



University Of Qom

Experimental Investigation of Strength and Durability Properties of Concretes Cast with Heated Zeolite

Mohammad Reza Shahhoseini¹, Mohammad Kazem Sharbatdar², Ali Kheyroddin³

1. MS Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: mrsh4813@gmail.com
2. Corresponding author, Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: msharbatdar@semnan.ac.ir
3. Distinguished Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: kheyroddin@semnan.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 Feb 2024
Revised 14 May 2024
Accepted 07 Jun 2024

Keywords:
Zeolite,
Concrete,
Cement,
Pozzolan,
Strength,
Durability.

ABSTRACT

Cement in concrete which is the most important part of this material and causes the concrete mixture to form by creating adhesion between the aggregates. Due to the qualitative and quantitative improvement of cement in concrete mix, as well as the reduction of environmental pollution and the improvement of energy consumption in the cement and concrete industry, researchers and researchers are looking for solutions to achieve. These goals with an attitude to sustainable development. The use of cement supplements and pozzolanic materials has been one of these solutions. The reason for the widespread application of these materials, apart from environmental protection and economic cost reduction, is to improve concrete's mechanical properties and durability in destructive environmental conditions. In this study, ordinary and heated zeolite was used under three different temperatures as pozzolan. Initially, concrete samples were made with 16 mixed designs to study compressive strength and Islamp samples. In the next step, the design of optimal mixtures to measure concrete resistance in unhealthy environments was investigated and investigated. The addition of heated zeolite under 200 degrees compared to conventional zeolite in concrete has increased resistance, especially in the long run, compared to reference samples. Also, the zeolite heated under 200 degrees at a young age and higher strength results in better resistance. The results of durability tests in the second phase showed that the durability of higher-strength samples due to more zeolite substituted 200-degree zeolite cement in the sulfate environment was more resistant than conventional concrete.

Cite this article: Shahhoseini MR, Sharbatdar MK, Kheyroddin A. Experimental investigation of strength and durability properties of concretes cast with heated zeolite. Civil Infrastructure Researches. 2024; Article in Press. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10381.1540>



بررسی آزمایشگاهی خواص مقاومتی و دوام بتن‌های ساخته شده با ژئولیت حرارت داده شده

محمد رضا شاه حسینی^۱، محمد کاظم شربتدار^۲✉، علی خیرالدین^۳

۱. کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: m.shahhoseini@semnan.ac.ir

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: msharbatdar@semnan.ac.ir

۳. استاد ممتاز، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: kheyroddin@semnan.ac.ir

چکیده

سیمان در بتن که مهم‌ترین جزو این ماده بوده و با ایجاد چسبندگی بین سنگدانه‌ها باعث تشکیل مخلوط بتن می‌شود. با توجه به ارتقای کمی و کیفی سیمان در مخلوط بتن و نیز کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و بهبود مصرف انرژی در صنعت سیمان و بتن پژوهشگران و محققان به دنبال راهکارهایی جهت نیل به این اهداف با نگرش به توسعه پایدار بوده‌اند. استفاده از مواد مکمل سیمان و مواد پوزولانی یکی از این راهکارها بوده است. دلیل کاربرد گسترده این مواد جدای از حفظ محیط زیست و کاهش هزینه‌های اقتصادی، بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن در شرایط محیطی مخرب است. در این پژوهش، از ژئولیت معمولی و حرارت دیده تحت سه دمای مختلف به عنوان پوزولان بهره گرفته شده است. در ابتدا نمونه‌های بتنی با ۱۶ طرح مخلوط جهت بررسی مقاومت فشاری و اسلامپ نمونه‌ها ساخته شد. در مرحله بعد از طرح مخلوط‌های بهینه جهت سنجش مقاومت بتن در محیط‌های ناسالم (سولفاتی) مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. افزودن ژئولیت حرارت دیده تحت دمای ۲۰۰ درجه نسبت به ژئولیت معمولی در بتن موجب افزایش مقاومت به ویژه در بلندمدت نسبت به نمونه‌های مرجع شده است. همچنین ژئولیت حرارت دیده تحت دمای ۲۰۰ درجه در سن کم و مقاومت بالاتر مقاومت بهتری را نتیجه می‌دهد. نتایج آزمایشات دوام در فاز دوم نشان دادند که دوام نمونه‌های با مقاومت بالاتر به دلیل ژئولیت بیشتر جایگزین سیمان حاوی ژئولیت ۲۰۰ درجه در محیط سولفاتی مقاومت بیشتر از بتن معمولی داشته است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸

کلیدواژه‌ها:

ژئولیت،
بتن،
سیمان،
پوزولان،
مقاومت،
دوام.

استناد: شاه حسینی محمد رضا، شربتدار محمد کاظم، خیرالدین علی. بررسی آزمایشگاهی خواص مقاومتی و دوام بتن‌های ساخته شده با ژئولیت حرارت داده شده. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛ آماده به انتشار. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10381.1540>

۱- مقدمه

دستیابی به بتن با مشخصه‌های مکانیکی و دوام مورد قبول را تشریح می‌کند. ژئولیت، بنتونیت، پومیس، متاکائولین، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، میکروسلیس و خاکستر پوسته برنج از جمله مهم‌ترین مواد پوزولانی جایگزین سیمان هستند که در مصرف با سیمان پرتلند یا سیمان مخلوط شده به خواص بتن تازه و خواص بتن سخت شده از نظر هیدرولیکی یا فعالیت‌های پوزولانی و یا هر دو سبب بهبود می‌شوند. پوزولان‌ها از لحاظ آیین‌نامه‌ای به صورت یک ماده سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی است که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به صورت پودر نرمی تعریف می‌شوند که با وجود رطوبت و در دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی حاصل می‌کند و ترکیباتی را که دارای خواص چسبندگی می‌باشند، به وجود می‌آورد [۲].

پوزولان‌ها به‌طور کلی، جزو گروه مواد سیمانی مکمل و یا افزودنی‌های معدنی هستند. بسته به مواد تشکیل‌دهنده و خواص مورد انتظار بتن از مواد مکمل سیمانی برای بهبود بخشیدن به یکی از خواص ویژه بتن مانند بهبود مقاومت، دوام، نفوذپذیری، مقاومت در برابر سولفات‌ها و محیط اسیدی و واکنش قلیایی سنگدانه‌ها استفاده شود. مقدار مصرف این مواد باید به وسیله آزمایش مشخص شود. مقدار مصرف به صورت بیشتر یا کمتر از اندازه بهینه می‌تواند زیان‌بخش بوده و یا اثر نامطلوب را در پی داشته باشد. همچنین مواد سیمانی مکمل با سیمان‌های پرتلند مختلف و سیمان‌های مختلف واکنش‌های متفاوتی می‌دهند که خواص بتن را دستخوش تغییر می‌کند. در گذشته، مواد مکمل سیمانی به تنهایی مورد استفاده قرار می‌گرفتند؛ اما امروزه با توجه به دسترسی بیشتر به این مواد، تولیدکنندگان بتن می‌توانند از دو یا چندین مورد از این مواد با هم در مخلوط بتن استفاده کنند.

از مواد پوزولانی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان طبق آیین‌نامه بتن ایران بین ۵ تا ۳۵ درصد استفاده می‌شود [۳]. ژئولیت جزو مصالح پوزولانی طبیعی

در سالیان اخیر، بحث مدیریت مصرف انرژی در صنایع مختلف مورد توجه جوامع بشری و محققان در سراسر دنیا قرار گرفته است. صنعت سیمان و بتن یکی از صنایع پرمصرف از لحاظ انرژی بوده و در میان صنایع مختلف، ۱۴ درصد مصرف انرژی در این حوزه مورد استفاده می‌باشد. بتن، مخلوطی از خمیر سیمان (آب و سیمان)، سنگدانه‌ها (شن و ماسه) و در برخی بتن‌های خاص مواد افزودنی معدنی یا شیمیایی و حباب‌های هوا می‌باشد. در حال حاضر، بیشتر بتن‌های مصرفی در صنعت ساختمان با سیمان پرتلند ساخته می‌شود. سیمان‌های پرتلند، سیمان‌های هیدرولیکی هستند که از کلسیم سیلیکات تشکیل شده‌اند. سیمان‌ها دارای انواع مختلفی بوده که دارای ویژگی‌های مختلفی از جمله بلین یا نرمی، ترکیبات شیمیایی متفاوت، زمان‌های گیرش متفاوت و کاربردهای مختلف محیطی بوده که پیش‌بینی خواص بتن با وجود سیمان‌های متفاوت را سخت می‌کند.

