Civil Infrastructure Researches, Vol. 6, Issue.2, Winter 2021, pp. 79-93

Investigation Experimental Of the Concrete Properties Containing Bentonite and Zeolite as Natural Pozzolan

S. Khosravi

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

e-mail: Sara.khosravi@semnan.ac.ir

O. Rezaifar*

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

e-mail: orezayfar@semnan.ac.ir

M. Gholhaki

Professor of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

e-mail: mgholhaki@semnan.ac.ir

S. M. Qiyami Taklymi

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

e-mail: m.qiyami@semnan.ac.ir

Using pozzolanic materials in concrete manufacturing is intended as an optimal solution to lower the rate of greenhouse gas emission, and diminish energy resources and cement consumption. This research is aimed at evaluating Semnan zeolite and bentonite as partial replacement of cement in concrete. Twelve bentonite and zeolite mixes and control mix were examined. The main variable is the proportion of bentonite and zeolite (5, 10, 15 and 20%) by weight of cement in replacement mode while the amount of cementitious material, water to cementitious material ratio, fine aggregate content were kept constant. To study properties of hardened concrete, compressive strength and splitting tensile strength tests were performed. According to the results of compressive strength test, using bentonite and zeolite results in 5% increase in compressive strength as compared with the control mix (without bentonite and zeolite). By replacing 20% of zeolite with the weight of cement, the compressive strength is reduced by 9%. In most samples, Bentonite and zeolite as partial replacement of cement, it is possible to obtain the compressive strength acceptable. According to the results in mixtures containing zeolite and bentonite, if the amount of zeolite and bentonite are more than 10% by weight of cement, the tensile strength is reduced by 23% compared to control mix.

Keywords: Pozzolanic Materials, Bentonite, Zeolite, Compressive, Strength, Tensile Strength

* Corresponding author
Received 09 May 2021, Revised 22 May 2021, Accepted 23 May 2021.
DOI: 10.22091/cer.2021.6931.1248

مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات بتن حاوی بنتونیت و زئولیت به عنوان پوزولان طبیعی

سارا خسروی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
پست الکترونیک:
Sara.khosravi@semnan.ac.ir

امید رضایی فر*
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
پست الکترونیک:
Orezayfar@semnan.ac.ir

مجید قلهکی
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
پست الکترونیک:
mgholhaki@semnan.ac.ir

سیده مرضیه قیامی تکلیمی
دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
پست الکترونیک:
m.qiyami@semnan.ac.ir

استفاده از مواد پوزولانی در ساخت بتن، راه‌حل مناسبی برای کاهش منابع انرژی، تولید گازهای گلخانه‌ای و مصرف سیمان می‌باشد. در این مقاله، تأثیر استفاده از بنتونیت و زئولیت سمنان به جای بخشی از سیمان در بتن بررسی شده است. در این مقاله، ۱۲ طرح مخلوط به همراه طرح مخلوط نمونه کنترل ساخته و مقایسه شده است. متغیر اصلی، تغییر نسبت زئولیت و بنتونیت به وزن سیمان می‌باشد که درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در نظر گرفته شده است که نمونه‌ها در سه گروه با و بدون بنتونیت و زئولیت ساخته و تأثیر هر کدام از این مواد به تنهایی و در کنار هم، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن برای بررسی خواص و عملکرد بتن، انجام شده است. با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری، استفاده از زئولیت و بنتونیت همزمان (ترکیب ۵٪ بنتونیت و زئولیت) باعث افزایش ۵٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل (بدون بنتونیت و زئولیت) است. همچنین با جایگزین کردن ۲۰٪ زئولیت، مقاومت فشاری به میزان ۹٪ کاهش یافته است. در اغلب نمونه‌ها با جایگزین کردن زئولیت و بنتونیت به میزان ۱۰٪، مقاومت فشاری افزایش یافته است. با توجه به نتایج مقاومت کششی در بتن‌های حاوی زئولیت و بنتونیت اگر مقدار زئولیت و بنتونیت بیش از ۱۰٪ وزن سیمان شود، مقاومت کششی تا ۲۳٪ نسبت به نمونه کنترل، کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: مواد پوزولانی، بنتونیت، زئولیت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی

۱- مقدمه

بخش تولید سیمان، یکی از مهم‌ترین بخش‌های صنعت ساخت و ساز می‌باشد که در میان سایر بخش‌های صنعت ساخت با ایجاد آلودگی‌های محیط زیستی یکی از مشکلات روز جوامع شده است. استفاده از بتن‌های پایدار و سازگار با محیط زیست برای کاهش تأثیرات آب و هوایی و زیست محیطی افزایش تقاضای بتن، ضروری است [۱]. صنعت سیمان، سهم مهمی در تولید دی اکسید کربن و آلودگی هوا و در نتیجه افزایش دمای زمین دارد. به همین دلیل کشورهای مختلف به منظور جلوگیری از این آسیب‌ها، هزینه‌های تولید سیمان را

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۲/۱۹، بازنگری ۱۴۰۰/۰۳/۰۱، پذیرش ۱۴۰۰/۰۳/۰۲.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2021.6931.1248

افزایش داده و روند تولید آن را محدود کرده‌اند [۲]. یکی از مهم‌ترین راه‌حل‌های کاهش هزینه‌های تولید سیمان و آسیب‌های وارد بر محیط زیست و جلوگیری از افزایش تولید دی‌اکسیدکربن، اصلاح مواد تشکیل دهنده بتن می‌باشد [۳-۵]. استفاده از مواد بازیافتی در مخلوط بتن و کاهش مصرف سیمان با استفاده از مواد مکمل سیمانی رو به افزایش می‌باشد [۶]. پوزولان‌های طبیعی و صنعتی از جمله مواد مکمل سیمانی هستند که دارای خواص سیمان می‌باشند و مطالعات زیادی در خصوص استفاده از این مواد در مخلوط بتن انجام شده است [۷-۱۱].

انواع مواد پوزولانی عبارت‌اند از: بنتونیت، کائولن و زئولیت که منشأ طبیعی دارند، خاکستر بادی با منشأ صنعتی و آهک که دارای منشأ معدنی می‌باشد. تحقیق و توسعه در زمینه مواد جایگزین سیمان، مواد مکمل سیمانی برای ایجاد صنعتی مناسب، به منظور مدیریت گرمایش جهانی و کمبود انرژی به دلیل استفاده بی‌رویه از منابع انرژی تجدیدناپذیر و همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای که از طریق تولید و تکنولوژی سیمان انجام می‌شود، لازم و ضروری می‌باشد. استفاده همزمان از آهک و بنتونیت در ساخت بتن باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود [۱۲].

براساس استاندارد ASTM-C618، تعریف پوزولان عبارت است از ماده‌ای که دارای سیلیس و یا سیلیس آلومینیومی باشد، پوزولان نامیده می‌شود. مواد پوزولانی چسبندگی ندارند و یا چسبندگی خیلی کمی دارند به همین دلیل بهتر است درصدی از آن به همراه سیمان و جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده قرار گیرد. اگر ماده پوزولانی در مجاورت با آب قرار گیرد، با هیدروکسیدکلسیم واکنش داده و ترکیبات هیدراسیون تولید می‌کند [۱۳].

