بررسی مشخصات مکانیکی بلند مدت (۳ ساله) بتن حاوی سنگدانه بازیافتی و پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس

میلاد عقیلی لطف[۱]، امیرمحمد رمضانیان پور[۲*]، محمد یاسر چمنی[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

ramezanian@ut.ac.ir

چکیده

از مسائل مطرح در زمینه‌ی استفاده از سنگدانه بازیافتی[۱] و پوزولان‌های جایگزین سیمان، عملکرد بلند مدت آن‌ها است. به‌منظور بررسی این مسئله، با استفاده از یک نوع درشت‌دانه بازیافتی و دو نوع پوزولان (میکروسیلیس و زئولیت)، در مجموع ۱۲ طرح اختلاط طراحی و ساخته شد. بررسی نتایج عملکرد مکانیکی نشان داد که تا سن ۲۸ روز، استفاده از میکروسیلیس و زئولیت باعث بهبود مقاومت‌های فشاری و کششی به ترتیب ٪۱۱-۱۷ و ٪۲-۳۳ شد، اما در بلندمدت اثر پوزولان‌های مصرفی کاهش یافت و به ٪۲-۱۰ و ٪۵-۸ رسید. همچنین داده‌های درصد جذب آب و عمق نفوذ آب نشان داد که استفاده از میکروسیلیس تأثیر بیشتری برای بهبود خواص دوامی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی نسبت به زئولیت دارد اما خواص دوامی همچنان ضعیف‌تر از نمونه‌ی بدون سنگدانه بازیافتی است.

کلمات کلیدی: سنگدانه بازیافتی، زئولیت، میکروسیلیس، بتن بازیافتی، خواص بلندمدت

۱- مقدمه

بتن پس از آب، به‌عنوان پرمصرف‌ترین محصول اصلی در صنعت ساخت، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در عصر کنونی، افزایش سریع جمعیت در چند دهه‌ی اخیر به همراه بالارفتن استانداردهای کیفی سطح زندگی، گسترش سریع صنعت ساخت را در پی داشته است [۱]. همین مسئله نتیجتاً تقاضای قابل ملاحظه‌ای در بتن، سیمان، فولاد، مصالح و منابع طبیعی ایجاد کرده است. به طوری کلی در تامین دو جزء سیمان و مصالح سنگدانه‌ای برای تولید بتن، صنعت ساخت با مشکلات عدیده‌ای مواجه است. در خصوص سیمان باید عنوان نمود که در حال حاضر ٪۷ از دی اکسید کربن در جهان ناشی از فعالیت کارخانه های تولید سیمان است [۲].

از دهه‌های گذشته تاکنون، کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی در تولید بتن محور کلیدی بسیاری از پژوهش‌های حوزه تکنولوژی بتن بوده است [۳–۹]. اما علی‌رغم انجام همه این پژوهش‌ها به دلیل عدم اولویت مبانی توسعه پایدار در بسیاری از کشورهای درحال‌توسعه از جمله ایران، همچنان این مباحث علمی صرفاً در حوزه‌های آکادمیک بحث‌وبررسی می‌شوند و در کارهای واقعی موضوعیت پیدا نکرده‌اند. تا آنجا که در جدیدترین ویرایش آیین‌نامه بتن ایران (آبا) بعد از مدت‌ها، امکان استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در تولید بتن معمولی تا سقف ٪۲۵ مجاز اعلام شد که مجدداً در اصلاحیه آیین‌نامه، این بند حذف گردید [۱۰]. با این حال پژوهشگران فعال در حوزه دانش تکنولوژی بتن پژوهش های متعددی را پیرامون کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی در تولید بتن و ملات تعریف و اجرا کرده اند [۱۱–۱۴]. همه این پژوهش ها با هدف ایجاد یک بستر مناسب علمی و تولید اسناد علمی پشتیبان برای سیاست گذاری در حوزه توسعه پایدار و مدیریت کلان منابع کشور، طراحی و اجرا شده اند. در ادامه بحث، بیان مسئله و نوآوری های پژوهش حاضر شرح داده خواهد شد.

سنگدانه‌های بازیافتی عموماً عملکرد کیفی به‌مراتب کمتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارند که در تحقیقات گذشته به این مهم اشاره شده است [۱۵–۱۷].

از جمله مشخصه‌ها و ویژگی‌های متفاوت سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، جذب آب بیشتر و سریع‌تر، چگالی کم‌تر، مقاومت کم‌تر در برابر سایش و شکل شکسته و زاویه‌دار است. همه‌ی تفاوت‌های بیان شده مستقیماً بر کیفیت بتن ساخته شده تأثیر می‌گذارد. از طرف دیگر بتن

[۱] Recycled Concrete Aggregate (RCA)

اولیه یا بتن مادر نیز معمولاً بر مشخصه‌های رفتاری، مکانیکی و عملکردی سنگدانه‌های بازیافتی تولیدی اثرگذار است. در برآیند پژوهش‌های صورت‌گرفته بر روی بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی، عموماً جذب آب بیشتر، چگالی کم‌تر، مقاومت فشاری، کششی و خمشی کم‌تر و خواص دوامی ضعیف‌تری نسبت به بتن معمولی مشاهده شده است [۱۸–۲۰]. لذا در بخشی از پژوهش های تعریف شده در این حوزه، ارائه رویکردهایی که بتواند عملکرد کیفی و رفتاری بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی را بهبود بخشد، مورد توجه ویژه قرار گرفته اند. یکی از این رویکردها، استفاده از مواد جایگزین سیمان مانند پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی است. استفاده از این مواد برای بهبود خواص بتن و سنگدانه‌ها موضوع تحقیقات مختلفی در دهه های گذشته تاکنون بوده است [۲۱,۲۲]. این مواد دارای اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیم واکنش‌زای زیادی بوده و با کلسیم هیدروکسید حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و CSH[۱] تولید می‌کنند که عامل اصلی افزایش مقاومت بتن است و به این صورت باعث بهبود ریزساختار بتن و پر شدن خلل و فرج موجود در بتن می‌شوند [۲۳]. از طرف دیگر، استفاده از خود این پوزولان‌ها به‌عنوان یک رویکرد مبتنی بر توسعه پایدار مطرح است. استفاده از این مواد باعث کاهش آلودگی ناشی از محصولات جانبی صنایع دیگر می‌شود به این صورت که به جای دفن این مواد که برای محیط زیست نیز مضر هستند، به‌عنوان ارزش افزوده در صنعت ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین با جایگزینی این مواد با سیمان، نیاز به سیمان نیز کاهش یافته و مواد اولیه‌ی مورد نیاز و آلودگی ناشی از تولید سیمان نیز کاهش می‌یابد.

در تحقیقی که توسط دیلباس و همکاران[۲] [۲۴] با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ انجام گرفت نمونه‌هایی با جایگزینی سیمان و میکروسیلیس ساخته شدند. نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه بازیافتی و بدون میکروسیلیس دچار افت مقاومت فشاری شدند و نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافتی با ٪۵ و ٪۱۰ میکروسیلیس افزایش و کاهش در مقاومت فشاری را تجربه کردند.

در تحقیق دیگری توسط کو و همکاران[۳] [۲۵] با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ افزایش مقاومت در سنین مختلف برای نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافتی و میکروسیلیس بررسی شد. در این تحقیق نمونه‌های حاوی درشت‌دانه طبیعی و ٪۵۰ و ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی با و بدون میکروسیلیس ساخته شدند و آزمایش‌های مختلفی روی آن‌ها انجام شد. در این تحقیق نمونه‌های حاوی به ترتیب ٪۰، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی و ٪۱۰ میکروسیلیس در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه‌ی شاهد ساخته شده با درشت‌دانه طبیعی بدون میکروسیلیس مقاومت فشاری بیشتری داشتند در حالی که در سن ۹۰ روز مقاومت فشاری افزایش کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشت که نشان‌دهنده‌ی تأثیر بیشتر میکروسیلیس در سنین کم است و هرچه سن نمونه‌ها بالاتر می‌رود اختلاف مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد.

در تحقیقی که توسط جلیلی فر و ساجدی [۲۶] با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۶ انجام گرفت از زئولیت به‌عنوان ماده‌ی افزودنی استفاده شد. با افزایش درصد جایگزینی زئولیت در بتن، مقاومت فشاری کاهش و جذب آب افزایش یافت و وضعیت ریزساختار بتن افول کرده و ضعیف‌تر شد و در ٪۳۰ جایگزینی سیمان با زئولیت، ترک‌هایی از ناحیه‌ی انتقال به درون خمیر سیمان تشکیل شده بود.