از آنجاکه فرآیند تولید سیمان فرآیند پیچیده‌ای بوده و در میان صنایع آلوده‌کننده هوا، سهم صنعت سیمان در حدود ۶ درصد می‌باشد. بررسی‌های محققان نشان می‌دهد که تولید هر یک تن سیمان بیش از ۸۰۰ کیلوگرم تا ۱۰۰۰ کیلوگرم گاز دی‌اکسیدکربن به دلیل کلسینه شدن مواد، تولید می‌کند. بنابراین تولید گاز دی‌اکسیدکربن برای تولید یک تن سیمان گاه از مرز یک تن تجاوز می‌نماید که بسیار وحشتناک بوده و محققان به دنبال راهکارهایی پایدار جهت کم کردن انتشار این گاز خطرناک بوده‌اند [۱]. یکی از راهکارهای مهم و کاربردی استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در سیمان است که علاوه بر بهره‌وری اقتصادی، به حفظ محیط‌زیست نیز کمک و سبب ارتقای خواص کمی و کیفی بتن‌ها می‌شود. افزایش مصرف پوزولان‌ها در صنعت ساخت‌وساز به اندازه‌ای بوده که در اکثر آیین‌نامه‌های معتبر بتن دنیا نیز ورود کرده و نکات اجرایی جهت حصول اطمینان و

۲/۵ درصد بنتونیت بوده است [۵]. در پژوهشی که توسط ساجدی و جلیلی فر انجام شد تأثیر ژئولیت طبیعی و میکروسیلیس بر رفتار مکانیکی بتن‌های بازیافتی مقایسه گردید. با بررسی تأثیر ژئولیت در سن ۷، ۲۸ و ۹۱ روز مشخص شد که بتن‌های معمولی و بتن‌های بازیافتی شامل ۱۰٪ ژئولیت، بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به سایر سطوح جایگزینی نشان می‌دهد [۶]. نایکیان^۱ و همکاران نشان دادند که تأثیر ژئولیت در کنترل انبساط ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی سنگدانه‌ها در بتن با عملکرد خاکستر بادی قابل مقایسه است. همچنین عملکرد آن با درصد جایگزینی یکسان، از سرباره مناسب‌تر و از میکروسیلیس ضعیف‌تر است. از طرفی، آنان به این نتیجه رسیدند هنگامی که ۳۰ درصد پودر ژئولیت طبیعی برای جایگزینی همان مقدار سیمان استفاده می‌شود (مقدار قلیایی برابر با ۱/۸۲ درصد باشد)، AAR در بتن رخ نمی‌دهد، حتی اگر از سنگدانه‌های واکنشی استفاده شود [۷].

در پژوهشی که توسط ناگروکین^۲ و همکاران در مورد تأثیر ژئولیت طبیعی بر خواص و مقاومت در برابر واکنش سیلیسی قلیایی ملات انجام شده است، به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین مقاومت فشاری با جایگزینی سیمان با ۱۲/۵ درصد ژئولیت طبیعی به‌دست آمد که خواص مکانیکی و فیزیکی ملات با افزایش مقدار ژئولیت طبیعی ۱۲/۵ درصد بهبود می‌یابد [۸]. پژوهشگران اثر ژئولیت کلسینه شده بر مقاومت فشاری بتن را بررسی کردند. در مقایسه با ژئولیت خام، مقاومت فشاری در سیمان مخلوط حاوی ژئولیت طبیعی به میزان ۲۰ درصد کلسینه شده به دلیل کاهش تخلخل و ساختار منافذ پالایش شده بهبود یافته است [۹]. نتایج مشابهی از تحقیقات سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است. استفاده از ژئولیت‌های کلسینه شده منجر به مقاومت فشاری و

می‌باشد که به‌دلیل هزینه پایین و در دسترس بودن، در نقاط مختلفی از جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. نام ژئولیت از ترکیب دو واژه یونانی *zéō*، به معنی جوش و *lithos*، به معنای سنگ تشکیل شده است. ژئولیت طبیعی یک ماده با قیمت پایین و منابع فراوان است که دارای ساختار کریستالی آلومینیوم سیلیکاتی است که مشابه ساختار لانه‌زنبور می‌باشد [۴]. اجزای اصلی ژئولیت‌های طبیعی عبارتند از SiO_2 و Al_2O_3 . تا به امروز حدود ۴۵ نوع ژئولیت طبیعی با خواص شیمیایی مختلف کشف شده است. این ماده دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت بوده و در بین نمونه‌های مختلف یک نوع خاص از ژئولیت نیز تفاوت‌هایی در خواص فیزیکی اندازه منافذ، اندازه بلور، ظرفیت تبادل یونی و ترکیب شیمیایی وجود دارد. اکثر مواد ژئولیتی، بی‌رنگ یا سفیدرنگ هستند. با این حال، بعضی از آن‌ها که حاوی مقادیر کمی آهن می‌باشند به رنگ زرد کم‌رنگ یا قهوه‌ای مایل به قرمز دیده می‌شوند.

بسیاری از محققان اثرات متنوع ژئولیت بر خواص مقاومتی و دوام بتن در محیط‌های مهاجم و شرایط محیطی ناسالم را بررسی کردند. خسروی و همکاران در پژوهشی با عنوان مطالعه آزمایشگاهی بتن حاوی بنتونیت و ژئولیت به عنوان پوزولان طبیعی به بررسی این دو پوزولان طبیعی پرداختند. این محققان با بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری به این نتیجه رسیدند که در نمونه‌هایی که درصد استفاده همزمان ژئولیت و بنتونیت کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد نسبت به نمونه مرجع با افزایش مقاومت مواجه بوده است، درصد بهینه استفاده بنتونیت در این ترکیب به عنوان جایگزین سیمان ۱۰٪ بوده است. همچنین این محققان با آزمایش مقاومت کششی به این نتیجه رسیدند که استفاده همزمان از ژئولیت و بنتونیت با هم در مخلوط بتن، مقاومت کششی بتن را نسبت به بتن مرجع افزایش داد که بهترین مخلوط بتن با ترکیب این دو مواد به میزان ۲/۵ درصد ژئولیت و

¹- Naiqian

²- Nagrockienė

ژئولیت موردنیت نسبت داد [۱۴]. ترن^۴ و همکاران به بررسی ژئولیت طبیعی و کاربرد آن در تولید بتن پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که با افزودن ژئولیت به بتن، خواص مکانیکی و دوام بتن به میزان قابل توجهی بهبود یافته و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد. این در حالی است افزودن ژئولیت‌های طبیعی به بتن کارایی را کاهش می‌دهد که این اجرای بتن را با مشکل روبه‌رو می‌سازد، اما افزودن آن‌ها به‌طور کلی بسیار سودمند است. همچنین مشخص شد که افزودن ژئولیت، خواص مهندسی دیگر بتن مانند انقباض نفوذ کلرید، نفوذپذیری آب، مقاومت در برابر کربناته و مقاومت سولفات را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۵].

ژانگ^۵، به منظور یافتن راه‌حل مؤثر برای کاهش انقباض و نفوذپذیری بتن‌های معمولی به استفاده از ذرات ژئولیت را بررسی کرد. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از ژئولیت در بتن، انقباض آن را کاهش می‌دهد. همچنین افزودن ژئولیت در بتن در سنین اولیه، تأثیر منفی می‌گذارد؛ اما نفوذپذیری در سنین بالاتر بتن در ۹۰ روز، بهتر از بتن مرجع بوده است [۱۶]. لخوا^۶ و همکاران به بررسی تأثیر پوزولان ژئولیت بر روی خواص مکانیکی بتن پرداختند. مطابق با نتایج تحقیق این محققان مشخص شد که خواص مکانیکی بتن با افزودن ژئولیت تا ۹۰ روزگی کاهش می‌یابد، اما در نمونه‌های ۱۸۰ روزه مشاهده شد که خواص مکانیکی نمونه‌های حاوی ژئولیت بهتر از نمونه‌های مرجع است [۱۷]. ولی‌پور و همکاران در تحقیقی در شرایط محیطی دریایی میزان عملکرد مقاومتی نمونه‌های بتنی ساخته شده با ژئولیت را همراه با طرح‌های ساخته شده با ۵ درصد میکروسیلیس و متاکائولن و ۱۰ درصد ژئولیت را مورد بررسی قرار دادند. اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در سن ۷ و ۲۸ روز حاکی از آن بود که

خمش‌ی بهتری نسبت به استفاده از ژئولیت‌های طبیعی شد. ساختار منافذ بتن با پخت داخلی ژئولیت بهبود یافت و مقاومت در برابر یخ‌زدگی آن پس از ۱۵۰ چرخه، افزایش یافت [۱۰ و ۱۱]. استفاده از ترکیبی از جایگزین‌های سیمان مانند ژئولیت و سایر مواد افزودنی شیمیایی باعث افزایش کارایی بتن، بهبود مقاومت در برابر ذوب/انجماد بتن می‌شود. همچنین انقباض ناشی از خشک شدن و عمق نفوذ آب را کاهش می‌دهد. جایگزینی سیمان با ژئولیت باعث کاهش موقتی مقاومت فشاری تا سن ۹۰ روز پس از سخت شدن بتن می‌شود، در حالی که مقاومت فشاری بتن حاوی ژئولیت بعد از ۱۸۰ روز بیشتر از بتن مرجع بود [۱۲].