مطالعه‌ای بر روی کاربرد زئولیت طبیعی در بتن کامپوزیتی انجام شده است. در این مقاله، خصوصیات ساختاری و بنیادی زئولیت‌های طبیعی و تأثیر آن بر روی عملکرد بتن از نظر کارایی، مقاومت، دوام و نفوذپذیری آب، نفوذ یون کلرید، مقاومت در برابر کربوناسیون و حملات سولفاتی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد زئولیت می‌تواند خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشد و سبب کاهش نفوذ پذیری آب، یون کلرید می‌شود [۱۴]. به دلیل ویژگی‌های مقاومتی و صرفه اقتصادی بنتونیت، می‌توان از این ماده در صنعت ساخت و ساز استفاده نمود. با توجه به نتایج مطالعات بر روی بنتونیت کشور پاکستان، استفاده از ۲۱٪ بنتونیت در بتن، مقاومت فشاری مخلوط افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری بتن دارای بنتونیت در سنین اولیه نسبت به بتن کنترل رشد چندانی نداشته اما با افزایش سن، مقاومت فشاری آن بیشتر از بتن کنترل می‌شود. یکی از آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه، بررسی مقاومت بتن حاوی بنتونیت در برابر حملات اسیدی است. نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از بنتونیت در بتن، چگالی بتن کاهش می‌یابد و نمونه‌های حاوی بنتونیت مقاومت بالاتری نسبت به نمونه کنترل در برابر حملات اسیدی داشته‌اند [۱۵]. با افزایش درصد بنتونیت به جای سیمان، بتن ضعیف شده و مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن به شدت کاهش می‌یابد [۱۶]. در صورت استفاده همزمان بنتونیت و کائولن در بتن، مقاومت فشاری و مقاومت کششی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به تعریف استاندارد ASTM-C618، این مواد به تنهایی نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و باید به عنوان بخشی از سیمان در بتن، استفاده شوند [۱۷].

از بنتونیت به عنوان ماده تشکیل‌دهنده دیوارهای آب‌بند در سدهای خاکی استفاده می‌شود و همچنین به دلیل خاصیت شیمیایی بنتونیت، از این ماده برای جذب فلزات سنگین در آب و دیگر کارهای مربوطه استفاده می‌شود [۱۸ و ۱۹]. مطالعه‌ای بر روی ساختار منافذ و نفوذپذیری مواد پایه سیمانی تأثیر زیادی در کاربرد این مواد دارد. نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از ۸٪ بنتونیت، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و میزان نفوذناپذیری به شدت افزایش یافته است که نفوذناپذیری

به دلیل ساختار بنتونیت می‌باشد [۲۰]. مطالعاتی در خصوص تأثیر زئولیت بر بتن انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از زئولیت در بتن مقاومت فشاری آن نسبت به نمونه کنترل افزایش می‌یابد [۲۱ و ۲۲]. همچنین در مطالعات دیگر به بررسی هزینه‌های ساخت بتن‌های حاوی زئولیت پرداخته شده است. هزینه تولید زئولیت نسبت به سیمان بسیار کمتر می‌باشد و آسیب‌های زیست محیطی کمتری نسبت به سیمان دارد اما به دلیل جذب آب بالای زئولیت و کاهش کارایی بتن نیاز به فوق روان‌کننده می‌باشد که همین امر سبب افزایش هزینه‌ها تولید بتن حاوی زئولیت می‌شود [۲۲ و ۲۳].

مطالعه‌ای بر مقاومت بتن حاوی زئولیت طبیعی در برابر آتش توسط کوشنیر[1] انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد کاهش مقاومت بتن حاوی زئولیت در برابر آتش بسیار مشابه نمونه مرجع (بتن فاقد زئولیت) می‌باشد، به همین دلیل استفاده از زئولیت در بتن، نمی‌تواند تأثیر به سزایی در برابر آتش داشته باشد [۱]. مطالعه‌ای بر روی استفاده از زئولیت و ضایعات صنعتی (زباله‌های صنعتی) در بتن با مقاومت بالا توسط پژوهشگران انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد افزودن این مواد سبب افزایش مقاومت، کاهش تخلخل و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. در صورتی که زئولیت یا مواد زائد صنعتی را به طور جداگانه به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده قرار گیرند مقاومت و دوام بتن بهبود می‌یابد؛ اما اگر این مواد به صورت ترکیبی جایگزین بخشی از سیمان در بتن شوند منجر به کاهش کارایی و نفوذپذیری می‌شود [۲۴].

در این مقاله به مقایسه تأثیر درصدهای مختلف (بازه ۵ تا ۲۰ درصد) جایگزینی بنتونیت و زئولیت به تنهایی و به همراه یکدیگر، به جای بخشی از سیمان پرداخته شده است. با توجه به آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌توان تأثیر استفاده از درصدهای مختلف را بر روی خصوصیات بتن حاوی بنتونیت و زئولیت مشاهده کرد. بر همین اساس می‌توان گفت، هدف از انجام این مقاله، بررسی و مقایسه تأثیر استفاده از بنتونیت و زئولیت سمنان به جای بخشی از سیمان، به منظور کاهش مصرف سیمان و بهبود عملکرد و خصوصیات مکانیکی بتن (افزایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی) می‌باشد. از اهداف این مقاله، تولید بتن با مقاومت فشاری مناسب با استفاده از پوزولان‌های طبیعی بنتونیت و زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان و کاهش آسیب‌های زیست محیطی به سبب کاهش مصرف سیمان، می‌باشد.

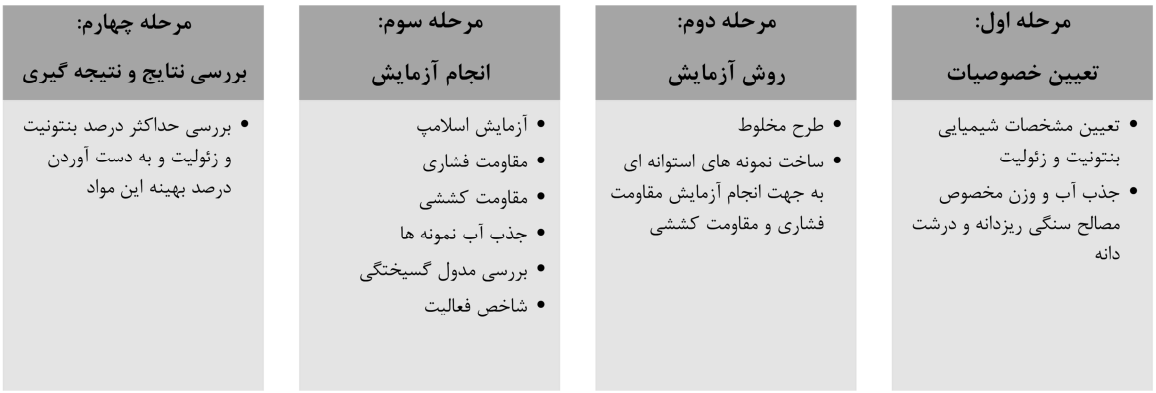
۲- روش آزمایش

در این قسمت به بررسی خصوصیات مصالح به کار رفته، انجام آزمایش‌های جذب آب، وزن مخصوص و دانه-بندی مصالح سنگی و روش ساخت و نمونه‌ها پرداخته شده است. در شکل ۱، فلودیاگرام روند انجام مقاله و آزمایش‌ها ارائه شده است.

