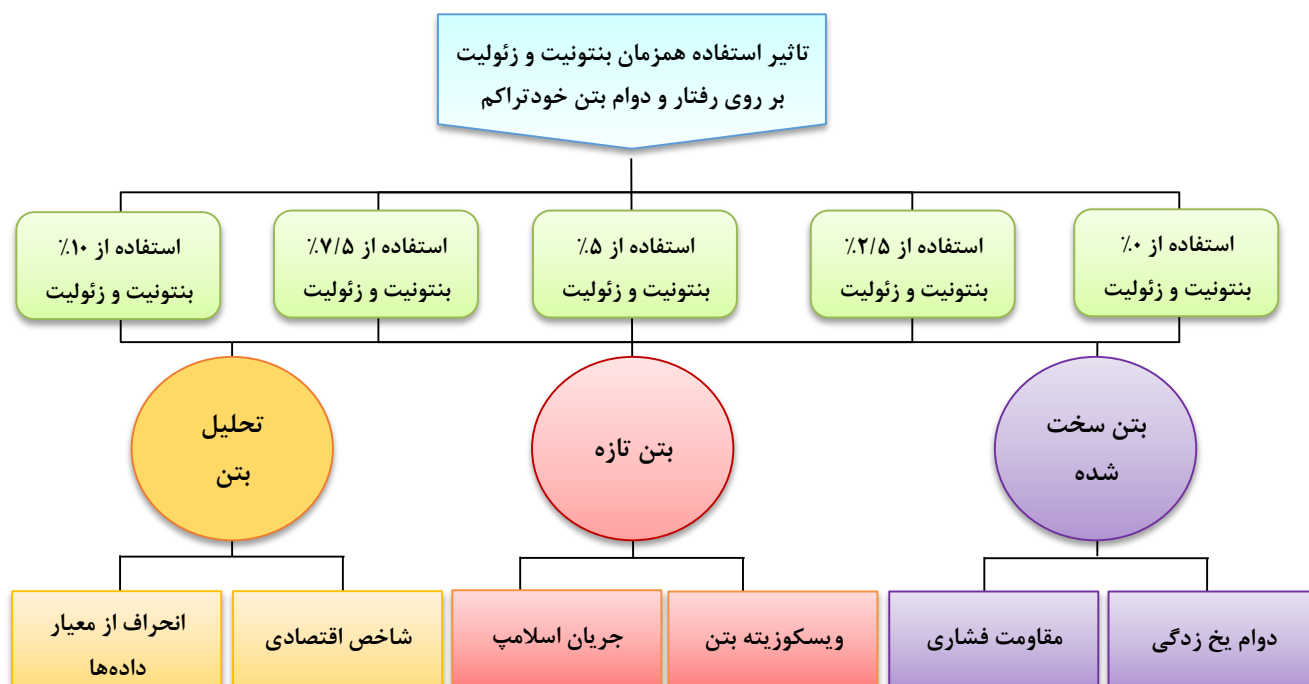
با توجه به نتایج بدست آمده از سایر تحقیقات گذشته، می‌توان نتیجه گرفت که عمدتاً میزان استفاده از پوزولان‌های طبیعی در بتن با توجه به نوع و ساختار شیمیایی آن ماده متغیر می‌باشد. بنابراین ضرورت دارد تا میزان استفاده از هر نوع پوزولان در بتن بر اساس آزمایش و بهینه‌یابی مورد بررسی و سنجش قرار گیرد. از طرفی استفاده ترکیبی از دو پوزولان زئولیت و بنتونیت در بتن خودتراکم از ابهامات استفاده از این روش است که تاکنون پاسخی برای آن یافت نشده است. در این تحقیق پس از معرفی مصالح مصرفی و تعیین استانداردهای روش کار، اقدام به تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی شامل جریان اسلامپ، ویسکوزیته بتن خودتراکم، مقاومت فشاری و دوام بتن در برابر یخ زدگی اقدام گردید. شکل شماره ۱ فلوجارت مراحل آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

¹ Zhang.k

² Helmes.t

³ Karmo.j

⁴ Lopez.s



شکل ۱ فلوجارت مراحل آزمایشات انجام گرفته در این تحقیق

۲- مواد و مصالح

۲-۱- سنگدانه

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از ماسه شکسته و درشت‌دانه مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر استفاده گردید. ماسه مصرفی دارای وزن مخصوص خشک 1650 kg/m^3 و جذب آب آن $1/57\%$ اندازه‌گیری شد. همچنین مدول نرمی ماسه به روش ASTM-C136 اندازه‌گیری و میزان آن $2/9$ تعیین شد. در ادامه وزن مخصوص خشک درشت‌دانه، 1350 kg/m^3 و میزان جذب آب آن برابر با $2/2\%$ اندازه‌گیری شد.

جدول ۱ مشخصات شن مصرفی جهت ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص خشک
	mm	%	kg/m^3
شن	۱۹	۲/۳	۱۳۵۰
ماسه	۴/۷۵	۱/۵۷	۱۶۵۰

۲-۲- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق، از نوع سیمان تیپ ۲ سپاهان می‌باشد. چگالی این سیمان $3/10 \text{ g/cm}^3$ است. آنالیز شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۲ که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده این محصول می‌باشد ضمیمه شده است [۱۶].

جدول ۲ ساختار شیمیایی سیمان تیپ ۲ سپاهان [۴۳]

SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Cl %	SO ₃ %	L.O.I %	I.R %	C ₃ A %
۲۰/۸۰	۴/۷۰	۴/۱۰	۶۴/۲۰	۲/۲۵	۰/۰۲۵	۲/۳۵	۰/۸۰	۰/۳۰	۵/۷۰

۳-۲- بنتونیت

بنتونیت^۵ یک پوزولان طبیعی است که از خانواده رس‌ها می‌باشد. این ماده نوعی رس ریزدانه است که حداقل دارای ۸۵٪ رس مونت‌موریلونیت می‌باشد [۲۲]. این پوزولان طبیعی در استان‌های سمنان و خراسان جنوبی به وفور یافت می‌شود. بنتونیت‌ها عمدتاً بر پایه سدیم دار و کلسیم دار یافت می‌شوند. بنتونیت سدیم دار وقتی با آب ترکیب می‌شود، منبسط شده و حجم آن چند برابر می‌شود و نیز دارای چسبندگی می‌شود به همین دلیل به بنتونیت سدیم دار، متورم نیز می‌گویند [۲۴]. بنتونیت مصرفی در این تحقیق از نوع سدیم‌دار با حداکثر اندازه ۳۷ میکرون و دارای رنگ طوسی می‌باشد که از معادن استان سمنان تهیه شده است. سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی این محصول به شرح جدول شماره ۳ و ۴ می‌باشد.

جدول ۳ مشخصات فیزیکی بنتونیت [۴۳]

اندازه اسمی مش	حداکثر اندازه اسمی (میکرومتر)	جذب آب %	تورم Ml/gr ²	چگالی (gr/cm ³)	سختی موسس	رنگ
# ۴۰۰	۲۷ μ	۳۰۰-۴۰۰	۲۳	۱/۹	۲	سفید- خاکستری

جدول ۴ خصوصیات شیمیایی بنتونیت [۴۳]

نام عنصر	ساختار شیمیایی	مقدار %
اکسید آلومینیوم	Al ₂ O ₃	۱۱/۸۸
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	۱/۷۳
اکسید منیزیم	MgO	۱/۴۲
اکسید سیلیس	SiO ₂	۶۹/۸
اکسید کلسیم	CaO	۰/۹۶
اکسید پتاسیم	K ₂ O	۰/۴۷
اکسید سدیم	Na ₂ O	۰/۵
اکسید تیتانیوم	TiO ₂	۰/۱

۴-۲- زئولیت

زئولیت^۶ یک پوزولان طبیعی است که به دو دسته معدنی و رسوبی تقسیم‌بندی می‌شوند. نوع معدنی عموماً جزء سنگ‌های آذرین یا آتشفشانی می‌باشد و زئولیت رسوبی نوع صنعتی آن است که نسبت سیلیسیم به آلومینیوم آن بیشتر از نوع آتشفشانی می‌باشد [۲۶]. زئولیت منبع غنی از اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیس است که با کلسیم هیدروکسید موجود در سیمان واکنش داده و منجر به تولید ژل آلومینات خواهد شد (خاصیت آمورف دارد). این پوزولان در ایران به وفور یافت می‌شود و به راحتی قابل استخراج و فراوری است [۲۷].