با توجه به سطح مخصوص بالای ژئولیت، یک مخلوط بتن تازه حاوی ژئولیت برای دستیابی به اسلامپ هدفمند، نیاز به یک فوق روان‌کننده در مقادیر جایگزینی بالاتر این ماده پوزولانی وجود دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از یک فوق روان‌کننده و یک عامل حباب‌زا در بتن با ژئولیت، به‌طور قابل توجهی نفوذ آب، انقباض ناشی از خشک شدن و مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۳]. در پژوهشی که توسط کاسای^۳ و همکاران پیرامون دو نوع ژئولیت طبیعی مختلف کلینوپتیلولیت و موردنیت برای مقایسه مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی حاوی این دو نوع ژئولیت انجام شد، محققان به این نتیجه رسیدند که در سنین کمتر از ۲۸ روز، مقاومت فشاری برای هر دو ملات حاوی کلینوپتیلولیت و موردنیت با جایگزینی ۱۰ درصد، کمتر از ملات سیمان مرجع بود؛ ولی پس از ۲۸ روز، مقاومت فشاری ملات حاوی کلینوپتیلولیت نسبت به ملات حاوی موردنیت، بالاتر بود. مقدار اختلاف در مقاومت ملات حاوی این دو نوع ژئولیت متفاوت را می‌توان نیاز کم به آب در ژئولیت کلینوپتیلولیت نسبت به

⁴- Tran

⁵- Zhang

⁶- Lekha

³- Kasai

به این نتیجه مهم دست یافتند که استفاده از ۱۵ درصد ژئولیت طبیعی تأثیر بیشتری بر افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر و در نتیجه کاهش خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی می‌گردد [۲۱]. مرادیان و همکاران در پژوهشی به بررسی دو پوزولان ژئولیت و میکروسیلیس در معرض در محیط اسید سولفوریک پرداختند و با بررسی نمونه‌ها پس از قرارگیری ۱۲۰ روز در محیط اسیدی به این نتیجه رسیدند که پوزولان‌ها باعث افزایش دوام بتن‌ها در شرایط محیطی سولفات می‌شوند. همچنین با بررسی عملکرد ژئولیت و میکروسیلیس در محیط اسیدی به این نتیجه دست یافتند که هرچند نمونه‌های ژئولیت دارای بیشترین مقدار سولفات روی سطح بودند اما نفوذ سولفات به داخل نمونه‌های حاوی ژئولیت کمتر از نمونه مرجع بوده است [۲۲]. مطالعات میرولد و همکاران پیرامون بررسی دوام بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و ژئولیت در شرایط شبیه‌سازی شده آب خلیج فارس انجام شده است. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن و جذب آب موئینه این محققان نشان داد که استفاده از دوده سیلیس سبب کاهش دوام بتن در مواجهه با آب دریای خلیج فارس شده است که ژئولیت می‌تواند این امر را بهبود بخشد، به طوری که استفاده از ژئولیت به همراه دوده سیلیسی در نمونه‌های بتن و ملات سبب افزایش خواص مقاومتی و دوام در برابر آب دریای خلیج فارس می‌شود [۲۳]. رضانی و همکاران به بررسی بتن حاوی ژئولیت در محیط اسیدی با شرایط عمل‌آوری‌های مختلف پرداختند. نمونه‌های ۷ روز عمل‌آوری شده حاوی ژئولیت که در محیط اسید قرار گرفتند با کاهش شدید جرم روبه‌رو شدند. اما نمونه‌های ۲۸ روز عمل‌آوری شده حاوی ژئولیت، پس از مدت زمان ۲۸ روز قرارگیری در محیط اسیدی با کاهش جرم روبه‌رو نشده است، بلکه اندکی جرم آن‌ها افزایش یافت که نشان‌دهنده عملکرد خوب ژئولیت در مقابله با حمله اسیدی است [۲۴]. یاری و همکاران همچنین شربتدار و اروئی، ترکیب ژئولیت و دوده سیلیسی

نمونه بتن ساخته شده با ۱۰ درصد ژئولیت باعث کسب مقاومت بالاتری در مقایسه با طرح‌های ساخته شده با میکروسیلیس و متاکائولن شده است و سبب افزایش مقاومت ۲۴ درصدی نسبت به بتن مینا را داشته است [۱۸]. علی‌زاده و محمدی‌زاده، تحقیق آزمایشگاهی را با عنوان تأثیرات مثبت ژئولیت بر خواص مکانیکی بتن معمولی و حاوی سنگدانه بازیافتی و تعیین درصد بهینه آن با هدف بررسی بهبود خواص بتن با استفاده از ژئولیت بوده انجام داده‌اند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد افزودنی ژئولیت، مقاومت فشاری تا ۱۳/۳ درصد پس از ۲۸ روز عمل‌آوری افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها بر روی مقاومت کششی نشان‌دهنده این است که همانند مقاومت فشاری، جایگزینی ۱۰ درصد ژئولیت در مخلوط بتن مقاومت کششی در سن ۲۸ و ۹۰ روز افزایش یافت، اما با جایگزینی درصدهای بیشتر ژئولیت کمتر از بتن‌های مرجع بود [۱۹].

پوزولان‌ها معمولاً برای جلوگیری از خراب شدن به دلیل حملات اسیدی و سولفاتی به خوبی عمل می‌کنند. استفاده از ژئولیت طبیعی با سیمان پرتلند در بتن باعث افزایش مقاومت در برابر یون‌های تهاجمی از آب دریا، حمله سولفات از خاک و به‌طور طبیعی آب اسیدی می‌شود. نجمی و همکاران نشان دادند که ژئولیت کلینوپیتولیت در مقایسه با دیگر پوزولان‌های طبیعی ایران فعالیت پوزولانی بیشتری دارد و با پوزولان نوع N در استاندارد ASTM C618 تطابق دارد. در سنین پایین مقاومت فشاری بتن با ژئولیت کمتر از بتن شاهد (فاقد ژئولیت) است؛ ولی با افزایش سن بتن این کاهش مقاومت بتن کم می‌شود. همچنین استفاده از ژئولیت دوام بتن افزایش می‌دهد. آن‌ها نشان دادند که با اضافه کردن ۱۵ تا ۳۰ درصد ژئولیت میزان نفوذ یون کلر به بتن (در مقایسه با نمونه شاهد) بعد از ۲۸ روز بین ۷۲/۵ تا ۹۱/۸ درصد کاهش می‌یابد [۲۰]. مطالعات سعیدی رضوی و همکاران

ژئولیت حرارت‌دیده و معمولی در فاز دوم برای سنجش دوام نمونه‌ها در محیط سولفاتی ساخته شدند و تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند.

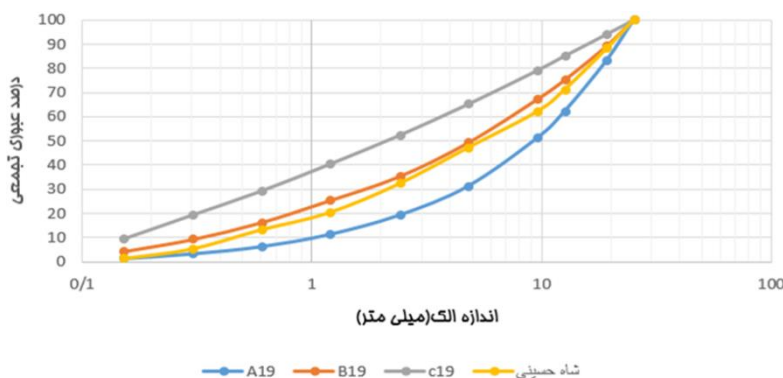
۲-۱- مصالح و آماده‌سازی نمونه‌ها

مصالح مصرفی در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ ۲ از کارخانه سیمان شاهرود، سنگدانه درشت از نوع شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۲۵ میلی‌متر، ماسه، آب شهری و ژئولیت از معدن شهر سمنان بوده است. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. سیمان دارای چگالی مخصوص ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب و نرمی ۳۰۵۶ سانتی‌مترمربع بر گرم براساس استاندارد ASTM C150 می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

در بتن سبک و تیرهای بتن معمولی را بررسی کردند و مقاومت فشاری تا ۲۷ مگاپاسکال برای بتن سبک و افزایش ۳۳ درصدی مقاومت خمشی بتن معمولی را به‌دست آوردند [۲۵ و ۲۶].

۲- برنامه آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی در دو فاز جداگانه طرح و ساخته شدند که در فاز اول، نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر با طرح مخلوط و دو نوع ژئولیت معمولی و حرارت‌دیده و دو نوع سیمان متفاوت با نسبت‌های آب به سیمان برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۳، جهت رسیدن به دو نوع مقاومت هدف ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال، از بتن معمولی ساخته شدند و پس از قرارگیری در حوضچه‌های آب شرب، در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. براساس نتایج آزمایشات در فاز اول، نمونه‌های بتنی مکعبی بهینه حاوی



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

C ₃ A	IR	LoI	SO ₃	Mgo	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	نام مشخصات
۸ ≥	۰/۷۵ ≥	۳ ≥	۳ ≥	۵ ≥	۶ ≥	۶ ≥	۲۰ ≤	مقدار در استاندارد ۳۸۹ (%)

آزمایش آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF^۷) و (XRD^۸) قرار گرفتند. مطابق نتایج به‌دست آمده از آنالیزهای XRF در این نوع ژئولیت مجموع درصدهای

در تحقیق حاضر، نمونه ژئولیت پس از حرارت دادن و قبل از استفاده در ساخت بتن، ژئولیت‌های معمولی و حرارت داده شده از حیث چگونگی تغییر عناصر و ترکیبات شیمیایی نسبت به ژئولیت معمولی، مورد

7- X-Ray Fluorescence

8- X-Ray Diffraction

مقاومت فشاری قرار گرفتند. سپس در فاز دوم با توجه به مقاومت‌های به‌دست آمده، شش طرح مخلوط منتخب که از طرح مخلوط‌های بهینه می‌باشد جهت بررسی دوام بتن در محیط ناسالم (سولفاتی) قرار گرفتند. لازم به ذکر است که برای هر طرح مخلوط، تعداد ۱۲ نمونه مکعبی ساخته شده است. از قالب‌های مکعبی به ابعاد 100×100 میلی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز استفاده شده است.