تام و تام[۴] [۲۷] به‌منظور بهبود در رفتار مقاومت مکانیکی بتن بازیافتی از میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین قسمتی از سیمان مصرفی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ استفاده کردند. نسبت‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ٪۳۰ درشت‌دانه طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی بتنی انتخاب شد و فرآیند اختلاط اجزای بتن با روش‌های اختلاط یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای صورت پذیرفت. در این پژوهش جامع سه گروه طرح اختلاط در نظر گرفته شد؛ در گروه اول بتن بازیافتی بدون میکرو سیلیس و روش اختلاط یک مرحله‌ای در نظر گرفته شد؛ در گروه دوم ٪۲ از وزن درشت‌دانه بازیافتی بتنی با میکرو سیلیس جایگزین و روش اختلاط دومرحله‌ای اعمال شد و در گروه سوم که بیشترین مقدار مواد سیمانی را شامل می‌شد، علاوه بر کاربرد میکرو سیلیس، درصدی از درشت‌دانه بازیافتی نیز مجدداً با سیمان پرتلند جایگزین و روش اختلاط دومرحله‌ای استفاده شد. تحلیل نتایج مقاومت فشاری در دو سن ۲۸ و ۵۶ روزه نشان داد که طرح‌های گروه سوم بهترین عملکرد مکانیکی را دارند و طرح‌های گروه دوم نیز عملکرد

[۱] Calsium Silicate Hydrate

[۲] Dilbas

[۳] Kou

[۴] Tam and Tam

بهتری نسبت به طرح‌های گروه اول دارند. محققین اذعان داشتند که در گروه دوم به دلیل کاربرد میکرو سیلیس، ناحیه انتقال سطحی بهبود مطلوبی یافته است و همچنین تخلخل ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی نیز کمتر می‌شود؛ اما در گروه سوم این بهبود مضاعف شده و عملاً لایه‌ای ضخیم از ملات سیمانی جدید در ناحیه انتقال سطحی قدیمی شکل می‌گیرد و ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی نیز به متراکم‌ترین حالت خود تبدیل می‌شوند.

کو و پون [۱] [۲۸] مشاهده کردند که بتن بازیافتی ساخته شده با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵۵ و ۰/۴۵ با ٪۲۵ خاکستر بادی در سن ۹۰ روزه مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد، اما افزودن ٪۳۵ خاکستر بادی مقاومت فشاری بتن بازیافتی را کاهش می‌دهد. کرینالدسی و موریکونی [۲] [۲۹] نیز در بتن ساخته شده با ٪۱۰۰ درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی ٪۳۰ خاکستر بادی و ٪۱۵ میکروسیلیس به‌کار بردند. در این پژوهش از نسبت آب به سیمان ۰/۴ برای بتن‌های بازیافتی استفاده شد و برای کنترل کارایی از افزودنی‌های شیمیایی استفاده شد. بتن بازیافتی دارای خاکستر بادی یا میکرو سیلیس، مقاومت فشاری یکسان یا بیشتری نسبت به بتن بازیافتی (در همه سنین) داشت، این موضوع بدان معناست که با افزودن ٪۱۵ میکروسیلیس به بتن حاوی ٪۱۰۰ سنگدانه بازیافتی می‌توان عملکرد مقاومتی بسیار بهتری نسبت به بتن معمولی داشت.

تانگچیراپات [۳] و همکاران [۳۰] تأثیر افزودن خاکستر شلتوک برنج [۴] را بر روی مقاومت مکانیکی بتن ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۸ و ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی، ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی و ٪۵۰ ریزدانه بازیافتی و ٪۱۰۰ درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی بررسی کردند.

در این پژوهش سیمان پرتلند در نسبت‌های جایگزینی ۲۰، ۳۵ و ٪۵۰ با خاکستر شلتوک برنج جایگزین شد. نتایج نشان داد که برای بتن ساخته شده با ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی، افزودن ۲۰ یا ٪۳۵ خاکستر شلتوک برنج منجربه بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری می‌گردد. همچنین جایگزینی ٪۵ سیمان پرتلند با خاکستر شلتوک برنج در همه طرح‌ها منجربه افت شدید مقاومت (کمترین مقاومت فشاری) شد.

یکی از موضوعاتی که در کاربرد سنگدانه بازیافتی و پوزولان‌ها در تولید بتن مورد پرسش است، خواص بلندمدت بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی و پوزولان است. این مسئله باتوجه‌به نقش‌آفرینی پوزولان‌ها در افزایش مقاومت مکانیکی بسیار حائز اهمیت است.

برای استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی در کشورها استانداردهایی وضع شده است [۳۱]. این استانداردها سنگدانه‌های بازیافتی را با توجه به آلودگی آن‌ها، کیفیت و مقاومت آن‌ها دسته‌بندی کرده و اجازه‌ی استفاده تا حد مشخصی از آن‌ها را می‌دهند. در ایران اما استاندارد مشخصی برای این سنگدانه‌ها وجود ندارد.

همچنین خود عملکرد سنگدانه بازیافتی در بلندمدت نیز سؤال‌برانگیز است؛ لذا در برنامه این پژوهش یک نوع درشت‌دانه بازیافتی با نسبت‌های جایگزینی ۳۰، ۵۰ و ٪۱۰۰ و همچنین دو نوع پوزولان شامل ٪۸ میکروسیلیس و ٪۱۵ زئولیت در طرح‌های اختلاط مورداستفاده قرار گرفت. همچنین نمونه‌های با سن سه‌ساله جهت ارزیابی عملکرد مکانیکی بلندمدت مورد آزمایش قرار گرفتند. در بخش بعدی روش تحقیق این پژوهش آورده شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- سیمان و مصالح سنگدانه‌ای

در این تحقیق یک نوع سنگدانه‌ی بازیافتی و یک نوع سنگدانه‌ی طبیعی استفاده شده است. سنگدانه‌های بازیافتی حاصل خردایش دستی نمونه‌های مکعبی فشاری (۱۵*۱۵*۱۵ cm) هستند و در محیط آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران تولید شدند. این نمونه‌ها همگی دارای طرح اختلاط واحد بودند و در بخشی از پروژه بازار بزرگ ایران (ایران مال) در حدفاصل سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۵ مورداستفاده قرار گرفته بودند. همچنین سن نمونه‌ها در حین خردایش به‌صورت متوسط ۶ ماه برآورد شده بود. برای تهیه‌ی این سنگدانه‌ها استانداردی مورد استفاده به دلیل عدم وجود استانداردی در کشور مد نظر نبود.

در آزمایش جذب آب، درشت‌دانه‌ی بازیافتی مورداستفاده جذب آب بسیار بیشتری نسبت به درشت‌دانه‌ی طبیعی داشت و ۱/۷۵ برابر درشت‌دانه‌ی طبیعی جذب آب داشت و چگالی درشت‌دانه‌ی بازیافتی نیز ٪۱۰ از درشت‌دانه‌ی طبیعی کمتر

[۱] Kou and Poon

[۲] Corinaldesi and Moriconi

[۳] Thangchirapat

[۴] Rice husk-bark ash (RHBA)

بود. در آزمایش سایش لس‌آنجلس نیز باید عنوان نمود که سنگدانه بازیافتی به‌مراتب عملکرد کیفی ضعیف‌تری نسبت به سنگدانه طبیعی داشت. در این آزمایش شاخص ٪۱۵/۹۳ و ٪۲۷/۷۲ به ترتیب برای سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی محاسبه شد. همان‌طور که در پیشینه تحقیقات اشاره شد، خمیر سیمان هیدراته شده چسبیده به سنگدانه‌ها در درشت‌دانه بازیافتی کیفیت عملکردی را به‌مراتب نسبت به مصالح سنگدانه‌ای طبیعی کاهش می‌دهد. تخلخل بیشتر و همچنین وجود ترک‌های متعدد بین خمیر سیمان هیدراته شده و سنگدانه در درشت‌دانه بازیافتی از دیگر علل کیفیت عملکردی پایین سنگدانه‌های بازیافتی است.

در جدول ۱ مشخصات طرح اختلاط بتن مادر سنگدانه‌های بازیافتی تولید شده آورده شده است همچنین برای یکسان بودن شکل سنگدانه‌ها، در سنگدانه‌های طبیعی نیز از سنگدانه‌های شکسته استفاده شد و برای جایگزینی سنگدانه‌ها، فقط درشت‌دانه‌ها با درشت‌دانه‌ی بازیافتی جایگزین شدند و در تمام نمونه‌ها از ریزدانه‌ی طبیعی استفاده شد. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورداستفاده در شکل ۱ آورده شده است. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۲ آورده شده‌اند. سیمان استفاده شده نیز سیمان تیپ ۲ بود و از میکرو سیلیس و زئولیت به‌عنوان مواد جایگزین سیمان استفاده شد که مشخصات شیمیایی به دست آمده از آزمایش XRF هرکدام در جدول ۳ آمده است.

