



مطالعه تغییرات مشخصات مکانیکی بتن های حاوی بنتونیت و زئولیت در جایگزینی سیمان

فاطمه عبدالشاه، امید رضائی فر*، مجید قلعهکی

کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴

کلمات کلیدی:

زئولیت
بنتونیت
مواد مکمل سیمانی
مقاومت فشاری
جذب آب

خلاصه: در عصر امروز ساخت مصالح ساختمانی مستلزم مصرف زیاد منابع طبیعی می باشد. به جهت تأمین مصالح مورد نیاز برای تولید سیمان، آلودگی و تولید زباله های صنعتی افزایش می یابد. زئولیت و بنتونیت از جمله پوزولان های طبیعی هستند که به راحتی قابل استخراج می باشند و با شرایط محیط زیست سازگاری دارند و از جمله موادی هستند که در مقایسه با سیمان پرتلند هزینه تولید کمتری دارند. در تحقیقات انجام شده، هر کدام از این پوزولان ها با مواد دیگر و یا به صورت منفرد مورد استفاده قرار گرفته اند. در این مقاله به بررسی مقاومت فشاری، جذب آب، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته پرداخته شده است. در این تحقیق ۱۰ مدل طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است، که نمونه های تولید شده با درصد بنتونیت و زئولیت متفاوت در آزمایشگاه ساخته و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفته اند. جهت بررسی تأثیر رفتار استفاده از این مصالح به جای سیمان در بتن، نتایج به دست آمده با نمونه مرجع مورد مقایسه قرار گرفته است. بهترین ترکیب با جایگزینی ۶ درصد زئولیت و ۶ درصد بنتونیت بوده که پس از ۲۸ روز، توانسته ۹۳ درصد مقاومت نمونه مرجع با مقاومت ۲۵/۱۲ مگاپاسکال را کسب کند. درصد جذب آب نمونه های تولید شده با زئولیت و بنتونیت نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است و بهترین ترکیبات در کشش، نمونه های با ۱۰ درصد بنتونیت بوده اند.

۱- مقدمه

افزایش رشد جمعیت و نیاز به مسکن در دهه های 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 بزند. حفاظت از محیط زیست برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه مورد بحث و بررسی می باشد، سالیانه ۷ درصد از تولید CO_2 توسط صنعت سیمان آسیب جدی به محیط زیست وارد می کند. تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از مواد مکمل سیمانی

(SCM)^۱ برای مدیریت گرمایش جهانی و کمبود انرژی به دلیل استفاده بیش از حد از منابعی که تجدید ناپذیر هستند و باعث انتشار بی رویه گازهای گلخانه ای می شود و هزینه های گزافی که استفاده از سیمان دارد، در دهه های اخیر بسیار افزایش یافته است. تولید خمیر سیمان پرتلند به طور قابل توجهی به تولید جهانی CO_2 افزوده است [۱-۳].

محققان در پی یافتن پوزولان هایی ارزان قیمت و مقرون به صرفه هستند تا هم چسبندگی خوبی داشته باشند و هم باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن ها شوند [۴]. استفاده از پوزولان ها در

1 Supplementary cementing materials (SCM)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: orezayfar@semnan.ac.ir



طرح اختلاط بتن، نقش مهمی دارد که منبع این پوزولان ها و مواد مکمل می توانند موادی طبیعی یا زباله های صنعتی باشند که برای تولید آن ها انرژی زیادی صرف نمی شود [۵].

در تحقیقی از ضایعات لاستیک خرد شده به عنوان جایگزین سنگدانه ها و همچنین از متاکائولین به عنوان جایگزینی سیمان استفاده شده است. متاکائولین نیز از جمله موادی است که در اکثر تحقیقات به عنوان جایگزین سیمان استفاده می شود که جایگزینی این دو پوزولان (متاکائولین و ضایعات لاستیک خرد شده) علاوه بر افزایش مقاومت فشاری باعث کاهش جذب آب شده است [۶]. بهبود رفتار سازه های بتنی یک مسأله اساسی در بین مهندسان سازه بوده و منجر به توسعه راه های مختلفی شده است، از جمله اثرات مغناطیسی بر بتن، تأثیر دما و دیگر موارد که به طور گسترده ای در توسعه و بهبود خصوصیات بتن مورد استفاده قرار می گیرند [۷]. با وجود عملکرد بسیار خوب زئولیت و بنتونیت در تحقیقات گذشته و با توجه به اینکه هزینه تولید این دو پوزولان نسبت به سیمان کمتر بوده است، از این دو پوزولان به طور همزمان به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است. بنتونیت با محتوای بیش از ۷۰ درصد مونت موریلونیت متعلق به گروه اسمکتیت است و از یک ورق هشت ضلعی از یون های آلومینیوم هستند، تشکیل شده است [۸]. با استفاده از متابنتونیت به جای بخشی از سیمان می توان نشان داد، با افزایش درصد جایگزینی بنتونیت، مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد [۹، ۱۰]. در تحقیقی استفاده از سیمان به همراه بنتونیت و کوارتز بر ساختار ملات سیمان اثرات بسزایی داشته که تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت فشاری، خمشی و همچنین نفوذپذیری بتن داشته است [۱۱]. یکی از موضوعاتی که در استفاده از بنتونیت ها مورد بررسی قرار گرفته، اندازه گیری مقاومت فشاری و دوام بتن های حاوی بنتونیت بوده که نتایج به دست آمده از بررسی های انجام شده، نشان داده است که بنتونیت در سنین اولیه (۷ و ۱۴ روز) مقاومت مطلوبی کسب نکرده و باعث ضعف در نتایج آزمایش مقاومت فشاری شده است، اما در سنین بالاتر مقاومت خوبی از خود نشان داده است [۱۲]. در تحقیقی دیگر تأثیر بنتونیت به همراه ضایعات سنگ معدن و خاکستر زغال سنگ و خاکستر بادی بر روی خواص سیمان و بتن با انجام آزمایش هایی مورد بررسی قرار گرفت که با افزایش بنتونیت بیش از ۱۵ درصد، از مقاومت فشاری بتن کاسته شده و زمان گیرش خمیر سیمان تسریع

یافت [۱۳]. تأثیر استفاده از پوزولان های طبیعی همچون بنتونیت و کائولن به همراه پوزولان های معدنی و شیمیایی همچون آهک به عنوان بخشی از سیمان در روسازی های بتنی، به منظور کاهش مصرف سیمان و بهبود عملکرد بتن مورد بررسی قرار گرفت که با استفاده از بنتونیت و کائولن در کنار سیمان مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به نمونه با شرایط مشابه بدون پوزولان افزایش یافته است [۱۴]. در پژوهشی به بررسی انواع مختلف رس ها و محدودیت های آن ها پرداخته شده، مسأله پایداری سنگ دانه هایی که دارای مواد معدنی خاک رس می باشد مورد بررسی قرار گرفته است که عملیات شیمیایی احتمالی خاک رس برای کاهش اثرات مضر آن ها در بتن نیز بیان شده است [۱۵]. در تولید بتن نفوذناپذیر، استفاده از بنتونیت به عنوان ماده مکمل سیمانی رایج بوده که به علت خاصیت رسی بنتونیت، تأثیر بسزایی در عملکرد و دوام بتن و مقاومت بتن تولید شده دارد. زئولیت از مواد پوزولانی مورد استفاده در بتن می باشد که ماده ای کاملاً زیست محیطی و غیرسمی است و در بسیاری از موارد از جمله موارد صنعتی و خانگی و کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد [۱۶]. زئولیت ها در مقایسه با دیگر مواد، فعالیت پوزولانی بالاتری نسبت به خاکستر بادی و فعالیت پوزولانی کمتری نسبت به میکروسیلیس دارند [۱۷، ۱۸].

همچنین اثربخشی زئولیت در بهبود مقاومت فشاری در تحقیقی در سال ۱۹۹۹ انجام شده است، پس از بررسی مقاومت فشاری بتن حاوی زئولیت، مشاهده شده زئولیت طبیعی در ترکیبات سیمان با نسبت های آب به سیمان پایین تر بهتر عمل می کند. اثر نسبت آب به سیمان خمیر سیمان حاوی زئولیت را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که زئولیت در خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان پایین تر، باعث افزایش مقاومت خمیر سیمان می شود. پژوهشگران در مطالعات خود نشان دادند که در نسبت آب به سیمان های بالاتر از ۰/۴۵، مقاومت بتن های حاوی زئولیت کمتر از بتن مرجع (فاقد پوزولان) بوده است، در حالی که در مقادیر کمتر از ۰/۴۵، مقاومت فشاری بالاتری برای بتن های حاوی زئولیت در مقایسه با بتن مرجع به دست آمده است [۱۹، ۲۰]. علاوه بر این، در مطالعه ای بتن های حاوی زئولیت طبیعی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ مقاومت فشاری بالاتری در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه از خود نشان دادند. در حالی که نتایج به دست آمده از این آزمایشات برخلاف بتن هایی با نسبت آب



شکل ۲. اسلامگیری نمونه
Fig. 2. Sampling slump



شکل ۱. نمونه های استوانه ای ساخته شده
Fig. 1. The Cylindrical Specimens

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، پوزولان های جایگزین شده سیمان شامل ژئولیت در درصد جایگزینی ۶، ۱۰ و ۱۶ درصد و بنتونیت با درصد جایگزینی ۶، ۱۰ و ۱۶ درصد نسبت به وزن سیمان مصرفی می باشند. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های استوانه ای براساس استاندارد ASTM C39 و آزمایش مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496-71 انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است و آزمایش مقاومت کششی نمونه ها در سن ۷ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفت. تمامی نمونه ها با نسبت آب به سیمان ثابت و برای انجام آزمایش ها از هر طرح اختلاط در هر سن عمل آوری سه نمونه ساخته شد و میانگین آن ها به عنوان نتایج نهایی اعلام شده است (شکل ۱). همه نمونه ها در شرایط یکسان ساخته شدند و طبق استاندارد ASTM- C14 اسلامپ بتن اندازه گیری شده است (شکل ۲) و سپس درون نمونه های استوانه ای ۱۰×۱۰×۲۰ ریخته شده و پس از ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب ها خارج شده و به مدت زمان لازم در آب با دمای معمولی نگهداری شدند.

