نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۶۷۱ تا ۱۶۸۶
DOI: 10.22060/ceej.2020.17090.6458

ارزیابی تأثیر زئولیت طبیعی بر خواص مکانیکی بتن های بازیافتی ساخته شده از درشت دانه های بازیافتی بنایی

مصطفی اژدری زاده، سیدفتح اله ساجدی*

گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

خلاصه: پژوهش حاضر به مطالعه تاثیر جایگزینی درصدهای مختلف درشت دانه های بنایی بازیافت شده بر خواص مکانیکی بتن های بازیافتی پرداخته است. در بتن های ساخته شده، سنگدانه های طبیعی در ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ با درشت دانه های بنایی بازیافت شده جایگزین شدند. جهت ارتقاء خواص مکانیکی بتن های بازیافتی تحقیق، پوزولان زئولیت طبیعی در ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ با سیمان جایگزین گردید. در مجموع، ۲۴۰ نمونه بتنی استاندارد مکعبی و استوانه ای در قالب ۱۶ طرح اختلاط ساخته شده و آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، آزمایش های مقاومت کششی دونیم شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی و سرعت امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه بر روی نمونه ها انجام شدند. نتایج به دست آمده بیانگر این است که جایگزینی ٪۲۰ زئولیت طبیعی به جای سیمان، بیش ترین بهبود در خواص مکانیکی بتن های معمولی را داشته ولی در ترکیب با سنگدانه های بازیافتی، جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی به جای سیمان، خواص مکانیکی بتن های بازیافتی را بهبود بخشیده است. هم چنین نتایج نشان داد که در سطوح جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی، کاربرد تا ٪۵۰ درشت دانه های بنایی بازیافت شده، نزدیکی خواص مکانیکی بتن بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی بدون پوزولان را نتیجه داد، ولی جایگزینی ٪۱۰۰ درشت دانه های طبیعی با نوع بنایی بازیافت شده، خواص مکانیکی بتن بازیافتی در مقایسه با بتن طبیعی بدون پوزولان را با افت قابل-توجهی روبرو کرده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۳۰
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

کلمات کلیدی:
بتن بازیافتی
درشت دانه های بازیافتی بنایی
خواص مکانیکی
زئولیت طبیعی

۱- مقدمه

امروزه بر کسی پوشیده نیست که سرعت توسعه زیرساخت های عمرانی در کشورهای در حال توسعه منجر به وارد آمدن آسیب های فراوانی به محیط زیست شده‌است. بتن یکی از محصولاتی است که نقش زیادی در مصرف منابع تجدیدناپذیر دارد. امروزه نگاه مبتنی بر توسعه پایدار در صنعت ساخت در حال رشد و فزونی است و بتن به عنوان یکی از پر مصرف ترین محصولات ساختمانی در صدر این نگاه قرار گرفته است. تخمین زده می شود که زباله های ناشی از ساخت و ساز و تخریب، حدود ٪۴۰ از کل زباله ها را شامل شود [۱]. میزان تولید زباله ها و نخاله های ساختمانی در کشور آمریکا به حدود ۱۴۰ میلیون تن رسیده و اتحادیه اروپا میزان تولید زباله های ساختمانی در هر سال را برابر ۹۷۰ میلیون تن، معادل ۲ تن به ازای هر شهروند اعلام کرده است [۲]. برابر با گزارش اعلام شده در اتحادیه اروپا، حدود ٪۵۵-۵۰ نخاله های ساختمانی را ضایعات بتنی و حدود ٪۴۰-۳۰ این ضایعات را نخاله های بنایی تشکیل داده و درصد کمی شامل دیگر ضایعات مثل شیشه و چوب و غیره می باشد [۳]. لذا بسیاری از این کشورها یکی از مبانی حرکت در مسیر توسعه پایدار را در استفاده مجدد از سنگدانه های بازیافتی تعریف کرده اند. لیته[1] نشان

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f_sajedi@yahoo.com

1 Leite

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

داد که سنگدانه های به دست آمده ناشی از ساخت وساز و تخریب برای ساخت بتن مناسب می باشد[۴]. برآوردها گویای آن است که تا سال ۲۰۲۰، حداقل ٪۵۰ از مصالح ساخت ساختمان های نوساز، از مصالح بازیافتی باشند [۵]. با توجه به اینکه ۷۵-۶۰ درصد حجم بتن را سنگدانه ها تشکیل می دهند [۶] و با توجه به امکان پذیر بودن بازیافت زباله های ساختمانی، و هم چنین مزایای زیست محیطی و اقتصادی آن، بازیافت زباله های ناشی از ساخت و ساز و تخریب به عنوان یک منبع جدید جهت تامین سنگدانه های بتن، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۷].

گرچه برخی از آیین نامه ها در به کارگیری از سنگدانه های بازیافتی به ویژه در مصارف سازه ها، به دلیل ناشناخته بودن برخی رفتارهای درازمدت آن‌ها، جانب احتیاط را برگزیده اند [۹،۸] و یا برخی آیین نامه ها مانند استانداردهای انگلستان و آلمان مصرف آنها را محدود نموده اند [۱۱،۱۰] ولی همچنان، جوامع مهندسی در تلاش هستند تا زمینه های استفاده از این بتن ها را برای مصارف عمومی مهیا سازند.

یکی از اساسی ترین مشکلات این دسته از بتن ها، کاهش چشم گیر خواص مکانیکی آنها در جایگزینی های بالاتر از ٪۳۰ می-باشد [۱۳،۱۲]. اگرچه برخی مطالعات نیز نشان داده که امکان دست یابی به مقاومتی بالاتر از مقاومت بتن معمولی در جایگزینی های ٪۵۰ نیز وجود دارد و هم چنین دست یابی به مقاومت های مورد نیاز طراحی در جایگزینی های تا سقف ٪۱۰۰ نیز امری ممکن است [۱۴].

یکی از عوامل مختلفی که می تواند بر خواص مکانیکی بتن های بازیافتی موثر باشد، تاثیر مواد افزودنی شیمیایی می باشد. در خصوص تاثیر مواد افزودنی شیمیایی، هر یک از محققان تلاش کردند برای بهبود کیفیت بتن بازیافتی، از مواد افزودنی خاصی نیز استفاده نمایند و هر یک درصد مشخصی از جایگزینی را نیز به عنوان درصد بهینه جایگزینی سیمان معرفی نمودند. کوو و همکارن [۱] در پژوهش خود کاربرد مواد افزودنی جایگزین سیمان را مورد استفاده قرار دادند. آن ها تاثیر به کارگیری میکروسیلیس را به میزان ٪۱۰ وزن سیمان با افزایش مقادیر مختلف مصالح بازیافتی بررسی کرده و نشان دادند که در تمام مخلوط های بتنی، زمانی که ٪۱۰ میکروسیلیس افزوده می شود، مقاومت فشاری حدود ٪۱۰ نیز افزایش خواهد یافت [۱۵]. مقیمی و همکاران با استفاده از جایگزینی سیمان با ٪۱۰ میکروسیلیس و فوق روان کننده، بتن بازیافتی ساختند که مقاومت فشاری آن ٪۳۹ از بتن مرجع بیش تر بود [۱۶]. در مطالعات دیگری نشان داده شد که استفاده از درصد جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس به ویژه در بتن-های حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی، باعث گردید تا رفتار مکانیکی بتن های بازیافتی به میزان چشم گیری به بتن های معمولی نزدیک گردد[۱۷]. مطالعات انجام شده توسط کو و پون [۲] نشان داده که در صورت استفاده از مواد جایگزینی مانند خاکستربادی، جایگزینی های تا سقف ٪۵۰ نیز می تواند منجر به ساخت بتن بازیافتی با کیفیت مطلوب نیز گردد [۱۸]. هم چنین مطالعات انجام شده دیگری نیز نشان داده که در صورت استفاده از خاکستربادی، جایگزینی سنگدانه ها تا سقف ٪۵۰ نیز می تواند منجر به ساخت بتن بازیافتی با کیفیت مطلوب گردد [۱۹]. در برخی از تحقیقات، جایگزینی همزمان سرباره کوره آهنگدازی و سنگدانه-های بازیافتی بتنی جهت ساخت بتن بازیافتی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در برخی از حالات استفاده از این مواد اگر چه منجر به کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه شده ولی در درازمدت این کاهش مقاومت با افزایش نرخ کسب مقاومت جبران شده‌است. این تحقیقات نشان دادند که تاثیر افزودن سرباره کوره آهنگدازی بر بتن های بازیافتی همانند تاثیری است که بر بتن-های معمولی دارد[۲۰]. استفاده از سرباره کوره آهنگدازی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ساخت بتن با سنگدانه های بازیافتی نیز توسط برندت [۳] مورد مطالعه قرار گرفت [۲۱]. او نشان داد که تاثیر افزودن سرباره کوره آهنگدازی [۴] در بتن های بازیافتی معادل تاثیر افزودن آن در بتن های با سنگدانه های طبیعی می باشد. در برخی تحقیقات نیز استفاده از سایر مواد پوزولانی مانند متاکائولین و پودر سنگ نیز مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این مطالعات نیز مبیّن آن است که افت مقاومت مورد انتظار ناشی از افزودن این مواد تحت تاثیر افزایش میزان سنگدانه های بازیافتی قرار نخواهد گرفت [۲۲].