۲-۲- طرح مخلوط

در این تحقیق ۱۲ طرح اختلاط جهت دستیابی به اهداف تحقیق طراحی شد. مقاومت ۲۸ روزه ۴۰ MPa مبنای طراحی اختلاط طرح شاهد قرار داده شد. برای این منظور نسبت آب به سیمان ۰/۵ به دست آمد. سپس درشت‌دانه‌های طبیعی با درصدهای ٪۳۰، ٪۵۰ و ٪۱۰۰ با درشت‌دانه‌ی بازیافتی جایگزین شدند. همچنین سیمان نیز با میکرو سیلیس و زئولیت به ترتیب با درصدهای ۸ و ٪۱۵ جایگزین شد و برای رسیدن به کارایی مناسب مقادیر مناسبی از فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی کربکسیلیک اتر اضافه شد. اختلاط بتن باتوجه‌به استاندارد ASTM C ۱۹۲ [۳۲] انجام شد اما به دلیل جذب آب بالای سنگدانه‌های بازیافتی، پیش از اختلاط، سنگدانه‌های بازیافتی به مدت ۶ ساعت در آب قرار داده شدند و روی آن‌ها با پلاستیک پوشانده شد. آب مورد استفاده برای اشباع سنگدانه‌ها ٪۶۰ از آب کل طرح اختلاط بود. بتن به روش معمول ساخته شد. بدین صورت که تمام مصالح به درون میکسر ریخته شده و ۳ دقیقه مخلوط شد و سپس نمونه‌ها گیری شد. پس از ساخت، قالب های حاوی بتن تازه به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگه داری شدند. بعد از خروج نمونه‌ها از قالب،

جدول ۱- طرح مخلوط بتن مادر

سیمان (Kg/m^3)	۴۲۰
سنگدانه ۱۹-۹/۵ mm (Kg/m^3)	۳۱۵
سنگدانه ۹/۵-۴.۷۵ mm (Kg/m^3)	۲۵۸
سنگدانه ۴.۷۵-۰ mm (Kg/m^3)	۱۲۳۸
آب (Kg/m^3)	۲۱۰

جدول ۲ – نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح سنگدانه‌ای مورداستفاده

	ریزدانه‌ی طبیعی	درشت‌دانه‌ی طبیعی	درشت‌دانه‌ی بازیافتی
جذب آب حالت اشباع (٪)	۳/۴۱	۲/۷۰	۷/۴۵
چگالی SSD (ton/m^3)	۲/۵۱	۲/۶۲	۲/۳۵
آزمایش سایش لس‌آنجلس (٪)	*	۱۵/۹۳	۲۷/۷۲

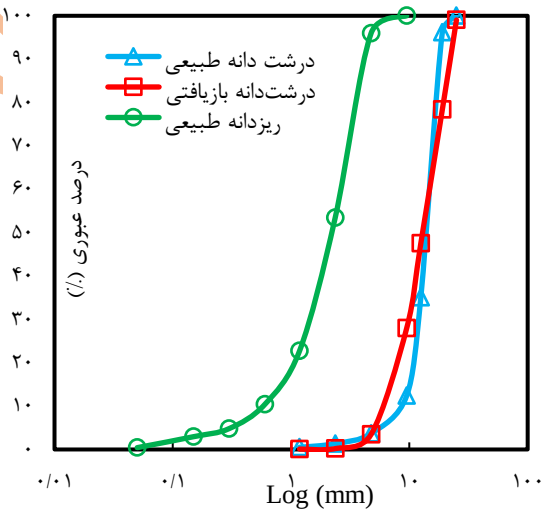
جدول ۳ – مشخصات شیمیایی سیمان، میکرو سیلیس و زئولیت مصرفی در پژوهش

ترکیب شیمیایی	سیمان	میکروسیلیس	زئولیت
SiO_2 (%)	۲۷/۳	۸۶/۱۸	۶۴/۹
Al_2O_3 (%)	۴/۶	۱/۴۴	۱۲/۳
Fe_2O_3 (%)	۲/۷	۰/۲	۰/۳۶
CaO (%)	۴۶/۷	۳/۰۶	۲/۱
MgO (%)	۳/۵	۱/۳۲	۰/۹
SO_3 (%)	۲/۰۴	۰/۳۳۷	۰/۱۹
Na_2O (%)	۰/۳۴	-	-
K_2O (%)	۰/۵۲	-	-

نمونه‌های بتنی تا زمان انجام آزمایش در آب آهک اشباع در دمای ۲۰ ± ۲ °C نگهداری شدند. طرح اختلاط‌های ساخته شده در این تحقیق در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ - مشخصات طرح اختلاط‌های طراحی شده در پژوهش حاضر

	سیمان (kg/m³)	میکرو سیلیس (kg/m³)	زئولیت (kg/m³)	آب (kg/m³)	w/c	ریزدانه (kg/m³)	درشت‌دانه‌ی طبیعی (kg/m³)	درشت‌دانه‌ی بازیافتی (kg/m³)	فوق روان‌کننده (gr/m³)	اسلامپ (cm)
NC	۳۵۰	-	-	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۸۴۸	۰	۹۵۰	۸
RCAC-۳۰	۳۵۰	-	-	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۵۹۴	۲۲۸	۱۲۴۰	۸/۵
RCAC-۵۰	۳۵۰	-	-	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۴۲۴	۴۲۴	۱۲۰۰	۷/۵
RCAC-۱۰۰	۳۵۰	-	-	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۰	۷۶۱	۱۲۳۰	۸
SFRCAC	۳۲۲	۲۸	-	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۸۴۸	۰	۱۴۴۴	۷/۵
SFRCAC-۳۰	۳۲۲	۲۸	-	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۵۹۴	۲۲۸	۱۴۵۱	۸
SFRCAC-۵۰	۳۲۲	۲۸	-	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۴۲۴	۴۲۴	۱۴۹۲	۹
SFRCAC-۱۰۰	۳۲۲	۲۸	-	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۰	۷۶۱	۱۴۷۴	۸
ZRCAC	۲۹۷/۵	-	۵۲/۵	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۸۴۸	۰	۱۵۲۶	۷
ZRCAC-۳۰	۲۹۷/۵	-	۵۲/۵	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۵۹۴	۲۲۸	۱۴۹۸	۷/۵
ZRCAC-۵۰	۲۹۷/۵	-	۵۲/۵	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۴۲۴	۴۲۴	۱۵۷۱	۷/۵
ZRCAC-۱۰۰	۲۹۷/۵	-	۵۲/۵	۱۷۵	۰/۵	۹۷۹	۰	۷۶۱	۱۵۵۶	۸



شکل ۱ دانه‌بندی سنگدانه‌های مورداستفاده

۲-۳- آزمایش‌های انجام شده

در این پژوهش آزمایش‌های مکانیکی و دوامی برای سنجش عملکرد کیفی سنگدانه‌ها و بتن انجام گرفت. برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوامی سنگدانه‌ها آزمایش سایش لس‌آنجلس طبق استاندارد ASTM C ۱۳۱ [۳۳] انجام گرفت و برای بررسی ریزساختار سنگدانه‌ها از آزمایش SEM استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوامی نمونه‌های بتنی ساخته شده، آزمایش‌های متعددی در برنامه پژوهش در نظر گرفته شد. در این برنامه، مقاومت فشاری با استاندارد BS EN ۱۲۳۹۰-۳ [۳۴] در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ ساله بر روی سه نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵*۱۵*۱۵ سانتی متر مکعب، آزمایش مقاومت کششی باتوجه به استاندارد ASTM C ۴۹۶ [۳۵] بر روی دو نمونه استوانه‌ای ۱۵*۳۰ در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ ساله انجام گرفت. همچنین آزمایش جذب آب با استاندارد ASTM C ۶۴۲ [۳۶] بر روی سه نمونه‌ی مکعبی و آزمایش عمق نفوذ آب با استاندارد DIN ۱۰۴۸ [۳۷] در سن ۲۸ روزه بر روی دو نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۵*۳۰ سانتی متر جهت ارزیابی عملکرد دوامی نمونه‌های بتنی درنظر گرفته شد. در بخش بعد نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی مصالح سنگدانه‌ای و نمونه‌های بتنی آورده شده است.

۳- تجزیه‌وتحلیل نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۵ و شکل ۲ آورده شده است. آزمایش مقاومت فشاری برای سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ ساله انجام گرفت. مقاومت فشاری طرح شاهد ساخته شده با سنگدانه‌ی طبیعی و بدون افزودن پوزولان‌ها (طرح NC) در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب ۳۳/۳ MPa، ۴۰/۱ MPa، ۵۳/۶ MPa بود. در سنین ۷ و ۲۸ روزه، نمونه‌های ساخته شده به ترتیب ٪۶۲ و ٪۷۵ مقاومت نهایی در سه سال را کسب کرده بودند.