۲-۱- مصالح مورد استفاده

بنتونیت و زئولیت مورد استفاده به رنگ زرد متمایل به سفید بوده و دارای دانه‌بندی ریز می‌باشند. در شکل ۲ نمونه بنتونیت و زئولیت نمایش داده شده است. سیمان مصرفی از نوع سیمان تیپ II شاهرود بوده است که خصوصیات سیمان، بنتونیت و زئولیت مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. طرح اختلاط‌های مورد نظر با نسبت آب به مواد چسبنده و مصالح سنگی ثابت ساخته و با یکدیگر مقایسه شده است. برای بررسی تأثیر بنتونیت و زئولیت در بتن مقاومت عیار اولیه سیمان در نمونه کنترل (CM)، ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

[1]- Kushnir



شکل ۱- فلودیاگرام آزمایش

(الف) نمونه بنتونیت (ب) نمونه زئولیت

شکل ۲- نمونه بنتونیت و زئولیت

جدول ۱- مشخصات سیمان و مواد پوزولانی

چگالی (g/cm^3)	سیمان	بنتونیت	زئولیت
	۳/۲	۱/۸	۱/۵
ترکیبات شیمیایی (٪)			
SiO_2	۲۱/۱۱	۶۹/۸	۶۹/۲۸
Al_2O_3	۴/۴۲	۱۱/۸۸	۱۰/۴۳
Fe_2O_3	۳/۹۶	۱/۷۳	۰/۴۹
CaO	۶۳/۳۶	۰/۹۶	۳/۵۶
MgO	۱/۵۱	۱/۴۲	۰/۵
Na_2O	۰/۳۲	۰/۵	۰/۷۳
K_2O	۰/۵۱	۰/۴۷	۱/۲۷
TiO_2	–	۰/۱	۰/۱۶۶
P_2O_5	–	–	۰/۰۰۴
SO_3	–	–	۰/۰۰۵
LOI	۲/۰۲	–	۱۲/۹۷
باقی مانده نامحلول در اسید	۰/۳۲	–	–
آهک آزاد	۱/۲۳	–	–
C_3S	۵۳/۰	–	–
C_2S	۲۰/۸	–	–
C_3A	۵/۰	–	–

۲-۲- نمونه‌های ساخته شده

جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی استوانه‌ای، تعداد ۵۲ نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است (شکل ۳). مراحل ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های مختلف مطابق استاندارد ASTM انجام شده است. دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه براساس ASTM-C136 و وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) براساس ASTM-C128 و وزن مخصوص مصالح سنگی درشت دانه (شن) براساس ASTM-C127 انجام شده است [۲۵-۲۷].نتایج آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ و نمودار دانه‌بندی ماسه در شکل ۴ نشان داده شده است.

(الف) نمونه‌های ساخته شده

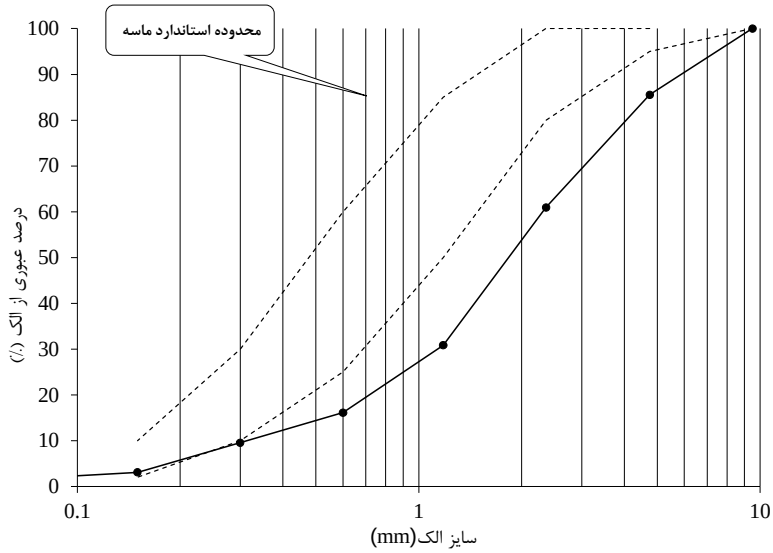
(ب) نمونه پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده

(ج) نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته

شکل ۳- نمونه‌های ساخته شده

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی ریزدانه

مشخصات	ماسه	شن
جذب آب (٪)	٪۲/۵	٪۱
وزن مخصوص (kg/m^3)	۱۹۵۰	۲۱۰۰



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای طبق استاندارد ASTM-C39 و آزمایش کششی دو نیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای براساس استاندارد ASTMC496-71 انجام شده است [۲۸]. آزمایش مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام شده است. همچنین نمونه‌های ساخته شده بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان انجام تست در حوضچه آب در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. آزمایش جذب آب نمونه‌ها براساس ASTM-C642 انجام شده است. برای انجام آزمایش جذب آب نمونه‌ها، نمونه از آب خارج و سطح آن در محیط خشک شده و وزن اشباع با سطح خشک آن اندازه‌گیری شده، سپس در گرمخانه (oven) قرار داده و بعد از گذشت ۲۴ ساعت وزن خشک آن مجدداً اندازه‌گیری شده است. برای بررسی کارایی مخلوط، آزمایش اسلامپ براساس استاندارد ASTM-C143 انجام شده است [۲۹]. همچنین پیش‌بینی مدول گسیختگی نمونه‌ها مطابق رابطه ارائه شده در استاندارد ACI318-14 به دست آمده است.

۲-۳- طرح مخلوط

طرح مخلوط نمونه‌ها با استفاده از روش وزنی و براساس استاندارد ACI211 انجام شده که در جدول ۳ ارائه شده است. درصد استفاده از بنتونیت در مطالعات مختلف پیشین، کمتر از ۱۰ درصد (حدود ۳ الی ۶ درصد) می‌باشد [۱۵ و ۲۰]. به جهت بررسی عملکرد و خصوصیات بتن حاوی بنتونیت و زئولیت با درصدهای بیشتر، درصد جایگزینی بنتونیت و زئولیت در بازه ۵ درصد الی ۲۰ درصد، در نظر گرفته شده است. زمان ساخت نمونه‌ها بین ۵ تا ۶ دقیقه می‌باشد که با افزایش درصد بنتونیت زمان ساخت بیشتر می‌شود.