کلیه نمونه‌ها پس از یک روز از قالب، خارج و سپس به حوضچه عمل‌آوری با آب معمولی با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انتقال یافته‌اند و پس از عمل‌آوری به مدت ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز از حوضچه عمل‌آوری خارج و پس از خشک شدن سطح نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

۲-۳- آزمایش بتن سخت شده

نمونه‌ها قبل از آزمایش از حوضچه خارج شده و سطح آنها خشک می‌شود. تعداد نمونه‌ها جهت آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها مطابق شکل ۴، در سن ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز از هر طرح مخلوط، ۱۲ عدد می‌باشد. تعداد نمونه‌های مورد آزمایش در مجموع ۱۹۲ عدد بوده است.

در فاز دوم و برای ارزیابی دوام و مقاومت فشاری بتن‌های در معرض محیط‌های سولفاتی و تأثیر افزودن زئولیت معمولی و حرارت دیده، شش نمونه فشاری مکعبی به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر با هر طرح مخلوط مورد نظر که جزو طرح مخلوط‌های بهینه بودند ساخته شدند. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۸ روز در حوضچه حاوی آب سالم جهت به‌دست آوردن مقاومت اولیه قرار گرفته و پس از طی این زمان از هر طرح مخلوط شش نمونه به بیرون از حوضچه آب و در محیطی خشک و از پیش تعیین شده انتقال یافتند. پس از خشک شدن کامل نمونه‌ها در مرحله اول، دو نمونه در محیط سالم از آنها (از هر طرح مخلوط دو نمونه) برای آزمایش مقاومت فشاری مورد استفاده قرار گرفتند.

وزنی سه عنصر SiO_2 و Al_2O_3 و Fe_2O_3 از مقدار ۷۰ درصد بیشتر می‌باشد، که طبق استاندارد ASTM C618 این نوع زئولیت طبیعی، می‌تواند جزو پوزولان‌های طبیعی یعنی در گروه N از این استاندارد قرار گیرد. به‌خاطر بالا بودن سطح مخصوص زئولیت و جذب آب زیاد این ماده، می‌تواند عامل افت وزن در اثر حرارت ($L.O.I^1$) زئولیت باشد. مقدار $L.O.I$ طبق استاندارد ASTM C 618 باید کمتر از مقدار ۱۰ درصد وزنی باشد. چنانچه دمای فرآوری تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد که با توجه به اینکه دمای فرآوری در این تحقیق کمتر از ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده است، قابل قبول می‌باشد. آزمایش XRF از روش‌های آنالیز عنصری است و برای تعیین عناصر شیمیایی موجود ماده کاربرد دارد. نتایج آزمایش XRF در جدول ۲ و نتایج حاصل از آزمایش XRD زئولیت معمولی و ۲۰۰ درجه در شکل ۲ آورده شده است. همچنین طرح مخلوط‌های فاز اول و دوم این تحقیق به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. به منظور بررسی مشخصات بتن تازه، آزمون تعیین روانی به وسیله اسلامپ مطابق شکل ۳- الف انجام گردیده است. نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ در شکل ۳- ب نشان داده است. وجود زئولیت معمولی و حرارت‌دیده در بتن باعث کاهش اسلامپ بتن می‌گردد. پژوهشگران دیگری نیز در رابطه با زئولیت معمولی چنین مشاهده‌ای را در گزارش تحقیق خود ارائه کرده‌اند و علت این موضوع را ساختار متخلخل ماده پوزولانی زئولیت دانسته‌اند [۱۸ و ۲۷].

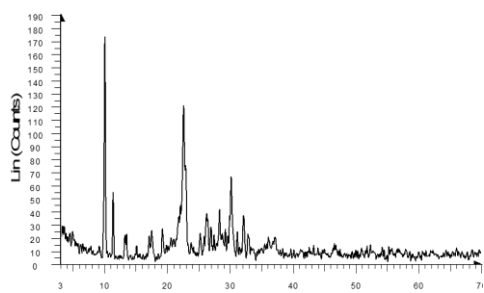
۲-۲- نگهداری نمونه‌ها

کار آزمایشگاهی در این پروژه در دو فاز مختلف انجام گرفت. در فاز اول، با ساخت نمونه‌ها از بتن تازه آزمایش اسلامپ گرفته شد و از بتن سخت شده بعد از رسیدن به سن ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز مورد آزمایش

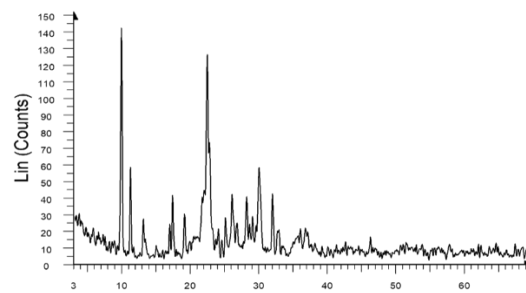
^۱ - Loss on ignition

جدول ۲- آنالیز XRF انواع ژئولیت‌های تحقیق

Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	LOI
ژئولیت معمولی										
۱/۹۳۶	۰/۲۵۱	۱/۷۲۸	۲/۳۹۱	۰/۰۲۴	۰/۰۲۵	۷۰/۳۷۷	۱۲/۲۴۲	۱/۳۱۳	۲/۴۱۵	۶/۸۲
ژئولیت ۲۰۰ درجه										
۱/۹۴۰	۰/۲۵۴	۲/۰۳۹	۲/۳۷۱	۰/۰۲۶	۰/۰۲۷	۷۰/۳۴۶	۱۲/۳۲۳	۱/۳۶۸	۲/۵۱۲	۶/۷۸
ژئولیت ۳۵۰ درجه										
۱/۹۶۱	۰/۲۴۲	۲/۰۶۶	۲/۳۴۹	۰/۰۲۸	۰/۰۱۸	۶۹/۴۹۷	۱۱/۹۷۶	۱/۲۸۲	۲/۴۹۳	۶/۷۸
ژئولیت حرارت دیده ۵۰۰ درجه										
۱/۹۸۳	۰/۲۵۴	۱/۷۹۷	۲/۴۳۸	۰/۰۲۶	۰/۰۱۱	۶۹/۴۹۷	۱۲/۱۳۷	۱/۲۶۴	۲/۵۱	۶/۲۷