مقاومت فشاری طرح SFNC (طرح شاهد + ٪۸ میکرو سیلیس) و ZNC (طرح شاهد+ ٪۱۵ زئولیت)، هرکدام در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب MPa ۳۶/۳، MPa ۴۵/۷، MPa ۵۳/۱ و MPa ۳۵، MPa ۴۳/۹، MPa ۴۸/۵ بود که نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت استفاده از هر دو پوزولان در سنین کم است (۷ و ۲۸ روزه) به‌گونه‌ای که طرح‌های SFNC و ZNC هرکدام در سنین ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ٪۱۰ و ٪۱۴، ٪۵ و ٪۹ افزایش مقاومت فشاری را نسبت به طرح شاهد (NC) نشان می‌دهند. در سن ۳ سال نیز همین طرح‌ها به ترتیب صفر درصد و ٪۱۰ کاهش در مقاومت فشاری را نسبت به طرح شاهد نشان دادند که نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش سن نمونه بتنی تا ۳ سال، عملاً پوزولان‌ها تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری کسب شده نسبت به طرح شاهد ندارند. به‌گونه‌ای که ٪۸ میکرو سیلیس در سن ۳ سال تأثیر بسیار اندک بر افزایش مقاومت فشاری و ٪۱۵ زئولیت نیز تأثیر بسیار اندک بر کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد داشتند. همچنین درصد کسب مقاومت نمونه‌های SFNC و ZNC نسبت به مقاومت در سن ۳ ساله در سنین ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ٪۶۸ ، ٪۸۶ و ٪۷۲ ، ٪۹۰ است که نشان‌دهنده‌ی آن است که سرعت کسب مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی پوزولان بیشتر است. به تعبیر بهتر در سن ۲۸ روزه عملاً حدود ٪۹۰ مقاومت فشاری ۳ ساله در هر دو طرح کسب شده است. همچنین این نتایج بیان می‌کنند که عملاً در بلندمدت پوزولان‌های میکرو سیلیس و زئولیت در درصدهای مورداستفاده در این پژوهش، تأثیر چندانی بر بهبود مقاومت فشاری نخواهند داشت. اگرچه این مسئله باید در نظر گرفته شود که مبنای محاسبه طرح اختلاط حتی در کارهای سازه‌ای، همان سن ۲۸ روزه بتن است و عملاً مقاومت فشاری بلندمدت مدنظر طراحی قرار نمی‌گیرد. از دیگر سو با بررسی طرح اختلاط‌های دارای درشت‌دانه بازیافتی نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی، مقاومت فشاری تمام طرح‌ها کاهش‌یافته است. به صورتی که در طرح RCAC-۳۰، در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب به مقاومت فشاری MPa ۲۸/۷ و MPa ۳۵/۱ و MPa ۴۴/۹ اخذ شده است که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ٪۱۴ و ٪۱۲ و ٪۱۶، کاهش در مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد متناظر است. به همین ترتیب در طرح RCAC-۵۰ نیز مقاومت فشاری MPa ۲۷/۱ و MPa ۳۲/۵ و MPa ۴۲/۹ اخذ شد که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ٪۱۹ و ٪۱۹ و ٪۲۰ کاهش در مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد متناظر است. طرح RCAC-۱۰۰ نیز مقاومت فشاری MPa ۲۲/۸ و MPa ۲۹/۸ و MPa ۴۰ را کسب کرد که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ٪۳۲ و ٪۲۶ و ٪۲۵ کاهش در مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد متناظر است.

مقاومت کسب شده در سنین ۷ و ۲۸ روز نسبت به مقاومت در سن ۳ سال در طرح‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی برای طرح‌های RCAC-۳۰ و RCAC-۵۰ و RCAC-۱۰۰ به ترتیب ٪۶۴ و ٪۷۸، ٪۶۳ و ٪۷۶، ٪۵۷ و ٪۷۵ بود. به تعبیر بهتر با استفاده از درشت‌دانه‌ی بازیافتی در طرح‌های اختلاط، در سن ۷ روز سرعت کسب مقاومت فشاری به‌خصوص در طرح RCAC-۱۰۰ اندکی کاهش یافت اما در سن ۲۸ روز با همان سرعت کسب مقاومت فشاری در بتن با درشت‌دانه‌ی طبیعی، مقاومت کسب شد.

داده‌های سن ۳ ساله نیز نشان می‌دهد که در مقایسه با طرح شاهد، طرح RCAC-۳۰، ٪۱۶، طرح RCAC-۵۰ ٪۲۰ و طرح RCAC-۱۰۰ ٪۲۵ مقاومت فشاری کمتری نسبت به طرح شاهد دارند اما با مقایسه داده‌ها با مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح شاهد (MPa ۴۰/۱) می‌توان نتیجه گرفت که با گذشت ۳ سال از ساخته شده بتن حاوی ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی، عملاً مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح شاهد به‌صورت کامل حاصل می‌گردد. این نتیجه‌گیری اگرچه ازنقطه‌نظر سن نمونه‌ها مبنای درستی ندارد اما در بسیاری از کاربردها مانند رویه‌های بتنی یا سازه‌هایی که به‌صورت طولانی مدت ساخته می‌شوند، این مسئله می‌تواند حائز اهمیت ویژه‌ای باشد و در طراحی مورد توجه قرار گیرد.

همچنین بررسی داده‌های مقاومت فشاری طرح‌های حاوی ٪۱۵ زئولیت و درشت‌دانه بازیافتی نشان می‌دهد که در طرح ZRCAC-۳۰ مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب به MPa ۳۲/۴ و MPa ۳۹/۵ و MPa ۴۶/۲ اندازه‌گیری شده است که نسبت به نمونه‌های حاوی درشت‌دانه‌های بازیافتی بدون پوزولان با درصد جایگزینی یکسان (RCAC-۳۰) در همین سنین، به ترتیب ٪۱۳ و ٪۱۳ و ٪۳ افزایش در مقاومت فشاری رخداده است.

به همین ترتیب طرح ZRCAC-۵۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به مقاومت فشاری MPa ۲۹/۴ و MPa ۳۷/۲ و MPa ۴۳/۶ رسید که نسبت به طرح RCAC-۵۰ در همین سنین به ترتیب ٪۸ و ٪۱۴ و ٪۲ افزایش در مقاومت فشاری را نتیجه داده است.

طرح ZRCAC-۱۰۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب مقاومت فشاری ۲۴/۳ MPa و ۳۳/۱ MPa و ۴۲/۵ MPa را اخذ نمود که نسبت به طرح RCAC-۱۰۰ در همین سنین، به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ٪۷ و ٪۱۱ و ٪۶ بهبود در مقاومت فشاری هستند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تا جایگزینی ٪۳۰ از درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی مخصوصاً در سنین کم بهبودیافته است اما برای درصدهای جایگزینی بیشتر از ٪۳۰ و سن ۳ سال تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود. کسب مقاومت فشاری در طرح‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی و زئولیت سنین ۷ و ۲۸ روز نسبت به مقاومت در سن ۳ سال برای نمونه‌های ZRCAC-۳۰ به ترتیب ٪۷۰ و ٪۸۶، برای طرح ZRCAC-۵۰ به ترتیب ٪۶۷ و ٪۸۵ و برای طرح ZRCAC-۱۰۰ به ترتیب ٪۵۷ و ٪۷۸ بود که نشان‌دهنده‌ی افزایش سرعت کسب مقاومت در سنین کم است و در سن ۲۸ روز و جایگزینی تا ٪۵۰ سرعت افزایش مقاومت فشاری بیشتر بوده و نمونه‌ها سریع‌تر به مقاومت نهایی رسیده‌اند که ناشی از تأثیر مثبت استفاده از ٪۱۵ زئولیت در افزایش سرعت روند کسب مقاومت فشاری است (تا سن ۲۸ روز). یک نکته حائز اهمیت دیگر مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح ZRCAC-۳۰ است که برابر با ۳۹/۵ MPa محاسبه شده است. مقایسه داده مقاومت فشاری ۲۸ روزه این طرح با مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح شاهد نشان می‌دهد که تا سن ۲۸ روزه تأثیر منفی جایگزینی ٪۳۰ از درشت‌دانه طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی توسط ٪۱۵ زئولیت جبران می‌شود اما بررسی همین طرح در سن ۳ سال نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ٪۱۴ نسبت به طرح شاهد (در سن ۳ ساله) کاهش‌یافته است. مسئله موردتوجه دیگر این است که در سن ۳ سال عملاً جایگزینی ٪۱۵ زئولیت تأثیر قابل قبولی در افزایش و بهبود مقاومت فشاری طرح‌های دارای درشت‌دانه بازیافتی ندارد (٪۳، ٪۲ و ٪۶ به ترتیب به‌ازای نسبت‌های جایگزینی ٪۳۰، ٪۵۰ و ٪۱۰۰). بررسی و تحلیل داده‌های مقاومت فشاری طرح‌های حاوی ٪۸ میکروسیلیس و درشت‌دانه‌های بازیافتی نشان می‌دهد که در طرح‌های SFRCAC-۳۰ و SFRCAC-۵۰ و SFRCAC-۱۰۰ مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال نسبت به نمونه‌های بدون میکرو سیلیس افزایش‌یافته است که نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت جایگزینی سیمان با میکروسیلیس در بتن حاوی درشت‌دانه بازیافتی است. مقاومت فشاری طرح SFRCAC-۳۰ در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب به ۳۳/۶MPa و ۴۱/۲ MPa و۴۶ MPa رسید که نسبت به طرح RCAC-۳۰ به ترتیب ذکر شده دارای ٪۱۷ و ٪۱۷ و ٪۳ بهبود در مقاومت فشاری است که البته مشاهده می‌گردد که در سن ۳ سال تغییر چندانی رخ نداده است.