⁵ Bentonite⁶ Zeoleit

زئولیت مصرفی در این تحقیق از نوع معدنی و مخلوطی از مش‌های ۸۰۰ و ۱۵۰۰ می‌باشد. زئولیت مصرفی مستخرج از معادن زئولیت منطقه آفر استان سمنان می‌باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی زئولیت بکار رفته در این تحقیق به شرح جدول شماره ۵ و ۶ می‌باشد.

جدول ۵ مشخصات فیزیکی زئولیت [۴۳]

رنگ	مدول نرمی	سختی موهس	چگالی (gr/cm ³)	حداکثر اندازه اسمی (میکرومتر)	اندازه اسمی مش
سفید	۰/۹	۳	۲/۳	۱۵ μ	# ۸۰۰
	۰/۶			۸ μ	# ۱۵۰۰

جدول ۶ خصوصیات شیمیایی زئولیت [۴۳]

مقدار %	ساختار شیمیایی	نام عنصر
۶۶/۲۱	AL ₂ O ₃	اکسید آلومینیوم
۴۴/۱۰	Fe ₂ O ₃	اکسید آهن
۲/۱	Mgo	اکسید منیزیم
۸۰/۶۷	SiO ₂	اکسید سیلیس
۶۸/۱	CaO	اکسید کلسیم
۵/۳	K ₂ O	اکسید پتاسیم

۲-۵- آبر روان کننده

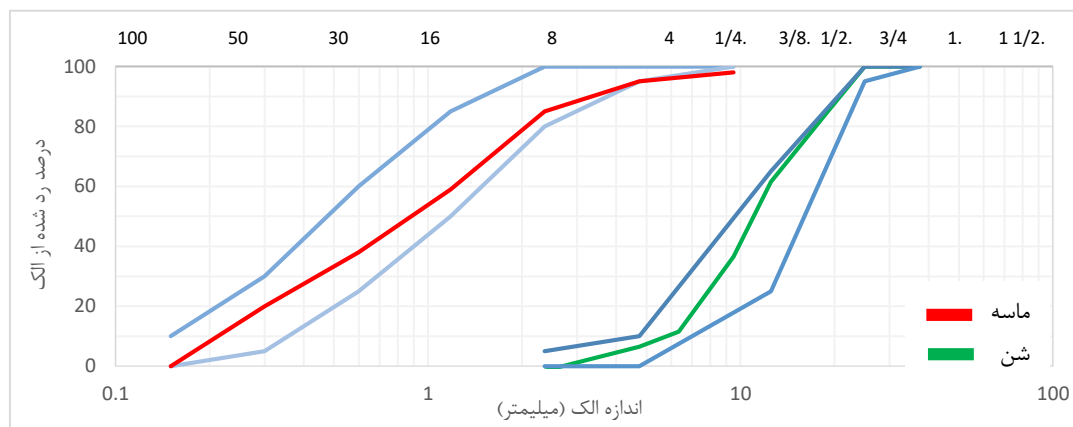
یکی از ویژگی‌های متمایز مهم بتن خودتراکم، روانی و کارایی بالای این نوع بتن می‌باشد. طی چند سال اخیر، استفاده از روان کننده‌ها یا کاهنده‌های آب، به جهت افزایش کیفیت خصوصیات مکانیکی و روئولوژی بتن‌های خودتراکم و نیز دستیابی به روانی مطلوب بسیار مرسوم بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق برای ساخت بتن خودتراکم و تامین روانی مدنظر از آبر روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات، استفاده گردید [۱۵]. خصوصیات فیزیکی این ماده مطابق و به شرح جدول شماره ۷ می‌باشد.

جدول ۷ مشخصات فیزیکی آبر روان کننده SP400 [۱۵]

رنگ	وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	PH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
بی رنگ	۱/۱ gr/cm ³	ASTM C1017	کمتر از ۰/۱ درصد	۵/۵۸	مایع	۰/۱ تا ۱٪ وزن سیمان

۳- دانه بندی

در آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها، مصالح سنگی با ایجاد لوزه توسط الک‌های مختلف شماره‌بندی شده عبور داده می‌شوند و اندازه دانه‌های روی هر الک و مقدار آن مشخص می‌گردد. البته قابل ذکر است که برای دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه از الک یا مقسم استفاده می‌شود. در این تحقیق مطابق با استاندارد ASTM-C136 دانه‌بندی با الک‌های سیمی استاندارد مدرج استفاده گردید که دانه‌بندی آن در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. با محاسبه مقادیر درصد تجمعی میزان عبور کرده از هر الک که بر اساس شماره بندی استاندارد روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، می‌توان این مقادیر را با منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه نمود [۳۸]. در منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها، محور عمودی نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می‌باشد.



شکل ۲ دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

۴- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن خودتراکم در این تحقیق مجموعاً متشکل از ۶۵ نمونه می‌باشد. آزمایشات انجام شده شامل جریان اسلامپ (روش T_{50})، قیف V (ویسکوزیته بتن خودتراکم)، مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، سنجش دوام بتن در برابر یخ‌زدگی طی ۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه تکرار شونده می‌باشد. قابل ذکر است که برای آزمایش مقاومت فشاری، سه نمونه و برای سنجش دوام بتن در برابر چرخه انجماد، دو نمونه مورد سنجش قرار گرفت و میانگین جواب آن‌ها بعنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد. جدول شماره ۸ استاندارد روش انجام آزمایش، تعداد نمونه به تفکیک هر آزمایش، ابعاد نمونه و شرح آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۸ مبنای استاندارد و تعداد و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

ردیف	شماره استاندارد	تعداد نمونه	ابعاد نمونه (میلیمتر)	نوع نمونه	شرح آزمایش
۱	ASTM-C1611	-	-	-	جریان اسلامپ (روانی)
۲	BS-EN-12350-9	-	-	-	قیف V
۳	BS-EN-12390-1	۴۵	۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰	مکعبی	مقاومت فشاری
۴	ASTM-C666-B	۲۰	۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰	مکعبی	ذوب و انجماد

۵- طرح اختلاط

مبنای طرح اختلاط برای ساخت بتن خودتراکم در این تحقیق تجربه آزمایشگاهی و مطالعات پیشین سایر تحقیقات بوده که در آن محدودیت‌ها و ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران در نظر گرفته شده است [۱-۲-۳-۶]. در این طرح مخلوط عیار سیمان در نمونه کنترل 450 kg/m^3 در نظر گرفته شده. همچنین حداکثر اندازه سنگ مورد استفاده ۱۹ میلی‌متر و نسبت آب به سیمان ۰/۴ در نظر گرفته شده است. در ادامه جهت کاهش حجم سیمان مصرفی و افزایش کیفیت و قوام بتن خودتراکم، از پودر زئولیت و بنتونیت بطور همزمان در نسبت‌های وزنی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ جایگزین سیمان استفاده شده. همچنین جهت حفظ کارایی بتن خودتراکم از محلول آبروان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات به میزان ثابت ۳٪ وزنی سیمان استفاده گردید. جدول شماره ۹ میزان مصالح مصرفی برای طرح مخلوط‌های مورد بررسی در مقیاس یک متر مکعب نشان می‌دهد.