جدول ۳- طرح اختلاط نهایی

نام طرح مخلوط	مواد تشکیل دهنده اصلی			ماده پوزولانی		نسبت آب به مواد چسبنده	درصد استفاده از بنتونیت (٪)	درصد استفاده از زئولیت (٪)
	سیمان	آب	ماسه	زئولیت	بنتونیت			
CM	۲۵۰	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	–	–	۰/۷۵	–	–
ZBC-1	۲۳۷/۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	صفر	۱۲/۵	۰/۷۵	۵	صفر
ZBC-2	۲۲۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	صفر	۲۵	۰/۷۵	۱۰	صفر
ZBC-3	۲۱۲/۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	صفر	۳۷/۵	۰/۷۵	۱۵	صفر
ZBC-4	۲۰۰	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	صفر	۵۰	۰/۷۵	۲۰	صفر
ZBC-5	۲۳۷/۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	۱۲/۵	صفر	۰/۷۵	صفر	۵
ZBC-6	۲۲۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	۲۵	صفر	۰/۷۵	صفر	۱۰
ZBC-7	۲۱۲/۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	۳۷/۵	صفر	۰/۷۵	صفر	۱۵
ZBC-8	۲۰۰	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	۵۰	صفر	۰/۷۵	صفر	۲۰
ZBC-9	۲۳۷/۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	۶/۲۵	۶/۲۵	۰/۷۵	۲/۵	۲/۵
ZBC-10	۲۲۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۰/۷۵	۵	۵
ZBC-11	۲۱۲/۵	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	۱۸/۷۵	۱۸/۷۵	۰/۷۵	۷/۵	۷/۵
ZBC-12	۲۰۰	۱۸۷/۵	۱۸۶۲/۵	۲۵	۲۵	۰/۷۵	۱۰	۱۰

در ابتدای مصالح سنگی درشت دانه و ریزدانه (شن و ماسه) به همراه بخشی از آب ترکیب شده و سپس نیمی از سیمان به همراه بخشی از آب باقی مانده به مخلوط اضافه می‌شود تا فرآیند جذب آب و تشکیل لایه سیمانی بر روی مصالح سنگی به خوبی انجام گیرد [۱۷].

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت به بررسی و مقایسه نتایج آزمایش اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب نمونه‌های حاوی بنتونیت و زئولیت، پیش‌بینی مدول گسیختگی نمونه‌های حاوی بنتونیت و زئولیت و بررسی تأثیر استفاده از این مواد بر چگالی نمونه استوانه‌ای سخت شده، پرداخته شده است.

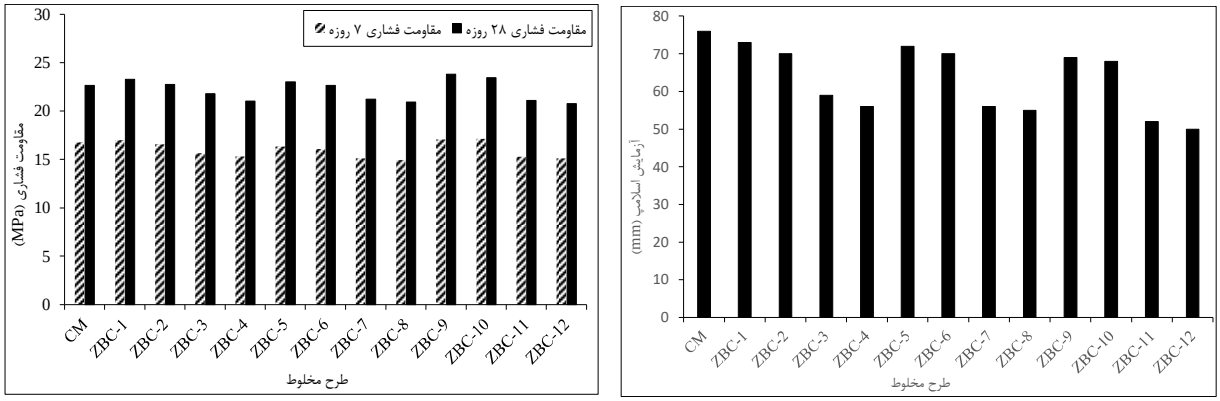
۳-۱- آزمایش اسلامپ

نتایج آزمایش اسلامپ در شکل ۵- الف ارائه شده است. کاهش اسلامپ در نمونه‌های حاوی بنتونیت و زئولیت نسبت به نمونه کنترل (CM) ناشی از کوچیک بودن و سطح نسبتاً بزرگ ذرات مواد پوزولانی می‌باشد. بلورها و ذرات مونت موریلونیت دارای سطح صاف و فوق‌العاده زیادی است به همین دلیل موجب افزایش تماس با آب می‌شود که همین امر سبب افزایش جذب آب و کاهش کارایی می‌شود.

بنتونیت دارای سطح ویژه بالا و ابعاد بسیار ریزی می‌باشد و مونت موریلونیت موجود در بنتونیت میل به جذب آب بالایی نسبت به دیگر کانی‌های رس دارد. همچنین قابلیت افزایش حجم و عدد اکتیویته در مونت موریلونیت که یکی از کانی‌های اصلی بنتونیت است، بیشتر از دیگر کانی‌های رس می‌باشد بنابراین؛ می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌های حاوی بنتونیت با نسبت آب به مواد چسبنده مشابه نمونه CM، کارایی کمتری دارند [۳۰].

۳-۲- مقاومت فشاری

در شکل ۵- ب می‌توان نتایج مقاومت فشاری سنین ۷ و ۲۸ روزه را مشاهده کرد. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌های ZBC-1، ZBC-9 و ZBC-10، مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه CM (۱/۵، ۱/۷ و ۰/۴ درصد) افزایش یافته است. به دلیل آن که واکنش پوزولانی زئولیت و بنتونیت کندتر از واکنش هیدراسیون سیمان می‌باشد، در صورت استفاده در بتن، تاثیر کمتری بر مقاومت فشاری در سن ۷ روزه دارد [۳۱ و ۳۲]. به همین دلیل در بیشتر نمونه‌ها مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه CM کاهش یافته است.



(الف) (ب)

شکل ۵- نتایج (الف) آزمایش اسلامپ و (ب) مقاومت فشاری

با توجه به نتایج، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیمی از نمونه‌ها که درصد استفاده از بنتونیت و زئولیت آن‌ها کمتر از ۱۵٪ می‌باشد (ZBC-1، ZBC-2، ZBC-5، ZBC-6، ZBC-9 و ZBC-10) نسبت به CM (۳، ۱، ۱/۷، ۰/۶، ۵ و ۴ درصد) افزایش یافته است.

در نمونه‌های حاوی بنتونیت و زئولیت (به صورت ترکیب یا به تنهایی) با افزایش درصد استفاده به بیش از ۱۰٪، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به CM به شدت کاهش یافته است.

دلیل اصلی افزایش مقاومت در برخی نمونه‌ها آن است که واکنش هیدراسیون مواد پوزولانی آهسته‌تر از واکنش هیدراسیون سیمان انجام می‌شود که فرآیند این واکنش با خاصیت پرکنندگی بنتونیت و زئولیت همراه می‌باشد [۳۳]. با توجه به نتایج، در نمونه‌های حاوی بنتونیت و زئولیت نسبت مقاومت فشاری ۷ به ۲۸ روزه در صورتی که درصد جایگزین بنتونیت نسبت به وزن سیمان کمتر از ۱۵٪ باشد، در حدود ۷۱٪ است که نشان می‌دهد درصد بهینه بنتونیت در حدود ۵٪ تا ۱۰٪ می‌باشد.