به همین ترتیب مقاومت فشاری طرح SFRCAC-۵۰ در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب به ۳۰/۷ MPa و ۳۶/۲ MPa و ۴۵/۸ MPa رسید که نسبت به طرح RCAC-۵۰ به ترتیب ذکر شده دارای ٪۱۳ و ٪۱۱ و ٪۷ بهبود در مقاومت فشاری است. مقاومت فشاری طرح SFRCAC-۱۰۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب به ۲۵/۷ MPa و ۳۳/۹ MPa و ۴۴/۲ MPa رسید که نسبت به طرح RCAC-۱۰۰ به ترتیب ذکر شده دارای ٪۱۳ و ٪۱۴ و ٪۱۰ بهبود مقاومت فشاری است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سن نمونه‌ها تأثیر میکرو سیلیس بر افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در سن ۳ سال با افزایش درصد جایگزینی، درصد افزایش مقاومت نیز افزایش یافت که نشان از تأثیر مثبت میکرو سیلیس بر مقاومت نمونه‌ها حتی در سن ۳ سال است (٪۳، ٪۷ و ٪۱۰ به ترتیب برای نسبت جایگزینی ٪۳۰، ٪۵۰ و٪ ۱۰۰). مقایسه این نتایج با نتایج مقاومت فشاری ۳ ساله طرح‌های دارای ٪۱۵ زئولیت نشان می‌دهد که عملکرد بلندمدت میکروسیلیس در روند بهبود مقاومت فشاری نسبت به زئولیت مطلوب‌تر بوده است.

در بررسی نتایج مقاومت فشاری مسئله‌ای که حائز اهمیت است، مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح SFRCAC-۳۰ است که برابر با ۴۱/۲ MPa محاسبه شد. مقایسه این مقاومت فشاری با مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح شاهد (۴۰/۱ MPa) نشان می‌دهد که جایگزینی ٪۸ از سیمان مصرفی با میکرو سیلیس تأثیر منفی جایگزینی ٪۳۰ درشت‌دانه طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی بر مقاومت فشاری را به‌صورت کامل جبران می‌کند و حتی به میزان ۱ MPa مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد اما بررسی همین طرح در سن ۳ سال نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ٪۱۴ نسبت به طرح شاهد (در سن ۳ ساله) کاهش‌یافته است.

با مقایسه‌ی مقاومت فشاری نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد، دیده می‌شود که استفاده از پوزولان‌ها در سن ۲۸ روز باعث بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ی با سنگدانه‌ی طبیعی و پوزولان (SFNC و ZNC) نسبت به نمونه‌ی بدون پوزولان شده است. این بهبود برای نمونه‌های با پوزولان و سنگدانه‌ی بازیافتی نیز اتفاق افتاده است و این نمونه‌ها مقاومت فشاری

بهتری نسبت به نمونه‌ی بدون پوزولان و با سنگدانه‌ی بازیافتی داشتند. اما در سن ۳ سال تأثیر پوزولان کاهش‌یافته و مقاومت فشاری نمونه‌ها به نمونه‌ی شاهد نزدیک شده‌اند.

نمونه‌های با پوزولان و سنگدانه‌ی طبیعی (SFNC و ZNC) در سن ۳ سال مقاومت فشاری کمتری داشتند که نشان‌دهنده‌ی اثر بیشتر پوزولان‌ها در سن کم است و در سن ۳ سال تأثیر ناچیز یا حتی منفی داشته‌اند.

همچنین می‌توان دید که استفاده از زئولیت و میکروسیلیس در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی طبیعی در سن ۲۸ روز باعث افزایش مقاومت فشاری و در سن ۳ سال باعث کاهش مقاومت فشاری شده است که نشان‌دهنده‌ی اثر بیشتر این دو ماده در سنین کم است و با افزایش سن در نمونه‌های بدون پوزولان حتی تأثیر منفی نیز داشته‌اند. با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌ی طبیعی با بازیافتی اثرگذاری این دو پوزولان افزایش یافته و مانند قبل در سن ۲۸ روز تأثیرگذاری این دو ماده بیشتر بوده و با افزایش سن اختلاف میان نمونه‌های دارای درصد جایگزینی یکسان و دارای پوزولان و بدون پوزولان کاهش یافته است که نشان‌دهنده‌ی اثرگذاری بیشتر این دو ماده در سنین کم است.

۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی در جدول ۵ و شکل ۳ آورده شده است. روند کلی موجود در آزمایش مقاومت کششی شبیه به روند موجود در آزمایش مقاومت فشاری است. مقاومت کششی نیز با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی روندی کاهشی را دنبال می‌کند. در طرح RCAC-۳۰ نسبت به نمونه‌ی NC در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب ٪۲ و ٪۱۱ و ٪۱۴ کاهش مقاومت کششی رخ‌داده است که نشان‌دهنده‌ی تأثیر منفی سنگدانه‌ی بازیافتی بر مقاومت کششی است. در طرح RCAC-۵۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب ٪۷ و ٪۱۷ و ٪۱۴ کاهش مقاومت کششی و در طرح RCAC-۱۰۰ در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال نیز ٪۳۳ و ٪۴۵ و ٪۳۸ کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه‌ی شاهد اتفاق افتاده است.

از دیگر سو با افزودن ٪۸ میکرو سیلیس، مقاومت کششی نمونه‌ی SFNC در سنین ۷ و ۲۸ روز ۳ سال به ترتیب به ۳ MPa و ۴ MPa و ۶/۳ MPa رسید که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ٪۳ و ٪۵ و ٪۴ افزایش مقاومت نسبت به طرح شاهد حتی در سن ۳ سال (برخلاف مقاومت فشاری) است. در طرح‌های ساخته شده با درشت‌دانه‌ی بازیافتی و ٪۸ میکرو سیلیس نیز بهبود در مقاومت کششی دیده شد و مقاومت کششی طرح SFRCAC-۳۰ در سنین ۷ و ۲۸ روز و سه سال به ترتیب به ۳ MPa و ۳/۵ MPa و ۵/۶ MPa رسید که نسبت به طرح RCAC-۳۰ به ترتیب ٪۵، صفر و ٪۸ افزایش در مقاومت کششی را نشان می‌دهد. به همین ترتیب مقاومت کششی طرح SFRCAC-۵۰ در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب به ۲/۷ MPa و ۳/۴ MPa و ۴/۸ MPa رسید که نسبت به طرح RCAC-۵۰ به ترتیب صفر و ٪۶ و ٪۸- تغییر در مقاومت کششی را نشان می‌دهد. مقاومت کششی طرح SFRCAC-۱۰۰ در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال نیز به ترتیب به ۲/۵ MPa و ۲/۸ MPa و ۳/۹ MPa رسید که نسبت به طرح RCAC-۱۰۰ به ترتیب ٪۳۰ و ٪۳۰ و ٪۶ افزایش مقاومت کششی را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی نتایج مقاومت کششی مشاهد می‌گردد که در سنین کم و مخصوصاً در سن ۷ روزه تأثیر میکرو سیلیس بر مقاومت کششی بیشتر است به‌گونه‌ای که بیشترین افزایش مقاومت کششی در این سن اتفاق افتاده است. همچنین با افزایش درصد جایگزینی، درصد بهبود مقاومت کششی نیز افزایش‌یافته است و استفاده از میکرو سیلیس مؤثرتر بوده است. اما در سن ۳ سال تأثیر میکرو سیلیس بسیار کم است تا جایی که در طرح SFRCAC-۵۰ مقاومت کششی ۳ ساله نسبت به طرح RCAC-۵۰ ٪۸ کاهش‌یافته است.

بررسی نتایج مقاومت کششی طرح‌های دارای ٪۱۵ زئولیت نیز نشان می‌دهد که طرح ZNC در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به مقاومت کششی ۲/۸ MPa و ۳/۸ MPa و ۵.۹ MPaرسیده است که نسبت به طرح NC ٪۵ و ٪۴ و ٪۲ کاهش مقاومت کششی داشتند که این مهم از نظر آماری تغییر معناداری نیست و می‌توان نتیجه گرفت که افزودن زئولیت بر مقاومت کششی تأثیر چندانی ندارد. طرح ZRCAC-۳۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب به مقاومت کششی ۲/۹ MPa و ۳/۵ MPa و ۵/۳ MPa را اخذ نمود. به همین ترتیب طرح ZRCAC-۵۰ در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب به مقاومت کششی ۲/۸ MPa و ۳/۴ MPa و ۵ MPa را اخذ نمود و طرح ZRCAC-۱۰۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روز و ۳ سال به مقاومت کششی ۲/۴ MPa و ۲/۷ MPa و ۴/۱ MPa رسیدند.