جدول ۹ طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش

ردیف	نام	سیمان	شن	ماسه	بنتونیت	زئولیت	آبروان کننده	آب	نسبت بنتونیت به سیمان	نسبت زئولیت به سیمان
		kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	lit/m^3		
۱	SC-B-Z-0%	۴۵۰	۸۵۰	۱۰۵۰	۰	۰	۱۳/۵	۱۸۰	٪۰	٪۰
۲	SC-B-Z-2.5%	۴۲۷/۵	۸۵۰	۱۰۵۰	۱۱/۲۵	۱۱/۲۵	۱۳/۵	۱۸۰	٪۲/۵	٪۲/۵
۳	SC-B-Z-5%	۴۰۵	۸۵۰	۱۰۵۰	۲۲/۵	۲۲/۵	۱۳/۵	۱۸۰	٪۵	٪۵
۴	SC-B-Z-7.5%	۳۸۲/۵	۸۵۰	۱۰۵۰	۳۳/۷۵	۳۳/۷۵	۱۳/۵	۱۸۰	٪۷/۵	٪۷/۵
۵	SC-B-Z-10%	۳۶۰	۸۵۰	۱۰۵۰	۴۵	۴۵	۱۳/۵	۱۸۰	٪۱۰	٪۱۰

در این آزمایش برای ساخت بتن، کلیه سنگ‌دانه‌ها ابتدا به مدت ۳ روز در دمای $+25$ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک و آب موجود در حفرات آن تبخیر شود. در ابتدا شن، ماسه و نیمی از آب به داخل میکسر ریخته و به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شدند. پس از آن سیمان، پودر زئولیت و پودر بنتونیت اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر مخلوط شدند. در انتها آب باقیمانده و محلول آبروان کننده به آرامی به مخلوط اضافه گردید و تمامی مصالح به مدت ۳ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. قابل ذکر است که سرعت دوران میکسر بتن ۱۵ دور در دقیقه تنظیم گردید. در نهایت، آزمایشات مربوط به بتن تازه بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. به منظور جلوگیری از چسبندگی بتن به جدار قالب، ابتدا جداره‌های داخلی قالب با یک لایه نازک روغن معدنی آغشته و بعد بتن بوسیله پارچ ملات‌ریز داخل قالب ریخته شد.



شکل ۳ مدت زمان و ترتیب اختلاط اجزای بتن [ماخذ: نگارندگان]

۶- یافته‌ها

۶-۱- جریان اسلامپ و ویسکوزیته بتن

جریان اسلامپ یا میزان روانی بتن، معیاری برای تعیین روانی و جریان‌پذیری بتن خودتراکم قبل از استفاده در محل بتن ریزی است. معمولاً مقدار جریان اسلامپ بین ۵۰ تا ۷۵ سانتیمتر است. مقدار بیشتر نشانه حرکت بهتر بتن خودتراکم تحت وزن خود بوده که می‌تواند قالب را سریع‌تر پر کند [۶]. آزمایش T₅₀ میزان گرانیوی بتن خودتراکم را نشان می‌دهد [۹]. زمان بیشتر در این آزمایش نشانه زیاد بودن گرانیوی بتن است. اگر مقدار T₅₀ مساوی یا کمتر از ۲ ثانیه باشد، به مفهوم گرانیوی کم مخلوط و بیشتر از ۵ ثانیه به معنی گرانیوی زیاد مخلوط است. گرانیوی خیلی کم احتمال جداسازی را افزایش می‌دهد. با در نظر گرفتن اینکه زئولیت و بنتونیت ذاتاً جذب آب بسیار



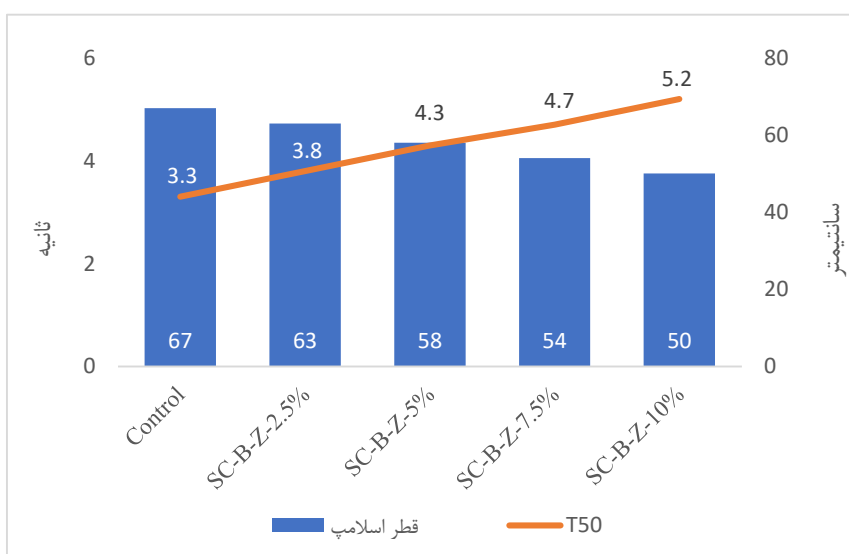
شکل ۴ برنامه آزمایشگاهی تحقیق (از سمت چپ به راست به ترتیب: اندازه قطر جریان اسلامپ، آزمایش قیف V، مقاومت فشاری، نمایشگر دستگاه فریزر بتن)

بالایی در مقایسه با سیمان دارد، کاهش میزان جریان اسلامپ بتن دور از انتظار نبود. همچنین با توجه به سطح مخصوص و افزایش قوام ذرات بنتونیت ناشی از جذب آب، قوام مخلوط بتن افزایش پیدا کرده و باعث جلوگیری از آب انداختگی بتن گردید. استفاده همزمان از این دو پوزولان باعث همگن شدن خمیره سیمان در بتن شد و نیز زمان جاری شدن مخلوط بتن (T₅₀) را افزایش داد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش جریان اسلامپ بر روی تمامی طرح مخلوط‌ها، مشخص گردید که میزان روانی تمامی طرح‌ها در محدوده مجاز استاندارد می‌باشد. مطابق با نتایج بدست آمده مشخص گردید که اندازه قطر اسلامپ طرح دارای ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ پوزولان ترکیبی به ترتیب به میزان ۶، ۱۳/۴، ۱۹/۴ و ۲۵/۴٪ کاهش می‌یابد.

نتیجه آزمایش قیف V بیانگر ویسکوزیته یا قوام بتن هنگام جاری شدن مخلوط بتن خودتراکم می‌باشد. مطابق آنچه قبلاً بیان شد، زمان مناسب تخلیه بتن خودتراکم از قیف V بین ۶ تا ۱۲ ثانیه است. اگر زمان تخلیه بتن بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد، بیانگر ویسکوزیته خمیری بالای بتن است و اگر زمان تخلیه بتن کمتر از ۶ ثانیه باشد، نشان دهنده ویسکوزیته کم بتن است که در این حالت احتمال وقوع پدیده جداسازی وجود دارد [۱۱]. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که تمامی طرح مخلوط‌های مورد آزمایش دارای ویسکوزیته مناسب می‌باشند. این مهم بدلیل وقوع چسبندگی مناسب بین سنگدانه و خمیره سیمان حاصل می‌شود. افزایش حجم و قوام خمیره سیمان ناشی از افزودن زئولیت و بنتونیت، از جمله دلایل مهم بروز این نتیجه تلقی می‌گردد. بنابراین می‌توان ادعان داشت که استفاده همزمان از زئولیت و بنتونیت باعث افزایش قوام بتن خودتراکم، جلوگیری از جداسازی سنگدانه، جلوگیری از آب انداختگی و بهبود ویسکوزیته خواهد شد. مطابق با نتایج بدست آمده مشخص گردید که میزان ویسکوزیته طرح دارای ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ پوزولان ترکیبی به ترتیب به میزان ۱۱/۱، ۲۲/۲، ۳۵ و ۴۶٪ افزایش می‌یابد. جدول شماره ۱۰ اندازه قطر اسلامپ و مدت زمان جاری شدن بتن خود تراکم و همچنین میزان ویسکوزیته هر طرح مخلوط را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰ مقایسه میزان روانی و ویسکوزیته طرح مخلوط‌های مورد آزمایش