اگرچه استفاده از مواد پوزولانی مانند خاکستربادی و میکروسیلیس به عنوان مواد افزودنی در بتن امری معمول بوده، ولی بررسی اثرات استفاده از زئولیت طبیعی به عنوان یک ماده پوزولانی به ویژه در

1 Kou et al.

2 Kou and Poon

3 Berndt

4 Ground Granulated Blast furnace Slag (GGBFS)

تولید بتن های بازیافتی، کمتر مورد پژوهش قرار گرفته است. در تحقیقی تاثیر زئولیت طبیعی بر عملکرد بتن خودتراکم بررسی گردید. نتایج آزمایش ها نشان داد که زئولیت طبیعی باعث بهبود عملکرد بتن خودتراکم در حالت تازه می شود. زئولیت طبیعی چسبناکی و پایداری بتن را افزایش و آب-انداختگی را کاهش می دهد و در حالت سخت شده، مقاومت فشاری برابر یا بیش تر از بتن مرجع را نتیجه می دهد [۲۳]. در تحقیقی دیگر نیز نشان داده شد که خواص مکانیکی بتن های بازیافتی حاوی تا ٪۵۰ از درشت دانه های بازیافتی بتنی با ٪۱۰ زئولیت طبیعی، عملکرد بهتری نسبت به بتن طبیعی خواهند داشت [۲۴] ولی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از زئولیت طبیعی در ساخت بتن های بازیافتی بنایی بسیار محدود می باشد.

۱-۱- دسته بندی سنگدانه های بازیافتی در بتن

همان‌طور که پیشتر گفته شد، برابر با گزارش اعلام شده در اتحادیه اروپا، حدود ٪۵۵-۵۰ نخاله های ساختمانی را ضایعات بتنی و حدود ٪۴۰-۳۰ این ضایعات را نخاله های بنایی تشکیل داده و درصد کمی شامل دیگر ضایعات مثل شیشه و چوب و غیره می باشد [۳]. لذا سنگدانه های قابل بازیافت از نخاله های ساختمانی را می توان به چهار گروه زیر دسته بندی نمود:

۱-۱-۱- درشت دانه های بتنی بازیافتی

مطالعات انجام شده در خصوص درشت دانه های بتنی بازیافتی نشان داده که در جایگزینی های کم و در بازه تا ٪۳۰ ، نمی تواند تاثیرات محسوسی در خواص مکانیکی بتن ها از خود به جای بگذارد و جایگزینی های بیش تر، با کاهش مقاومت های مکانیکی روبرو خواهد شد [۲۷-۲۵]، ولی مطالعات دیگری نشان داده که امکان دست یابی به مقاومتی بالاتر از مقاومت بتن معمولی در جایگزینی-های ٪۵۰ نیز وجود دارد و هم چنین دست یابی به مقاومت های مورد نیاز طراحی در جایگزینی ها تا سقف ٪۱۰۰ نیز امری ممکن است [۱۴].

۱-۱-۲- ریزدانه های بتنی بازیافتی

به طور کلی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از سنگدانه های بازیافتی در قالب ریزدانه بسیار محدود می باشدکه یکی از اصلی-ترین دلایل این امر افزایش میزان آب خواهی بتن با کاهش اندازه سنگدانه بازیافتی است [۲۸]. ولی به‌طور کلی لوپز و همکاران[1] [۲۹] گزارش کردند که با افزایش نسبت جایگزینی در ریزدانه، مقاومت فشاری افزایش می یابد. همچنین نتایج تحقیقات دیگری نشان داده، استفاده از سطح جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس، به ویژه در بتن های حاوی ٪۲۵ مصالح بازیافتی، باعث گردیده تا خواص مکانیکی بتن های بازیافتی به میزان چشمگیری به بتن های معمولی نزدیک گردند. همچنین در بازه ۲۸ روزه، استفاده از میکروسیلیس می تواند باعث شود تا بتن های ٪۲۵ بازیافتی به مقاومت مطلوب ۴۰ مگاپاسکالی برسند. [۳۰].

۱-۱-۳- درشت دانه های بنایی بازیافتی

گزارش های مختلفی در مورد استفاده از نخاله های آجری بازیافتی در ساخت جاده ها، کف سازی ها و محوطه ها وجود دارد [۳۳-۳۱] ولی اهمیت استفاده این نخاله ها در ساخت بتن می تواند بسیار پراهمیت تر باشد. خلف[2] نشان داد که استفاده از سنگدانه های بازیافتی بنایی به صورت درشت دانه در ساخت بتن مناسب است [۳۴]. سیلوا و همکاران[3] نیز نشان دادند که می توان سنگدانه های بازیافتی بنایی را در رده سنگدانه های با کیفیت تقسیم بندی نمود. هم چنین نشان دادند که با استفاده از این سنگدانه ها، می توان بتنی با عملکردی مشابه و یا حتی بهتر نسبت به بتن با سنگدانه طبیعی ساخت [۳۵].

۱-۱-۴- ریز دانه های بنایی بازیافتی

موانع اصلی برای استفاده از سنگدانه های بازیافتی همگن نبودن و جذب آب بالای آن ها می باشد. خطیب [۳۶] در استفاده از سنگدانه های آجری ریزدانه بازیافتی با اندازه تا ۵ میلی متر نشان داد که سنگدانه های ریز جذب آب تا ۱۸ برابر بیش تر از ماسه معمولی دارند و چگالی نمونه تهیه شده با آنها نسبت به نمونه های بتن معمولی کم تر است. دبیب و کنای[4] [۳۷] در تحقیقات خود نشان دادند که تولید بتن با ریزدانه ها و درشت دانه های آجری بازیافتی امکان پذیر بوده و خواص مشابهی با بتن تولید شده با سنگدانه های معمولی در

1 Lopez et al.
2 Khalaf
3 Silva et al.
4 Debib and Kenai

درصدهای جایگزینی محدود شده به ٪۲۵ درشت دانه و ٪۵۰ ریزدانه را ارائه دادند. هم چنین در تحقیقی دیگر، ساجدی و رزاک بیان کردند که با جایگزینی سنگدانه های ریز طبیعی با ریزدانه های بازیافتی بنایی، در مقاومت فشاری افزایش حاصل گردید [۳۸].

در مجموع، تحقیقات در باره زمینه استفاده دوباره از بتن تخریب شده و مصالح ساختمانی، به عنوان سنگدانه هایی برای بتن جدید، به سال های بسیار قبل و حتی به پایان جنگ جهانی دوم باز می گردد [۴۱-۳۹]. ولی در یک مطالعه تفصیلی انجام شده در رابطه با بتن های بازیافتی که توسط سیلوا[1] انجام شده، فهرست کاملی از مطالعات، پژوهش ها و مقالات چاپ گردیده در مجلات و تارنماهای علمی تهیه شده‌است که ابتدایی ترین مطالعات مدون موجود در این رابطه مربوط به دهه ۷۰ میلادی می باشد. این در حالی است که در مقایسه با دهه های پیشین، در اواخر دهه ۹۰، گستره این مطالعات به شکل چشم گیری رو به افزایش نهادند و اوج این مطالعات در سال ۱۹۹۸ ملاحظه شده که این امر به واسطه توجه کشورهای توسعه یافته به استفاده از ظرفیت های بالقوه این سنگدانه ها و برگزاری همایش بین المللی استفاده از سنگدانه های بتنی بازیافتی در کشور انگلستان در سال ۱۹۹۸ می باشد.

در ایران نیز سابقه پژوهش در زمینه بتن های بازیافتی به حدود یک دهه می رسد. آمار ثبت شده مقالات موجود در باره این بتن ها در تارنماهای نمایه سازی مقالات فارسی زبان، گویای آن است که کانون توجه به مطالعات از سال ۱۳۸۴ شکل گرفته و تاکنون مجموع مقالات چاپ شده در همایش ها و مجلات ارائه شده ۱۱۰ مورد ثبت شده اند. از این میان فقط ۸ عدد مقاله ثبت شده در مجلات علمی بوده و مابقی مقالات ارائه شده در همایش ها می باشند. طبق ملاحظات، مجموع آمار مقالات ۱۲ سال اخیر ارائه شده در ایران تقریبا معادل مقالات ارائه شده در یک سال در سایت های معتبر نمایه سازی مقالات بین المللی می باشند که اکثر قریب به اتفاق آن ها نیز مقالات مندرج در مجلات معتبر علمی می باشد.