(ب) ژئولیت ۲۰۰ درجه



(الف) ژئولیت معمولی

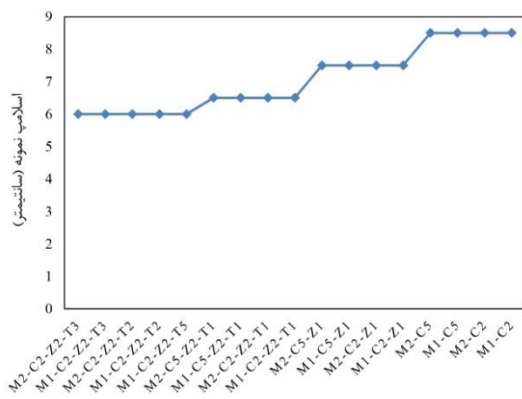
شکل ۲- نتایج حاصل از آزمایش XRD

جدول ۳- طرح مخلوط بتن‌های فاز اول تحقیق

آب کل (Kg)	شن خشک (Kg)	ماسه خشک (Kg)	ژئولیت (Kg)	سیمان (Kg)	درصد ژئولیت (%)	ژئولیت	نام نمونه	ردیف
۲۳۰	۸۳۷/۵۳	۹۳۴/۸۳	-	۳۳۳/۳	-	-	M ₁ -C ₂	۱
۲۳۰	۸۳۷/۵۳	۹۳۴/۸۳	۶۶/۶	۲۶۶/۶۴	۲۰/۰	معمولی	M ₁ -Z ₁ -C ₂	۲
۲۳۰	۸۳۷/۵۳	۹۳۴/۸۳	۶۶/۶	۲۶۶/۶۴	۲۰/۰	حرارت دیده	M ₁ -T ₁ -Z ₂ -C ₂	۳
۲۳۰	۸۳۷/۵۳	۹۳۴/۸۳	۶۶/۶	۲۶۶/۶۴	۲۰/۰	حرارت دیده	M ₁ -T ₂ -Z ₂ -C ₂	۴
۲۳۰	۸۳۷/۵۳	۹۳۴/۸۳	۶۶/۶	۲۶۶/۶۴	۲۰/۰	حرارت دیده	M ₁ -T ₃ -Z ₂ -C ₂	۵
۲۳۰	۸۳۷/۵۳	۹۳۴/۸۳	-	۳۳۳/۳	-	-	M ₁ -C ₅	۶
۲۳۰	۸۳۷/۵۳	۹۳۴/۸۳	۶۶/۶	۲۶۶/۶۴	۲۰/۰	معمولی	M ₁ -Z ₁ -C ₅	۷
۲۳۰	۸۳۷/۵۳	۹۳۴/۸۳	۶۶/۶	۲۶۶/۶۴	۲۰/۰	حرارت دیده	M ₁ -T ₁ -Z ₂ -C ₅	۸
۲۸۰	۷۸۴/۷۴	۸۷۳/۴	-	۴۴۲/۵۳	-	-	M ₂ -C ₂	۹
۲۸۰	۷۸۴/۷۴	۸۷۳/۴	۸۸/۵۰	۳۵۴/۰۳	۲۰/۰	معمولی	M ₂ -Z ₁ -C ₂	۱۰
۲۸۰	۷۸۴/۷۴	۸۷۳/۴	۸۸/۵۰	۳۵۴/۰۳	۲۰/۰	حرارت دیده	M ₂ -T ₁ -Z ₂ -C ₂	۱۱
۲۸۰	۷۸۴/۷۴	۸۷۳/۴	۸۸/۵۰	۳۵۴/۰۳	۲۰/۰	حرارت دیده	M ₂ -T ₂ -Z ₂ -C ₂	۱۲
۲۸۰	۷۸۴/۷۴	۸۷۳/۴	۸۸/۵۰	۳۵۴/۰۳	۲۰/۰	حرارت دیده	M ₂ -T ₃ -Z ₂ -C ₂	۱۳
۲۸۰	۷۸۴/۷۴	۸۷۳/۴	-	۴۴۲/۵۳	-	-	M ₂ -C ₅	۱۴
۲۸۰	۷۸۴/۷۴	۸۷۳/۴	۸۸/۵۰	۳۵۴/۰۳	۲۰/۰	معمولی	M ₂ -Z ₁ -C ₅	۱۵
۲۸۰	۷۸۴/۷۴	۸۷۳/۴	۸۸/۵۰	۳۵۴/۰۳	۲۰/۰	حرارت دیده	M ₂ -T ₁ -Z ₂ -C ₅	۱۶

جدول ۴- طرح مخلوط بتن‌های فاز دوم تحقیق

ردیف	نام نمونه	زئولیت	درصد زئولیت (%)	سیمان (Kg)	زئولیت (Kg)	ماسه خشک (Kg)	شن خشک (Kg)	آب کل (Kg)
۱	M ₁ -C ₂	-	-	۳۳۳/۳	-	۹۳۴/۸۳	۸۳۷/۵۳	۲۳۰
۲	M ₁ -Z ₁ -C ₂	معمولی	۲۰/۰	۲۶۶/۶۴	۶۶/۶	۹۳۴/۸۳	۸۳۷/۵۳	۲۳۰
۳	M ₁ -T ₁ -Z ₂ -C ₂	حرارت دیده	۲۰/۰	۲۶۶/۶۴	۶۶/۶	۹۳۴/۸۳	۸۳۷/۵۳	۲۳۰
۴	M ₂ -C ₂	-	-	۴۴۲/۵۳	-	۸۷۳/۴	۷۸۴/۷۴	۲۸۰
۵	M ₂ -Z ₁ -C ₂	معمولی	۲۰/۰	۳۵۴/۰۳	۸۸/۵۰	۸۷۳/۴	۷۸۴/۷۴	۲۸۰
۶	M ₂ -T ₁ -Z ₂ -C ₂	حرارت دیده	۲۰/۰	۳۵۴/۰۳	۸۸/۵۰	۸۷۳/۴	۷۸۴/۷۴	۲۸۰



(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف) آزمایش و (ب) نتایج اسلامپ نمونه

سولفات منیزیم، دو حوضچه آب، دو پمپ آب و دو پرز تایمردار استفاده شد. برای آماده‌سازی محیط سولفاتی، ابتدا میزان محلول مورد نیاز با توجه حجم حوضچه آب محاسبه گردید. پس از ساخت محلول سولفات منیزیم، به حوضچه آب اضافه شد. محیط آزمایش به‌گونه‌ای آماده گردید تا نمونه‌ها در سیکل‌های تر و خشک متناوب (چرخه‌ای) به مدت ۲ ماه بعد از ۲۸ روز اول در محیط ناسالم سولفاتی عمل‌آوری شوند. مدت زمان چرخه به گونه‌ای تنظیم شد که محلول هر ۱۲ ساعت در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز جابه‌جا شود (شکل ۵). پس از گذشت مدت زمان ۹۰ روز، نمونه‌های قرار داده شده در محیط سولفاتی توسط دستگاه جک فشاری آزمایش شدند.

۳- تحلیل نتایج به‌دست آمده

۳-۱- نتایج آزمایشات مقاومت فشاری در محیط سالم (فاز اول)



شکل ۴- آزمایش مقاومت فشاری

پس از طی مراحل فوق جهت آزمایش دوام تعداد نمونه‌های باقی مانده (از هر طرح مخلوط چهار نمونه)، در محیط سولفاتی به حوضچه‌های آب موجود محلول سولفات منیزیم اضافه شد. جهت بررسی عملکرد دوام نمونه‌های بتنی در فاز دوم، در شرایط ناسالم با محیط مخرب خلیج فارس شبیه‌سازی شده است. در این راستا با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه برای منطبق شدن محیط آزمایش به محیط خلیج فارس از پودر

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های مکعبی مرجع در دو حالت نسبت W/C برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۳ به ترتیب برابر ۱۷/۵۱ و ۲۵/۵۰ مگاپاسکال بودند.

یکی از عواملی که بر مقاومت فشاری بتن‌ها تأثیر می‌گذارد، سن بتن بوده که با استفاده از سیمان تپ ۲ انتظار تأمین مقاومت ۷۰ درصد مقاومت بتن مرجع بعد از ۷ روز برآورده شده است. همچنین مقاومت نمونه‌ها بیش از مقدار پیش‌بینی شده بود که قابل قبول می‌باشد. ولی حضور ژئولیت معمولی و حرارت‌دیده باعث افت مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به بتن مرجع شده است. ژئولیت و سایر پوزولان‌های طبیعی در سنین پایین، به دلیل سرعت کم واکنش پوزولانی و دیرتر وارد شدن در فرآیند هیدراسیون، مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهند.

نمونه‌های بتنی مکعبی حاوی دو نوع متفاوت ژئولیت معمولی و حرارت‌دیده تحت سه دمای ۲۰۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ با ۲۰ درصد جایگزینی و با دو نوع مقاومت هدف ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال به مدت ۹۰ روز در محیط آب شرب معمولی محیط سالم عمل‌آوری شدند و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج مقاومت‌های فشاری در جدول ۸ ارائه شده است.



شکل ۵- محیط چرخه‌ای تر و خشک شدن نمونه‌ها در فاز دوم

جدول ۸- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت ۹۰ روز (MPa)	مقاومت ۵۶ روز (MPa)	مقاومت ۲۸ روز (MPa)	مقاومت ۷ روز (MPa)	ژئولیت	نام نمونه
۲۸/۵	۲۶/۶	۲۵/۵	۱۷/۵۱	-	M ₁ -C ₂
۲۷	۲۴/۹۶	۲۱/۱۰	۷/۲۶	معمولی	M ₁ -Z ₁ -C ₂
۲۷/۸۳	۲۵/۳	۲۴/۰۸	۱۳/۲۳	حرارت دیده	M ₁ -T ₁ -Z ₂ -C ₂
۲۶/۱۶	۲۴/۳	۲۱/۰۹	۱۲/۹۳	حرارت دیده	M ₁ -T ₂ -Z ₂ -C ₂
۲۴/۵	۲۳/۰۶	۱۹/۷۸	۱۰/۵۳	حرارت دیده	M ₁ -T ₃ -Z ₂ -C ₂
-	۳۰/۷۶	-	-	-	M ₁ -C ₅
-	۲۸/۷۳	-	-	معمولی	M ₁ -Z ₁ -C ₅
-	۳۰/۵	-	-	حرارت دیده	M ₁ -T ₁ -Z ₂ -C ₅
۳۸/۶۶	۳۶/۳۳	۳۵/۱۳	۲۵/۵	-	M ₂ -C ₂
۳۶/۵۰	۳۴/۴۳	۳۰	۱۰/۵	معمولی	M ₂ -Z ₁ -C ₂
۳۷/۸۳	۳۵/۳۰	۳۳/۶۶	۱۵/۴	حرارت دیده	M ₂ -T ₁ -Z ₂ -C ₂
۳۶/۴۳	۳۳/۹۶	۳۱/۱۶	۱۵/۰۶	حرارت دیده	M ₂ -T ₂ -Z ₂ -C ₂
۳۴/۱۶	۳۳/۱۳	۳۰/۱۱	۱۳/۳	حرارت دیده	M ₂ -T ₃ -Z ₂ -C ₂
-	۴۰/۵	-	-	-	M ₂ -C ₅
-	۳۷/۳۳	-	-	معمولی	M ₂ -Z ₁ -C ₅
-	۳۹/۵	-	-	حرارت دیده	M ₂ -T ₁ -Z ₂ -C ₅

۳۵/۱۳ مگاپاسکال بودند که اندکی از مقاومت فشاری مورد انتظار بیشتر می‌باشد و میزان کاهش مقاومت با افزایش دما، بیشتر مشاهده شد. مقاومت فشاری نمونه‌های

همچنین در جدول ۸ مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی مرجع در دو حالت نسبت W/C برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۳ به ترتیب برابر ۲۵/۵۰ و

از آنجا که وزن مخصوص پوزولان زئولیت نسبت به سیمان پرتلند کمتر می‌باشد، طبیعی است وجود پوزولان زئولیت باعث کاهش وزن مخصوص بتن حاوی این ماده پوزولانی باشد. در رابطه با زئولیت‌های حرارت داده شده نیز به دلیل انبساط حجمی این نوع زئولیت نسبت به زئولیت معمولی، کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها مشاهده شده است.