۳- مصالح مصرفی

در انجام این تحقیق برای ساخت بتن های معمولی از سیمان پرتلند تیپ دو شرکت سیمان شاهرود استفاده گردید، همچنین برای ساخت بتن پوزولانی از ژئولیت و بنتونیت تهیه شده از معادن استان

به سیمان ۰/۵ بوده است [۲۱، ۲۲]. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده در آن تحقیق، اگرچه ژئولیت طبیعی در مقایسه با سیمان ارزانتر است، اما تقاضای بالای استفاده از فوق روان کننده ها برای رسیدن به اسلامپ های بالاتر هزینه های تولید را بیشتر می کند [۲۲، ۲۳].

در پژوهش حاضر تأثیر کاربرد ژئولیت و بنتونیت به طور همزمان به عنوان جایگزین سیمان بررسی شده است. هدف اصلی جایگزینی پوزولان ها به جای سیمان، که از لحاظ بهبود جبران فرآیند هیدراتاسیون سیمان در اثر جایگزینی بنتونیت و ژئولیت، دارای شرایط مناسبی می باشند و می توانند در تولید زنجیره های جدید سیمان سازگار با محیط زیست مورد استفاده قرار گیرند. در تحقیقاتی که در گذشته انجام شده است، هر کدام از پوزولان ها با مواد دیگر یا به صورت منفرد استفاده شده است ولی در این تحقیق ترکیب ژئولیت و بنتونیت که هر دو جز مصالح بومی منطقه و سازگار با شرایط زیستی هستند، بررسی شده است.

طبق مقررات ملی ساختمان مبحث ۹، برخی از المان های سازه ای مانند دیوارهای حجیم مقاومت فشاری بیشتر از ۱۵ مگاپاسکال ضرورتی نداشته، برای بتن های سازه ای، مقاومت فشاری بین ۲۰ تا ۳۵ مگاپاسکال کفایت می کند. به طور کلی برای برخی از المان های سازه ای مانند تیر و دال می توان از بتن با مقاومت متوسط استفاده کرد و در سازه های کوتاه مرتبه (یک الی دوطبقه) نیز می توان از این نوع بتن با مقاومت متوسط استفاده کرد.

تولید می کنند که ساختار آن ها تا حدودی مشابه ترکیباتی است که بر اثر هیدراتاسیون سیمان پرتلند تولید می شوند. با توجه به خصوصیات شیمیایی که در جدول ۲ ارائه شده بنتونیت و زئولیت پوزولان های طبیعی هستند که حاوی مقادیر بالای سیلیکا و آلومینا هستند. بنتونیت و زئولیت به عنوان پوزولان طبیعی شناخته شده اند که می توانند باعث بهبود خصوصیات مکانیکی بتن شوند [۲۵].

مصالح سنگی استفاده شده در این آزمایش از نوع ماسه شسته رد شده از الک ۴ (۴/۷۵ میلی متر) و مصالح سنگی درشت دانه با دانه بندی یکسان (حداکثر اندازه اسمی ۸ میلی متر) می باشد. ابتدا

سیمان، آسیاب شده توسط شرکت نگین پودر سیمان، به عنوان پوزولان در کنار سیمان استفاده شد. زئولیت و بنتونیت مصرفی در این آزمایش به صورت پودری و با دانه بندی یکسان مورد استفاده قرار گرفتند. مشخصات شیمیایی و فیزیکی مواد مصرفی به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده است.

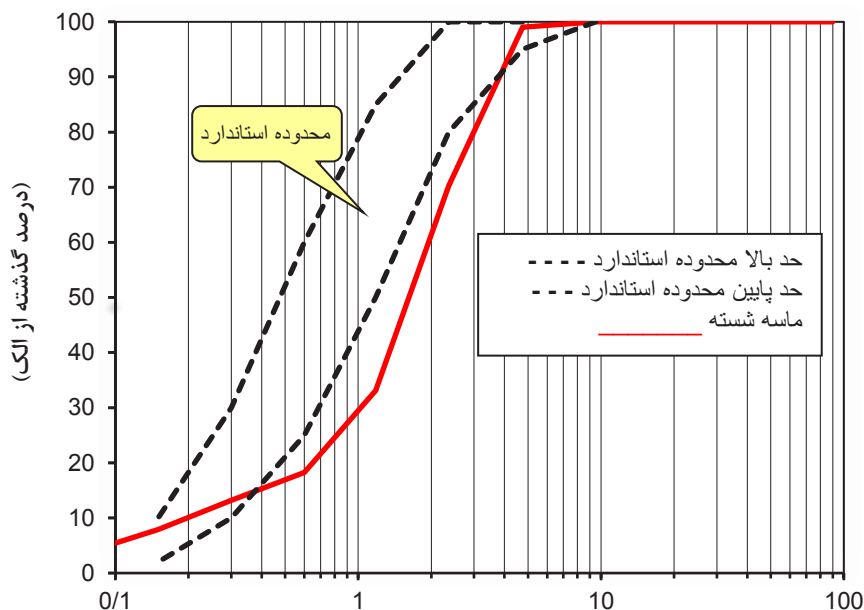
پوزولان ها عبارتند از مواد سیلیسی یا سیلیسی و آلومینی که خود به تنهایی فاقد ارزش چسبانندگی اند یا ارزش چسبانندگی کمی دارند، اما به صورت ذرات بسیار ریز در دمای متعارف در مجاورت با هیدروکسید کلسیم واکنش می دهند که ترکیباتی را

جدول ۲. آنالیز شیمیایی مواد مورد استفاده در آزمایش
Table 2. Chemical analysis of materials used in experiments

ترکیبات	سیمان (%)	زئولیت (%)	بنتونیت (%)
SiO ₂	۲۱/۱۱	۶۹/۲۸	۶۹/۸
Al ₂ O ₃	۴/۴۲	۱۰/۴۳	۱۱/۸۸
Fe ₂ O ₃	۳/۹۶	۰/۴۹	۱/۷۳
CaO	۶۳/۲۳	۳/۵۶	۰/۹۶
MgO	۱/۵۱	۰/۵	۱/۴۲
Na ₂ O	۰/۳۲	۰/۷۳	۰/۵
K ₂ O	۰/۵۱	۱/۲۷	۰/۴۷
TiO ₂	-	۰/۱۶۶	۰/۱

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی بنتونیت مورد استفاده
Table 1. Physical properties of bentonite

آنالیز	میانگین
جذب آب (%)	۳۰۰-۷۰۰
تورم (MI/gr ²)	۲۲-۲۵
رطوبت (%)	۴-۸
دانه بندی (Mesh)	۴۰۰
مونت موریلونیت (%)	۸۶<
ظرفیت تبادل کاتیونی (mEq/100mgr)	۱۰۰-۱۱۰



شکل ۳. منحنی دانه بندی ماسه
Fig. 3. Sand granulation curve

شده و مقداری آب طرح اختلاط به آن اضافه شده تا سیمان به همراه شن و ماسه به خوبی مخلوط شود و یک لایه از سیمان به طور کامل سنگدانه ها را در برگیرد و آماده ی هیدراتاسیون شوند، سپس زئولیت و بنتونیت ترکیب شده در دو مرحله به آن اضافه شده در نهایت کل آب باقیمانده به میکسر اضافه شد. در جدول طرح اختلاط ها نام گذاری بدین صورت می باشد که نمونه مرجع با مقدار عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب با C-250 نشان داده شده است، و طرح هایی که با B6-C-Z10 عدد جلو B نمایانگر درصد بنتونیت و عدد حرف Z نمایانگر درصد زئولیت می باشد و حرف C بیانگر وجود سیمان در طرح اختلاط ها می باشد. در جدول ۳ طرح اختلاط تمامی نمونه ها ارائه شده است. نمونه های C125-B50 و C125-Z50 و C125-B25Z25، با مقدار عیار ثابت سیمان ۱۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شدند و طرح اختلاط B50Z50 بدون سیمان نیز ساخته شده است. نمونه های حاوی پوزولان ها و سیمان با شرایط یکسانی در آزمایشگاه ساخته شدند، اما نمونه حاوی بنتونیت و زئولیت (B50Z50) بدون سیمان دارای شرایط عمل آوری متفاوتی نسبت به دیگر طرح اختلاط ها بوده است، در ابتدا این نمونه مانند دیگر طرح اختلاط ها پس از اینکه از قالب خارج شد، در داخل آب

برای انجام آزمایش از ماسه شکسته استفاده شد اما به علت وجود پرکن بسیار زیاد در ماسه شکسته، ماسه شسته انتخاب شد، زیرا با افزایش پرکن در ماسه نیاز بتن به آب بالا می رفت. منحنی دانه بندی ماسه مصرفی در شکل ۳ ارائه شده است. دانه بندی ماسه طبق استاندارد ASTM-C128 انجام شده است.