ردیف	نام طرح مخلوط	قطر اسلامپ سانتیمتر	T50 ثانیه	درصد تغییر (قطر اسلامپ) %	قیف V ثانیه	درصد تغییر (قیف V) %
۱	SC-B-Z-0%	۶۷	۳/۳	۰	۶/۳	۰
۲	SC-B-Z-2.5%	۶۳	۳/۸	-۶/۰	۷	۱۱/۱
۳	SC-B-Z-5%	۵۸	۴/۳	-۱۳/۴	۷/۷	۲۲/۲
۴	SC-B-Z-7.5%	۵۴	۴/۷	-۱۹/۴	۸/۵	۳۵/۰
۵	SC-B-Z-10%	۵۰	۵/۲	-۲۵/۴	۹/۲	۴۶/۰



شکل ۵ مقایسه میزان روانی و ویسکوزیته طرح مخلوط‌های مورد آزمایش

۶-۲- مقاومت فشاری

پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که عمدتاً استفاده و بکارگیری از انواع پوزولان در بتن سبب کاهش سرعت گیرش مقاومت در سنین اولیه خواهد شد [۱-۲-۳-۵]. نتایج بدست آمده از میزان مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق نیز موید این موضوع است. به طور کلی با افزودن پوزولان‌ها بجای سیمان، مقدار مقاومت فشاری در سنین اولیه کاهش می‌یابد اما با افزایش سن عمل‌آوری و انجام کلیه واکنش‌های پوزولانی این اختلاف مقاومت نسبت به نمونه شاهد تا حدودی از بین می‌رود و جبران می‌گردد [۶]. در سنین اولیه به علت در دسترس نبودن کلسیم هیدروکسید $Ca(OH)_2$ کافی برای شروع واکنش‌های پوزولانی، اُفت مقاومت فشاری در بتن رخ می‌دهد. ولی در سنین بالا به دلیل پیشرفت سرعت هیدراتاسیون و افزایش سیلیکات کلسیم که در طی واکنش‌های پوزولانی رخ می‌دهد، مقاومت فشاری روند رو به رشدی خواهد داشت. بطوریکه در طرح SC-B-Z-2.5% و SC-B-Z-5% مشخص گردید که مقاومت فشاری نهایی ۹۰ روزه آن در مقایسه با نمونه شاهد به ترتیب ۴/۲ و ۸/۶٪ افزایش پیدا کرده است. از طرفی با کاهش حجم سیمان، به همان نسبت فرآیند هیدراتاسیون

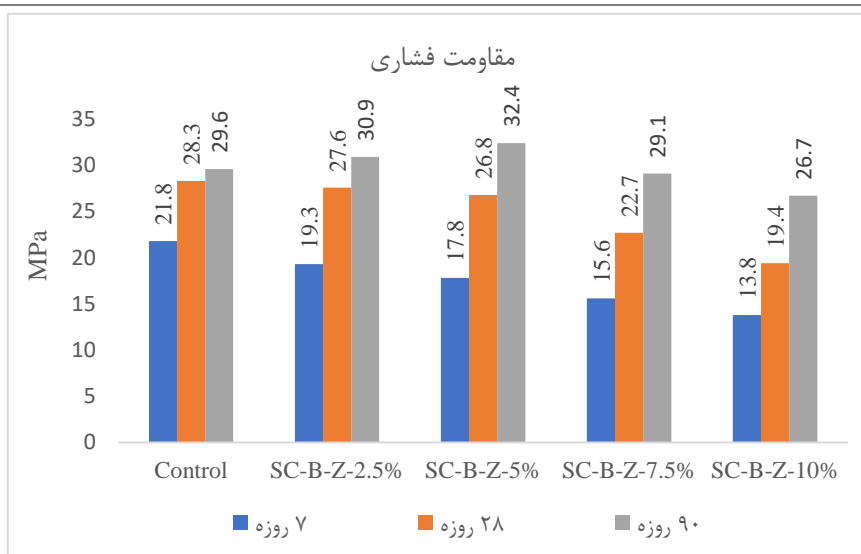
(C_3S, C_2S) کاهش پیدا می‌کند و آهک شکفته نشده در سیمان به همان میزان کمتر می‌شود. اما با افزایش سن عمل‌آوری، اثر افزودن پوزولان‌ها باعث می‌شود تا مقاومت فشاری افزایش یابد و در مواردی برابر با نمونه شاهد یا به مقاومتی بیش از نمونه شاهد دست یابند. این مهم متأثر از افزایش تراکم ایجاد شده توسط ریزدانه‌های بنتونیت و زئولیت در بتن می‌باشد. قبلاً اشاره شد که پوزولان‌ها به تنهایی نمی-

توانند از خود مقاومتی نشان دهند، به طور کلی پوزولان‌ها از جمله زئولیت و بنتونیت به تنهایی فاقد خاصیت چسبندگی هستند و در مجاورت آهک موجود در سیمان در فرآیند هیدراتاسیون، خاصیت چسبندگی بیشتری پیدا می‌کنند.

حد بهینه استفاده همزمان از زئولیت و بنتونیت در این تحقیق، بطور جداگانه ۵٪ تعیین گردید. بطوریکه با افزودن مقادیر بیش از آن مانند طرح مخلوط SC-B-Z-7.5% و SC-B-Z-10% شاهد افت مقاومت فشاری نهایی (۹۰ روزه) به میزان به ترتیب ۱/۷ و ۱۰/۸٪ در مقایسه با نمونه شاهد خواهیم بود. اما با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌ها و مخاطرات زیست محیطی و سایر مزایای دیگری که استفاده از کاهش حجم مصرفی سیمان دارد، این میزان افت مقاومت فشاری قابل توجیه و استفاده از آن می‌تواند قابل قبول باشد.

جدول ۱۱ مقایسه مقاومت فشاری کسب شده نمونه‌های مورد آزمایش در سنین مختلف

ردیف	نام طرح مخلوط	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			میزان تغییر مقاومت (درصد)		
		۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
۱	SC-B-Z-0%	۲۱/۸	۲۸/۳	۲۹/۶	-	-	-
۲	SC-B-Z-2.5%	۱۹/۳	۲۷/۶	۳۰/۹	-۲/۵۴	-۱۲/۹۵	۴/۲۱
۳	SC-B-Z-5%	۱۷/۸	۲۶/۸	۳۲/۴	-۵/۶۰	-۲۲/۴۷	۸/۶۴
۴	SC-B-Z-7.5%	۱۵/۶	۲۲/۷	۲۹/۱	-۲۴/۶۷	-۳۹/۷۴	-۷/۲
۵	SC-B-Z-10%	۱۳/۸	۱۹/۴	۲۶/۷	-۴۵/۸۸	-۵۷/۹۷	-۱۰/۸۶



شکل ۶ مقایسه مقاومت فشاری کسب شده نمونه‌های مورد آزمایش در سنین مختلف

۳-۶- انحراف از معیار داده‌ها

میزان انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه میزان از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند. در حالیکه انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. به طور کلی واریانس و انحراف معیار، معیارهای پراکندگی

هستند که درجه تغییر پذیری، گسترش یا پراکندگی یک متغیر را تعیین می‌کنند [۲۷]. در این تحقیق میزان انحراف از معیار داده‌ها از طریق رابطه ذیل الذکر محاسبه شده است.

در ابتدا از رابطه شماره ۱ میزان میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش تعیین می‌شود [۲۷]:

$$A = \frac{\sum xi}{N} \quad (1)$$

$\sum xi$ = مجموع مقاومت فشاری نمونه‌ها

N = تعداد نمونه‌ها

در گام دوم از رابطه شماره ۲ مربع اختلاف میزان هر داده محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$m = (xi - A)^2 \quad (2)$$

در گام سوم از رابطه شماره ۳ انحراف معیار نمونه محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (xi - m)^2}{N - 1}} \quad (3)$$

در نهایت از رابطه شماره ۴ میزان ضریب تغییر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$V = \frac{S}{A} \times 100 \quad (4)$$

مطابق جدول شماره ۱۲ همانطور که ملاحظه می‌گردد نتایج هر دو سری بتن تقریباً دارای توزیع نرمال می‌باشد. قابل ذکر است نمونه ۷ روزه طرح مخلوط SC-B-Z-10% و نمونه ۲۸ روزه طرح SC-B-Z-0% به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان انحراف از معیار و ضریب تغییر در بتن می‌باشند. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول شماره ۱۲ می‌توان اذعان داشت که افزودن مقادیر بالای بنتونیت و ژئولیت در بتن عاملی برای افزایش میزان انحراف از معیار یا افزایش میزان ضریب تغییر خواهد بود. بطوریکه این پوزولان‌ها در روند هیدراتاسیون سیمان یا روند گیرش مقاومت سیمان بعضاً اختلالاتی ایجاد خواهند کرد. اما با این وجود میزان انحراف از معیار و ضریب تغییر در تمامی نمونه‌ها نشان دهنده کیفیت خوب آزمونه‌های بتنی ساخته شده می‌باشد. زیرا در ضوابط پذیرش مقاومت فشاری بتن انحراف معیار ۴ تا ۶ مگاپاسکال قابل پذیرش است [۲۷]. علاوه بر آن پیشنهاد شده که ضریب تغییرات مساوی یا کوچکتر از ۱۰٪ در بتن، نشان دهنده کنترل کیفیت مناسب می‌باشد [۲۸].