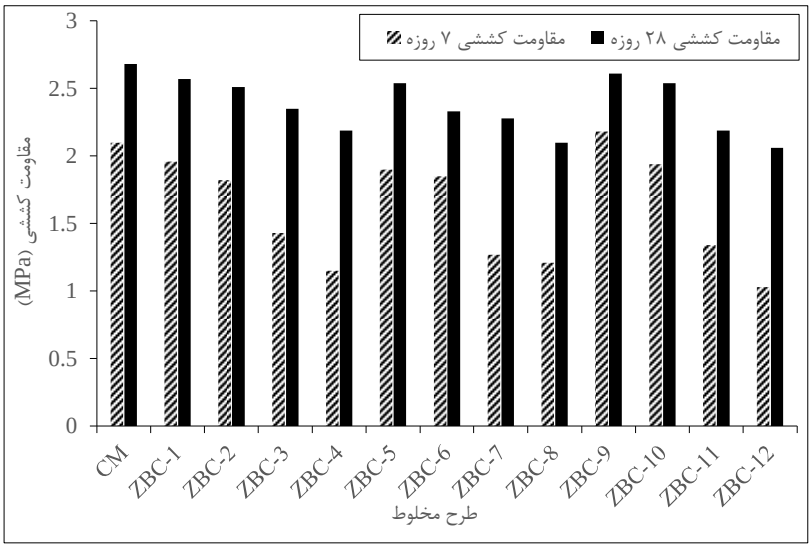
۳-۳- مقاومت کششی

مقاومت کششی دو نیم شدن براساس استاندارد ASTM-C496 انجام شده است. براساس این استاندارد، با استفاده از نیروی به دست آمده از آزمایش دو نیم شدن استوانه‌ای از طریق معادله (۱) می‌توان مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای به دست آورد. در شکل ۶ نیز نتایج مقاومت کششی ارائه شده است.

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \qquad (۱)$$

که در آن P نیروی ارائه شده توسط دستگاه، L طول نمونه استوانه‌ای، D قطر نمونه استوانه‌ای و f_t مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه استوانه‌ای می‌باشد.

از عوامل موثر بر مقاومت کششی می‌توان به کیفیت ملات و خاصیت سنگدانه‌ها اشاره کرد [۳۴ و ۳۵]. یکی از دلایلی که باعث بهبود مقاومت کششی نمونه‌های حاوی زئولیت و بنتونیت می‌شود، شکل مولکولی و پیوند بین مولکولی این مواد است. می‌توان گفت به دلیل شکل مولکول‌های مواد پوزولانی که گره خورده هستند و شکل نامنظمی دارند، خاصیت شکنندگی و سختی کمتری دارند، به همین دلیل انتظار می‌رود رفتار این نمونه‌ها، در مقاومت کششی نسبت به نمونه کنترل بهتر باشد، که با توجه به نتایج شکل ۶ مشاهده می‌شود در صورت استفاده از بنتونیت و زئولیت به بیش از ۱۰٪ مقاومت کششی به شدت کاهش می‌یابد. یکی دیگر از عوامل مهم بر مقاومت کششی پیوند مولکولی است، به همین دلیل مقاومت کششی در نمونه‌هایی که درصد بنتونیت آن‌ها بیش از ۲۰٪ است، نسبت به نمونه CM به شدت کاهش یافته است، زیرا پیوند بین مولکولی بنتونیت و زئولیت از نوع پیوند بین مولکولی واندروالسی می‌باشد و تحت شرایط آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهند [۳۶ و ۳۷]. در میان عوامل ذکر شده، موثرترین آن‌ها در رابطه با استفاده از مواد پوزولانی، پیوند بین مولکولی می‌باشد [۳۵]. بر همین اساس درصد استفاده از بنتونیت و زئولیت بسیار مهم می‌باشد.



شکل ۶- نتایج مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن استوانه‌ای نشان می‌دهد اغلب نمونه‌ها مقاومت کششی ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه افزایش قابل توجهی داشته است و همچنین برخی از نمونه‌ها نسبت به نمونه CM، مقاومت کششی بهتری کسب نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد در نمونه‌هایی که درصد بنتونیت و زئولیت در مخلوط بتن افزایش یافته (ZBC-3، ZBC-4، ZBC-7، ZBC-8، ZBC-11 و ZBC-12)، مقاومت کششی نسبت به نمونه CM، به ترتیب ۷، ۱۰، ۸، ۱۴، ۱۰ و ۲۸ درصد کاهش یافته است. در این نمونه‌ها به دلیل ضعیف بودن پیوند بین مولکولی ذرات زئولیت و بنتونیت، پیوندهای بین مولکولی آن‌ها به راحتی قابل شکستن می‌باشد و به همین دلیل در صورت استفاده از این مواد با درصد بالا در مخلوط بتن، مقاومت کششی به شدت کاهش می‌یابد.

۴-۳- رابطه میان مقاومت فشاری و مقاومت کششی

با توجه به نتایج مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه نمونه‌ها، ضریبی پیش‌بینی شده است که در شکل ۷ ارائه گردیده است. بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی ارتباطی وجود دارد اما با یکدیگر نسبت مستقیمی ندارند. براساس استاندارد ACI318-14 رابطه بین مقاومت کششی آزمایش دو نیم شدن، f_t ، و مقاومت فشاری، f_c'، در معادله (۲) ارائه شده است [۳۸]:

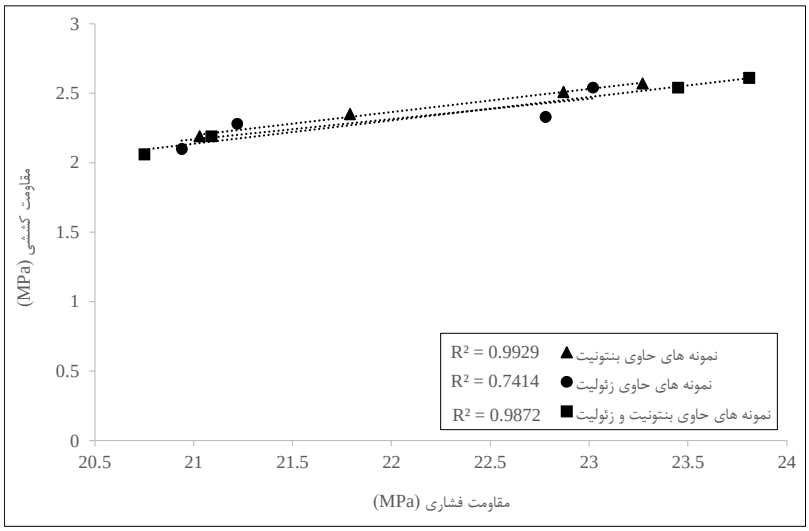
$$f_t = 0.56\sqrt{f_c'} \qquad (۲)$$

با توجه به نتایج شکل ۷، در نمونه‌هایی که درصد جایگزین بنتونیت و زئولیت نسبت به وزن سیمان بیش از ۱۰٪ می‌باشد، ضریب بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری، نسبت به ضریب ارائه شده در آیین‌نامه به شدت کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش درصد جایگزینی (بیش از ۱۰٪) عملکرد بتن ضعیف می‌گردد در نتیجه مقاومت فشاری نمونه مقدار قابل قبولی داشته باشد مقاومت کششی آن نمی‌تواند پاسخگوی عملکرد مطلوب بتن باشد.