۴- شرح آزمایشات

مخلوط های ساخته شده در این آزمایش با نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ و شرایط یکسان در حین ساخت و با استفاده از درصدهای متفاوت بنتونیت و زئولیت ساخته شده اند که جزییات آن در جدول ۳ به تفصیل آمده است.

نحوه ی ترکیب مصالح در آزمایشگاه به شرح زیر بوده است: مصالح سنگی مورد استفاده در این آزمایش با رطوبت موجود استفاده شده که با توجه به اینکه مصالح سنگی اشباع نشده به همین علت مقدار آب مصرفی در این آزمایش ۰/۷۵ می باشد. بدین صورت که ابتدا شن و ماسه در میکسر ریخته شده و یک چهارم از آب طرح اختلاط به آن اضافه شده تا شن و ماسه به خوبی مخلوط شده و سطح آن خیس شود، سپس یک چهارم سیمان داخل میکسر ریخته

جدول ۳. طرحهای اختلاط ساخته شده در پژوهش
Table 3. Mixing designs made in the research

نام نمونه	سیمان (kg)	آب (kg)	بنتونیت (kg)	درصد بنتونیت (kg)	زئولیت (kg)	درصد زئولیت (kg)	ماسه (kg)	شن (kg)	w/c
C-250	۲۵۰	۱۸۸	۰	۰	۰	۰	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B6-C-Z6	۲۲۰	۱۸۸	۱۵	۶	۱۵	۶	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B6-C-Z10	۲۱۰	۱۸۸	۱۵	۶	۲۵	۱۰	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B6-C-Z16	۱۹۵	۱۸۸	۱۵	۶	۴۰	۱۶	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B10-C-Z6	۲۱۰	۱۸۸	۲۵	۱۰	۱۵	۶	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B10-C-Z10	۲۰۰	۱۸۸	۲۵	۱۰	۲۵	۱۰	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B10-C-Z16	۱۸۵	۱۸۸	۲۵	۱۰	۴۰	۱۶	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B16-C-Z6	۱۹۵	۱۸۸	۴۰	۱۶	۱۵	۶	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B16-C-Z10	۱۸۵	۱۸۸	۴۰	۱۶	۲۵	۱۰	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B16-C-Z16	۱۷۰	۱۸۸	۴۰	۱۶	۴۰	۱۶	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
B50Z50	-	۱۹۵	۱۲۵	۵۰	۱۲۵	۵۰	۱۲۵۰	۶۲۵	-
C125-Z50	۱۲۵	۱۸۸	-	-	۱۲۵	۵۰	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
C125-B50	۱۲۵	۱۸۸	۱۲۵	۵۰	-	-	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵
C125-B25Z25	۱۲۵	۱۸۸	۶۲/۵	۲۵	۶۲/۵	۲۵	۱۲۴۱/۶۷	۶۲۰/۸۳	۰/۷۵

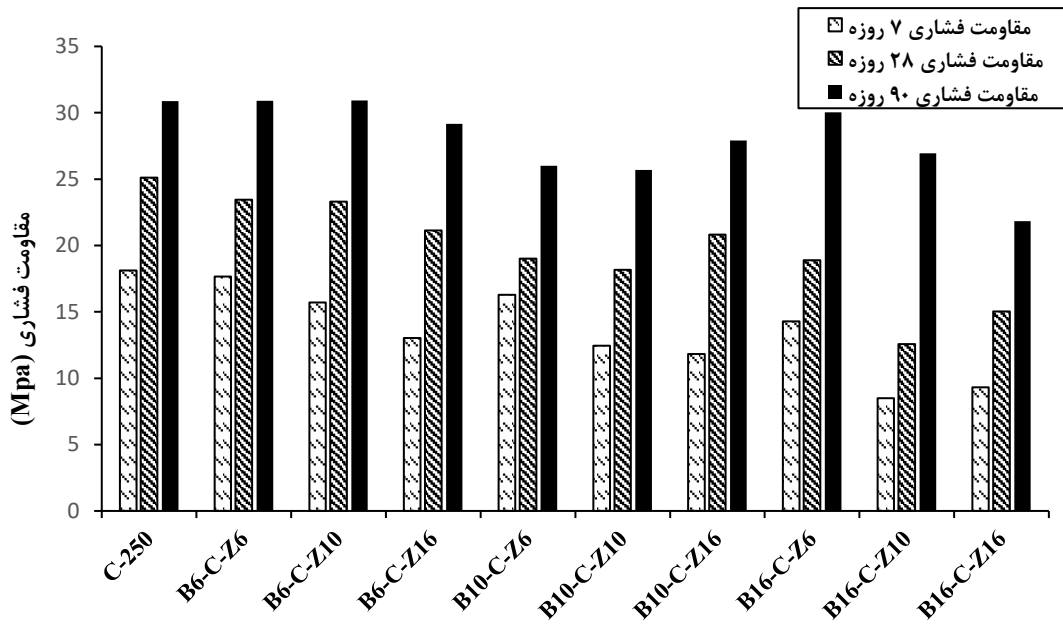


ب- پس از دو ساعت عمل آوری

الف- ابتدای عمل آوری غرقابی

شکل ۴. وضعیت پایداری نمونه بدون سیمان (B50Z50)

Fig. 4. Stability status of cement-free sample (B50Z50); a) The beginning of flooding operation, b) After two hours of processing



شکل ۵. نمودار مقایسه ای مقاومت فشاری نمونه ها

Fig. 5. Mixing designs made in the research

مقاومت ۷ و ۲۸ روزه خود برسد.

۵- نتایج آزمایشات و بررسی نتایج

آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 برای نمونه های ۱ تا ۱۰ در مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد (شکل ۵)، تمامی نمونه ها سه بار ساخته شدند و میانگین آن ها به عنوان عدد نهایی اعلام شده است.

عمل آوری شد، اما در حین عمل آوری در همان ساعات اولیه با توجه به اینکه فاقد سیمان بوده است، از هم پاشیده شده، در شکل ۴ وضعیت پایداری نمونه بدون سیمان در ساعات اولیه عمل آوری را نشان می دهد. در نهایت این نمونه دوباره ساخته شد و پس از اینکه از قالب خارج شده به مدت ۲۴ ساعت در کوره (آون) نگه داری شد و برای انجام آزمایش مقاومت فشاری در سنین بالاتر در محیط آزمایشگاه در دمای معمولی و در جای خشک نگهداری شد تا به

تحقیقات پیشین در سنین اولیه به علت در دسترس نبودن کلسیم هیدروکسید $Ca(OH)_2$ کافی برای شروع واکنش های پوزولانی، افت مقاومت فشاری در بتن رخ داده؛ ولی در سنین بالا به دلیل پیشرفت سرعت هیدراتاسیون و افزایش ژل سیلیکاتی که در طی واکنش های پوزولانی رخ می دهد، مقاومت فشاری روند رو به رشدی داشته است [۱۴]. نتایج سایر محققین که از ۱۵ درصد ژئولیت استفاده شده نیز نشان می دهد که مقاومت فشاری نمونه ی حاوی ژئولیت در مقایسه با نمونه مرجع در سنین اولیه پایین تر بوده و با افزایش سن عمل آوری افزایش یافته اما در تمامی سنین نمونه های حاوی ژئولیت مقاومت کمتری نسبت به نمونه مرجع داشته است [۲۱].