جدول ۱۲ مقایسه و محاسبه میزان واریانس و انحراف از معیار داده‌ها

ردیف	نام طرح	سن نمونه	انحراف معیار	درصد ضریب تغییرات
		روز	S	V
۱	SC-B-Z-0%	۷	۰/۲۰۸	۰/۰۴۳
		۲۸	۰/۲۰	۰/۰۴۰
		۹۰	۰/۲۵۲	۰/۰۶۳
		۷	۰/۲۶۵	۰/۰۷۰
۲	SC-B-Z-2.5%	۲۸	۰/۵۱۳	۰/۲۶۳
		۹۰	۰/۴۵۸	۰/۲۱۰

۰/۱۰۳	۰/۳۲۱	۷		
۰/۱۶۳	۰/۴۰۴	۲۸	SC-B-Z-5%	۳
۰/۱۷۳	۰/۴۱۶	۹۰		
۰/۵۴۳	۰/۷۳۷	۷		
۰/۱۶۳	۰/۴۰۴	۲۸	SC-B-Z-7.5%	۴
۰/۱۷۳	۰/۴۱۶	۹۰		
۰/۵۶۳	۰/۷۵۱	۷		
۰/۱۶۳	۰/۴۰۴	۲۸	SC-B-Z-10%	۵
۰/۴۹۳	۰/۷۰۲	۹۰		

۴-۶- دوام یخ زدگی

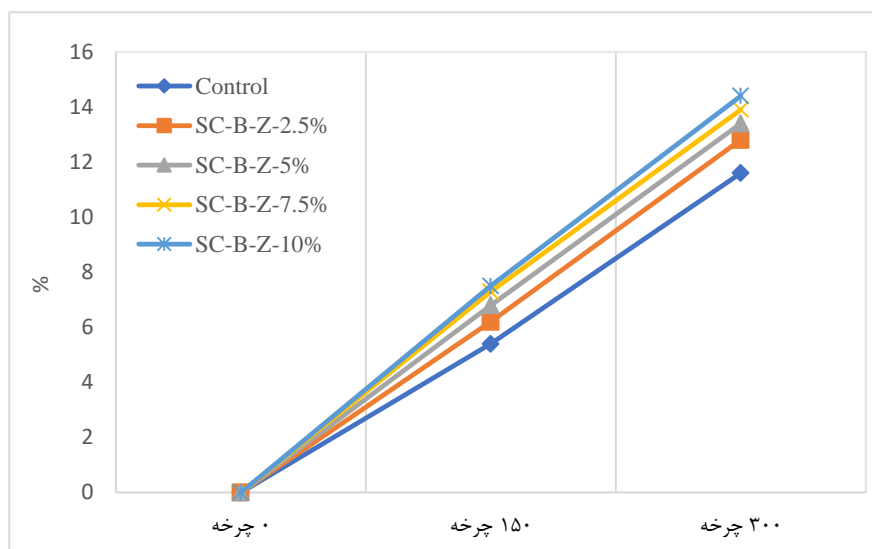
دوام نمونه‌های مورد مطالعه در برابر چرخه ذوب و انجماد از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا مساحت زیادی از کشور ایران در مناطق سردسیری قرار دارد و ممکن است استفاده از این بتن جهت ساخت و ساز در مناطق سردسیر مشکلات عدیده‌ای را بوجود آورد. بنابراین جهت سنجش میزان دوام نمونه‌ها در برابر چرخه یخبندان نیز آزمایش مطابق با استاندارد ASTM-C666-B در دمای ۱۸- تا ۴+ در بازه ۵ ساعته مورد آزمایش قرار گرفت. در ادامه پس از سپری نمودن ۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه تکرار شونده نیز میزان آفت وزن و آفت مقاومت فشاری نمونه‌ها اندازه‌گیری و با نمونه شاهد مقایسه گردید. نتایج بدست آمده از انجام این آزمایش به شرح جدول شماره ۱۳ و شکل شماره ۷ می‌باشد. به استناد از این نتایج مشخص گردید که بدلیل میزان جذب آب بالای پوزولان‌ها میزان انبساط و انقباض ناشی از یخ زدن و آب شدن در بتن افزایش می‌یابد و در نتیجه نمونه‌ها دچار ترک و زوال زودرس می‌گردند. گفتنی است که مونت موریلونیت موجود در بنتونیت خاصیت ارتجاعی یا پلاستیکی داشته و به همین دلیل بنتونیت باعث ایجاد نرمی بیشتری در بتن می‌شود [۲]. بطوریکه با افزودن هر چه بیشتر بنتونیت در بتن آهنگ آفت زوال بتن کاهش می‌یابد. از دیگر عوامل موثر بر دوام یخ زدگی بتن می‌توان به ژئولیت اشاره کرد. از طرفی ژئولیت پیوند مولکولی ضعیف‌تری نسبت به سیمان دارد و نوع پیوند بین مولکولی آن از نوع واندروالسی می‌باشد [۵]. بنابراین تحت شرایط ذوب و انجماد عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد.

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده هر چه بیشتر از پوزولان‌های ژئولیت و بنتونیت در بتن می‌تواند باعث کاهش آفت مقاومت فشاری پس از ۳۰۰ چرخه انجماد گردد بطوریکه میزان آفت مقاومت فشاری طرح 10% , SC-B-Z-7.5% در مقایسه با طرح SC-B-Z-5% , 2.5% آهنگ زوال کمتری دارد و مشخص است که عمده این خرابی، صرفاً ناشی از افزودن ژئولیت و بنتونیت در بتن نبوده بلکه طرح مخلوط شاهد نیز دچار عارضه گردیده که این مهم نشان از ضعف سایر عناصر سازنده بتن مانند سنگدانه می‌باشد. بنابراین ایجاد تمهیداتی مانند استفاده از افزودنی‌های حباب‌زا یا ضدیخ می‌تواند کیفیت و دوام این بتن را در برابر انجماد بهبود بخشد.

به استناد از توصیه سایر مراجع [۲, ۳, ۱۰, ۱۲]، معیار رد یا پذیرش دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد نیز حداکثر آفت وزن بتن بیش از ۵٪ یا حداکثر آفت مقاومت فشاری بتن بیش از ۱۰٪ مردود اعلام شده و در این صورت زوال و خرابی بتن اعلام می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ژئولیت و بنتونیت در بتن بدلیل جذب بالای آب باعث زوال بتن در برابر چرخه یخ زدگی خواهد شد.