شکل ۷- مقایسه ضریب به دست آمده از آزمایش‌ها با ضریب استاندارد

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای می‌توان رابطه اثر بخشی این دو آزمایش بر یکدیگر و تأثیر استفاده از بنتونیت و زئولیت را بر این دو، با توجه به ضریب رگرسیون به دست آمده مقایسه و بررسی نمود که در شکل ۸ رابطه اثر بخشی مقاومت فشاری و مقاومت کششی نشان داده شده است. با توجه به ضرایب رگرسیون به دست آمده برای نمونه‌ها، مشاهده می‌شود نمونه‌های با استفاده از بنتونیت ساخته شده، ضریب رگرسیون (همبستگی) بالاتری نسبت به دو حالت دیگر دارد، بدان

معناست که افزایش مقاومت تأثیر خوبی بر افزایش مقاومت کششی نمونه داشته است که نشان دهنده تأثیر مطلوب استفاده از بنتونیت در بتن می‌باشد.

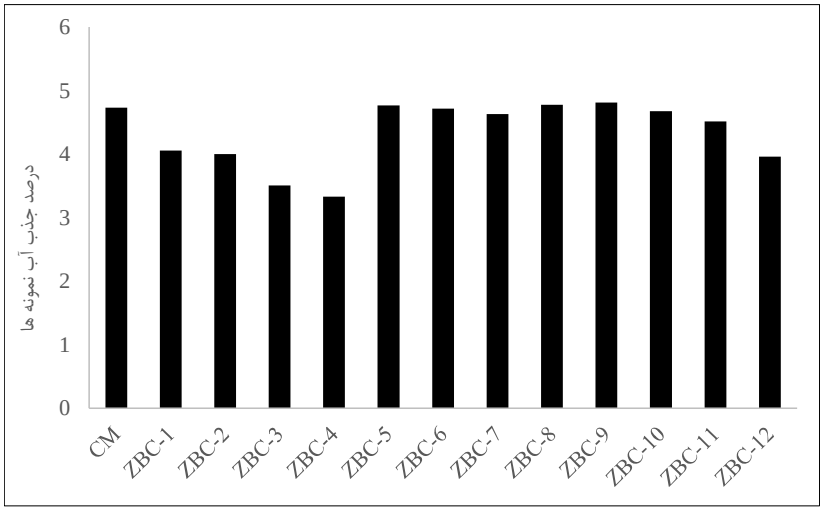


شکل ۸- رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی ۲۸ روزه

از طرفی نمونه‌های حاوی زئولیت کمترین ضریب همبستگی را دارند. ضریب تعیین در نمونه‌های زئولیت با توجه به ضریب رگرسیون به دست آمده برابر ۷۴٪ می‌باشد که یعنی با افزایش مقاومت فشاری تنها ۷۴٪ باعث افزایش مقاومت کششی در این نمونه‌ها می‌شود. در نمونه‌هایی که حاوی زئولیت و بنتونیت با هم می‌باشند، وجود بنتونیت تأثیر نامناسب زئولیت را در بتن جبران نموده است و ضریب رگرسیون نزدیک به یک به دست آمده است.

۳-۵- جذب آب

در شکل ۹، نتایج جذب آب نمونه‌ها ارائه شده است که مطابق استاندارد ASTM-C642 می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، با افزایش درصد بنتونیت و زئولیت جذب آب نمونه کاهش می‌یابد. به دلیل خاصیت پرکنندگی و کوچک بودن مواد پوزولانی نسبت به سیمان در صورت افزایش درصد جایگزین سیمان، باعث کاهش تخلخل مخلوط بتن می‌شود و در نتیجه سبب کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام مخلوط می‌گردد [۳۹].



شکل ۹- جذب آب

همچنین به دلیل خاصیت نفوذناپذیری بنتونیت از آن، به عنوان مصالح در دیوارهای آب‌بند در زیر سدهای خاکی به منظور کاهش و یا جلوگیری از نشت آب، استفاده می‌شود [۱۸]. با توجه به نتایج، هرچه درصد جایگزین بنتونیت و زئولیت بیشتر شود، جذب آب نمونه نسبت به نمونه CM کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌های حاوی زئولیت جذب آب بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی بنتونیت دارد.

۶-۳- مدول گسیختگی

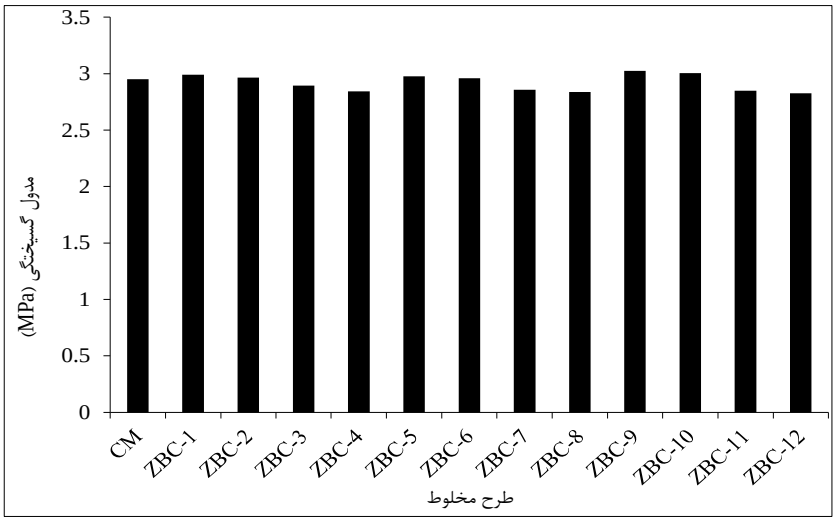
مقاومت کششی ناشی از خمش، مدول گسیختگی یا مقاومت خمشی نامیده می‌شود. نتایج آزمایش خمش برای کنترل کیفی بتن در دال‌ها، تیرها و روسازی‌های صنعت حمل و نقل اهمیت زیادی دارد، زیرا رفتار بتن در خمش بررسی می‌شود [۱۲]. مطابق استاندارد ACI318-14 می‌توان مدول گسیختگی بتن را با توجه به مقاومت فشاری آن، از رابطه (۳) پیش‌بینی کرد که نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است.

$$f_r' = 0.62\lambda\sqrt{f_c'} \qquad (۳)$$

در این رابطه، λ یک ضریب اصلاحی می‌باشد که برای بتن‌های با وزن معمولی برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به نتایج، با افزایش درصد بنتونیت و زئولیت مدول گسیختگی پیش‌بینی شده نسبت به CM کاهش می‌یابد. در نمونه‌هایی که درصد بنتونیت و زئولیت آن‌ها ۵٪ (ZBC-1 و ZBC-5) می‌باشد، مدول گسیختگی نمونه‌ها نسبت به CM به ترتیب ۱/۴ و ۱ درصد افزایش یافته است. در نمونه‌ای که از بنتونیت و زئولیت به طور همزمان استفاده شده (ZBC-9، ترکیب ۲/۵٪ از هریک) مدول گسیختگی نسبت به CM ۲/۵ درصد افزایش یافته است. در دیگر نمونه‌ها مدول گسیختگی (ZBC-2، ZBC-3، ZBC-4، ZBC-6، ZBC-7، ZBC-8، ZBC-11 و ZBC-12) نسبت به CM، با افزایش درصد بنتونیت و زئولیت کاهش یافته است.