با نگاهی اجمالی به عناوین مقالات ارائه شده به زبان فارسی می توان دریافت که کانون تمرکز این مطالعات بر خواص مکانیکی بتن های ساخته شده از سنگدانه های بتنی بازیافتی بوده و مطالعات بسیار کم تری در خصوص بتن های با سنگدانه های بنایی بازیافتی انجام پذیرفته که نه تنها در زمینه شناخت رفتار درازمدت این بتن ها توجهی نشده، بلکه حتی در همان بخش شناخت رفتار مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، ضریب ارتجاعی استاتیکی، مقاومت خمشی، سرعت امواج فراصوت و .... نیاز به توسعه پژوهش وجود دارد.

از جمله مصالح ساختمانی که می توان به عنوان یک منبع جایگزین مناسب مطرح گردد، نخاله های بنایی بازیافتی است. استفاده از بتن حاوی نخاله های بنایی بازیافتی در صنعت ساخت و ساز ، علاوه بر بارگذاری استاتیکی، توانایی قرار گیری آن در معرض انواع بارهای دینامیکی را نیز دارد [۴۲]. اما در این خصوص دی بریتو و همکاران[2] [۴۳] نشان دادند که با افزایش سطح جایگزینی درشت دانه های بازیافتی بنایی، میزان مقاومت فشاری بتن، به شکل خطی کاهش می یابد (برای جایگزینی ٪۵۰ حدود ٪۲۴ افت مقاومت به همراه دارد).

آیین نامه های موجود در ایران در رابطه با استفاده از سنگدانه های بازیافتی سخنی به میان نیاورده اند، اما بسیاری از آیین نامه-های معتبر موجود در دنیا محدوده مجاز برای هر دسته از این سنگدانه ها را بیان کرده اند [۴۵-۴۴ ، ۹-۸].

عوامل مختلفی می تواند بر خواص مکانیکی بتن های بازیافتی موثر باشد؛ از این قبیل می توان به تاثیر جایگزینی میزان سنگدانه ها[۴۶] و تاثیر مواد افزودنی شیمیایی[۱۵] اشاره نمود.

در مورد تاثیر جایگزینی درصد سنگدانه ها، محققان هنوز به یک وحدت نظر دست نیافته اند. اگرچه اکثر محققان بر این نظر متفقند که جایگزینی های کم و در بازه تا ٪۳۰ برای سنگدانه های بازیافتی درشت دانه و برای سنگدانه های بازیافتی ریزدانه تا حداکثر ٪۲۰ تاثیر محسوسی در بهبود مقاومت فشاری روی نخواهد داد [۴۷] اما رفته رفته با افزایش میزان درصد جایگزینی، از مقاومت فشاری نیز کاسته خواهد شد [۵۰-۴۸] برخی مطالعات نیز نشان داده که امکان دست یابی به مقاومتی بالاتر از مقاومت بتن معمولی در جایگزینی های ٪۵۰ نیز وجود دارد و هم چنین دست یابی به مقاومت های مورد نیاز طراحی در جایگزینی های تا سقف ٪۱۰۰ نیز امری ممکن است [۱۴].

در مورد تاثیر مواد افزودنی شیمیایی، همان‌طور که پیش تر نیز اشاره شد، هر یک از محققان تلاش کردند تا برای بهبود کیفیت بتن

1 Silva

2 De Brito et al.

بازیافتی، از مواد افزودنی خاصی نیز استفاده نمایند و هر یک درصد مشخصی از جایگزینی را نیز به عنوان درصد بهینه جایگزینی سیمان معرفی نمودند.

این تحقیق تلاش می کند تا تاثیر درصدهای مختلف جایگزینی درشت دانه های بازیافتی بنایی را همراه با تأثیر کاربرد زئولیت طبیعی بر خواص مکانیکی بتن بازیافتی ساخته شده از این نوع سنگدانه ها را مورد بررسی قرار دهد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

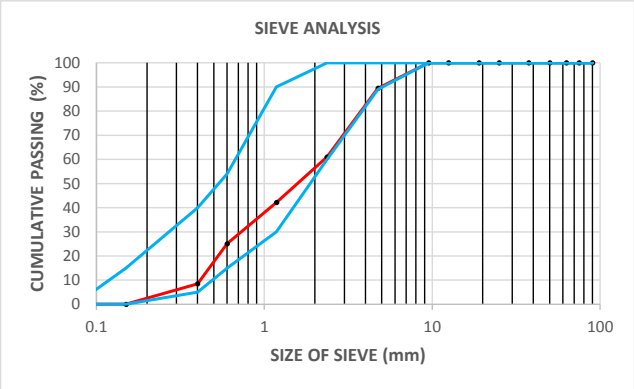
۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- مواد سیمانی مصرفی در تحقیق

سیمان استفاده شده در این تحقیق سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان خوزستان بوده و پوزولان استفاده شده زئولیت طبیعی (Ze) می باشد. زئولیت طبیعی یکی از متداول ترین پوزولان ها است که از زمان های بسیار قدیم در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده قرار گرفته و از دهه های اول قرن بیستم، در ساخت مخلوط سیمان استفاده شده‌است [۵۱]. زئولیت طبیعی یک ماده آتشفشانی یا آتشفشان رسوبی با ساختار سه بعدی است و به عنوان یک آلومینو سیلیکات هیدراته کاتیون های خاکی قلیایی و قلیایی طبقه بندی می شود [۵۲]. زئولیت طبیعی یک ساختار بلوری داشته و مانند سایر پوزولان ها، به دلیل داشتن مقدار زیادی اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیم واکنش زا، در ترکیب با هیدروکسید کلسیم، برای تشکیل ژل "سیلیکات کلسیم هیدراته" اضافی، تحت عمل پوزولانی قرار می گیرد [۵۳]. متداول ترین انواع زئولیت طبیعی عبارتند از: کلینوپتیلولیت، هولاندیت، چابازیت و موردنیت. ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی مصرف شده در تحقیق در جدول ۱ ارائه شده‌است.

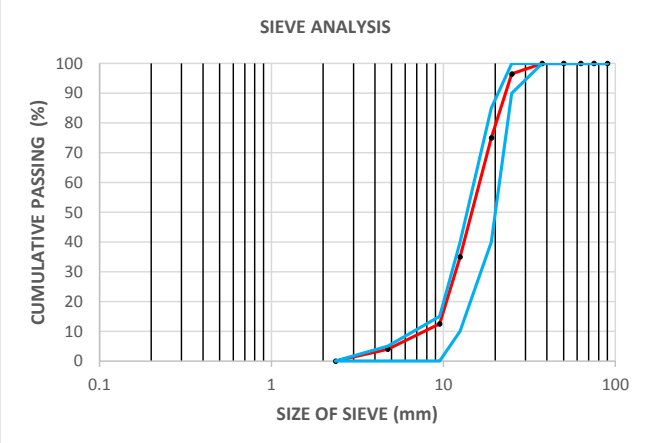
۲-۱-۲- سنگدانه ها

سنگدانه های طبیعی استفاده شده در این تحقیق شامل ریزدانه طبیعی با حداکثر اندازه ۴ میلی متر و درشت دانه طبیعی شکسته با حداکثر قطر ۱۹ میلیمتر با میزان جذب آب ٪۲/۵۳ وزنی و چگالی خشک شده در کوره به مقدار ۲/۵۷ تن در مترمکعب می باشند. میزان توزیع سنگدانه ها در مخلوط به نحوی است که ٪۵۵ از سنگدانه ها در محدوده درشت دانه و ٪۴۵ از آنها در محدوده ریزدانه قرار گرفته اند. شکل های ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر منحنی ای دانه بندی ریزدانه ها و درشت دانه های طبیعی می باشند.