جدول ۱۳ مقایسه میزان آفت مقاومت فشاری در نمونه‌های مورد آزمایش

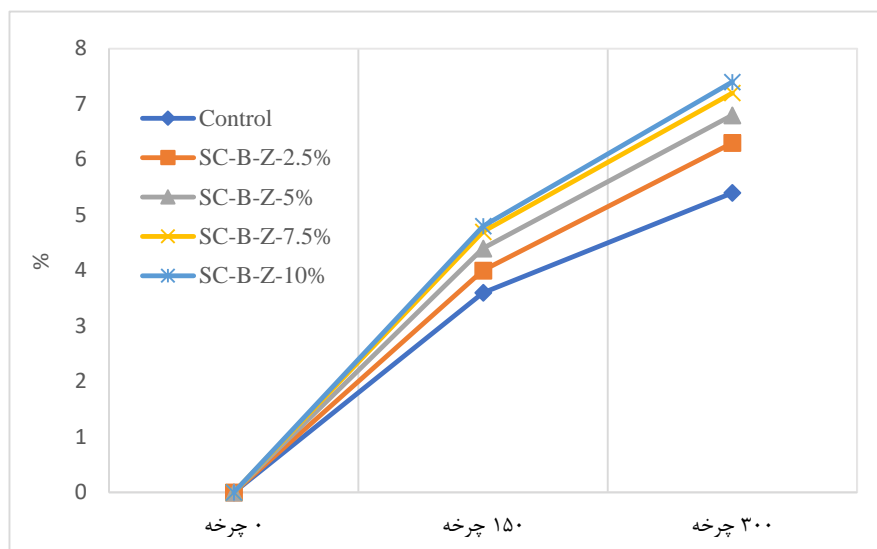
مقاومت فشاری پس از ذوب و انجماد					نام طرح مخلوط	ردیف
۳۰۰ چرخه	۱۵۰ چرخه	۳۰۰ چرخه	۱۵۰ چرخه	مگاپاسکال		
%	%	مگاپاسکال	مگاپاسکال			
-۱۱/۶	-۵/۴	۲۵/۰	۲۶/۸	SC-B-Z-0%	۱	
-۱۲/۸	-۶/۲	۲۴/۱	۲۵/۹	SC-B-Z-2.5%	۲	
-۱۳/۴	-۶/۸	۲۳/۲	۲۵/۰	SC-B-Z-5%	۳	
-۱۳/۹	-۷/۳	۱۹/۵	۲۱/۰	SC-B-Z-7.5%	۴	
-۱۴/۴	-۷/۵	۱۶/۶	۱۷/۹	SC-B-Z-10%	۵	



شکل ۷ مقایسه میزان آفت مقاومت فشاری در نمونه‌های مورد آزمایش

جدول ۱۴ مقایسه میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از چرخه انجماد

وزن نمونه پس چرخه ذوب و انجماد					نام طرح مخلوط	ردیف
۳۰۰ چرخه	۱۵۰ چرخه	۳۰۰ چرخه	۱۵۰ چرخه	چرخه ۰		
%	%	گرم	گرم	گرم		
-۵/۴	-۳/۶	۷۰۲۹	۷۱۶۳	۷۴۳۰	SC-B-Z-0%	۱
-۶/۳	-۴	۶۹۲۱	۷۰۹۱	۷۳۸۶	SC-B-Z-2.5%	۲
-۶/۸	-۴/۴	۶۹۱۷	۷۰۹۵	۷۴۲۲	SC-B-Z-5%	۳
-۷/۲	-۴/۷	۶۹۵۸	۷۱۴۶	۷۴۹۸	SC-B-Z-7.5%	۴
-۷/۴	-۴/۸	۶۸۶۲	۷۰۵۴	۷۴۱۰	SC-B-Z-10%	۵

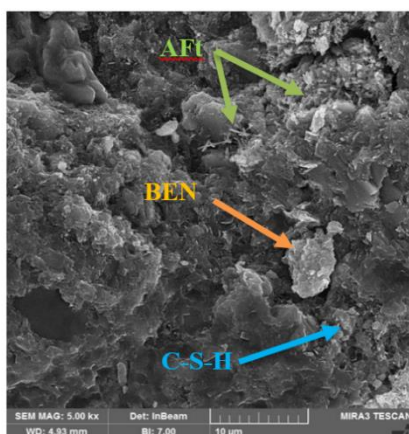


شکل ۸ مقایسه میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از چرخه انجام

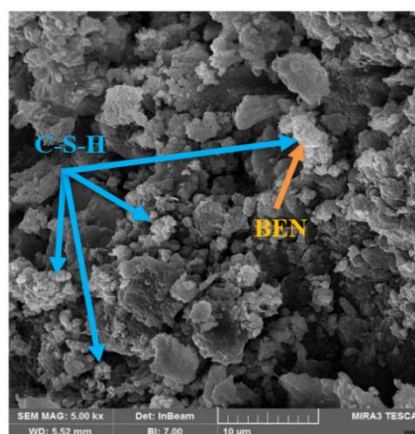
۵-۶- تصویر SEM

جهت عکس برداری الکترونی روبشی SEM^۷ نیز نمونه‌های بتنی ۹۰ روزه شکسته شده در ابعاد حدود ۲ سانتیمتر جمع‌آوری و در محلول پروپانل نگهداری شدند. شکل‌های شماره ۹-الف تا ۹-د وضعیت منافذ، تراکم و ریز ساختار موجود در بتن را پس از افزودن نسبت‌های مختلف زئولیت و بنتونیت را نمایش می‌دهند. مطابق با شکل شماره ۹-الف و ۹-ب که مربوط به طرح 5% , SC-B-Z-2.5% می‌باشد، اترینگایت سوزنی شکل و ژل سیلیکات کلسیم تشکیل شده ناشی از هیدراتاسیون مناسب سیمان مشخص می‌باشد. تورم ایجاد شده در بنتونیت پس از ترکیب با آب باعث ایجاد واکنش شیمیایی با سیلیکات کلسیم سیمان شده و تشکیل ژل کلسیم داده است. این پدیده باعث کاهش تخلخل، افزایش چسبندگی و ایجاد خمیره همگن‌تر در بتن می‌شود. اما در شکل ۹-ج و ۹-د که مربوط به طرح SC-B-Z-10% می‌باشد ژل سیلیکات کلسیم به کمترین حد خود رسیده که این عارضه ناشی از تراکم بیش از حد در خمیره سیمان می‌باشد. بنابراین با افزایش مقادیر زئولیت و بنتونیت در بتن، شاهد اخلاص در عمل هیدراتاسیون سیمان خواهیم بود. لازم به ذکر است که افزودن مقادیر بالای پوزولان به جای سیمان در بتن بدلیل جذب آب بالای ساختار آن، باعث کاهش تشکیل اترینگایت و هیدروکسید کلسیم در سیمان شده و این عامل باعث به تعویق افتادن سن گیرش بتن یا اصطلاحاً دیرگیر شدن بتن خواهد شد. از طرفی کاهش تشکیل ژل هیدروکسید کلسیم رابطه مستقیمی با کاهش چسبندگی سیمان داشت که این عارضه باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خواهد شد.

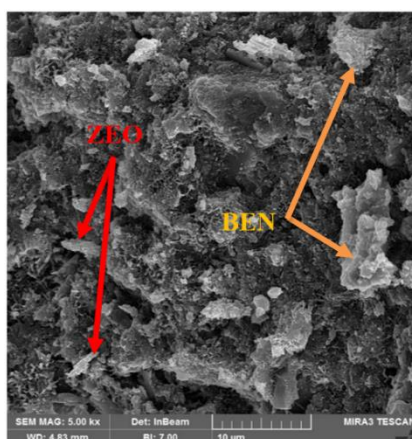
⁷ Scanning Electron Microscopy



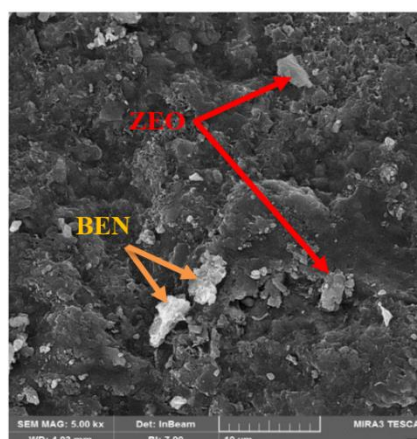
الف) نمونه SC-B-Z-2.5%



ب) نمونه SC-B-Z-5%



ج) نمونه SC-B-Z-7.5%



د) نمونه SC-B-Z-10%

شکل ۹ تصاویر الکترونی روبشی به منظور ساختار شناسی و محصولات هیدراتاسیون [ماخذ: نگارندگان]

اترینگایت سوزنی شکل (AFt)، سیلیکات کلسیم (C-S-H)، ذرات بنتونیت (BEN)، ذرات زئولیت (ZEO)