با توجه به نتایج تأثیر نامطلوب افزایش درصد جایگزینی بنتونیت و زئولیت در مقاومت خمشی مشاهده می‌شود، اما برای بیان دقیق‌تر تأثیر این مواد در مقاومت خمشی بتن باید نمونه‌های خمشی ساخته و مورد آزمایش مقاومت خمشی قرار گیرند.



شکل ۱۰- پیش‌بینی مدول گسیختگی

۷-۳- شاخص فعالیت مقاومت

شاخص فعالیت مقاومت بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی (زئولیت و بنتونیت) و خاکستر بادی مطابق استاندارد ASTM-C618 باید حداقل ۷۵٪ بتن معمولی باشد. نتایج به دست آمده از شاخص فعالیت مقاومت که مطابق استاندارد ASTM-C311 می‌باشد از رابطه (۴)

محاسبه شده و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به آن که نمونه‌های ساخته شده نمونه‌های استوانه‌ای هستند، با استفاده از ضرایب مبحث ۹، مقاومت نمونه‌ها به نمونه‌های مکعبی تبدیل شده و شاخص فعالیت آن‌ها محاسبه شده است.

$$SAI=\frac{A}{B}\times 100 \qquad (۴)$$

در این رابطه، A مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی حاوی بنتونیت (مواد پوزولانی) براساس مگاپاسکال و B مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی مرجع (بتن معمولی) براساس مگاپاسکال است.

نتایج نشان می‌دهد، در صورت جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ بنتونیت یا زئولیت در مخلوط بتن، نسبت به CM، شاخص فعالیت مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های که بنتونیت و زئولیت همزمان استفاده شده است، در صورتی که حداکثر درصد جایگزینی هر دو ۱۰٪ باشد، نسبت به CM، شاخص فعالیت مقاومت افزایش می‌یابد، در غیر این صورت در نمونه‌هایی که ۱۵٪ و ۲۰٪ بنتونیت یا زئولیت و یا هر دو استفاده شده، شاخص فعالیت مقاومت نسبت به CM کاهش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان از بنتونیت یا زئولیت و یا هر دو در تولید بتن استفاده نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و مقایسه تأثیر استفاده از بنتونیت و زئولیت برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده و مقایسه آن‌ها عبارت است از:

۱- استفاده از زئولیت و بنتونیت به عنوان پوزولان طبیعی و سازگار با محیط زیست که دارای حداقل آسیب به محیط زیست می‌باشند، می‌توانند یک انتخاب مناسب برای کاهش مصرف سیمان قرار گیرند. همچنین با توجه به خصوصیات این مواد، می‌توان در صورت استفاده در مخلوط بتن، سبب بهبود عملکرد آن شوند.

۲- در صورت استفاده از زئولیت و بنتونیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان کارایی بتن، کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش اسلامپ نشان می‌دهد، با افزایش درصد جایگزینی نسبت به وزن سیمان، خاصیت چسبندگی مخلوط بتن نیز افزایش می‌یابد و سبب کاهش کارایی می‌شود. در نمونه‌هایی که درصد استفاده از زئولیت و بنتونیت بیش از ۱۰٪ می‌باشد (ZBC-3، ZBC-4، ZBC-7، ZBC-8، ZBC-11 و ZBC-12) اسلامپ نمونه به شدت کاهش یافته است.

۳- با توجه به نتایج مقاومت فشاری، نمونه‌هایی که درصد استفاده از زئولیت و بنتونیت جایگزین سیمان کمتر از ۱۵٪ می‌باشد (ZBC-1، ZBC-2، ZBC-5، ZBC-6، ZBC-11 و ZBC-12)، نسبت به CM مقاومت فشاری بالاتری کسب کرده‌اند. به همین دلیل برای کسب مقاومت فشاری مناسب، حداکثر درصد استفاده از بنتونیت به عنوان جایگزین سیمان، ۱۰٪ می‌باشد.

۴- نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده همزمان از بنتونیت و زئولیت می‌توان مقاومت فشاری و کششی مخلوط بتن را نسبت به نمونه CM، افزایش داد. مقاومت فشاری مخلوطی که دارای ۲/۵٪ بنتونیت و ۲/۵٪ زئولیت می‌باشد به ترتیب به میزان ۵٪ و ۴٪ افزایش یافته و همچنین مقاومت کششی این نمونه‌ها نسبت به نمونه CM بهبود یافته است. همچنین استفاده از بنتونیت در کنار زئولیت می‌تواند باعث بهبود بخشیدن به تأثیر زئولیت در مخلوط بتن شود که مستلزم مطالعات بیشتر بر روی خصوصیات شیمیایی این مواد می‌باشد.

۵- با مقایسه نتایج نمونه‌ها، در مقاومت فشاری مخلوط بتن، مشاهده می‌شود در صورت استفاده از بنتونیت به تنهایی می‌توان عملکرد مخلوط بتن را نسبت به مخلوط بتن دارای زئولیت، بهبود بخشید و نتایج بهتری را کسب نمود. نمونه‌های حاوی بنتونیت (۵٪ و ۱۰٪) نسبت به نمونه CM، ۳ و ۱ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری شده است.

۶- با توجه به نتایج مقاومت کششی، نمونه‌های دارای ۵ و ۱۰٪ زئولیت و بنتونیت مقاومت کششی بهتری نسبت به CM دارند. به همین دلیل برای کسب مقاومت کششی مناسب حداکثر درصد استفاده از این مواد به جای سیمان ۱۰ درصد می‌باشد.

۷- با توجه به نتایج مشاهده می‌شود با افزایش درصد زئولیت و بنتونیت (به دلیل کاهش مقاومت فشاری و مقاومت کششی)، ضرایب به دست آمده از رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری، کمتر از ضریب ارائه شده در استاندارد (۰/۵۶) می‌باشد. به همین دلیل حداکثر درصد جایگزینی بنتونیت ۱۰٪ است.

۸- نتایج پیش‌بینی مدول گسیختگی نشان می‌دهد در صورت افزایش درصد جایگزینی بنتونیت و زئولیت بیشتر از ۱۰٪ مدول گسیختگی کاهش می‌یابد، زیرا چسبندگی و مقاومت کششی در صورت افزایش درصد این مواد به شدت کاهش می‌یابد در نتیجه عملکرد بتن در مدول گسیختگی ضعیف می‌شود. همچنین با افزایش درصد جایگزینی مقاومت فشاری کاهش یافته در نتیجه مدول گسیختگی پیش‌بینی شده مخلوط بتن نیز کاهش می‌یابد.

۹- با توجه به نتایج جذب آب، نمونه‌های حاوی بنتونیت جذب آب کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی زئولیت و یا ترکیب هر دو داشته‌اند. همچنین در صورت افزایش درصد بنتونیت و زئولیت جذب آب نمونه کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد سبب افزایش خاصیت نفوذناپذیری مخلوط بتن حاوی بنتونیت و زئولیت شده است.