شکل ۱. منحنی دانه بندی ریزدانه های طبیعی مصرفی در طرح اختلاط بتن ها

Fig. 1. The grain size distribution curve of the fine particles used in the concrete mixing design



شکل ۲. منحنی دانه بندی درشت دانه های طبیعی مصرفی در طرح اختلاط بتن ها

Fig. 2. The grain size distribution curve of the natural coarse aggregates used in the concrete mixing design

جدول ۱. تجزیه شیمیایی مواد سیمانی مصرف شده در تحقیق (%)

Table 1. Chemical compounds of cementitious materials used in the research (%)

مواد سیمانی	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
سیمان	۱۹/۸	۳/۹	۳/۱	۶۵/۳	۲/۵	۲/۸	۲/۲
زئولیت طبیعی	۶۸	۱/۵	۱۱/۵	۲/۵	-	-	۱۲/۲

شکل ۳. دستگاه خرد کن سنگدانه ها

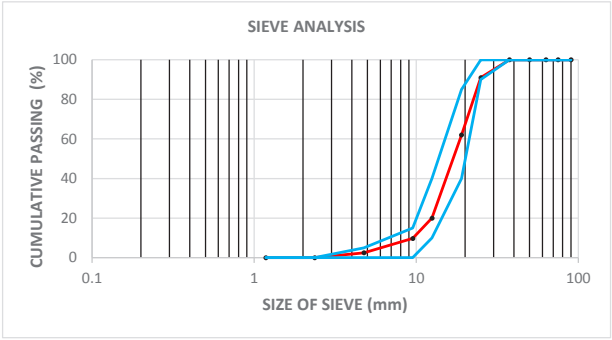
Fig. 3. Aggregate grinder machine

۲-۱-۲-۱- نحوه آماده سازی و دانه بندی درشت دانه های بنایی بازیافتی

درشت دانه های بنایی بازیافتی شامل قطعات شکسته شده آجر، پلاستر سیمان، سنگ، کاشی، سرامیک بوده که از ساختمان های تخریب شده در اهواز حاصل شدند. در ابتدا، از دپوهای مختلف، نخاله های بنایی به مقدار مورد نیاز جمع آوری گردید و سپس ضایعات آن ها شامل خاک، گچ، شیشه و فلزات جداسازی شدند. به کمک دستگاه خردکن (شکل ۳)، تمامی نخاله ها خرد شده و پس از الک کردن، دانه بندی شدند. درشت دانه های بنایی بازیافتی حاصله که بر مبنای طرح اختلاط ملی بتن ایران دانه بندی شده اند، دارای حداکثر قطر اسمی ۱۹ میلی متر بوده، میزان جذب آب آنها ٪۱۵/۲۲ وزنی و چگالی خشک شده در کوره به مقدار ۱/۰۴ تن در مترمکعب می باشند. شکل ۴ بیانگر منحنی دانه بندی درشت دانه های بنایی بازیافتی مصرفی در طرح اختلاط بتن های تحقیق می باشد.

۲-۱-۳- آب و مواد افزودنی

جهت ساخت مخلوط های بتنی و همین طور عمل آوری نمونه ها از آب شرب اهواز استفاده شده‌است. جهت دست یابی به کارایی مناسب به ویژه در بتن های بازیافتی از فوق روان کننده پایه پلی کربکسیلات با علامت اختصاری تجاری POWER PLAST-PM با چگالی g/cm۳ ۱/۱±۰/۰۲ و به میزان ٪۱ وزن مصالح سیمانی



شکل ۴. منحنی دانه بندی درشت دانه های بنایی بازیافتی مصرفی در طرح اختلاط بتن های تحقیق

Fig. 4. The grain size distribution curve of coars masonry recycled aggregate used in research concrete mixing design

استفاده شد.

۲-۲- طرح اختلاط های تحقیق

جهت مطالعه خواص مکانیکی بتن های بازیافتی، ۱۶ طرح اختلاط با درصدهای مختلف جایگزینی درشت دانه بازیافتی بنایی و پوزولان-زئولیت طبیعی ساخته شدند. در تمامی طرح ها نسبت آب به سیمان معادل ۰/۳۶ و مقدار مواد سیمانی ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب ثابت نگه داشته شده‌است. فرآیند اختلاط مصالح براساس فرآیند اختلاط سه مرحله ای ارائه شده توسط ساجدی و جلیلی فر [۲۴] انجام شده که قرابت زیادی با فرآیند دو مرحله ای تعریف شده توسط تام و

جدول ۲. جزئیات طرح اختلاط های بتن های تحقیق (kg)

Table 2. Details of the mix design of research concrete (kg/m^3)

طرح اختلاط	سیمان	زئولیت طبیعی	آب	فوق روان‌کننده	ماسه	شن طبیعی	شن بازیافتی
RC0/CC	۴۲۰	-	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	-
RC25	۴۲۰	-	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50	۴۲۰	-	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100	۴۲۰	-	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	-	۹۳۷
RC0-Ze10	۳۹۹	۴۲	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	-
RC25- Ze10	۳۹۹	۴۲	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50- Ze10	۳۹۹	۴۲	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100- Ze10	۳۹۹	۴۲	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	-	۹۳۷
RC0- Ze20	۳۷۸	۸۴	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	-
RC25- Ze20	۳۷۸	۸۴	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50- Ze20	۳۷۸	۸۴	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100- Ze20	۳۷۸	۸۴	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	-	۹۳۷
RC0- Ze30	۳۵۷	۱۲۶	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۹۳۷	-
RC25- Ze30	۳۵۷	۱۲۶	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۷۰۳	۲۳۴
RC50- Ze30	۳۵۷	۱۲۶	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	۴۶۸/۵	۴۶۸/۵
RC100- Ze30	۳۵۷	۱۲۶	۱۵۰	۴/۲	۷۶۶	-	۹۳۷

همکاران[1] (۲۰۰۵) دارد [۵۴]. جزئیات طرح اختلاط استفاده شده در تحقیق، در جدول ۲ ارائه گردیده است. قابل ذکر است نمایه RC معرف بتن بازیافتی حاوی سنگدانه های بازیافتی بنایی می باشند و برای پوزولان-زئولیت طبیعی از نمایه Ze و عدد مندرج پس از نمایه نیز بیانگر میزان درصد جایگزینی زئولیت طبیعی با سیمان بر حسب وزن سیمان می باشد. مطابق برنامه تحقیق، علاوه بر جایگزین کردن درشت دانه های طبیعی با درشت دانه های بازیافتی بنایی در سه سطح ٪۲۵، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ بر مبنای وزن سنگدانه های طبیعی، زئولیت طبیعی نیز در سه سطح ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ به ترتیب به میزان ۴۲، ۸۴ و ۱۲۶ کیلوگرم با سیمان جایگزین شده‌است.

۲-۳- نحوه آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش ها

طرح اختلاط پیش بینی شده بر مبنای طرح ملی مخلوط بتن ایران [۵۵] و برای دست یابی به بتن معمولی با مقاومت مشخصه در سن ۲۸ روزه ۴۰ مگاپاسکال بوده است. جهت بهبود سطح کیفی خواص مکانیکی بتن های بازیافتی از پوزولان زئولیت طبیعی در سطوح جایگزینی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ استفاده شده‌است. در مجموع ۲۴۰ نمونه بتنی مکعبی و استوانه ای استاندارد در قالب ۱۶ طرح اختلاط، ساخته شدند. وزن مخصوص بتن مرجع و بتن های بازیافتی در حالات تازه و سخت شده در جدول ۳ ارائه شده اند. پس از ساخت، تمامی نمونه ها در شرایط آزمایشگاهی قرار داده شده و پس از گذشت ۲۴ ساعت اقدام به بازنمودن قالب ها گردید و تا سررسیدهای تعیین شده، نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM C۱۹۲ [۵۶] در حوضچه آب با دمای ۲±۲۵° C عمل آوری شدند.

آزمایش مقاومت فشاری در سن ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه در مجموع بر روی ۱۴۴ نمونه مکعبی استاندارد براساس استاندارد ASTM C۳۹ [۵۷]، آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه در مجموع بر روی ۴۸ نمونه استوانه ای استاندارد براساس استاندارد ASTM C۴۶۹ [۵۸]، آزمایش تعیین مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه در مجموع بر روی ۴۸ نمونه استوانه ای استاندارد براساس استاندارد ASTM C۴۹ [۵۹]، و هم چنین قبل از شکستن نمونه های مکعبی در سن ۲۸ روزه، آزمایش سرعت امواج فراصوت براساس استاندارد ASTM C۵۹۷ [۶۰]، برروی ۴۸ نمونه استاندارد انجام گردید.