این طرح‌ها نسبت به طرح‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی و بدون زئولیت تغییر چندانی نداشتند و مقاومت کششی تقریباً یکسانی داشتند به جز طرح ZRCAC-۱۰۰ که در سنین ۷

و ۲۸ روز و ۳ سال به ترتیب ٪۲۴ و ٪۲۴ و ٪۱۰ افزایش مقاومت کششی نسبت به طرح RCAC-۱۰۰ داشتند. از نتایج این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از زئولیت در افزایش مقاومت کششی طرح‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی تا درصد جایگزینی ٪۵۰ تأثیر چندانی ندارد اما برای درصد جایگزینی بیش از ٪۵۰ باعث بهبود مقاومت کششی می‌شود. همچنین در طرح‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی نیز در سن ۳ سال مقاومت کششی نمونه‌ها تغییر معناداری نداشت که نشان‌دهنده‌ی اثر ناچیز زئولیت در سنین بالا است. با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی بازیافتی اثرگذاری میکرو سیلیس و زئولیت بر مقاومت کششی نمونه‌ها بیشتر شد و در درصدهای جایگزینی بیشتر از ٪۳۰ این دو پوزولان تأثیرگذاری بیشتری داشتند. بیشترین مقاومت کششی را نمونه‌ی SFNC در تمام سنین داشت و در سن ۳ سال دارای مقاومت کششی ۶/۳ MPa و کمترین مقاومت کششی را نمونه‌ی RCAC-۱۰۰ در تمام سنین داشت و در سن ۳ سال دارای مقاومت کششی ۳/۷ MPa بود که نشان‌دهنده‌ی اثر منفی سنگدانه‌های بازیافتی بر مقاومت کششی است. بیشترین تأثیر را در کسب مقاومت کششی سن نمونه داشته و با بیشتر شدن سن نمونه‌ها، مقاومت کششی نمونه‌ها به نمونه‌ی بدون پوزولان نزدیک شده و همگی افزایش‌یافته‌اند.

با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها، مشخص شد که میکروسیلیس و زئولیت عموماً اثر مثبتی بر مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها داشتند اما تأثیرگذاری میکروسیلیس بیشتر بود که به دلیل خلوص بالاتر و درصد سیلیسم بیشتر در آن ماده است. همچنین با بررسی مقاومت کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه‌ی شاهد نیز می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پوزولان‌ها تأثیر چندانی بر مقاومت کششی نمونه‌ها ندارد و حتی استفاده از زئولیت باعث کاهش مقاومت کششی در نمونه‌ی ZNC شده است. اما با استفاده از پوزولان‌ها در درصد جایگزینی بیش از ٪۵۰ اثر مثبت استفاده از این مواد جایگزین سیمان دیده می‌شود. با افزایش سن از ۲۸ روز به ۳ سال با افزایش سن، مقاومت کششی اکثر نمونه‌ها به نمونه‌ی شاهد بسیار نزدیک شد [به جز طرح‌های حاوی ٪۱۰۰ سنگدانه‌ی بازیافتی و این نیز خود شاهدی بر اثر بسیار زیاد سن نمونه بر مقاومت کششی است]. در سن ۳ سال نیز استفاده از پوزولان‌ها تأثیر چندانی بر مقاومت کششی نداشته و فقط برای درصد جایگزینی بیش از ٪۵۰ اثر چشمگیری داشته‌اند.

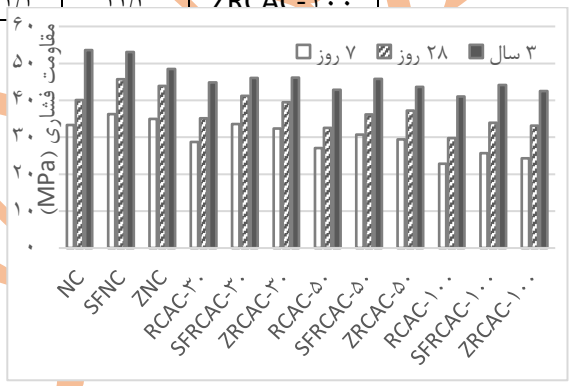
با مقایسه‌ی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز و سه سال نسبت به نمونه‌ی شاهد مربوطه می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سن نمونه‌ها باعث نزدیک شدن مقاومت کششی و فشاری طرح‌ها به طرح شاهد می‌شود و پوزولان‌ها تأثیر به‌مراتب بیشتری بر روی مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی دارند. همچنین افزایش درصد جایگزینی تأثیر بیشتری در مقاومت فشاری داشته اما در مقاومت کششی تا افزایش درصد جایگزینی ٪۵۰ افت محسوسی رخ نداده است.

۳–۳– نتایج آزمایش جذب آب بتن

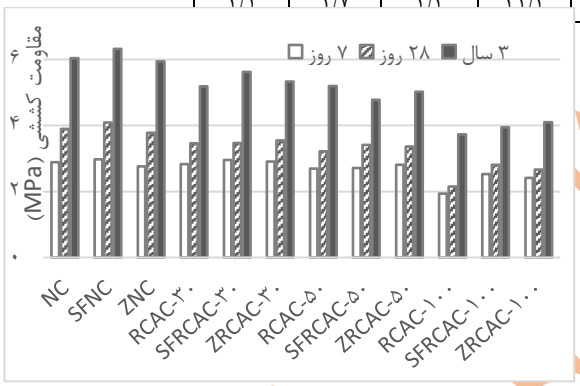
نتایج آزمایش جذب آب در جدول ۶ و شکل ۴ آورده شده است. آزمایش جذب آب انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش درصد جایگزینی مصالح طبیعی با مصالح بازیافتی جذب آب نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد که این مهم به دلیل تخلخل و جذب آب بیشتر سنگدانه‌های بازیافتی است. در میان نمونه‌های ساخته شده کمترین جذب آب را نمونه‌ی NC و بیشترین جذب آب را نمونه‌ی ZRCAC-۱۰۰ داشت که تماماً با درشت‌دانه‌ی بازیافتی ساخته شده است. دلیل این اتفاق می‌تواند تخلخل بیشتر سنگدانه‌ی بازیافتی و زئولیت مصرفی باشد زیرا که زئولیت دارای ساختاری متخلخل است که این ساختار متخلخل دارای فضای خالی زیادی می‌باشد که درون این فضاهای خالی را حباب‌های هوا پر می‌کنند. حباب‌های هوای ناخواسته‌ای که در بتن به دلیل استفاده از زئولیت تشکیل می‌شوند، باعث افزایش جذب آب نمونه‌ها می‌شوند. روند مشخص دیگری که وجود دارد، افزایش جذب آب نمونه‌های دارای زئولیت و میکرو سیلیس است هرچند این افزایش در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کمتر بوده و قابل اغماض می‌باشد. نمونه‌های حاوی زئولیت و میکرو سیلیس دارای جذب آب بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت و میکرو سیلیس هستند به صورتی که نمونه‌های SFRCAC-۱۰۰ و ZRCAC-۱۰۰ به ترتیب ٪۱۱ و ٪۲۲ جذب آب بیشتری نسبت به نمونه‌ی RCAC-۱۰۰ داشتند. این مهم نشان‌دهنده‌ی تأثیر منفی تر استفاده از زئولیت در جذب آب بتن ساخته شده با درشت‌دانه‌ی بازیافتی است. در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌ی طبیعی نیز با استفاده از میکرو سیلیس و زئولیت، جذب آب افزایش‌یافته است اما این افزایش جذب آب بسیار جزئی بوده و قابل‌مقایسه با تغییرات جذب آب در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی نیست.

جدول ۵ - نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در سنین مختلف

کد نمونه	مقاومت فشاری (MPa)			مقاومت کششی (MPa)		
	۷ روز	۲۸ روز	۳ سال	۷ روز	۲۸ روز	۳ سال
NC	۳۳/۳	۴۰/۱	۵۳/۶	۲/۸	۳/۹	۶
SFNC	۳۶/۳	۴۵/۷	۵۳/۱	۳	۴	۶/۳
ZNC	۳۵	۴۳/۹	۴۸.۵	۲/۸	۳/۸	۶
RCAC-۳۰	۲۸/۷	۳۵/۱	۴۴/۹	۲/۸	۳/۵	۵/۲
SFRCAC-۳۰	۳۳/۶	۴۱/۲	۴۶	۳	۳/۵	۵/۶
ZRCAC-۳۰	۳۲/۴	۳۹/۵	۴۶/۱	۲/۹	۳/۶	۵/۳
RCAC-۵۰	۲۷/۱	۳۲/۵	۴۲/۹	۲/۷	۳/۲	۵/۲
SFRCAC-۵۰	۳۰/۷	۳۶/۲	۴۵/۸	۲/۷	۳/۴	۴/۸
ZRCAC-۵۰	۲۹/۴	۳۷/۲	۴۳/۶	۲/۸	۳/۴	۵
RCAC-۱۰۰	۲۲/۸	۲۹/۸	۴۰	۱/۹	۲/۱	۳/۷
SFRCAC-۱۰۰	۲۵/۷	۳۳/۹	۴۴/۲	۲/۵	۲/۸	۳/۹
ZRCAC-۱۰۰	۲۴/۳	۳۳/۱	۴۲/۴	۲/۴	۲/۷	۴/۱



شکل ۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۳ نتایج آزمایش مقاومت کششی

با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی تا ٪۳۰ با استفاده از هرکدام از پوزولان‌های گفته شده، جذب آب کاهش‌یافته است که این کاهش نیز چندان زیاد نبوده و قابل اغماض می‌باشد.