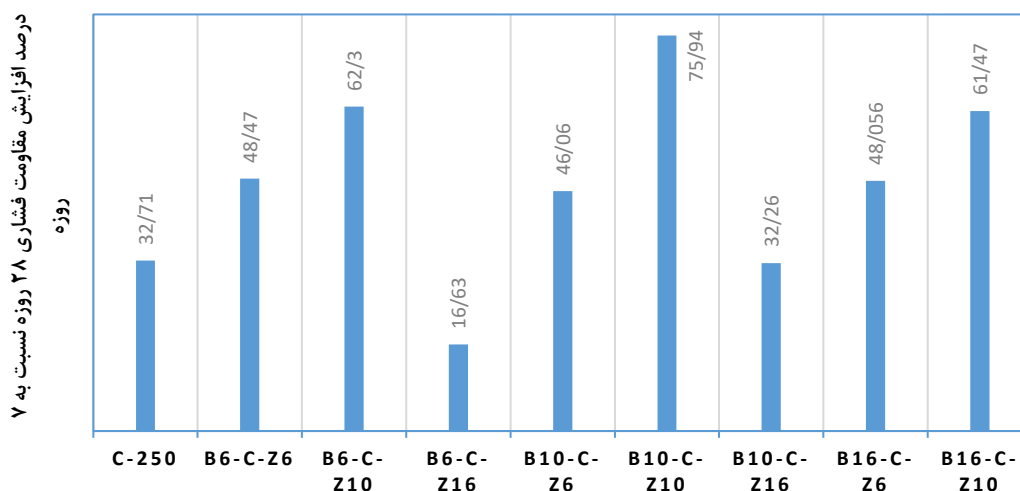
با توجه به نمودارهای به دست آمده، بهترین ترکیبات در سن ۹۰ روزه B6-C-Z6، B6-C-Z10 و B16-C-Z6 می باشند. نتایج به دست آمده از آزمایش نشان می دهد که پس از ۹۰ روز سیمان واکنش هیدراتاسیون خود را آغاز کرده و پوزولان ها نیز وارد واکنش شده اند به خصوص در مواردی که مقدار ژئولیت زیاد شده است، کلسیم هیدروکسید کافی تولید شده و سرعت رشد مقاومت را بالا برده است [۲۱].

تعدادی از نمونه ها با کاهش عیار سیمان و بدون سیمان نیز ساخته شدند که نتایج حاصل از آن در جدول ۴ ارائه شده است. همان طور که در جدول ۵ نشان داده شده، ترکیب B50Z50 با حذف سیمان پس از ۷ و ۲۸ روزه هیچ مقاومتی از خود نشان نداده است. براساس تحقیقات و شرایط و خواص بنتونیت و ژئولیت،

در سن ۷ و ۲۸ روزه نمونه های حاوی بنتونیت و ژئولیت با کاهش مقاومت همراه بوده اند، تا جایی که در همه ترکیبات نسبت به نمونه مرجع، افت مقاومت فشاری دیده می شود. به صورت کلی با افزودن پوزولان ها مقدار مقاومت فشاری کاهش می یابد که به طور معمول با افزایش سن عمل آوری و انجام کلیه واکنش های پوزولانی این اختلاف مقاومت نسبت به نمونه مرجع تا حدودی از بین می رود، با افزایش جایگزینی سیمان مقاومت فشاری کمتر می شود. با کاهش سیمان، به همان نسبت محصولات هیدراتاسیون (C_3S , C_2S) کاهش پیدا می کند و آهک شکفته نشده در سیمان به همان مقدار کاهش پیدا می کند؛ ولی رشد مقاومت فشاری سریع تر می شود. با افزایش سن عمل آوری، جایگزینی پوزولان ها به خوبی باعث شده تا مقاومت فشاری افزایش یابد و در مواردی برابر نمونه مرجع یا به مقاومتی بیش از نمونه مرجع دست یافتند. می توان گفت با توجه به

جدول ۴. مقاومت فشاری نمونه ها با شرایط متفاوت در این تحقیق
Table 4. Comparative diagram of compressive strength of samples

نام نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	
	۷ روزه	۲۸ روزه
50B50Z	۰	۰
C125-50B	۴/۹۳	۷/۶۳
C125-Z50	۷/۱۸	۱۳/۲۵
C125-B25Z25	۳/۶۸	۶/۴۹



شکل ۶. نمودار درصد افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه
Fig. 6. Percentage chart of 28-day compressive strength increase compared to 7-day

تعیین مقاومت کششی به روش غیرمستقیم (آزمایش برزیلی)، براساس استاندارد ASTM C496-71 انجام شده است. شکل ۷ نتایج این آزمایش پس از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری را نشان می دهد. نتایج حاصل از آزمایش در ۲۸ روز نشان می دهد که مقاومت کششی همه طرح اختلاط ها نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است، اما نمونه B16-C-Z16 با بیشترین جایگزینی (۳۲ درصد) نسبت به نمونه مرجع، ۹ درصد کاهش مقاومت داشته است.

با توجه به نتایج به دست آمده، نمونه های حاوی ۱۰ درصد بنتونیت، بیشترین مقاومت را در کشش به دست آورده اند. افزودن بنتونیت به طور قابل توجهی انعطاف پذیری را افزایش می دهد. خاصیت خمیری ذرات بنتونیت بیشتر از زئولیت می باشد و به همین دلیل باعث به وجود آمدن لایه ای انعطاف پذیر در اطراف سنگدانه ها می شوند و در نتیجه باعث افزایش شکل پذیری نمونه ها می شوند. بتن های حاوی بنتونیت در سطوح جایگزینی بیشتر از ۱۰ درصد بنتونیت با کاهش مقاومت کششی همراه بوده اند. بیشترین مقاومت کششی مربوط به ترکیبات B10-C-Z10 و B10-C-Z16 و B10-C-Z6 می باشد. با بررسی مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه از نمودار شکل ۷ مشخص می شود که طرح اختلاط نمونه مرجع و B6-C-Z6 نسبت به دیگر طرح اختلاط ها تغییر محسوسی نداشته اند. روند رو به رشد مقاومت در سنین بالاتر ناشی از درصد بنتونیت بیشتر در ترکیبات است، تا جایی که بیشترین رشد مقاومت کششی از ۷ به ۲۸ روزه را ترکیبات B10-C-Z16 و B16-C-Z16 دارند. به طور میانگین در جایگزینی بین ۲۰ الی ۳۲ درصد پوزولان بنتونیت و زئولیت، مقاومت کششی حدود ۳۵ درصد از ۷ روزه به ۲۸ روزه افزایش داشته، با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۷ مشخص است که بهترین طرح اختلاط در کشش پس از ۲۸ روزه، طرح B10-C-Z16 می باشد. در سال ۲۰۱۷ نیز پژوهشی به بررسی مقاومت سیمان و بتن با جایگزینی بنتونیت پرداخت که در این پژوهش بنتونیت با درصدهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ جایگزین بتن شد که در مطالعات این تحقیق نیز نشان داده شد که جایگزینی ۱۰ درصد بنتونیت بهترین نتایج را در آزمایش مقاومت کششی و فشاری داشته است [۲۴].

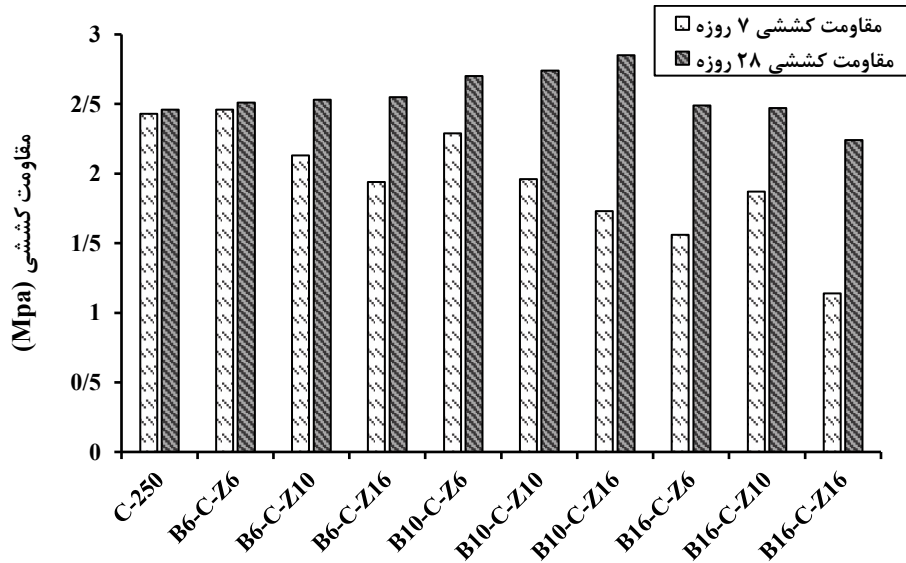
با توجه به اینکه مقاومت فشاری بتن می تواند بر مقاومت کششی آن تأثیر بگذارد، اما با این حال تناسب مستقیمی بین آن ها وجود

پوزولان ها به تنهایی نمی توانند از خود مقاومتی نشان دهند، به طور کلی پوزولان ها 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 می کنند. در بین این ترکیبات که هر سه با عیارسیمان ۱۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شده اند و نسبت آب به سیمان در این ترکیبات یکسان بوده، طرح اختلاط C125-Z50 بیشترین مقاومت فشاری را در هر دو سن عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه کسب کرده است. در نتیجه زئولیت به تنهایی در ترکیب با سیمان با مقدار عیار ۱۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب، تأثیر بیشتری بر مقاومت فشاری بتن داشته است.

درصد افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های حاوی زئولیت و بنتونیت نسبت به مقاومت فشاری ۷ روزه در شکل ۶ مشاهده می شود. همان طور که در نمودار شکل ۶ مشخص است، درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه ها با مقدار بنتونیت ثابت (۶، ۱۰ و ۱۶ درصد) با افزایش زئولیت، به طور چشمگیری افزایش می یابد.