1 Tam et al.

جدول ۳. وزن مخصوص بتن مرجع و بتن های بازیافتی در حالات تازه و سخت شده

Table 3. Specific weight of reference concrete and recycled concrete in fresh and hardened states

عنوان طرح اختلاط	RC0	RC25	RC50	RC100	RC0-Ze10	RC25-Ze10	RC50-Ze10	RC100-Ze10	RC0-Ze20	RC25-Ze20	RC50-Ze20	RC100-Ze20	RC0-Ze30	RC25-Ze30	RC50-Ze30	RC100-Ze30
میانگین وزن مخصوص بتن تازه (t/m^3)	۲/۵۱	۲/۴۶	۲/۴۰	۲/۳۰	۲/۴۴	۲/۳۸	۲/۳۳	۲/۲۳	۲/۴۲	۲/۳۷	۲/۳۳	۲/۲۰	۲/۴۲	۲/۴۰	۲/۳۱	۲/۲۰
میانگین وزن مخصوص بتن سخت شده (t/m^3)	۲/۴۲	۲/۳۴	۲/۲۵	۲/۱۰	۲/۴۰	۲/۳۴	۲/۲۹	۲/۱۵	۲/۴۰	۲/۳۵	۲/۲۸	۲/۱۵	۲/۳۸	۲/۳۵	۲/۲۶	۲/۱۵

۳- نتایج آزمایش ها و تفسیر آنها

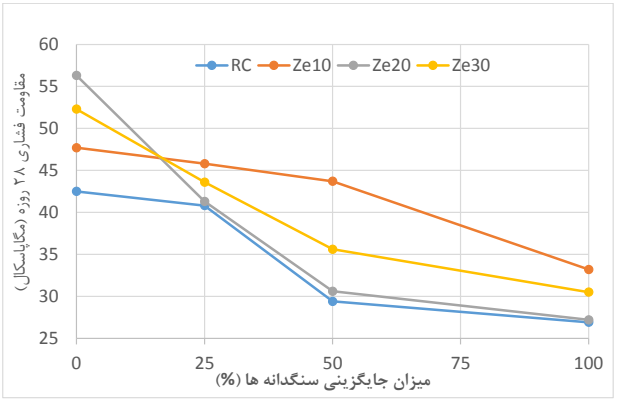
۳-۱- مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه

جدول ۴ و شکل ۵ نشان دهنده مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن-طبیعی و بتن بازیافتی دارای پوزولان-زئولیت طبیعی می‌باشند. در بتن های بدون جایگزینی مواد پوزولانی، تا سقف جایگزینی ٪۲۵ درشت دانه بازیافتی بنایی، مقاومت فشاری کاهش محسوسی نداشته و مقاومت فشاری هدف (۴۰ مگاپاسکال) را تامین می کند. در جایگزینی ٪۵۰ درشت دانه بازیافتی بنایی، مطالعات پیشین نشان داده بود که حدود ٪۲۴ کاهش مقاومت فشاری را به دنبال دارد [۴۳] که نتایج این تحقیق، ضمن تأیید گزارش بالا، نشان داد که در این حالت جایگزینی مقاومت فشاری بتن ٪۲۸ افت داشته و به ۲۹/۴ مگاپاسکال رسید و جایگزینی ٪۱۰۰ درشت دانه باعث شده تا مقاومت فشاری از مقاومت هدف بسیار کمتر شده و با ٪ ۳۳ کاهش نسبت به بتن معمولی به ۲۶/۹ مگاپاسکال برسد. در بتن های طبیعی، بیشترین مقاومت کسب شده در بتن با حضور ٪۲۰ زئولیت طبیعی می باشد درحالیکه در بتن های بازیافتی، بیشترین مقاومت کسب

جدول ۴. مقاومت فشاری بتن های طبیعی و بازیافتی (MPa)

Table 4. Compressive strength of normal and recycled concrete (MPa)

طرح اختلاط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
RC	۴۲/۵	۴۰/۸	۲۹/۴	۲۶/۹
Ze10	۴۷/۷	۴۵/۸	۴۳/۷	۳۳/۲
Ze20	۵۶/۳	۴۱/۳	۳۰/۶	۲۷/۲
Ze30	۵۲/۳	۴۳/۶	۳۵/۶	۳۰/۵



شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه ,ها برای بتن های معمولی و بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی

Fig. 5. Compressive strength changes at 28 days of age in percentage of aggregate replacement for normal and recycled concrete containing natural zeolite

شده در بتن با ٪۲۵ درشت دانه بازیافتی بنایی با ٪۱۰ زئولیت طبیعی می باشد. در جایگزینی های تا سقف ٪۵۰ درشت دانه بازیافتی بنایی، فقط در سطح استفاده ٪۱۰ زئولیت طبیعی، مقاومت فشاری هدف (۴۰ مگاپاسکال) کسب شد. در جایگزینی های ٪۱۰۰ درشت دانه بازیافتی بنایی، در هیچ یک از سطوح جایگزینی زئولیت طبیعی، مقاومت فشاری کسب شده به مقاومت فشاری هدف نزدیک نبوده و اختلاف زیادی مشاهده گردید.

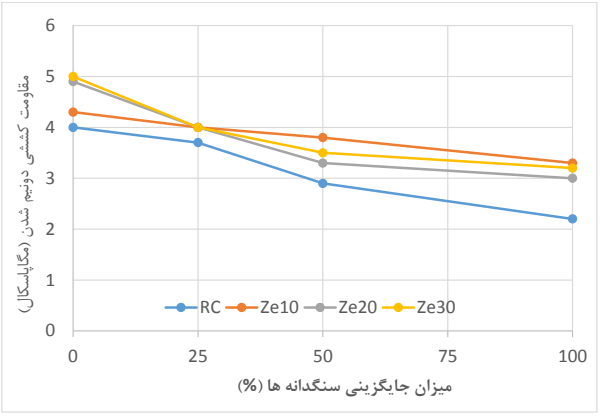
۳-۲- مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه

جدول ۵ و شکل ۶ نشان دهنده مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه بتن های معمولی و بازیافتی حاوی پوزولان-زئولیت

جدول ۵. مقاومت کششی دو نیم شدن بتن های معمولی و بازیافتی (MPa)

Table 5. Splite cylinder strength of normal and recycled concrete (MPa)

طرح اختلاط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
RC	۳/۹	۳/۷	۲/۹	۲/۲
Ze10	۴/۳	۴/۰	۳/۸	۳/۳
Ze20	۴/۹	۴/۰	۳/۳	۳/۰
Ze30	۵/۰	۴/۰	۳/۵	۳/۲



شکل ۶. تغییرات مقاومت کششی دو نیم شدن در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه ها برای بتن های معمولی و بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی

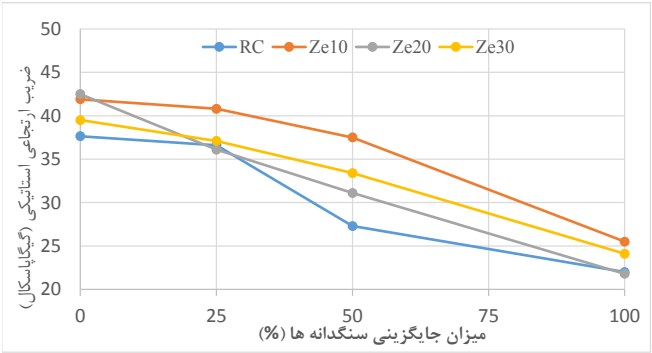
Fig. 6. Splite cylinder strength changes at 28 days of age in percentage of aggregate replacement for normal and recycled concrete containing natural zeolite

طبیعی می باشند. بیشترین و کمترین مقاومت کسب شده، ۵ و ۲/۲ که به ترتیب مربوط به بتن-معمولی با ۳۰٪ زئولیت طبیعی و بتن ۱۰۰٪ بازیافتی بدون پوزولان می باشد. در بتن بدون پوزولان، جایگزینی کامل درشت دانه بازیافتی باعث افت ۴۴٪ مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی شده‌است. در تمام سطوح جایگزینی زئولیت طبیعی، تا جایگزینی ۲۵٪ درشت دانه بازیافتی، مقاومت کششی دونیم شدن بیشتری نسبت به بتن طبیعی مشاهده گردید و همچنین در سطح جایگزینی ۱۰٪ زئولیت طبیعی، تا جایگزینی حتی ۵۰٪ درشت دانه بازیافتی، مقاومت کششی دونیم شدن به بتن معمولی بسیار نزدیک شد. سایر سطوح جایگزینی زئولیت طبیعی تاثیر محسوسی در بهبود مقاومت کششی دونیم شدن نسبت به بتن-معمولی نداشته ولی نسبت به بتن های مشابه بدون پوزولان از مقاومت بیشتری برخوردار بودند. در مجموع جدول ۵ و شکل ۶ نشان می دهند که استفاده از زئولیت طبیعی تا حدودی توانسته مقاومت کششی دونیم شدن برخی بتن ها را بهبود ببخشد.