جدول ۹- وزن مخصوص نمونه‌ها

نام نمونه	وزن مخصوص نمونه (Kg/m ³)
M ₁ -C ₂	۲۳۷۵
M ₁ -Z ₁ -C ₂	۲۳۶۹
M ₁ -T ₁ -Z ₂ -C ₂	۲۳۶۵
M ₁ -T ₂ -Z ₂ -C ₂	۲۳۶۲
M ₁ -T ₃ -Z ₂ -C ₂	۲۳۶۰
M ₁ -C ₅	۲۳۸۰
M ₁ -Z ₁ -C ₅	۲۳۷۶
M ₁ -T ₁ -Z ₂ -C ₅	۲۳۷۰
M ₂ -C ₂	۲۳۷۹
M ₂ -Z ₁ -C ₂	۲۳۶۸
M ₂ -T ₁ -Z ₂ -C ₂	۲۳۶۳
M ₂ -T ₂ -Z ₂ -C ₂	۲۳۶۰
M ₂ -T ₃ -Z ₂ -C ₂	۲۳۵۹
M ₂ -C ₅	۲۳۸۱
M ₂ -Z ₁ -C ₅	۲۳۷۶
M ₂ -T ₁ -Z ₂ -C ₅	۲۳۷۳

۳-۳- نتایج آزمایشات فشاری دوام در محیط ناسالم سولفاتی (فاز دوم)

نمونه‌های بتنی مکعبی در این فاز پس از ۲۸ روز قرارگیری در آب سالم، حدود دو ماه در محیط ناسالم (سولفاتی) و به صورت سیکل‌های تر و خشک شدن قرار گرفتند. پس از پایان زمان مقرر و بیرون آوردن نمونه‌ها از محیط سولفاتی، تغییراتی بر روی نمونه‌ها مشاهده شد، به طوری که بر روی تمامی نمونه‌ها لکه‌های سفیدرنگی مشابه شورزدگی که ناشی از حمله‌های سولفاتی است شکل گرفته بود. نتایج مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های قرار داده شده در محیط ناسالم سولفاتی در مقایسه با

حاوی زئولیت حرارت‌دیده با افزایش زمان تا ۹۰ روز، دارای رشد مثبت بوده و این رشد مثبت در مقاومت بالا بیشتر بوده است.

جدول ۸ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۵۶ و ۹۰ روزه نمونه‌های مکعبی مرجع در دو حالت نسبت W/C برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۳ نیز روند مشابه مقاومت ۲۸ روز را داشتند. با توجه به این مطلب که حرارت دادن در ۲۸ روز، بیشترین تأثیر را دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده است و در سازه‌هایی که نیازمند بهره‌برداری سریع می‌باشند، حائز اهمیت است؛ ولی در زمان‌های طولانی‌تر زئولیت نسبت به حرارت تأثیری ندارد. در سن ۲۸ روز، بتن با زئولیت معمولی در مقاومت بالا، ۱۵ درصد افت مقاومت پیدا می‌کند، ولی در بتن با زئولیت حرارت‌دیده ۲۰۰ درجه، حدود ۱۱ درصد مقاومت افزایش می‌یابد و اختلاف خود را نسبت به بتن مینا به ۴ درصد می‌رساند که از لحاظ اقتصادی و فنی قابل توجیه است.

با توجه به دو تیپ سیمان استفاده شده در این تحقیق، جهت بررسی عملکرد این دو تیپ سیمان و واکنش آن با پوزولان زئولیت با طرح مخلوط مشابه مقاومت فشاری ۵۶ روزه نمونه‌های مکعبی مرجع با سیمان تیپ ۵ در دو حالت نسبت W/C برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۳ به ترتیب برابر ۳۰/۷۶ و ۴۰/۵۰ مگاپاسکال بودند که نسبت به سیمان تیپ ۲ با طرح مخلوط مشابه، افزایش مقاومت به ترتیب ۱۵ و ۱۱ درصدی داشتند. این افزایش مقاومت، به دلیل عملکرد مشابه سیمان تیپ ۵ و زئولیت که کنندگی‌کننده می‌باشد، بوده است.

۳-۲- وزن مخصوص نمونه‌ها

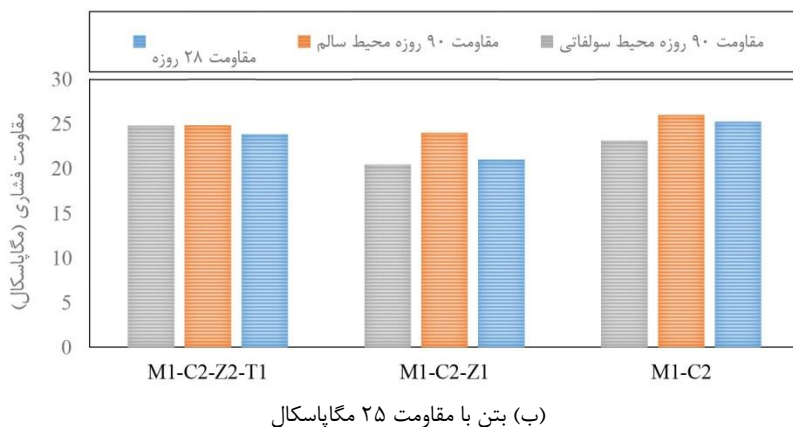
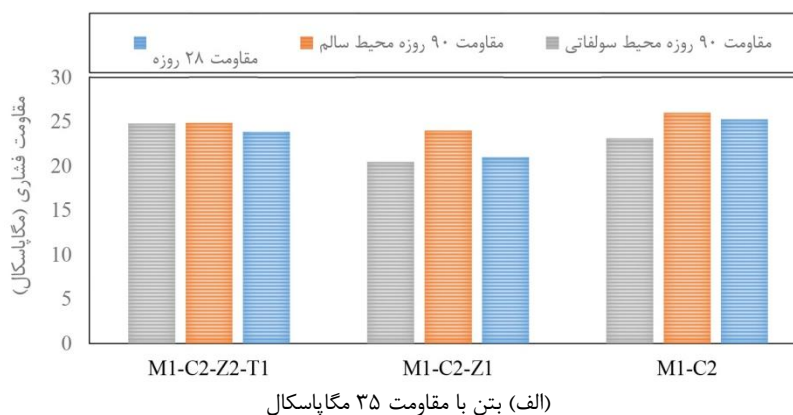
وزن مخصوص بتن در واقع وزن بتن در واحد حجم را مشخص می‌کند که بر کیفیت و سختی، دوام و تخلخل بتن موردنظر تأثیرگذار است. وزن مخصوص بتن از مجموع وزن تک‌تک اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط بتن شامل سیمان، آب، شن و ماسه تشکیل شده است. نتایج حاصل از انجام این آزمایش در جدول ۹ آورده شده است.

زمان طولانی‌تری نمونه‌ها در محیط سولفاتی نگه داشته شوند، زیرا حمله‌های سولفاتی در چندین سال اتفاق می‌افتد تا شرایط واقعی نزدیک‌تر باشند. دوما باید از نمونه‌های بیشتری استفاده شود تا نتیجه‌گیری منطقی‌تری بتوان انجام داد. سوم از پوزولان‌های دیگر با ژئولیت و یا سیمان‌های ضدسولفات استفاده کرد. پس از پایان سن ۹۰ روز نمونه‌های بیرون آورده شده از محیط سولفاتی تغییراتی بر روی نمونه‌ها مشاهده شد.

نمونه‌های مشابه که در محیط سالم آب شرب قرار گرفتند در جدول ۱۰ ارائه شده است و مقایسه اثر دو نوع ژئولیت معمولی و حرارت‌دیده بر مقاومت فشاری ۹۰ روزه در محیط‌های سالم و ناسالم در شکل ۶ نشان داده شده است که نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد ژئولیت حرارت‌دیده ۲۰۰ درجه برای هر دو نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ و ۰/۴۳، اثربخشی مناسبی در محیط‌های سولفاتی را از خود نشان دادند. همچنین برای رسیدن به نتایج مطلوب‌تر باید اولاً

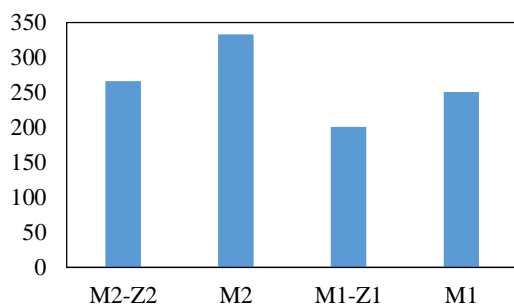
جدول ۱۰- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط سالم و ناسالم سولفاتی (دوام)