۶-۶- شاخص اقتصادی

یکی از ارکان‌های اصلی که در بهینه‌سازی و توسعه پایدار طرح اختلاط بتن باید مورد توجه قرار گیرد، شاخص اقتصادی است. با عنایت به رویکرد کاربردی این تحقیق، در این بخش اقدام به بررسی شاخص اقتصادی و مقایسه هزینه ساخت هر طرح اختلاط نسبت به مقاومت فشاری ۹۰ روزه گردیده است. بنابراین جهت مقایسه از حیث مقایسه هزینه ساخت برای تهیه یک متر مکعب بتن با فرض قیمت در زمستان سال ۱۴۰۱ مطابق با جدول شماره ۱۵ مقایسه شده است. واضح است که هزینه‌های ساخت بتن در آزمایشگاه بیشتر از ساخت همان بتن در مقیاس کارگاه یا کارخانه می‌باشد. در جدول شماره ۱۵ میزان هزینه برای ساخت یک متر مکعب بتن رنگی از حاصلضرب مقدار مصرف هر یک از اجزاء در قیمت آن جزء و جمع آن‌ها محاسبه شده است. گفتنی است که هر چه میزان شاخص اقتصادی طرح مخلوط کم‌تر باشد، آن طرح توجیه پذیرتر خواهد بود. مطابق با نتایج بدست آمده مشخص گردید که طرح مخلوط SC-B-Z-5% با شاخص اقتصادی ۴/۸ در مقایسه با سایر طرح مخلوط‌های دیگر از توجیه اقتصادی بیشتری برخوردار است. علاوه بر آن استفاده از پوزولان‌های طبیعی به جای بخشی از سیمان مزایای زیست محیطی بسیاری دارد که می‌توان از میزان افزایش ناچیز قیمت ساخت چشم‌پوشی کرد.

جدول ۱۵ مقایسه شاخص اقتصادی بر اساس هزینه ساخت هر متر مکعب بتن / مقاومت فشاری ۹۰ روزه

نام طرح مخلوط	هزینه ساخت هر متر مکعب بتن		شاخص اقتصادی طرح
	تومان	مقاومت فشاری ۹۰ روزه	
SC-B-Z-0%	۱/۵۳۴/۵۰۰	۲۹/۶	۵/۲
SC-B-Z-2.5%	۱/۵۴۲/۳۷۵	۳۰/۹	۵/۰
SC-B-Z-5%	۱/۵۵۰/۲۵۰	۳۲/۴	۴/۸
SC-B-Z-7.5%	۱/۵۵۸/۱۲۵	۲۹/۱	۵/۴
SC-B-Z-10%	۱/۵۶۶/۰۰۰	۲۶/۷	۵/۹

۷- نتیجه گیری

برخی از مهم ترین نتایج این تحقیق به شرح ذیل می باشد:

۱. استفاده همزمان از بنتونیت و ژئولیت در بتن خودتراکم بدلیل جذب آب بالا، میزان جریان اسلامپ و ویسکوزیته بتن را کاهش می دهند. اما بدلیل افزایش قوام خمیره سیمان جلوی جداسدگی سنگدانه و آب انداختگی بتن را خواهند گرفت.
۲. استفاده از بنتونیت و ژئولیت در بتن خودتراکم، میزان مقاومت فشاری را در سنین اولیه کاهش می دهد که علت آن کمبود هیدروکسید کلسیم برای شروع واکنش های پوزولانی می باشد. اما در سنین بالا به دلیل پیشرفت سرعت هیدراتاسیون و افزایش سیلیکات کلسیم که در طی واکنش های پوزولانی رخ می دهد، مقاومت فشاری روند رو به رشدی خواهد گرفت.
۳. استفاده از ۲/۵، ۵٪ بنتونیت و ژئولیت بطور همزمان به جای سیمان در بتن خودتراکم باعث رشد مقاومت فشاری نهایی (۹۰ روزه) به ترتیب به میزان ۴/۲ و ۸/۶٪ گردید.
۴. استفاده از ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ بنتونیت و ژئولیت بطور همزمان به جای سیمان در بتن خودتراکم پس از قرارگیری در معرض چرخه ذوب-انجماد باعث آفت مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۱۲/۸، ۱۳/۴، ۱۳/۹، ۱۴/۴٪ گردید.
۵. استفاده از ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ بنتونیت و ژئولیت بطور همزمان به جای سیمان در بتن خودتراکم پس از قرارگیری در معرض چرخه ذوب-انجماد باعث کاهش وزن به ترتیب به میزان ۶/۳، ۶/۸، ۷/۲، ۷/۴٪ گردید.
۶. استفاده همزمان از ۵٪ بنتونیت و ۵٪ ژئولیت بطور همزمان به جای سیمان در بتن خودتراکم با شاخص اقتصادی ۴/۸ نسبت به مقاومت فشاری ۹۰ روزه، مقرون به صرفه ترین طرح اختلاط مورد بررسی انتخاب گردید.
۷. میزان انحراف از معیار و ضریب تغییر طرح مخلوط SC-B-Z-10% به میزان به ترتیب ۰/۷۵۱ و ۰/۵۶۳ بیشترین واریانس را در مقایسه با سایر طرح مخلوهای دیگر نشان داد.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از موسسه آموزشی "ماهرشو" شهر شیراز، شرکت "جهان پودر دلیجان" شهرستان دلیجان، آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز جهت همکاری و کوشش های موثر که جهت ثمربخش بودن این تحقیق میبذول داشتند.

منابع

- [1] Kalhari, M., Saibani, M. (2012). Durability of concretes containing zeolite against chloride ion penetration and corrosion. Second National Conference on Engineering and Construction Management, Amir Kabir University of Technology, Bandar Abbas Campus, Iran, pp. 83-48.
- [2] Shirzad.A., Khoshro.M., Katbi.A. (2017). Investigation of mechanical properties and durability of concrete containing zeolite cement supplement and micronanobubble water. Concrete Research, Year 12, No. 48, pp. 98-60.
- [3] Ramzan Ali. A, Abdi Moghadam.M (2019). Laboratory investigation of replacing different percentages of zeolite with cement on improving the mechanical characteristics and durability of concrete at high temperatures. Amirkabir Engineering Journal, Volume 52, Pages 1-18.
- [4] Parivi.S., Zahiri.R., Moradi.K., Shaiste.H. (2013). Investigation of geological and mineralogical characteristics of zeolites of the After Semnan mine., Journal of Sciences and Earth, year 24, number 94, pages 27 to 36.
- [5] Sadat Emini.A (2017). Investigating the ability of Semnan zeolite to absorb water in removing pollutants from polluted water. First International Water Crisis Conference, Zabol University.
- [6] Ghale Navi.M., Azhdari Moghadam.M., Urei Golmakani.A.A., (2008). Study on increasing the durability of concrete against freezing and thawing cycles. 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz - Iran
- [7] Esfahani.M.R., Rajabi.M., Ramezani.A.R., (2018). Investigating the durability of concrete with composite fibers against thawing and freezing cycles with the help of the relative dynamic elasticity modulus., Concrete Research 12th year, number 2, Iran.
- [8] Tadin.M., Rahmati.H., Salami.H. (1390). The relationship between the process of gaining concrete strength and different cements in Iran. - Journal of Concrete Technology Engineering, Year 1, Number 4, Iran
- [9] Sharif Tehrani. S., Hosseini Lavasani. H., Shirgir. B. (2016). Investigation of the effect of water flow and de-icing materials on asphalt concrete deterioration under freezing and thawing cycles. Scientific Research Journal of Civil Engineering, Modares, Iran.
- [10] M. Goldost Rezaei, H. Tarvirdizadeh, (2015). Investigation of the advantages and disadvantages of green and recycled concrete. 4th International Congress of Civil Engineering, Tehran, Iran
- [11] F. Old Takme Dash, A.M. Sadeghi, H. Afshin (2018). Investigation of some durability characteristics of concrete surfaces containing rubber powder. Scientific and research journal of Azarbaijan University, Tabriz, Iran.
- [12] Zh.zhang, m. Pradhouni (2020). investigation of the effect of glass powder on the compressive strength of concrete (review article). 7th annual international congress on civil engineering, architecture and urban development, tehran, iran.
- [13] C. Helmes, k. Andalibi, j. Kesai (2019). evaluation of the effect of adding recycled aggregate on the mechanical properties of concrete. 10th international congress of civil engineering, faculty of civil engineering, tabriz, iran.
- [14] C. Karmo, a.j. Ahmadian hosseini, b. Ashraf hosseini (2019). investigation of the effect of adding crushed tiles on the strength and stability parameters of self-compacting concrete., 3rd international research conference on concrete technology, berlin, germany.
- [15] Azad, B., & Bazae, A. (2022). Comparison Of Cost And Time Of Construction RCCP And Asphalt Surface (Case Study Of Shiraz). Journal of Concrete Structures and Materials, 7(1), 114-136.
- [16] B. Shirgir, H. Alizadeh (2017). Laboratory study of the effect of recycled ceramic shards on the wear resistance of permeable concrete in pavements. - 7th National Conference of Applied Researches in Civil Engineering and Architecture, Khawaja Nasiruddin Tosi University-Tehran, Iran.
- [17] H. Lopz, s. Nunes, j.s. Coutinho, c. Andrade, (2017). Linking fresh and durability properties of paste to scc mortar, cement concr. Compos. 209-226.
- [18] M.Zargar, h., deghani, a., labafzadeh, m. P. (1401). effect of calcium carbonate with nanocarbon coating on mechanical properties and durability of concrete. Journal of engineering, sharif omran, 2, 39-31.
- [19] Ramzaniyanpour. A. A., Ramzaniyanpour. A. M., Zulfiqaraneb. A. (2014). The role of silica fume and silica fume mixed cements in the mechanical properties and durability of concrete. - 7th Annual Congress of Concrete Technology, Tehran, Iran.