جدول ۶. ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن های معمولی و بازیافتی (GPa)

Table 6. Static elasticity modulus of normal and recycled concrete (GPa)

طرح اختلاط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
RC	۳۷/۶	۳۶/۶	۲۷/۳	۲۲/۰
Ze10	۴۱/۹	۴۰/۸	۳۷/۵	۲۵/۵
Ze20	۴۲/۵	۳۶/۱	۳۱/۳	۲۱/۸
Ze30	۳۹/۵	۳۷/۱	۳۳/۴	۲۴/۱



شکل ۷. تغییرات ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه ها برای بتن های معمولی و بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی

Fig. 7. Static elastic modulus changes at 28 days of age in percentage of aggregate replacement for normal and recycled concrete containing natural zeolite

۳-۳- ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه

جدول ۶ و شکل ۷ نشان دهنده ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه بتن های معمولی و بازیافتی حاوی پوزولان- زئولیت طبیعی می باشند. تفاوت شکل ۷ با شکل‌های ۵ و ۶ نشانگر این است که افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی، باعث شده تا ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن های بازیافتی در مقایسه با مقاومت های فشاری و کششی از افت محسوس تری برخوردار باشد. البته تقریبا در هر سطح جایگزینی مصالح بازیافتی، استفاده از این ماده پوزولانی باعث افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی نسبت به حالت بدون پوزولان شده‌است. بیشترین و کمترین ضریب ارتجاعی کسب شده، ۴۲/۹ و ۲۱/۸ که به ترتیب مربوط به بتن - معمولی با ۲۰٪ زئولیت طبیعی و بتن ۱۰۰٪ بازیافتی با ۲۰٪ زئولیت طبیعی می باشد. در سطح جایگزینی ۱۰٪ زئولیت طبیعی ، در جایگزینی ۲۵٪ درشت دانه بازیافتی، ضریب ارتجاعی بیشتری نسبت به بتن معمولی مشاهده گردید و در

جایگزینی ٪۵۰ درشت-دانه بازیافتی، ضریب ارتجاعی بتن بازیافتی به بتن طبیعی بسیار نزدیک مشاهده شد ولی در دیگر جایگزینی ها، ضریب ارتجاعی به دست آمده از ضریب ارتجاعی بتن معمولی بدون پوزولان هم کمتر بوده است.

۳-۴- سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه

در جدول ۷ و شکل ۸ نتایج سرعت انتشار امواج فراصوت روی نمونه های مکعبی استاندارد ارائه شده است. هرعدد بیانگر متوسط سه نمونه مکعبی می باشد. حدود تعریف شده روی شکل، معرف بازه های تعیین کیفیت بتن ها براساس یافته های وایتهورس[1] (۱۹۵۱) می باشند [۶۱]. براساس این نمودار، مشاهده شده است که بتن طبیعی بدون پوزولان در محدوده کیفی بتن خوب قرار گرفته است ولی با افزودن تمام سطوح زئولیت طبیعی (٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰) به بتن، بتن در محدوده کیفی عالی قرار گرفته است. اما با جایگزینی ٪۲۵ درشت دانه بازیافتی بنایی به جای درشت دانه طبیعی، فقط بتن با ٪۱۰ زئولیت طبیعی در محدوده کیفی عالی باقی مانده و بتن های ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی به محدوده بتن خوب تنزل کیفیت پیدا کرده اند. و در جایگزینی های ٪۵۰ مصالح بازیافتی، تمام بتن ها در محدوده کیفی خوب قرار دارند. در جایگزینی های ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی، تمام بتن ها در محدوده کیفی خوب و مشکوک بوده اند. در بتن های طبیعی بدون پوزولان نیز، با افزایش میزان جایگزینی درشت دانه بازیافتی بنایی به جای درشت دانه طبیعی، از کیفیت بتن کاسته شده و در محدوده بتن های مشکوک و ضعیف قرار گرفته است. در مجموع، بیشترین سرعت انتشار امواج فراصوت، مربوط به بتن طبیعی با ٪۲۰ پوزولان به میزان km/hr ۴/۹، و کمترین آن، مربوط به بتن با ٪۱۰۰ سنگدانه های بازیافتی بدون پوزولان km/hr ۳/۰ بوده است.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش ها

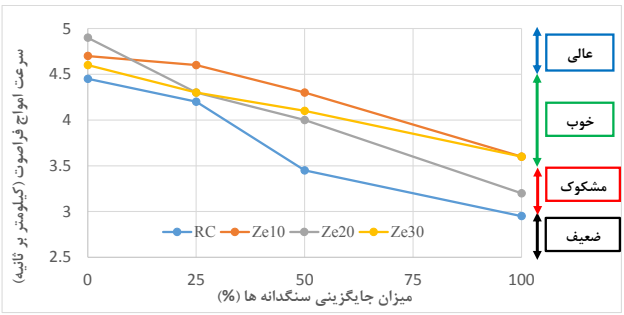
همان‌طور که پیش تر اشاره شد، در زمینه رفتار مکانیکی بتن های بازیافتی، محققان هنوز به یک وحدت نظر دست نیافته اند. اگرچه اکثر محققان بر این نظر متفقند که جایگزینی های کم و در بازه تا ٪۳۰ از سنگدانه های درشت دانه بازیافتی نمی تواند تاثیرات محسوسی در رفتار مکانیکی بتن ها از خود به جای بگذارد [۲۷-۲۵]

1 Whitehurst

جدول ۷. سرعت انتشار امواج فراصوت (km/hr)

Table 7. Ultrasonic pulse velocity (km/hr)

طرح اختلاط	میزان جایگزینی سنگدانه‌ها (٪)			
	۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
RC	۴/۵	۴/۲	۳/۵	۳/۰
Ze10	۴/۷	۴/۶	۴/۳	۳/۶
Ze20	۴/۹	۴/۳	۴/۰	۳/۲
Ze30	۴/۶	۴/۳	۴/۱	۳/۶



شکل۸. تغییرات سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه بر حسب درصد جایگزینی سنگدانه ها برای بتن های معمولی و بازیافتی حاوی زئولیت طبیعی

Fig. 8. Static elastic modulus changes at 28 days of age in percentage of aggregate replacement for normal and recycled concrete containing natural zeolite

ولی مطالعات نیز نشان داده که امکان دست یابی به مقاومتی بالاتر از مقاومت بتن معمولی در جایگزینی های ٪۵۰ نیز وجود دارد [۱۴]. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که جایگزینی ٪۲۵ مصالح بازیافتی تاثیری در کاهش مقاومت فشاری ندارد. استفاده از ٪۱۰ زئولیت طبیعی باعث می شود حتی در جایگزینی ٪۵۰ درشت دانه های بازیافتی بنایی، مقاومت فشاری از بتن بدون پوزولان نیز بیشتر شود که این امر نشان می دهد که به علت ریزی بسیار زیاد ذرات زئولیت طبیعی و متعاقباً افزایش قابلیت پرکنندگی بیشتر آن، از شدت بروز و توسعه حفرات در مقطع بتن های بازیافتی کاسته شده و این امر منجر به بهبود محسوس تر مقاومت فشاری این بتن ها گردیده است. نمودارهای ارائه شده نشان داد که جایگزینی ٪۱۰۰ درشت دانه بازیافتی بنایی با میانگین ٪۴۳ کاهش مقاومت فشاری روبرو می شود، درحالی که برخی منابع این کاهش مقاومت در بتن های ٪۱۰۰ بازیافتی بتنی را تا ٪۳۰ گزارش کرده اند [۶۲، ۴۸].

در زمینه مقاومت کششی دونیم شدن، مطالعات آماری قبلی انجام شده، نشان داده که در اثر جایگزینی کامل سنگدانه های بازیافتی، امکان وقوع افت ٪۴۰ در مقاومت کششی دونیم شدن وجود

دارد [۲۶]. مطالعات تحقیق حاضر نیز ضمن تائید گزارش فوق، نشان داد که در صورت جایگزینی کامل درشت دانه، بدون حضور هرگونه پوزولان، کاهش ٪۴۵ مقاومت کششی دونیم شدن در مقایسه با بتن معمولی روی می دهد. با این حال استفاده از سطح بهینه مصرف زئولیت طبیعی که پیش تر در بررسی های مربوط به مقاومت فشاری، معادل ٪۱۰ بیان شده بود، باعث شد تا در جایگزینی کامل درشت دانه بنایی ٪۲۳ افت در مقاومت کششی دونیم شدن روی دهد. البته نکته مهم این است که با افزودن ٪۱۰ و ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی به بتن طبیعی، مقاومت کششی دونیم شدن به ترتیب ٪۱۰ و ٪۲۶ و ٪۸٫۲ افزایش پیدا کرده است که این نسبت در جایگزینی ٪۲۵ درشت دانه بازیافتی برای تمام جایگزینی های زئولیت طبیعی حدود ٪۸ می باشد. ولی با جایگزین نمودن درشت دانه بنایی به جای سنگدانه طبیعی در جایگزینی ٪۵۰، مقاومت کششی دونیم شدن از بتن طبیعی هم کمتر شد.