نام نمونه	ژئولیت (%)	مقاومت ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت ۹۰ روزه محیط سالم (مگاپاسکال)	مقاومت ۹۰ روزه محیط ناسالم (مگاپاسکال)	نسبت مقاومت ۹۰ روزه نمونه ناسالم نسبت به نمونه سالم متناظر
M ₁ -C ₂	-	۲۵/۲۶	۲۶	۲۳/۱۲	۰/۸۹
M ₁ -Z ₁ -C ₂	۲۰	۲۱	۲۴	۲۰/۱۲	۰/۸۳
M ₁ -T ₁ -Z ₂ -C ₂	۲۰	۲۳/۸۵	۲۴/۸۶	۲۴/۸۰	۰/۹۹
M ₂ -C ₂	-	۳۴/۸۱	۳۶/۵۸	۳۳/۵	۰/۹۲
M ₂ -Z ₁ -C ₂	۲۰	۲۹/۷۵	۳۵/۱۴	۳۴	۰/۹۶
M ₂ -T ₁ -Z ₂ -C ₂	۲۰	۳۲/۸۳	۳۶/۲۹	۳۸/۴۲	۱/۰۵



شکل ۶- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط سالم و ناسالم سولفاتی در سن ۹۰ روز

مصالح مصرفی در این تحقیق شامل شن، ماسه، سیمان و زئولیت معمولی و حرارت‌دیده می‌باشد که زئولیت طبیعی چون به صورت طبیعی وجود دارد، شاخص GWP آن صفر می‌باشد. براساس نمودار شکل ۷، نمونه M2-Z2 که حاوی سیمان با عیار مقدار ۴۴۲/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب بتن بوده، دارای بیشترین مقدار GWP می‌باشد که با استفاده از زئولیت در مخلوط بتن این نمونه حدود ۲۰ درصد نسبت به ماده مرجع با کاهش گازهای گلخانه‌ای همراه بوده است.



شکل ۷- GWP برای طرح مخلوط‌های منتخب

۵- مقایسه نمونه‌گیری آزمایشی و کارگاهی در سن ۲۸ روز

ساخت بتن در حجم کم درون میکسر کوچک آزمایشگاهی ممکن است به دلیل زمان کم مخلوط کردن مصالح بتن و همچنین حجم کم مصالح مصرفی، با خطاهایی همراه باشد. به همین منظور، طرح مخلوط بتن مرجع برای مقاومت ۲۵ مگاپاسکال در شرکت پارس بتن گرمسار انجام شد و در یکی از پروژه‌های فونداسیون جهت بررسی و نیز اجرایی بودن بتن این طرح مخلوط استفاده گردید. پس از نمونه‌گیری، ۱۲ عدد نمونه مکعبی در محل پروژه و سپس بعد از ۲۴ ساعت به محل آزمایشگاه انتقال داده شده و در حوضچه آب قرار گرفتند. نمونه‌ها در سن ۲۸ روز، آزمایش شدند و مشاهده گردید که بتن کارگاهی در حدود ۶ درصد مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به بتن آزمایشگاهی در سن ۲۸ روز در پی دارد. نتایج این آزمایش در شکل ۸ آورده شده است.

۴- تحلیل پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) مصالح مصرفی تحقیق

مهم‌ترین پدیده‌ای که امروز توجه دانشمندان و فعالان زیست‌محیطی را در اکثر کشورهای جهان به خود معطوف کرده است، پدیده تغییر اقلیم و موضوع گرمایش جهانی می‌باشد که در اثر پدیده انتشار گازهای گلخانه‌ای رخ می‌دهد. صنعت بتن به عنوان یک صنعت مسئول، حدود ۶ درصد از تولید و انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ می‌باشد. در مرحله پیمایش مواد خام جهت تولید سیمان، انرژی زیادی صرف این عمل شده و سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای زیادی می‌شود. با توجه به این‌که سیمان از پرکاربردترین مصالح در تمام قسمت‌های ساختمان و به‌خصوص ساختمان‌های بتن‌آرمه می‌باشد، یافتن راهکارهایی جهت کاهش این ماده در فرآیند ساخت بتن از اهداف اصلی استفاده از پوزولان‌های طبیعی در مخلوط بتن می‌باشد. همچنین هر کیلوگرم آب حدود ۰/۰۰۲۵ کیلوگرم CO₂ تولید می‌کند [۲۶]. مطابق دستورالعمل گازهای گلخانه‌ای برای تولید یک کیلوگرم شن و ماسه مورد استفاده در بتن به ترتیب حدود ۰/۰۰۰۱۱۴ کیلوگرم و حدود ۰/۰۰۰۰۳ کیلوگرم گاز CO₂ تولید شده و وارد کره زمین می‌شود. طی تحقیقات انجام گرفته توسط پژوهشگران با توجه به رده‌های مختلف سیمان، مقادیر متفاوتی را برای انتشار گاز CO₂ در فرآیند تولید سیمان به‌دست آورده‌اند. نتایج تحقیق تورک^{۱۰} و همکاران چنین بیان کرده است که به‌ازای تولید یک کیلوگرم سیمان پرتلند، ۰/۸۰۳ کیلوگرم گاز CO₂ در کره زمین انتشار می‌یابد. براساس نتایج حاصل از تحقیق این محققان، به‌ازای تولید یک کیلوگرم سیمان پرتلند تیپ ۲، حدود ۰/۷۵۰ کیلوگرم گاز CO₂ در کره زمین منتشر می‌شود [۲۸].

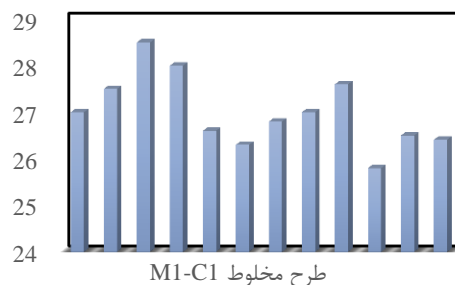
¹⁰- Turk

اختلاف ژئولیت معمولی با بتن مرجع خود ۱۸ درصد بوده، ولی اختلاف ژئولیت ۲۰۰ درجه با بتن مرجع خود به ۶ درصد می‌رسد، که تأثیر ژئولیت حرارت دیده در سن کم را نشان می‌دهد. در مقاومت‌های کمتر از ۵۶ روز حرارت ژئولیت حرارت دیده می‌تواند نتیجه بسیار خوبی داشته باشد ولی حرارت در سه ماه توجیه ندارد. از این نظر در سازه‌هایی که می‌خواهند زودتر به بهره‌برداری برسند حائز اهمیت می‌باشد.

۳- نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان بالاتر حاوی ۲۰ درصد ژئولیت حرارت دیده ۲۰۰ درجه دارای مقاومت خوبی در برابر محیط سولفاتی بودند به‌گونه‌ای که مقاومت ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی سرباره در محیط ناسالم به مقاومت نمونه‌های متناظر ۹۰ روزه در محیط سالم نه تنها کاهش نداشت که تا ۵ درصد افزایش داشت. مقاومت نمونه‌های بتنی حاوی ۲۰ درصد ژئولیت معمولی ۴ درصد افت داشته است. نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان کمتر حاوی ۲۰ درصد ژئولیت حرارت دیده ۲۰۰ درجه دارای مقاومت قابل‌قبولی در برابر محیط سولفاتی بودند به‌گونه‌ای که مقاومت ۹۰ روزه نمونه‌های حاوی ژئولیت حرارت دیده در محیط ناسالم به مقاومت نمونه‌های متناظر ۹۰ روزه در محیط سالم نزدیک به مقاومت هدف بود.

۴- وزن مخصوص نمونه‌های حاوی ژئولیت حرارت دیده نسبت به بتن با ژئولیت معمولی و بتن مرجع کمتر بوده و علت کاهش وزن مخصوص نمونه‌های حاوی ژئولیت حرارت دیده انبساط حجمی ژئولیت به دلیل وجود (Al_2O_3) در محتوای شیمیایی این نوع پوزولان می‌باشد.

۵- از آنجا که استفاده از مصالح جدید در تولید بتن باید دارای توجیه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی داشته باشد، با بررسی اثر GWP مصالح مصرفی



شکل ۸- مقاومت فشاری بتن اجرایی طرح مخلوط M1-C1 در محل

۶- نتیجه‌گیری

نمونه‌های بتنی مکعبی در دو فاز جداگانه ساخته و آزمایش شدند و تأثیر ژئولیت معمولی و حرارت دیده با جایگزینی ۲۰ درصد وزن سیمان با دو نوع مقاومت فشاری مورد انتظار در محیط سالم آب شرب و محیط ناسالم سولفاتی در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه مقاومت‌های فشاری بررسی شدند که نتایج زیر حاصل این آزمایشات بوده است:

۱- با بررسی نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ نمونه‌های حاوی ژئولیت معمولی و حرارت دیده مشخص شد که ژئولیت حرارت دیده نسبت به ژئولیت معمولی باعث کاهش روانی بتن می‌گردد. این کاهش در روانی بتن برای ژئولیت معمولی ۱۲ درصد و برای ژئولیت حرارت دیده در دمای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد این مقدار به ۳۰ درصد رسیده که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

۲- در سن کم ۷ روز از نمونه بتن، افزودن پوزولان ژئولیت جایگزین سیمان، نه تنها تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشت، بلکه مقاومت فشاری آن‌ها نسبت به نمونه‌های مرجع کاهش چشمگیری یافتند. در سن ۲۸ روز از نمونه بتن، مقاومت نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ با جایگزینی ۲۰ درصد ژئولیت معمولی و حرارت دیده با دماهای ۲۰۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه نسبت به بتن مرجع با کاهش مقاومت همراه بود.