- [20] Zoharabi. M. (2016) .Investigation of mechanical and rheological properties of self-compacting concrete containing recycled aggregates with micro-silica pozzolan. - master's thesis in civil engineering, structure orientation, Gilan University, Iran.
- [21] Tadin.M., Rahmati.H., Salami.H. (1390) .The relationship between the process of obtaining concrete strength and different cements in Iran. - Journal of Concrete Technology Engineering, 1st year, 4th issue, Iran.
- [22] Homayoun, M. J., Aghamajidi, R., Bazae, A., & mansouri, B. (2022). Studying the Behavior and the Freezing Endurance of Heavy Concrete with Nano-Silica Gel and Ilmenite Powder in Different Volume Ratios. Journal of Concrete Structures and Materials, 7(2), 89-110.
- [23] L.Soltani.J., Zunemat Kermani.M., (1400) .Investigation of the effect of rubberin light dense concrete containing silica and concrete without nano. 2nd Annual Conference of Civil Engineering Research, Tehran – Iran.
- [24] Mirgadaz Langroudi.M.M., Mohammadi.V. (2017) .Effect of bentonit on rheological, mechanical and durability characteristics of cement composites. Concrete Research, year 11, number 1, pages 61-74, Iran.
- [25] Khalilzadeh.A, Vahidi.V, Moradi.N (2016) .Laboratory investigation of the effect of nanoclay and fly ash on the compressive strength of cement-sand mortar,. Journal of Structural and Construction Engineering, Iran Structural Engineering Association, year 3, number 1, Iran.
- [26] Familyi.H., Tadin.M., Taghi Tehrani.P. (2008) .Evaluation of the effect of the initial temperature of concrete on its resistance to consecutive cycles of freezing and thawing. - First National Concrete Conference, Tehran - Iran
- [27] Zahihi.A., Nahovi.A., Samadi.D., Farmanpour.G. (2014) .Comparison of electrical and compressive strength of concrete in freezing and water cycles. 6th annual concrete conference, Tehran, Iran.
- [28] Topic 9 of National Building Regulations .2019 Edition.
- [29] Iranian concrete standard .ABA.
- [30] Ahmadi.J., Azizi.H., Kohi.M. (2014) "Investigation of the effect of metakaolin in different grades of cement on the strength and permeability of concrete" Concrete Research, Year 8, Number 2, Pages 60-78.
- [31] Kalhari, M., Saibani, M. (2012) "Durability of metakaolin-containing concretes against the penetration of chloride ions and corrosion" Second National Conference on Engineering and Construction Management, Amir Kabir University of Technology, Bandar Abbas Campus, Iran, page 132-149.
- [32] Shirzad.A., Khoshro.M., Katbi.A. (2017) "Investigation of mechanical properties and durability of concrete containing metakaolin cement supplement and micronanobubble water" Concrete Research, Year 12, Number 48, Pages 60-98.
- [33] Ramzan Ali. A., Abdi Moghadam.M (2019) "Laboratory investigation of replacing different percentages of metakaolin with cement on improving the mechanical characteristics and durability of concrete at high temperatures" Amirkabir Civil Engineering Journal, Volume 52, Page 1-18.
- [34] Parivi.S., Zahiri.R., Moradi.K., Shaisteh.H. (2013) "Investigation of the geological and mineralogical characteristics of metakaolins from the After Semnan mine", Journal of Science and Earth, year 24, number 94, pages 27 to 36.
- [35] Sadat Emini.A (2017) "Investigation of Semnan metakaolin water absorption ability in removing pollutants from polluted waters" First International Water Crisis Conference, Zabol University.
- [36] Ghale Navi.M., Azhdari Moghadam.M., Urei Golmakani.A.A., (2008) "Study on the increase of durability of concrete against freezing and thawing cycles" 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz - Iran.
- [37] Sajedi.M.R., Rajabi.M., Ramezani.A.R., (2018) "Investigating the durability of concrete with composite fibers against thawing and freezing cycles with the help of the relative dynamic elasticity modulus", Concrete Research 12th year, number 2, Iran.
- [38] Tadin.M., Rahmati.H., Salami.H. (2018) "The relationship between the process of obtaining concrete strength and different cements in Iran" - Journal of Concrete Technology Engineering, 1st year, 4th issue, Iran.
- [39] Sharif Tehrani.S., Hosseini Lavasani.H., Shirgir.B. (2016) "Investigating the effect of water flow and deicing materials on the damage of asphalt concrete under freezing and thawing cycles" Scientific Research Journal of Civil Engineering, Modares, Iran.
- [40] Famili.H., Tadin.M., Taghi Tehrani.P. (2008) "Investigation of the effect of the initial temperature of concrete on its resistance to consecutive cycles of freezing and thawing" - the first national concrete conference, Tehran - Iran.
- [41] Zahihi.A., Nahovi.A., Samadi.D., Farmanpour.G. (2014) "Comparison of electrical and compressive strength of concrete in freezing and water cycles" 6th Annual Concrete Conference, Tehran, Iran.
- [42] Astm c666,(2019). Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing., u.s.a.

- [43] Delijan Powder Company <https://delijanpoudr.com>
- [44] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2019). Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete. *Journal of Building Engineering*, 26, 100856.
- [45] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. *Journal of Structural Fire Engineering*.
- [46] Gholhaki, M., Sharbatdar, M., & Pachideh, G. (2022). An experimental investigation into the mechanical performance and microstructure of cementitious mortars containing recycled waste materials subjected to various environments. *Journal of Building Engineering*, 61, 105275.
- [47] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshatgh, A. (2022). The effect of adding different pozzolans on mechanical properties and water absorption of Pervious Concrete Pavement. *Journal of Transportation Research*, 19(3), 51-66.
- [48] Gholhaki, M., Pachideh, G., & Kafi Felaverjani, M. (2017). Numerical and Experimental Study of the Effect of Simultaneous Adding Steel and Polypropylene Fiber on the Strength of Sleeper Concrete with an Approach to Achieve Optimal Percentage of the Fiber (Case Study: Sleeper Concrete Manufacturing Factory of Karaj). *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 3(2), 73-88.
- [49] Farda Market Analysis Institute, (1399), Cement production, <https://www.tahlilbazaar.com/> (in persian)