اما با درصدهای جایگزینی بیش از این مقدار با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی، در صورت استفاده از زئولیت درصد جذب آب افزایش‌یافته و این افزایش برای ZRCAC-۱۰۰ بیشترین مقدار خود را دارد. این اتفاق می‌تواند به دلیل ساختار متخلخل زئولیت و تشکیل حباب‌های هوای ناخواسته در بتن باشد. اما میکرو سیلیس تا ٪۵۰ جایگزینی درشت‌دانه طبیعی با درشت‌دانه نیز تغییری در جذب آب ایجاد نمی‌کند و با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه طبیعی با بازیافتی، جذب آب در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نیز افزایش پیدا کرده است. در حالت کلی استفاده از میکرو سیلیس در زمان جایگزینی ٪۱۰۰ سنگدانه طبیعی با بازیافتی و زئولیت در هر درصدی از جایگزینی سنگدانه طبیعی با بازیافتی تأثیر مثبتی بر جذب آب نداشته است و نتوانسته اثر منفی سنگدانه بازیافتی را خنثی نماید. با افزایش جذب آب بتن نیز خطرات دوامی متعددی ممکن است برای بتن یا میلگردهای کار شده در بتن به وجود آید. به این دلیل باید بااحتیاط کامل در مورداستفاده از میکرو سیلیس و زئولیت در بتن حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی تصمیم‌گیری شود.

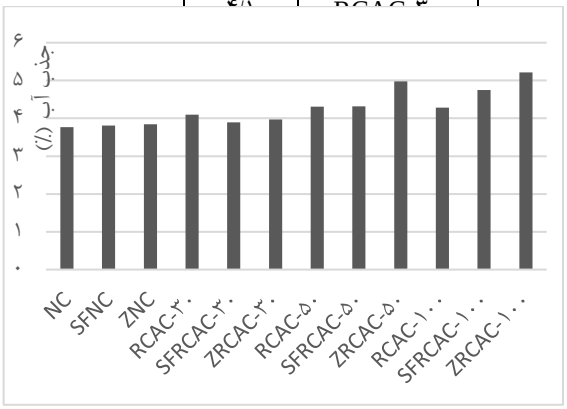
۳-۴- نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در بتن

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در بتن در جدول ۷ و شکل ۵ آورده شده است. بررسی نتایج مأخوذه نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی، عمق نفوذ آب افزایش می‌یابد به‌طوری‌که نمونه‌های RCAC-۳۰ و RCAC-۵۰ و RCAC-۱۰۰ به ترتیب دارای ٪۱۴، ٪۶۰ و ٪۳۵ عمق نفوذ آب بیشتر نسبت به نمونه‌ی طرح شاهد بودند که این اثر نیز به دلیل نفوذپذیری و جذب

آب بیشتر سنگدانه‌های بازیافتی است. همچنین روند دیگری که در این آزمایش وجود دارد کاهش عمق نفوذ آب در نمونه‌های ساخته شده با درشت‌دانه‌ی طبیعی با استفاده از میکروسیلیس و زئولیت است به‌طوری‌که در نمونه‌های SFNC و ZNC به ترتیب ٪۱۷ و ٪۱۰ عمق نفوذ آب کاهش یافت. از دیگر سو نتایج نشان داد که در نمونه‌های ساخته شده با درشت‌دانه‌ی بازیافتی حاوی زئولیت، عمق نفوذ آب افزایش‌یافته و بیشتر از نمونه‌ی بدون پوزولان است که دلیل آن می‌تواند تشکیل حباب‌های هوای ناخواسته و ساختار متخلخل زئولیت باشد. در نمونه‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی نمونه‌ی ZRCAC-۱۰۰ دارای ٪۷۱ جذب آب بیشتر نسبت به نمونه‌ی RCAC-۱۰۰ است که نشان‌دهنده‌ی اثر منفی زئولیت بر عمق نفوذ آب در نمونه‌های بتنی است. اما استفاده از میکرو سیلیس در بتن حاوی ٪۵۰ درشت‌دانه‌ی بازیافتی باعث کاهش عمق نفوذ آب شد و نمونه‌ی SFRCAC-۵۰ ٪۴۳ کاهش عمق نفوذ آب را نشان داد که به معنی اثر مثبت میکرو سیلیس بر عمق نفوذ آب و بهبود ریزساختار بتن و پرشدن خلل‌وفرج موجود در آن در درصدهای جایگزینی ٪۵۰ سنگدانه طبیعی با بازیافتی است که با افزایش درصد جایگزینی به ٪۱۰۰ این اختلاف کاهش یافته و در نمونه‌ی SFRCAC-۱۰۰ نسبت به نمونه‌ی RCAC-۱۰۰ ٪۴ کاهش عمق نفوذ را باعث شده است. افزایش عمق نفوذ آب در نمونه‌های ساخته شده با درشت‌دانه‌ی بازیافتی حاوی زئولیت به دلیل ساختار حفره‌دار زئولیت است که باعث افزایش نفوذ آب در بتن می‌شود. دلیل دیگر می‌تواند ناسازگاری میان زئولیت و فوق روان‌کننده‌ی مورداستفاده در بتن باشد که این ناسازگاری باعث گیرافتادن هوا در بتن می‌شود که یکی از عوامل اصلی تخلخل در بتن است.

جدول ۶ - جذب آب

کد نمونه‌ها	جذب آب (٪)
NC	۳/۸
SFNC	۳/۸
ZNC	۳/۸

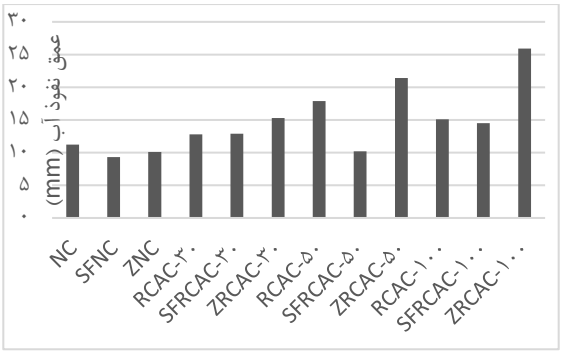


شکل ۴ نتایج جذب آب

جدول ۷ عمق نفوذ آب

کد نمونه‌ها	عمق نفوذ آب (mm)
NC	۱۱/۲
SFNC	۹/۳
ZNC	۱۰/۱
RCAC-۳۰	۱۲/۸
SFRCAC۳۰	۱۲/۹
ZRCAC۳۰	۱۵/۳
RCAC-۵۰	۱۷/۹
SFRCAC۵۰	۱۰/۲
ZRCAC۵۰	۲۱/۴
RCAC-۱۰۰	۱۵/۱
SFRCAC۱۰۰	۱۴/۵
ZRCAC۱۰۰	۲۵/۹

ویراستاری نشده



شکل ۵ عمق نفوذ آب

۴- نتیجه گیری

در این مقاله نمونه‌های بتنی مختلفی با درصدهای جایگزینی مختلف سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی و با استفاده از ۸٪ از میکروسیلیس و ۱۵٪ از زئولیت به‌عنوان جایگزین سیمان، ساخته شد. آزمایش‌های مختلفی روی نمونه‌های بتنی ساخته شد و اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی و تأثیر میکرو سیلیس و زئولیت بر آن‌ها بررسی شد. همچنین جهت ارزیابی عملکرد بلندمدت نمونه‌های بتنی، داده‌های ۳ ساله برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی اخذ و تحلیل شد.

مهم‌ترین نتایجی که در این پژوهش به دست آمد، مربوط به خواص سه‌ساله‌ی بتن‌های ساخته شده بود. همچنین آزمایش‌های دوامی نیز بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت که نشان داد استفاده از پوزولان‌ها و مخصوصا زئولیت می‌تواند اثرات منفی بر بتن داشته باشد. در ادامه اهم یافته‌های پژوهش به‌اختصار آورده شده است.