در ترکیبات B6-C-Z6، B6-C-Z10 و B6-C-Z16 مقدار بنتونیت ثابت بوده، اما بر مقدار زئولیت افزوده شده و مقدار سیمان در این ترکیبات به ترتیب ۲۲۰، ۲۱۰ و ۱۹۵ بوده، یعنی به صورت جزئی سیمان کاهش پیدا کرده؛ اما زئولیت توانسته است با افزایش سن، کاهش مقاومت در اثر کاهش سیمان را جبران نماید.

مقاومت فشاری نمونه ها B6-C-Z6، B6-C-Z10 و B6-C-Z16 به ترتیب با مقدار عیار سیمان ۲۲۰، ۲۱۰ و ۱۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب، پس از ۲۸ روز عمل آوری به ترتیب ۳۲/۷۱، ۴۷/۴۸ و ۳۶/۶۲ درصد افزایش داشته است، همان طور که در شکل ۶ مشهود است با جایگزینی ۶ درصد بنتونیت و افزودن زئولیت، درصد رشد مقاومت فشاری افزایش یافته است. در ترکیبات B10-C-Z6، B10-C-Z10 و B10-C-Z16 به ترتیب مقدار عیار سیمان ۲۱۰، ۲۰۰ و ۱۸۵ بوده است، با مقدار بنتونیت ۱۰ درصد و افزودن زئولیت، مقاومت فشاری به ترتیب ۱۶/۶۳، ۴۶/۰۶ و ۷۵/۹ درصد بعد از ۲۸ روز عمل آوری افزایش می یابد. پس از بررسی نمودار شکل ۶ مشاهده می شود در ترکیبات B16-C-Z6، B16-C-Z10 و B16-C-Z16 که با افزایش زئولیت و مقدار بنتونیت ثابت ۱۶ درصد، در هر مرحله با افزایش زئولیت به ترتیب ۳۲/۲۶، ۴۸/۰۵۶ و ۴۷/۶۱ درصد افزایش یافته است.



شکل ۷. نتایج مقاومت کششی نمونه ها
Fig. 7. Tensile strength results of samples

در جدول ۵ مقدار k ، نسبت مقاومت کششی به جذر مقاومت فشاری را مشخص می کند که همان عدد پشت رادیکال رابطه (۱) می باشد. نسبت مقاومت کششی به جذر مقاومت فشاری در بتن های پوزولانی از مقدار شاهد بیشتر بوده است، این افزایش مقدار k نشان می دهد که پوزولان ها در کشش عملکرد خوبی داشته اند. در ترکیباتی که این ضریب بیشتر از ۰/۶ می باشد نسبت به دیگر طرح اختلاط ها عملکرد بهتری در کشش داشته اند. در ستون انتهایی جدول ۵، نسبت k هر نمونه به نمونه مرجع حساب شده است. مقدار این ضریب در همه ترکیبات نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. با توجه به مقادیر به دست آمده برای k می توان این ضریب را ۰/۵۸ به عنوان عدد میانگین برای ترکیباتی که دارای عیار سیمان ۲۵۰ می باشند، اعلام کرد.

درصد جذب آب نمونه ها براساس ASTM-C642 در سنین اولیه پس از ساخت نمونه ها برای هر کدام از طرح اختلاط های به دست آمده در جدول ۶ ارائه شده است. طبق استاندارد ASTM-C642 نمونه ها از آب خارج شده و پس از خشک شدن نمونه ها در محیط آزمایشگاه، به مدت ۲۴ ساعت داخل آون با دمای 110 ± 5 درجه سانتی گراد برای تعیین وزن خشک قرار داده شده است. برای تعیین وزن اشباع نمونه با سطح خشک پس از این که نمونه ها در محیط آزمایشگاه به طور معمول خشک شدند در داخل مخزن آب به مدت ۴۸ ساعت قرارداده و سپس نمونه ها را خارج کرده و با حوله خشک

جدول ۵. ضریب k نمونه های مورد بررسی
Table 5. The coefficient k of the studied samples

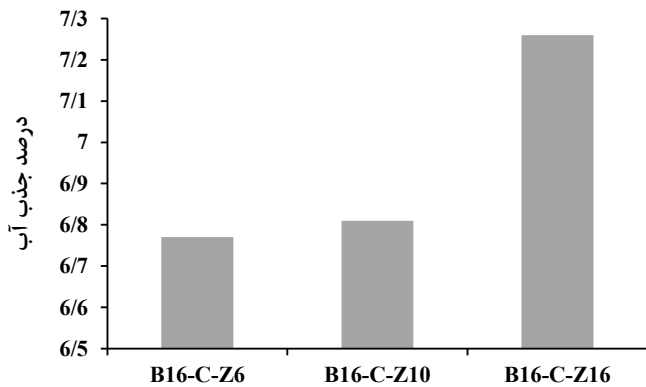
نام نمونه	$\sqrt{f_c}$	f_t	k	$\frac{k \text{ هر نمونه}}{k \text{ نمونه شاهد}}$
C-250	۵/۰۱	۲/۴۸	۰/۴۹	-
B6-C-Z6	۴/۸۴	۲/۵۱	۰/۵۱	۱/۰۴
B6-C-Z10	۴/۸۳	۲/۵۳	۰/۵۲	۱/۰۶
B6-C-Z16	۴/۵۹	۲/۵۵	۰/۵۵	۱/۱۲
B10-C-Z6	۴/۳۵	۲/۷	۰/۶۲	۱/۲۷
B10-C-Z10	۴/۲۶	۲/۷۴	۰/۶۴	۱/۳۱
B10-C-Z16	۴/۵۶	۲/۸۵	۰/۶۲	۱/۲۷
B16-C-Z6	۴/۳۴	۲/۴۹	۰/۵۷	۱/۱۶
B16-C-Z10	۳/۵۵	۲/۴۷	۰/۶۹	۱/۴۱
B16-C-Z16	۳/۸۷	۲/۲۴	۰/۵۷	۱/۱۶

ندارد. در بسیاری از موارد با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت کششی آن با درصد رشد کمتری افزایش می یابد. آیین نامه ACI 318-14، برای تخمین مقاومت کششی براساس مقاومت فشاری رابطه (۱) را پیشنهاد داده است. در آیین نامه های مختلف $f_t = k \cdot f_c$ "تعریف شده است که f_t مقدار مقاومت کششی و f_c مقاومت فشاری را نشان می دهد.

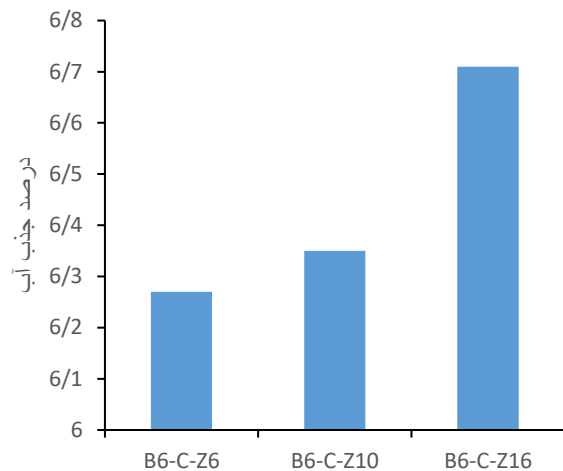
$$f_t = 0.56\sqrt{f_c'} \quad (1)$$

جدول ۶. درصد جذب آب نمونه ها
Table 6. Percentage of water absorption of samples

B16-C-Z16	B16-C-Z10	B16-C-Z6	B10-C-Z16	B10-C-Z10	B10-C-Z6	B6-C-Z16	B6-C-Z10	B6-C-Z6	C-250	نمونه
۷/۲۶	۶/۸۱	۶/۷۸	۶/۸۹	۶/۸	۶/۷۴	۶/۷۱	۶/۳۵	۶/۲۷	۶/۱۱	جذب آب (%)



شکل ۱۰. نمودار جذب آب نمونه های حاوی ۱۶ درصد بنتونیت
Fig. 10. Water absorption diagram of samples containing 16% bentonite

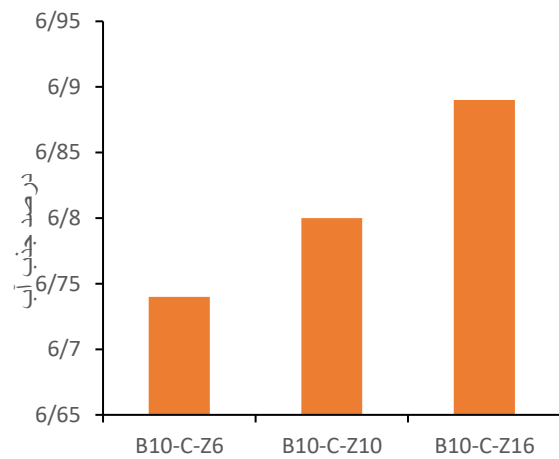


شکل ۸. نمودار جذب آب نمونه های حاوی ۶ درصد بنتونیت
Fig. 8. Water absorption diagram of samples containing 6% bentonite

همان طور که انتظار می رفت ساختار معمولی نمونه مرجع نسبت به ترکیبات حاوی زئولیت و بنتونیت، مقدار جذب آب بتن مرجع را نسبت به دیگر طرح اختلاط ها کاهش داده است. همان طور که گفته شد بنتونیت به دلیل دارا بودن خواص خانواده رس بسیار آب دوست می باشد، همچنین منافذ موجود در زئولیت ها باعث شده تا مانند یک اسفنج عمل کنند، این خصوصیات زئولیت ها و بنتونیت ها موجب شده که جذب آب نمونه ها بالا رود. نتایج جذب آب در رابطه با تأثیر استفاده از بنتونیت و زئولیت را می توان در شکل های ۹ الی ۱۱ مشاهده کرد.