در زمینه رفتار ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن های بازیافتی، هرگونه افزایش مقدار سنگدانه بازیافتی منجر به کاهش ضریب ارتجاعی استاتیکی شده‌است که این پدیده را می توان به علت پایین تر بودن ضریب ارتجاعی استاتیکی سنگدانه های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه های طبیعی دانست. در بتن های طبیعی، جایگزینی ٪۲۰ زئولیت طبیعی بهترین رفتار ارتجاعی را از خود نشان داده و باعث شده تا عملکرد بتن حدود ٪۱۳ بهبود پیدا کند ولی در بتن های بازیافتی، جایگزینی ٪۱۰ زئولیت طبیعی، بهترین رفتار را نسبت به دیگر جایگزینی ها از خود نشان داده و باعث شده که افت رفتار بتن در اثر جایگزینی سنگاه های بازیافتی کمتر از بقیه حالت ها باشد. هم چنین نتایج نشان دادند که در جایگزینی ٪۵۰، تمام بتن های بازیافتی نسبت به بتن طبیعی بدون پوزولان از ضریب ارتجاعی کمتری برخوردار شدند ولی در جایگزینی ٪۲۵، بتن با ٪۱۰ زئولیت طبیعی عملکرد قابل قبولی از خود نشان دادند که این امر نشان می دهد در زمینه ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن ها، تاثیر نامطلوب سنگدانه های بازیافتی در سطوح بالاتر جایگزینی سنگدانه ها، بر تاثیر بهبودبخشی زئولیت طبیعی اثرگذار تر بوده است. این موضوع وقتی خود را بیشتر نشان می دهد که در جایگزینی ٪۱۰۰ درشت دانه بازیافتی بنایی و فارغ از میزان افزودنی، نتایج حاصله برای ضریب ارتجاعی استاتیکی تمام بتن ها بسیار نزدیک به هم می باشد.

نتایج آزمایش تعیین سرعت انتشار امواج فراصوت، نشان داد که با افزایش میزان سنگدانه بازیافتی در بتن، از میزان سرعت انتشار امواج نیز کاسته می شود. وقوع این امر را می توان به کاهش چگالی سنگدانه های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه های طبیعی دانست. نتایج نشان داد که جایگزینی کامل درشت دانه های بازیافتی در بتن های طبیعی، منجر به کاهش ٪۳۵ سرعت انتشار امواج گردید، با این حال استفاده از پوزولان-زئولیت طبیعی و متراکم کردن فضای موجود در بتن های بازیافتی، موثر واقع شده به نحوی که در جایگزینی ٪۱۰، ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی به ترتیب ٪۲۰، ٪۲۹ و ٪۲۰ کاهش سرعت انتشار امواج فراصوت در بتن های ٪۱۰۰ بازیافتی نسبت به بتن معمولی مشابه دیده شد.

۵- جمع بندی

در این تحقیق خواص مکانیکی بتن های بازیافتی ساخته شده از درصدهای مختلف درشت دانه های بنایی بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. پوزولان زئولیت طبیعی نیز در درصدهای مختلف جایگزینی با سیمان جهت بهبود خواص مکانیکی استفاده شد. در مجموع ۱۴۴ نمونه مکعبی استاندارد و ۹۶ نمونه استوانه ای استاندارد در قالب ۱۶ طرح اختلاط ساخته شدند و آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، و آزمایش های مقاومت کششی دونیم شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی و سرعت انتشار امواج فراصوت در سن ۲۸ روزه بر روی نمونه های مرتبط انجام گردیدند. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می باشند:

- مقاومت فشاری ۲۸در سن روزه بتن دارای ٪۲۵ سنگدانه های بنایی بازیافتی بدون پوزولان در مقایسه با بتن معمولی تقریبا بدون تغییر باقی مانده درحالی که جایگزینی های ٪۵۰ و ٪۱۰۰ از مصالح بازیافتی، باعث کاهش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ٪۳۰ و ٪۳۷ گردید.

- مصرف ٪۲۰ و ٪۳۰ زئولیت طبیعی در بتن معمولی، باعث شده تا مقاومت فشاری بتن از مرز ۵۰ مگاپاسکال عبور کند.

- تمام بتن های بازیافتی دارای ٪۲۵ مصالح درشت دانه بازیافتی بنایی و حاوی زئولیت طبیعی، در طی ۲۸ روز به مقاومت مشخصه ۴۰ مگاپاسکال رسیدند، و در ٪۵۰ جایگزینی مصالح بازیافتی، فقط بتن حاوی ٪۱۰ زئولیت طبیعی به مقاومت مشخصه ۴۰ مگاپاسکال

دست یافت.

- تمام بتن های حاوی زئولیت طبیعی در مقایسه با بتن های مشابه بدون پوزولان، از مقاومت کششی دونیم شدگی بیش-تری برخوردار بودند.

- در جایگزینی تا ٪۵۰ از درشت دانه های بازیافتی بنایی، فقط در جایگزینی ٪۱۰ از زئولیت طبیعی، مقاومت کششی دو نیم شدن بتن نزدیک به مقاومت بتن مرجع بوده است. ولی در جایگزینی ٪۲۵ از درشت دانه های بازیافتی بنایی، مقاومت کششی دونیم شدن کسب شده بتن ها با بتن مرجع تقریبا یکسان بوده است.

- در مقایسه با مقاومت های فشاری و کششی دونیم شدن، کاهش ضریب ارتجاعی استاتیکی به مقدار بیش تری تحت تاثیر افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی قرار گرفت.

- پوزولان زئولیت طبیعی به نسبتی که منجر به بهبود مقاومت فشاری بتن بازیافتی شد، قادر نبود تا مقاومت کششی دونیم شدن و ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن های بازیافتی را در مقایسه با بتن معمولی بهبود بخشد.

- فقط در جایگزینی ٪۲۵ از مصالح بازیافتی بنایی، استفاده از ٪۱۰ زئولیت طبیعی باعث افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن نسبت به بتن مرجع شده‌است.

- بتن های طبیعی حاوی تمام درصدهای جایگزینی زئولیت طبیعی، از منظر سرعت انتشار امواج فراصوت در محدوده «سطح کیفی عالی» قرار گرفتند.

- در جایگزینی های ٪۲۵ و ٪۵۰ از درشت دانه های بازیافتی بنایی و در تمام درصدهای جایگزینی از زئولیت طبیعی، بتن ها در محدوده «سطح کیفی خوب» قرار گرفتند.

- جایگزینی ٪۱۰۰ سنگدانه های طبیعی با درشت دانه های بازیافتی بنایی، باعث شده تا تمام بتن ها در «محدوده کیفی ضعیف و مشکوک» قرار گیرند.

سپاسگزاری

نویسندگان از همکاری های خوب «بچینگ پلنت شرکت فولاد خوزستان » و «آزمایشگاه مکانیک خاک استان خوزستان» برای در اختیار قرار دادن مصالح، تجهیزات آزمایشگاهی و امکانات مورد نیاز تشکر می نمایند.

مراجع

[1] Takahashi. H., Sando. Y., Satomi. T., Numerical Simulation on Crushing of Concrete Blocks by Mobile Crusher. Proceeding Int. Symp. Earth Sci. Technol, Fukuoka, Japan, 2011, 75–78.

[2] Hansen.T.C,(Editor), "Recycling of Demolition and Masonry" RLLEM(The intimational union of testing and Research laboratories for materials and structure), Reports, 1992.

[3] Vivian, W.Y., Economic comparison of concrete recycling: A case study approach Resources, Journal of Resources and Conservation and Recycling, 2008, 52 (5) pp. 821-828.

[4] Leite, M. B., Evaluation of the mechanical properties of concrete produced with recycled aggregates from construction and demolition wastes, PhD Thesis, Brazil, Federal University of Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.

[5] limbachiya. M., sustainable waste management and recycling: construction and demolition waste, Telford, 2004.

[6] Taylor. P.C., Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State of the Practice Manual, Federal Highway Administration HIF-07-004. Federal Highway Administration, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, 2007.

[7] Bui. N.K., Satomi. T., Takahashi. H., Improvement Of Mechanical Properties Of Recycled Aggregate Concrete Basing On A New Combination Method Between Recycled Aggregate And Natural Aggregate. Journal of Construction and Building Materials, 2017, 148:376-85.