۷- طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان مقاومت فشاری برای بتن‌های سازه‌ای بین مقدار ۲۰ الی ۳۵ مگاپاسکال بوده استفاده از بتن با مقاومت ۳۵ را توصیه می‌کند.

۸- از آنجا که ساختن نمونه‌های آزمایشگاهی چون در حجم کم ساخته می‌شود ممکن است با خطاهایی همراه باشد، ساخت بتن در کارگاه ساخت بتن به دلیل حجم بیشتر و مخلوط کردن دقیق‌تر می‌تواند نتایج و مقاومت بهتری را حاصل کند. در این تحقیق در بررسی طرح مخلوط مرجع M1-C1 دو سری نمونه‌گیری از بتن آزمایشگاهی و کارگاهی انجام شد که نتیجه شد بتن کارگاهی در حدود ۶ درصد مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به بتن آزمایشگاهی در سن ۲۸ روز در پی داشت.

این تحقیق مشخص گردید، استفاده از عبارهای سیمان پایین‌تر این تحقیق می‌تواند گازهای گلخانه‌ای کمتری را تولید کند، لذا طرح مخلوط بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال به دلیل عیار سیمان ۳۳۳/۳ گاز گلخانه‌ای کمتری را نسبت به طرح مخلوط بتن با مقاومت ۳۵ مگاپاسکال با عیار ۴۴۲/۵ تولید می‌کند.

۶- با ارزیابی اقتصادی ژئولیت معمولی و حرارت‌دیده در مخلوط بتن مشخص می‌شود که در بتن‌های حاوی ژئولیت معمولی و حرارت‌دیده در مقاومت ۳۵ مگاپاسکال صرفه اقتصادی بیشتری داشته و قابل توجه است. استفاده از ژئولیت در پروژه‌های بزرگ صرفه اقتصادی بیشتری داشته و با وجود منابع عظیم این ماده پوزولانی در استان‌هایی مثل سمنان و آذربایجان شرقی می‌توان استخراج و تولید این ماده با مش‌های ریزتر را انبوه کرده و مشکلات اجرایی و فنی را نیز مرتفع کرد.

References

- [1] Yazdani M, Habib Nejad Kurim A. Effect of fly ash on properties of fresh concrete and hardened concrete: A review article. Seventh International Conference on Researches in Science and Engineering and Fourth International Congress on Civil, Architecture and Urbanism of Asia. 2022. [In Persian]
- [2] ASTM C618-99a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concret. ASTM International, West Conshohocken, PA. 1999.
- [3] Country Planning and Budget Organization. Iran Concrete Regulation (Abba), Second Volume of Materials and Implementation. 2021. [In Persian]
- [4] Newman JB, Choo BS. Advanced Concrete Technology. Butterworth-Heinemann. 2003; 3.
- [5] Khosravi S, Rezaifar O, Gholhaki M, Qiyami Taklymi SM. Investigation Experimental of the Concrete Properties Containing Bentonite and Zeolite as Natural Pozzolan. Civil Infrastructure Researches. 2021; 6(2): 79-93. doi: 10.22091/cer.2021.6931.1248 [In Persian]
- [6] Sajedi F, Jalilifar H. Study and comparison of the effect of natural zeolite and silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concretes. Journal of Structural and Construction Engineering. 2019; 5(Special Issue 4): 109-126. doi: 10.22065/jsce.2017.88276.1224 [In Persian]
- [7] Naiqian F, Hongwei J, Enyi C. Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction. Magazine of Concrete Research. 1998 Mar; 50(1): 17-24. doi: 10.1680/mac.1998.50.1.17
- [8] Nagrockienė D, Rutkauskas A, Norkus A. Impact of natural zeolite on the properties and resistance to alkali silica reaction of mortar. Ceramics-Silikáty. 2021; 65(4): 317-325. doi: 10.13168/cs.2021.0033
- [9] Khoshroo M, Javid AA, Katebi A. Effect of chloride treatment curing condition on the mechanical properties and durability of concrete containing zeolite and micro-nano-bubble water. Construction and Building Materials. 2018 Jul 20; 177: 417-427. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.086
- [10] Zolghadri A, Ahmadi B, Taherkhani H. Influence of natural zeolite on fresh properties, compressive strength, flexural strength, abrasion resistance, Cantabro-loss and microstructure of self-consolidating concrete. Construction and Building Materials. 2022 Jun 6; 334: 127440. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127440

- [11] Ganji S, Sharabiani HE, Zeinali F. Laboratory investigation on abrasion resistance and mechanical properties of concretes containing zeolite powder and polyamide tire cord waste as fiber. *Construction and Building Materials*. 2021 Nov 15; 308: 125053. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.125053](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125053)
- [12] Rudžionis Ž, Adhikary SK, Manhanga FC, Ashish DK, Ivanauskas R, Stelmokaitis G, Navickas AA. Natural zeolite powder in cementitious composites and its application as heavy metal absorbents. *Journal of Building Engineering*. 2021 Nov 1; 43: 103085. doi: [10.1016/j.jobbe.2021.103085](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103085)
- [13] Sedlmajer M, Hubáček A, Rovnaníková P. Properties of concretes with admixture of natural zeolite. *Advanced Materials Research*. 2014 Oct 15; 1000: 106-109. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.106](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.106)
- [14] Kasai Y, Tobinai K, Asakura E, Feng N. Comparative study of natural zeolites and other inorganic admixtures in terms of characterization and properties of mortars. *Special Publication*. 1992 May 1; 132: 615-634.
- [15] Tran YT, Lee J, Kumar P, Kim KH, Lee SS. Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering*. 2019 May 15; 165: 354-364. doi: [10.1016/j.compositesb.2018.12.084](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.084)
- [16] Zhang J, Ding X, Wang Q, Zheng X. Effective solution for low shrinkage and low permeability of normal strength concrete using calcined zeolite particles. *Construction and Building Materials*. 2018 Jan 30; 160: 57-65. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.029](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.029)
- [17] Vanreyk AJ, Lekha R T K. Zeolite addition on concrete sustainability- A review. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*. 2017; 3(2): 5578-5582.
- [18] Valipour M, Pargar F, Shekarchi M, Khani S, Moradian M. In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. *Construction and Building Materials*. 2013 Sep 1; 46: 63-70. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2013.03.026](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.026)
- [19] Alizadeh A, Mohammadizadeh M. (1402). The positive effects of zeolite on the mechanical properties of ordinary concrete containing recycled aggregate and determining its optimal percentage. *Eleventh International Conference on Modern Research in Civil Engineering, Architecture, Urban and Environmental Management*. 2023. [In Persian]
- [20] Najimi M, Sobhani J, Ahmadi B, Shekarchi M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and building materials*. 2012 Oct 1; 35: 1023-1033. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038)
- [21] Saeedi Razavi B, Rohani SM, Shiri M, Mehdikhani B. Influence of zeolite on compressive strength, permeability and resistance to chlorine ion attack in concrete. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*. 2020 Nov 21; 13(3): 35-49. [In Persian]
- [22] Moradian M, Aslanian Z, Nouri V. Evaluation of concrete performance containing zeolite and silica soot exposed to sulfuric acid. *The Second National Concrete Conference of Iran*. 2010. [In Persian]
- [23] Mirvalad S, Shirzadi Javid AA, Alaghebandian N. Studying the Effect of silicafume and zeolite on durability of self-consolidating concrete exposed to various exposure conditions in a simulated marine environment. *Modares Civil Engineering journal*. 2021 May 10; 21(3): 175-187. [In Persian]
- [24] Ramazani M, Mousavi SE, Farhmandfar A, Charkhtab Moghaddam, SH. Evaluation of the performance of zeolite-containing concrete in an acidic environment under different operating conditions. *The 9th National Conference on Modern Materials and Structures in Civil Engineering*. 2022. [In Persian]
- [25] Yari A, Sharbatdar MK, Kheyroddin A. Effect of adding combined cementitious zeolite and silica fume on compressive and flexural strengths and the final cost of structural light weight concrete containing expanded polystyrene. *Journal of Concrete Structures and Materials*. 2021; 6(1): 104-120. doi: [10.30478/JCSM.2021.274244.1198](https://doi.org/10.30478/JCSM.2021.274244.1198) [In Persian]
- [26] Sharbatdar MK, Oruhi M. Improved compressive, tensile and flexural strength of non-reinforced specimens and reinforced beams including zeolite. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2019 Jan 21; 48(93): 103-113. doi: [10.22034/CEEJ.2019.8513](https://doi.org/10.22034/CEEJ.2019.8513) [In Persian]
- [27] Nematzadeh M, (1401). Laboratory study of zeolite effect on compressive behavior of organic concrete containing waste aggregates after exposure to fire. *The Second International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urbanism, Environment and Horizons of Islamic Art in the Statement of the Second Step of the Revolution*. [In Persian]
- [28] Turk J, Cotič Z, Mladenović A, Šajna A. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste management*. 2015 Nov 1; 45: 194-205. doi: [10.1016/j.wasman.2015.06.035](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035)