نتایج به دست آمده از نمودار شکل ۸ نشان می دهد که با افزایش زئولیت به میزان ۱۶ درصد، جذب آب طرح اختلاط B6-C-Z16 با اختلاف زیادی از نمونه B6-C-Z6 بیشتر شده است، درصد جذب آب نمونه B6-C-Z16 نسبت به نمونه B6-C-Z6، ۷ درصد افزایش یافته است. نمودار شکل ۹ جذب آب نمونه های حاوی ۱۰ درصد بنتونیت را نشان می دهد، در این ترکیبات نیز با افزایش مقدار زئولیت، درصد جذب آب نمونه ها افزایش یافته است.

نمودار شکل ۱۰ مربوط به ترکیبات با جایگزینی ۱۶ درصد



شکل ۹. نمودار جذب آب نمونه های حاوی ۱۰ درصد بنتونیت
Fig. 9. Water absorption diagram of samples containing 10% bentonite

کرده و توزین شدند و عدد نهایی به عنوان وزن اشباع با سطح خشک اعلام شده است.

بنتونیت چگالی بتن مورد بررسی قرار گرفت که با افزودن بنتونیت چگالی نمونه ها کاهش یافت و تراکم بتن شاهد که فاقد بنتونیت بوده از دیگر ترکیبات بیشتر بوده است [۹].

براساس آیین نامه ACI 318-14 برای محاسبه مدول الاستیسیته در بتن رابطه (۲) را پیشنهاد دادند که در این رابطه مقدار f_c' مقاومت فشاری نمونه های بتنی می باشد. منحنی مدول الاستیسیته برحسب سن عمل آوری در شکل های ۱۲ تا ۱۵ برای تمامی نمونه ها محاسبه و ارائه شده است.

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \quad (2)$$

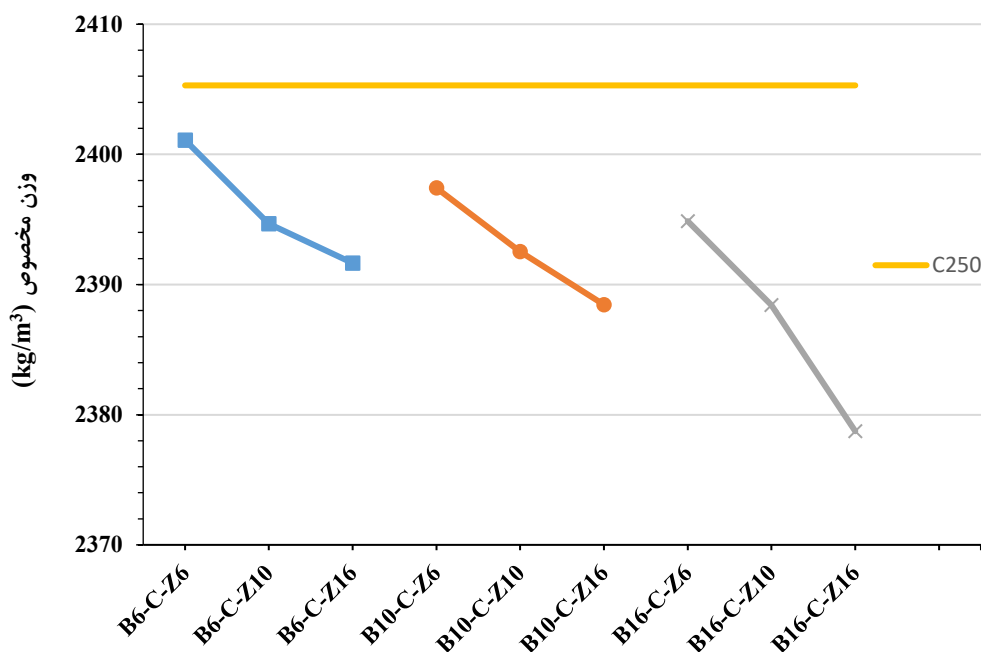
ضریب رگرسیون حاصله از نمودار شکل ۱۲، ۰/۸۶۸۳ می باشد، که در نمونه مرجع با افزایش سن عمل آوری مقدار مدول الاستیسیته نیز افزایش یافته است. نتایج به دست آمده از شکل ۱۳ نشان می دهد که نمونه های حاوی ۶ درصد بنتونیت که مقدار ژئولیت تغییر کرده، پایین ترین مقدار مدول الاستیسیته در هر سن عمل آوری مربوط به ترکیب B6-C-Z16 بوده است، اما این ترکیب از لحاظ همبستگی بهترین شرایط را داشته است.

همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، در ترکیبات حاوی

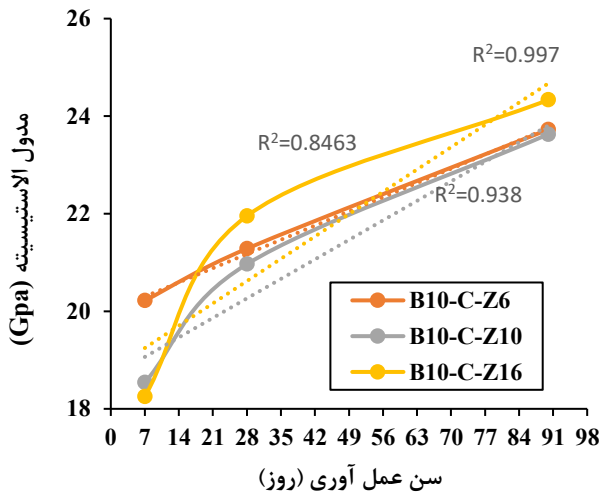
بنتونیت می باشد، در این طرح مخلوط ها نیز، درصد جذب آب نمونه با سطح جایگزینی بیشتر ژئولیت، از دو ترکیب دیگر بیشتر بوده است. پس از مقایسه نمونه های با درصد ژئولیت ثابت و افزایش بنتونیت نیز، افزایش درصد جذب آب مشاهده می شود.

آزمایش تعیین چگالی بتن بر اساس ASTM-C138 انجام شد. شیب نزولی نمودار شکل ۱۱ نشان دهنده رابطه معکوس درصد جایگزینی بنتونیت و ژئولیت با وزن مخصوص بتن می باشد. در میان نمونه ها بیشترین میزان وزن مخصوص مربوط به نمونه مرجع بوده است، با افزایش درصد جایگزینی این دو پوزولان (بنتونیت و ژئولیت)، مقدار وزن مخصوص بتن کاهش می یابد.

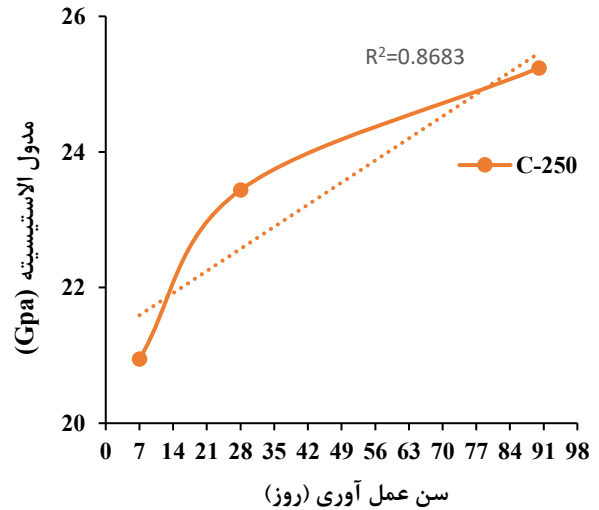
از آنجایی که چگالی بنتونیت و ژئولیت پایین تر از سیمان است، هر چه درصد بنتونیت و ژئولیت بالاتر می رود چگالی بیشتر کاهش می یابد، زیرا تراکم (چگالی) تابع وزن مخصوص است. بنابراین چگالی مخلوط مرجع که فاقد ژئولیت و بنتونیت بوده، با بیشترین مقدار سیمان، بالاتر از دیگر ترکیبات می باشد. همچنین جذب آب بالای ژئولیت و بنتونیت باعث کاهش مقدار آب آزاد موجود در خمیر سیمان می شود و در نتیجه تخلخل موجود در خمیر سیمان را کاهش می دهد. نتایج به دست آمده از این آزمایش کاملاً در رابطه با این موضوع صدق می کند. در پژوهشی با استفاده از درصدهای متفاوت