براساس نتایج به دست آمده، می‌توان از پوزولان‌های طبیعی از جمله زئولیت و بنتونیت به عنوان بخشی از سیمان استفاده نمود. این جایگزینی سبب بهبود عملکرد بتن، کاهش سیمان مصرفی و علاوه بر آن حفظ منابع انرژی و منابع مواد اولیه که در نتیجه موجب کاهش آسیب‌های محیط زیستی می‌گردند. درصد بهینه جایگزینی زئولیت و بنتونیت نسبت به وزن سیمان در مخلوط بتن، ۵ و ۱۰٪ می‌باشد که بتن به دست آمده مقاومت فشاری و مقاومت کششی مطلوبی نسبت به نمونه بدون بنتونیت و زئولیت، کسب می‌کند.

سپاسگزاری

بدینوسیله از آزمایشگاه دانشگاه سمنان و مسئولین مربوطه که با مساعدت و راهنمایی‌ها و تدابیر اتخاذ شده، برای به انجام رسیدن آزمایشات موفق و دستیابی به نتایج قابل اطمینان نقش موثری داشته‌اند، کمال تشکر و سپاس به عمل می‌آید.

مراجع

[1] Kushnir, A. R., Heap, M. J., Griffiths, L., Wadsworth, F. B., Langella, A., Baud, P., ... & Utley, J. E. (2021). “The fire resistance of high-strength concrete containing natural zeolites”, *Cement and Concrete Composites*, *116*, 103897.

[2] Onyelowe, K. C., Amhadi, T., Ezugwu, C., Ugwuanyi, H., Iro, U., Jideofor, I., ... & Ugorji, B. (2019). "Strength of pozzolan soil blend in chemically improved lateritic soil for pavement base material purpose", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *14*(3), 410-416.
[3] Trümer, A., Ludwig, H. M., Schellhorn, M., & Diedel, R. (2019). "Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete", *Applied Clay Science*, *168*, 36-42.
[4] Zhang, L., De Schryver, P., De Gusseme, B., De Muynck, W., Boon, N., & Verstraete, W. (2008). "Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review", *Water research*, *42*(1-2), 1-12.
[5] Noeiaghaei, T., Mukherjee, A., Dhami, N., & Chae, S. R. (2017). "Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies", *Construction and Building Materials*, *149*, 575-586.
[6] Heidari, A., Hashempour, M., & Tavakoli, D. (2017). "Using of Backpropagation Neural Network in Estimation of Compressive Strength of Waste Concrete", *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, *1*(1), 54-64.
[7] Polder, R. B. (2012). "Effects of slag and fly ash on reinforcement corrosion in concrete in chloride environment-Research from the Netherlands", *HERON*, *57*(3), 197-210.
[8] Caballero, C. E., Sanchez, E., Cano, U., Gonzalez, J. G., & Castano, V. (2000). "On the effect of fly ash on the corrosion properties of reinforced mortars", *Corrosion Reviews*, *18*(2-3), 105-112.
[9] Aydın, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H., & Baradan, B. (2007). "Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete", *Building and Environment*, *42*(2), 717-721.
[10] Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D. S., & Bhattacharjee, B. (2009). "Resistance of mineral admixture concrete to acid attack", *Journal of Advanced Concrete Technology*, *7*(2), 273-283.
[11] Mane, K. M., Kulkarni, D. K., & Prakash, K. B. (2019). "Prediction of flexural strength of concrete produced by using pozzolanic materials and partly replacing NFA by MS", *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, *3*(2), 65-75.
[12] Qiyami Taklimi, S. M., Rezaifar, O., & Gholhaki, M. (2019). "Effect of substitution of natural calcareous and clay materials with cement in low-carbon concretes", *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, *5*(4), 73-93.
[13] ASTM C618-08a. (2010). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *American Society for Testing and Materials*.
[14] Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K. H., & Lee, S. S. (2019). "Natural zeolite and its application in concrete composite production", *Composites Part B: Engineering*, *165*, 354-364.
[15] Memon, S. A., Arsalan, R., Khan, S., & Lo, T. Y. (2012). "Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete", *Construction and building materials*, *30*, 237-242.
[16] Reddy, G. V. K., Rao, V. R., & Reddy, M. A. K. (2017). "Experimental investigation of strength parameters of cement and concrete by partial replacement of cement with Indian calcium bentonite", *Int J Civ Eng Technol*, *8*(1), 512-8.
[17] Taklymi, S. M. Q., Rezaifar, O., & Gholhaki, M. (2020). "Investigating the properties of bentonite and kaolin modified concrete as a partial substitute to cement", *SN Applied Sciences*, *2*(12), 1-14.
[18] Amlashi, A. T., Abdollahi, S. M., Goodarzi, S., & Ghanizadeh, A. R. (2019). "Soft computing based formulations for slump, compressive strength, and elastic modulus of bentonite plastic concrete", *Journal of Cleaner Production*, *230*, 1197-1216.
[19] Amlashi, A. T., Alidoust, P., Ghanizadeh, A. R., Khabiri, S., Pazhouhi, M., & Monabati, M. S. (2020). "Application of computational intelligence and statistical approaches for auto-estimating the compressive strength of plastic concrete", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-32.
[20] Yang, H., Long, D., Zhenyu, L., Yuanjin, H., Tao, Y., Xin, H., ... & Shuzhen, L. (2019). "Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar", *Construction and Building Materials*, *224*, 276-283.
[21] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., & Shekarchi, M. (2012). "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan", *Construction and building materials*, *35*, 1023-1033.
[22] Ahmadi, B., & Shekarchi, M. (2010). "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement and concrete composites*, *32*(2), 134-141.
[23] Bilim, C. (2011). "Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material", *Construction and Building Materials*, *25*(8), 3175-3180.
[24] Iswarya, G., & Beulah, M. (2021). "Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete–A review", *Materials Today: Proceedings*, *46*, 116-123.
[25] ASTM-C136. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.

[26] ASTM-C128. (2001). Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate.
[27] ASTM-C127-07. (2007). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
[28] ASTM-C496. (2011). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.
[29] ASTM-C143. (1996). Standard test method for slump of hydraulic cement concrete. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
[30] Qiyami Taklymi, S. M., Rezaifar, O., & Gholhaki, M. (2020). "Utilization of bentonite as partial replacement of cement in low-strength concrete", *Journal of Concrete Structures and Materials*, 1-16.
[31] Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
[32] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
[33] Akram, T., Memon, S. A., & Iqbal, K. (2007). "Utilization of bagasse ash as partial replacement of cement", In *International Conference on Advances in Cement Based Materials and Applications in Civil Infrastructure ACBM-ACI, Lahore, Pakistan*, 235-245.
[34] Bogas, J. A., de Brito, J., & Figueiredo, J. M. (2015). "Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete", *Journal of Cleaner Production*, *89*, 187-195.
[35] Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*. *4*, Longman London.
[36] Falihy, R. (2014). "Causes of using sodium bicarbonate in cement slurry for injection in rocks", http://www.tpbin.com/article/28305, (In Persian).
[37] Erfany, H. (2007). *Crystallography*. University of Tehran Press, ISBN: 9789640336953.
[38] Standard, A. A. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-14). In *American Concrete Institute*.
[39] Shannag, M. J. (2000). "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume", *Cement and concrete composites*, *22*(6), 399-406.