[8] BCSJ, Proposed Standard for the Use of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, Japan: Building Contractors Society of Japan Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste, 1977.

[9] DIN 4226-100. Mineral aggregates for concrete and mortar-Part 100: Recycled aggregates, Germany, 2000.

[10] Brazilian Association of Technical Standards (ABNT).

(2004). NBR 15116: Recycled aggregates of solid residue of building constructions – requirements and methodologies.

[11] BS, 8500-2, (2006). Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part II: Specification for constituent materials and concrete. British Standard Institution.

[12] Li, X., Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate

concrete, Journal of Resources and Conservation and Recycling, 2008, 53 (1), 36-44.

[13] Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V., Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. Journal of Construction and Building Materials, 2011, 25 (1), 69-80.

[14] Suvash Chandra. P., Data on optimum recycle aggregate content in production of new structural concrete, 2017, 15: 987–992.

[15] Kou. S.C., Poon. C.S., Chan. D., Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete , Journal of Materials and Structures, 2007, 41(7): 1191-1201.

[16] Moghimi, M., Shafiq, P., Berenjian, J., Nemati, K., Experimental study of the effect of using micro-silica and super-plasticizer on mechanical properties of recycled concrete made from crushed concrete, Journal of Civil Engineering, 2010.

[17] Sajedi, S.F., Jalilifar, H., Investigation and Comparison of the Effect of Natural Zeolite and Micro-silica on the Mechanical Behavior of Recycled Concrete, Journal of Structural and Construction Engineering, 2017.

[18] Kou. S.C., Poon. C.S., Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates, Journal of Cement and concrete composites, 2010, 32 (8): 649-654.

[19] Arifi. E., Zacoeb. A., Shigeishi. M., Effect Of Fly Ash On The Strength Of Concrete Made From Recycled Aggregate By Pulsed Power, International Journal of GEOMATE, 2014, 7(13):1009-1016.

[20] Douglas. E., Bilodeau. A., Brandstetr. J., Alkali activated ground granulated blast-furnace slag concrete: Preliminary investigation, Journal of Cement and Concrete Research, 1991, 21: 101-108.

[21] Berndt. M.L., Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate, Journal of Construction and Building Materials, 2009, 23: 2606-2613.

[22]Pacheco-Torgal. F., Moura. D., Ding. Y., Jalali. S., Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars, Journal of Construction and Building Materials, 20101, 25: 3732-3745.

[23] Ismail Nia, A. M., Faridi, M., The effect of zeolite on the compressive strength of self-compacting concrete containing recycled aggregates, 5th Annual Iranian Concrete Conference, 2013.

[24] Sajedi, S.F., Jalilifar, H., Investigation on Mechanical Properties of Recycled Concrete Containing Natural Zeolite. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), 2017, 4 (3), 77-81.

[25] Medina. C., Frías. M., Sánchez de Rojas. M., Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. Journal of Construction and Building Materials, 2012, 31: 112-118.

[26] Silva, R. V., J. De Brito, and R. K. Dhir., Tensile strength behavior of recycled aggregate concrete. Journal of Construction and Building Materials, 2015, 83: 108-118.

[27] Immelman. D.W., The Influence of Percentage Replacement on the Aggregate and Concrete Properties from Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate (SFc Thesis), Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, 2013.

[28] De Juan, M. S., Gutiérrez, P. A., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Journal of Construction and building materials, 2009, 23 (2), 872-877.

[29] Lopez, V., Liamas. B., Juan, A., Moran, J. M., Guerra, I., Eco-efficiient concretes: impact of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete,

Biosystems Engineering, 2007, 96(4), pp. 559-64.

[30] Sajedi, S.F., Afshar, R., Evaluation of the effect of silica on the mechanical properties of concrete containing micro-recycled aggregates, Journal of Structural and Construction Engineering, 2018.

[31] Ali. M.M.Y., Arulrajah. A., Potential Use of Recycled Crushed Concrete-Recycled Crushed Glass Blends in Pavement Subbase Applications, GeoCongress, 2012, 3662-71.

[32] Arulrajah. A., Piratheepan. J., Aatheesan. T., Bo. M., Geotechnical Properties of Recycled Crushed Brick in Pavement Applications. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 10:1444-52.

[33] Arulrajah. A., Disfani. M. M., Horpibulsuk. S., Suksiripattanapong. C., Prongmanee. N., Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications, 2014, 58:245-57.

[34] Khalaf, F. M., Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18: 518-526.

[35] Silva. R. V., de Brito. J., Dhir. R. K., Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, Journal of Construction and Building Materials, 2014, 65:201-17.

[36] Sajedi, S. F., Razak, H. A., Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars, Journal of Construction and Building Materials, 2011, 25(4), pp. 2036-2045.

[37] Debib, F., Kenai, S., The use of coarse and fine crushed brickd as aggregate in concrete, Journal of Construction and Building Materials, 2008, 22, pp. 886-893.

[38] Gómez-Soberón, J., Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, Journal of Cement and Concrete Research, 2002, 32 (8), pp. 1301-1311.

[39] Malhorta, V.M., Neville, A., Symposium on concrete technology in the use of demolition waste in concrete , by wain Wright, Pj26, 1995, pp. 179-197.

[40] Kasai, Y., Demolition and reuse of concrete and masonary, Reuse of Demolition Waste, vol. 2. London, Great Britain: Chapman and Hall, 1988.

[41] Hansen, T.C., Recycling of demolished concrete and masonry, RILEM TC 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete. London, Great Britain: E&FN Spon, 1992.

[42] Mousavi, S. Y., Charkhtab, Sh., Mozaffari Bandboni, M., Evaluation of Resistance to Impact of Recycled Concrete Containing Brick Wastes, 7th Annual Iranian Concrete Conference, 2015.

[43] de Brito. J., Pereira. A.S., Correia. J.R., Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled ehavio aggregate, Journal of Cement and Concrete Research, 2005, 27:429-433.

[44] RILEM "Specifications for concrete with recycled aggregates". Materials and Structures, 27, 173, 557-559, 1994.

[45] LNEC-E471, Guide for the use of coarse recycled aggregates in concrete (in Portuguese). National laboratory of Civil Engineering (Laboratório Nacional de Engenharia Civil LNEC), Portugal, 6 p, 2006.

[46] Rao. A., Jha. K. N., Misre. S., Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, Journal of Resources and Conservation and Recycling, 2007, 50: 71-78.

[47] Dhir, R. K., and Kevin A. Paine. Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high-strength concrete. 1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management. University of Bath, 2004.

[48] Etxeberria, A., Miren, E., Vázquez, A., Barra, M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, Journal of Cement and concrete research, 37, 5, 735-742, 2007.

[49] Yang, K. H., Chung, h. S., Ashour. A., Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. ACI Materials Journal, 2008, 150, 3, 289-296.

[50] Limbachiya, M. C., Coarse recycled aggregates for use in new concrete, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability, 2004, 157, 2. Thomas Telford Ltd.

[51] J. Čejka , H. Van Bekkum, A. Corma and F. Schueth, Introduction to Zeolite science and practice, Amsterdam: Elsevier, 2007, pp. 999-1035.

[52] A. A. Ramezanianpour, A. Kazemian, M. Sarvari and B. Ahmadi, Use of Natural Zeolite to Produce Self-Consolidating Concrete with Low Portland Cement Content and High Durability, Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, Vol. 25, No. 5, pp. 589-596.

[53] D. Jana , A new look to an old pozzolan, clinoptilolite – a promising pozzolan in concrete, in 29th ICMA conference on cement microscopy, Quebec City, 2007.

[54] Tam, T., Vivian, W.Y., Gao, X. F.,Chi, M., Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Journal of Cement and concrete research, 2005, 35, 6, 1195-1203.

[55] Iranian Management Organization, Iranian Concrete Code (ICC). 6ed, 120, Tehran, Iran, 2003.

[56] ASTM C192 / C192M-16a.; Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, 2016.

[57] ASTM C39/C39M-18.; Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens , ASTM International, West Conshohocken, 2007.

[58] ASTM C469 / C469M-14.; Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, 2014.

[59] ASTM C496 / C496M-11.; Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, 2004.

[60] ASTM C597-16.; Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, 2016.

[61] Whitehurst, E. A., Soniscope tests concrete structures. Journal Proceedings, 1951, 47, 2, 433-444.

[62] Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., Leelawat, T., Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structuresand Buildings, 1999 134, 3.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Azhdarizadeh, S. F. Sajedi, Evaluation of Natural Zeolite Effect on the Mechanical Properties of Concrete Containing Coarse Masonry Recycled Aggregates, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1671-1686.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17090.6458

این صفحه عمداً خالی است