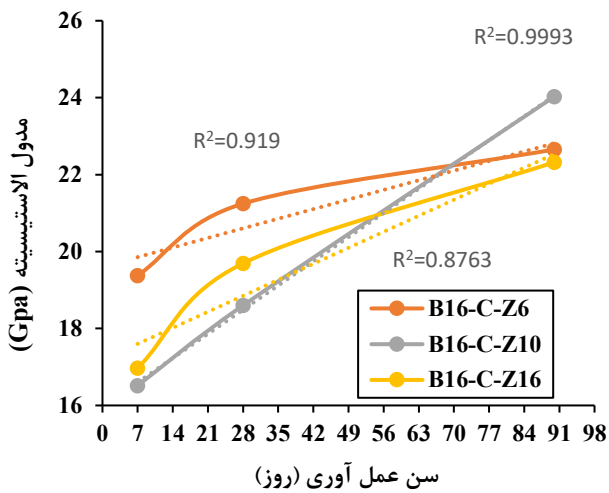
شکل ۱۱. نمودار مقایسه ای چگالی بتنهای ساخته شده
Fig. 11. Comparative diagrams of the density of concrete made



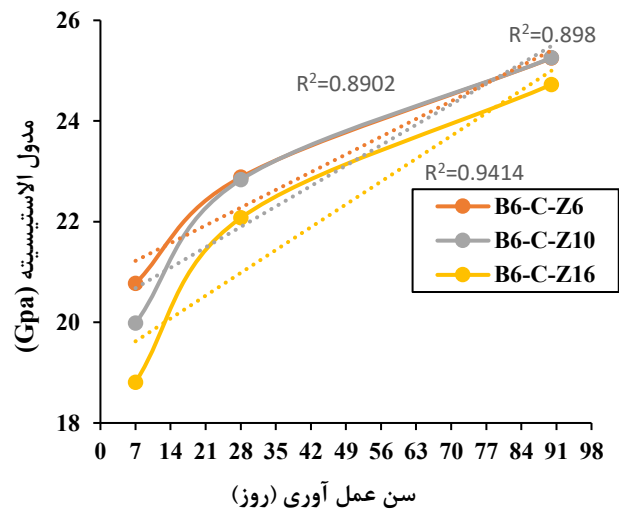
شکل ۱۴. منحنی مدول الاستیسیته نمونه های حاوی ۱۰ درصد بنتونیت
Fig. 14. Modulus of elasticity curve of samples containing 10% bentonite



شکل ۱۲. منحنی مدول الاستیسیته نمونه C-250
Fig. 12. Modulus of elasticity curve of sample C-250



شکل ۱۵. منحنی مدول الاستیسیته نمونه های حاوی ۱۶ درصد بنتونیت
Fig. 15. Modulus of elasticity curve of samples containing 16% bentonite



شکل ۱۳. منحنی مدول الاستیسیته نمونه های حاوی ۶ درصد بنتونیت
Fig. 13. Modulus of elasticity curve of samples containing 6% bentonite

را کسب کرده است. اما بیشترین مقدار مدول الاستیسیته در ۹۰ روز و بیشترین رشد مدول الاستیسیته و بیشترین ضریب همبستگی مربوط به نمونه B16-C-Z16 بوده است. نتایج به دست آمده از پیش بینی مدول الاستیسیته طبق رابطه (۲) که در شکل های ۱۲ الی ۱۵ نشان داده شده است، افزایش مدول الاستیسیته را در سنین مختلف عمل آوری نشان می دهد، براساس رگرسیون حاصله می توان گفت که با افزایش سن عمل آوری، مدول الاستیسیته تمام نمونه ها افزایش پیدا کرده است، زیرا در این رابطه مدول الاستیسیته رابطه

۱۰ درصد بنتونیت، در سنین اولیه (۷ روز) کمترین میزان مدول الاستیسیته مربوط به ترکیبات B10-C-Z10 و B10-C-Z16 بوده است. اما با افزایش سن عمل آوری نمونه B10-C-Z16 بیشترین میزان مدول الاستیسیته را به دست آورده است. اما با جایگزینی ۱۰ درصد بنتونیت و ۶ درصد ژئولیت (B10-C-Z6)، بیشترین میزان همبستگی مدول الاستیسیته با سن عمل آوری به دست آمده است. با توجه به نمودار شکل ۱۵ در سن ۷ و ۲۸ روز، ۱۶ درصد بنتونیت به همراه ۶ درصد ژئولیت، بیشترین مقدار مدول

جدول ۷. مقایسه پیش‌بینی مدول الاستیسیته نمونه‌ها
Table 7. Comparison of the modulus of elasticity prediction of samples

نام نمونه	مدول الاستیسیته		نسبت مدول الاستیسیته	
	مدول الاستیسیته نمونه‌ها بر حسب رابطه (۲)	مدول الاستیسیته سکانتی نمونه‌ها	سکانتی نمونه‌ها به نمونه مرجع	پیش‌بینی مدول الاستیسیته براساس مدول الاستیسیته سکانتی بتن
C-250	۲۳/۴۳	۴۷/۷۹	۱	۲۳/۴۳
B6-C-Z6	۲۲/۸۸	۳۵	-۲۶/۷	۱۷/۱۵
B6-C-Z10	۲۲/۸۳	۳۹/۰۸	-۱۸/۲۲	۱۹/۱۵
B6-C-Z16	۲۲/۰۷	۳۴	-۲۸/۸۵	۱۶/۶۷
B10-C-Z6	۲۱/۲۸	۳۵/۳	-۲۶/۱۳	۱۷/۳
B10-C-Z10	۲۰/۹۶	۳۹/۱۲	-۱۸/۱۴	۱۹/۱۷
B10-C-Z16	۲۱/۹۵	۳۸/۲۱	-۲۰/۰۴	۱۸/۷۳
B16-C-Z6	۲۱/۲۴	۳۵/۱۱	-۲۶/۵	۱۷/۲۲
B16-C-Z10	۱۸/۵۹	۲۴/۷۱	-۵۱/۷	۱۱/۳۱
B16-C-Z16	۱۹/۶۹	۲۴/۹۱	-۴۷/۸۷	۱۲/۲۱

بنتونیت تا ۱۶ درصد، بیشترین کاهش مدول الاستیسیته وجود داشته است، در این حالت به طور میانگین مدول الاستیسیته سکانتی این نمونه‌ها ۵۷/۹۷ درصد نمونه مرجع را کسب کرده‌اند. با توجه به اینکه مدول الاستیسیته سکانتی براساس شیب نمودار تنش-کرنش بتن بوده است، مقدار مدولی که براساس شیب نمودار به دست آمده نسبت به نمونه مرجع کاهش بیشتری داشته است. با افزایش مقدار ژئولیت و بنتونیت، خصوصاً با افزایش بنتونیت، مقدار کرنش نمونه‌ها افزایش یافته و همین امر باعث شده تا مدول الاستیسیته سکانتی بتن که براساس نسبت تنش به کرنش می‌باشد، با افزایش کرنش، مقدار مدول الاستیسیته سکانتی بتن نسبت به مدول الاستیسیته ای که برحسب رابطه (۲) بیان شده، بیشتر کاهش یافته است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد بتن تولید شده با ژئولیت و بنتونیت در مقاومت فشاری، کششی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین درصد جذب آب و چگالی بتن نیز مورد بررسی قرار گرفت، مدول الاستیسیته براساس مقاومت فشاری نیز به دست آمده و با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به تأثیر استفاده از ژئولیت و بنتونیت بر مقاومت فشاری و

مستقیمی با مقاومت فشاری دارد. در نتیجه با افزایش مقاومت فشاری در سنین بالاتر، مدول الاستیسیته نیز افزایش پیدا کرده است. مدول الاستیسیته نمونه‌ها در ۷ روز به طور میانگین ۱۹/۰۴ گیگاپاسکال و در سن ۲۸ روز و ۹۰ روز، به ترتیب مقدار مدول الاستیسیته به طور میانگین، ۲۱/۴۹ و ۲۴/۱۱ گیگاپاسکال به دست آمده است.

مدول الاستیسیته سکانتی بتن در واقع شیب خطی است که از نقطه ابتدایی، به نقطه ای از منحنی تنش-کرنش متناظر با $0.4f_c$ براساس ACI318-14 وصل می‌شود، این تعریف معمولاً به مدول الاستیسیته سکانتی بتن معروف می‌باشد. مقایسه مدول الاستیسیته بتن با مدول الاستیسیته سکانتی بتن در جدول ۷ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۷، مدول الاستیسیته سکانتی همه طرح اختلاط‌ها نسبت به نمونه C-250 کاهش یافته است، با افزایش پوزولان ژئولیت و بنتونیت، کرنش نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و در نتیجه شیب نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. نمونه‌ها با جایگزینی ۶ درصد بنتونیت و ژئولیت با ۶، ۱۰ و ۱۶ درصد، به طور میانگین در حدود ۷۵/۴۱ درصد مدول الاستیسیته نمونه مرجع را به دست آورده‌اند. با افزایش جایگزینی بنتونیت تا ۱۰ درصد، ۷۸/۵۶ درصد مدول الاستیسیته نمونه C-250 را کسب کرده‌اند، با افزایش

کششی و جذب آب، چگالی و مدول الاستیسیته، نتایج زیر به دست آمده اند:

• در سنین اولیه ساخت به علت در دسترس نبودن هیدروکسید کلسیم کافی برای شروع واکنش های پوزولانی، مقاومت فشاری نمونه ها اُفت پیدا کرده است؛ ولی در سنین بالا به دلیل پیشرفت سرعت هیدراتاسیون و افزایش ژل سیلیکاتی که در طی واکنش های پوزولانی رخ می دهد، مقاومت فشاری روند رو به رشدی داشته است. • در سنین ۷ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته بود؛ اما با افزایش استفاده از ژئولیت و بنتونیت و افزایش ژل سیلیکاتی، در طی واکنش مقاومت فشاری نمونه ها با درصد بیشتری رشد یافتند.

• بهترین ترکیبات پس از ۹۰ روز عمل آوری، مخلوط های B6-C-Z6، B6-C-Z10 و B10-C-Z6 می باشند که به مقاومتی برابر یا بیش از نمونه مرجع با مقاومت ۳۰/۸۸ مگاپاسکال دست یافتند. جایگزینی ۱۲ الی ۱۶ درصد بنتونیت و ژئولیت، مقاومت فشاری را افزایش می دهد.

• به طور کلی افزودن بنتونیت و ژئولیت، باعث افزایش مقاومت کششی دونیم شدن، شده است. نمونه های حاوی ۱۰ درصد بنتونیت، بیشترین مقاومت کششی را به دست آورده اند. در جایگزینی بین ۲۰ الی ۳۲ درصد پوزولان بنتونیت و ژئولیت، مقاومت کششی حدود ۳۵ درصد از ۷ روزه به ۲۸ روزه افزایش داشته و بهترین طرح اختلاط در کشش پس از ۲۸ روز B10-C-Z16 می باشد که به مقاومت برابر با ۲/۸۵ مگاپاسکال دست یافته است.

• با توجه به نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری و کششی و بررسی و محاسبه روابط بین این دو آزمایش، می توان گفت نمونه های ساخته شده با ۱۰ درصد بنتونیت، در کشش عملکرد خوبی داشته اند. • از آنجایی که خشت بنتونیت بسیار آب دوست بوده و منافذ موجود در ژئولیت، جذب آب بالاتری نسبت به سیمان خالص دارند، افزایش بنتونیت و ژئولیت، درصد جذب آب بتن تولیدی را بالا می برد. • شیب نزولی نمودار چگالی بتن حاوی پوزولان بنتونیت و ژئولیت، نشان دهنده رابطه معکوس درصد جایگزینی بنتونیت و ژئولیت با چگالی بتن است. با افزایش این دو پوزولان در بتن، وزن مخصوص بتن کاهش می یابد. از آنجایی که تراکم (چگالی) تابع وزن مخصوص بتن می باشد، پس با افزایش این دو پوزولان، چگالی بتن کاهش

می یابد.

• براساس پیش بینی مدول الاستیسیته مطابق رابطه پیشنهادی منطبق با آیین نامه ACI، افزایش مقاومت فشاری باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن می شود. براساس رگرسیون حاصله از نمودارها می توان گفت که با افزایش سن عمل آوری، مدول الاستیسیته تمام نمونه ها افزایش پیدا کرده است، زیرا در این رابطه مدول الاستیسیته رابطه مستقیمی با مقاومت فشاری دارد.

• با افزایش کرنش نمونه ها در اثر افزودن ژئولیت و بنتونیت، مدول الاستیسیته سکانتی نمونه ها نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از آزمایشگاه دانشگاه سمنان و مسئولین مربوطه که با مساعدت و راهنمایی ها و تدابیر اتخاذ شده، برای به انجام رسیدن آزمایشات موفق و دستیابی به نتایج قابل اطمینان نقش مؤثری داشته اند، کمال تشکر و سپاس گذاری به عمل می آید.

مراجع

- [1] K.C. Onyelowe, T. Amhadi, C. Ezugwu, H. Ugwuanyi, U. Iro, I. Jideofor, E. Amanamba, D.B. Van, A.B. Salahudeen, F. Sosa, Strength of pozzolan soil blend in chemically improved lateritic soil for pavement base material purpose, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(3) (2019) 410-416.
- [2] V. Glinskiy, L. Serga, M. Khvan, Assessment of Environmental Parameters Impact on the Level of Sustainable Development of Territories, *Procedia CIRP*, 40 (2016) 625-630.
- [3] A.M. Rashad, Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition-A comprehensive overview, *Construction and Building Materials*, 41 (2013) 303-318.
- [4] Kunal, R. Siddique, A. Rajor, Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics, *Resources, Conservation and Recycling*, 61 (2012) 59-68.

- [14] Rezaifar.Omid, S.M. Qiyami Taklimi, M. Gholhaki, Effect of Substitution of Natural Calcareous and Clay Materials with Cement in Low-Carbon Concretes, *Transportation Infrastructure Engineering (JTIE)*, 5 (2019) 40-49.
- [15] M.L. Nehdi, Clay in cement-based materials: Critical overview of state-of-the-art, *Construction and Building Materials*, 51 (2014) 37 382.
- [16] A. Martucci, L. Pasti, N. Marchetti, A. Cavazzini, F. Dondi, A. Alberti, Adsorption of pharmaceuticals from aqueous solutions on synthetic zeolites, *Microporous and Mesoporous Materials*, 148 (2012) 174-183.
- [17] Y.T. Tran, J. Lee, P. Kumar, K.H. Kim, S.S. Lee, Natural zeolite and its application in concrete composite production, *Composites Part B: Engineering*, 165 (2019) 354-364.
- [18] N.M. Altwair, M.A. Megat Johari, S.F. Saiyid Hashim, Flexural performance of green engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 518-525.
- [19] C.S. Poon, L. Lam, S.C. Kou, Z.S. Lin, A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, *Construction and Building Materials*, 13 (1999) 427-432.
- [20] S.Y.N. Chan, X. Ji, Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes, *Cement and Concrete Composites*, 21 (1999) 293-300.
- [21] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, M. Shekarchi, An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and Building Materials*, 35 (2012) 1023-1033.
- [22] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and Concrete Composites*, 32(2) (2010) 134-141.
- [23] C. Bilim, Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious
- [5] R. Siddique, J. Klaus, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Applied Clay Science*, 43 (2009) 392-400.
- [6] O. Rezaifar, M. Hasanzadeh, M. Gholhaki, Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method, *Construction and Building Materials*, 123 (2016) 59-68.
- [7] I. Abavisani, O. Rezaifar, A. Kheyroddin, Alternating Magnetic Field Effect on Fine-aggregate Concrete Compressive Strength, *Construction and Building Materials*, 134 (2017) 83-90.
- [8] A. Terzić, L. Pezo, N. Mijatović, J. Stojanović, M. Kragović, L. Miličić, L. Andrić, The effect of alternations in mineral additives (zeolite, bentonite, fly ash) on physico-chemical behavior of Portland cement based binders, *Construction and Building Materials*, 180 (2018) 199-210.
- [9] S.A. Memon, R. Arsalan, S. Khan, T.Y. Lo, Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 237-242.
- [10] J. Mirza, M. Riaz, A. Naseer, F. Rehman, A.N. Khan, Q. Ali, Pakistani bentonite in mortars and concrete as low cost construction material, *Applied Clay Science*, 45 (2009) 220-226.
- [11] H. Yang, D. Long, L. Zhenyu, H. Yuanjin, Y. Tao, H. Xin, W. Jie, L. Zhongyuan, L. Shuzhen, Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar, *Construction and Building Materials*, 224 (2019) 276-283.
- [12] B.A. Junaid akbar, M. Ashraf, S. Afzal, A. Ahmad, K. Shahzada, Evaluating the Effect of Bentonite on Strength and Durability of High Performance Concrete, *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 02 (2013) 1-5.
- [13] C. Targan, A. Olgun, Y. Erdogan, V. Sevinc, Effects of supplementary cementing materials on the properties of cement and concrete, in: *Cement and Concrete Research*, 2002, pp. 1551-1558.

- 518.
- [25] L. Sing Wong, R Hashim, Faisal Al, Utilization of sodium bentonite to maximize the filler and pozzolanic effects of stabilized peat, *Engineering Geology*, (2013) 56-66.
- material, *Construction and Building Materials*, (2011) 25-3180-3175.
- [24] G. Vamsi Krishna Reddy, V. Ranga Rao, Experimental Investigation of Strength Parameters of Cement and Concrete By Partial Replacement of Cement with Indian Calcium Bentonite, *International Journal of Civil Engineering and Techn*, (2017) 512-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Abdolshah, O. Rezaifar, M. Gholhaki, Mechanical Properties of Concrete Incorporating Bentonite and Zeolite as Replacement of Cement, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3355-3370.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17839.6707](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17839.6707)