۱- در سن ۳ سال تأثیر میکروسیلیس در بهبود مقاومت فشاری و مقاومت کششی بسیار کاهش می یابد. استفاده از زئولیت نیز به اندازه‌ی میکروسیلیس مؤثر نیست و بیشتر در سنین کم (۲۸ روزه) اثر خود را نشان می‌دهد.

۲- استفاده از مواد جایگزین سیمان در سنین کم (۲۸ روز) بیشترین تأثیر را در عملکرد مکانیکی بتن دارد اما در سنین بالا (۳ سال) تأثیر محسوسی بر عملکرد مکانیکی بتن ندارد. به تعبیر بهتر نتایج این مقاله نشان داد که استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت عملاً فقط روند کسب مقاومت فشاری و مقاومت کششی را تسریع می‌کنند و در بلند مدت عملکرد مکانیکی مشابه با سیمان پرتلند و یا حتی ضعیف تر از آن دارند. اگرچه این مهم را باید در نظر گرفت که تاثیر استفاده از پوزولان‌های یاد شده در بتن‌های ساخته شده با سنگدانه بازیافتی به مراتب بیشتر از بتن معمولی حتی در سن ۳ سال است.

۳- مقاومت فشاری در سن ۳ سال با استفاده از درشت‌دانه‌ی بازیافتی با افزایش درصد جایگزینی کاهش یافت و در درصد جایگزینی ٪۱۰۰ کمترین مقاومت فشاری را داشت و در مقاومت کششی با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با بازیافتی از ٪۳۰ به ٪۵۰ تغییری رخ نداد اما با افزایش درصد جایگزینی به ٪۱۰۰ مقاومت کششی کاهش یافت که نشان‌دهنده‌ی آن است که استفاده تا ٪۵۰ از درشت‌دانه‌ی بازیافتی تأثیر منفی قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت کششی ندارد که می‌تواند به دلیل وجود خمیر سیمان چسبیده به سنگدانه و کمتر بودن کیفیت سنگدانه‌ها باشد.

۴- بررسی داده‌های ۲۸ روزه نشان داد که جایگزینی ٪۸ از سیمان مصرفی با میکروسیلیس یا ٪۱۵ از سیمان مصرفی با زئولیت در بتن ساخته شده با ٪۳۰ درشت‌دانه بازیافتی بتنی، مقاومت فشاری طرح شاهد را به صورت کامل پوشش می‌دهد و اختلاف جزئی با آن دارد. به تعبیر دیگر جایگزینی ٪۳۰ از درشت‌دانه طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی و استفاده از پوزولان‌های مذکور در نسبت‌های ذکر شده، دارای عملکرد مکانیکی یکسانی با طرح شاهد هستند (در سن ۲۸ روزه). با افزایش سن نمونه‌ها به ۳ سال بهبود مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافتی حاوی پوزولان بسیار کم است و این افزایش مقاومت به دلیل استفاده از پوزولان‌ها نمی‌تواند کاهش مقاومت ناشی از استفاده از سنگدانه بازیافتی را جبران کند.

۵- همچنین نتایج آزمایش‌های دوامی(درصد جذب آب و عمق نفوذ آب) نشان داد که در بتن‌های ساخته‌شده با درشت‌دانه بازیافتی با افزایش نسبت جایگزینی هر دو پارامتر دوامی بهبود می‌یابند. در خصوص کاربرد موارد جایگزین سیمان نیز باید عنوان نمود که نتایج این پژوهش حاکی از تأثیر ناچیز یا کمی منفی استفاده از زئولیت و تأثیر عموما مثبت یا خنثی استفاده از میکروسیلیس، بر عملکرد دوامی بتن‌های ساخته‌شده با درشت‌دانه بازیافتی در درصدهای جایگزینی بالای سنگدانه طبیعی با بازیافتی است.

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار در راستای تحقق اهداف توسعه‌ی پایدار باشد و با استفاده از مواد جایگزین سیمان خواص مکانیکی بتن ساخته شده با این سنگدانه را بهبود بخشید اما خواص دوامی هنگام استفاده از سنگدانه بازیافتی بسیار تضعیف شده و با استفاده از میکروسیلیس بهبود بیشتری نسبت به زئولیت می‌توان

ویرایشگر شده

انتظار داشت اما همچنان عموما نسبت به نمونه‌ی شاهد بدون سنگدانه بازیافتی دوام کمتری در برابر شرایط محیطی دارد. این نتیجه به آن معناست که با توجه به شرایط محیطی باید برای استفاده از سنگدانه بازیافتی تصمیم‌گیری شود. همچنین برای تسهیل استفاده از این مصالح پیشنهاد می‌شود آیین‌نامه‌ای برای تولید، دسته‌بندی و استفاده از آن در زمینه‌های مختلف تدوین گردد و در پروژه‌های عمرانی درصدی از مصالح مورداستفاده به مصالح بازیافتی تخصیص یابد تا از این راه استفاده از مصالح بازیافتی تشویق گردد.

مراجع:

۱. Tu TY, Chen YY, Hwang CL. Properties of HPC with recycled aggregates. Cem Concr Res. ۲۰۰۶ May;۳۶(۵):۹۴۳–۵۰.

۲. Benhelal E, Zahedi G, Shamsaei E, Bahadori A. Global strategies and potentials to curb CO۲ emissions in cement industry. J Clean Prod. ۲۰۱۳ Jul;۵۱:۱۴۲–۶۱.

۳. Bai G, Zhu C, Liu C, Liu B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. Vol. ۲۴۰, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd; ۲۰۲۰.

۴. aghili lotf milad, Ramezanianpour AM, palasi masoud. Investigation the effect of Different Types of Recycled Concrete Aggregates on the Engineering Properties of Concrete. Journal of Structural and Construction Engineering [Internet]. ۲۰۲۰;۷(۳):۱۷۹–۹۲. Available from: https://www.jsce.ir/article_۷۳۶۸۴.html

۵. Aghili Lotf M, Palassi M, Ramezanianpour AM. Evaluation of the Freeze and Thaw Resistance of Recycled Concrete Aggregates and Natural Aggregates. Journal of Transportation Infrastructure Engineering [Internet]. ۲۰۱۸;۳(۴):۶۵–۷۶. Available from: https://jtie.semnan.ac.ir/article_۲۸۸۸.html

۶. Aghili Lotf M, Ramezanianpour AM, Palassi M. EVALUATING THE DEICER SALT SCALING RESISTANCE OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE. Sharif Journal of Civil Engineering [Internet]. ۲۰۲۰;۳۵,۲(۴,۲):۲۱–۳۱. Available from: https://sjce.journals.sharif.edu/article_۲۰۹۷۰.html

۷. Palassi M, Aghili Lotf M, Ramezanianpour AM. Evaluating the Utilization of Recycled Concrete Aggregate in Road Applications. Journal of Transportation Research [Internet]. ۲۰۱۸; Available from: https://www.trijournal.ir/article_۶۳۰۹۶.html

۸. aghili lotf milad, Ramezanianpour AM, habibi alireza. Utilization of Recycled Concrete Powder as Cement Replacement or Filler in Masonry Mortar. Concrete Research [Internet]. ۲۰۱۸;۱۱(۴):۱۳۳–۴۳. Available from: https://jcr.guilan.ac.ir/article_۳۱۷۱.html

۹. Aghili lotf M, Ramezanianpour AM. Investigation on the Correlations Between Different Physical and Mechanical Properties of Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. mdrsjrns [Internet]. ۲۰۱۸ Sep ۱;۱۸(۳):۱۵۳–۶۷. Available from: http://mcej.modares.ac.ir/article-۱۶-۲۵۷۳۸-en.html

۱۰. آیین نامه ی بتن ایران، ویرایش دوم. ۱۴۰۰;

۱۱. Aghililotf M, Kuroshkarim M, Chamani MY, Ramezanianpour AM. A study on properties of masonry mortar containing recycled fine aggregate. Concrete Research [Internet]. ۲۰۲۳; Available from: https://jcr.guilan.ac.ir/article_۶۷۲۲.html

۱۲. Sajedi SF, Jalilifar H. Evaluating and comparing the effect of zeolite, micro-silica, and fly ash on the mechanical properties of recycled concrete made of ۱۰۰٪ recycled aggregates. Journal of Structural and Construction Engineering [Internet]. ۲۰۱۹;۶(Special Issue ۴):۱۶۵–۸۰. Available from: https://www.jsce.ir/article_۶۵۶۳۱.html

۱۳. Shorbi Niazi H, Khalilzadeh Vahidi E. Investigation of Properties of Concrete Containing Recycled Aggregates and Waste Rubber with Micro Silica. Amirkabir Journal of Civil Engineering [Internet]. ۲۰۲۲;۵۴(۳):۱۱۵۱–۶۴. Available from: https://ceej.aut.ac.ir/article_۴۳۹۳.html

۱۴. Aghili lotf M, Ramezanianpour AM, Masoud Palasi. Evaluation of mechanical properties and durability of recycled aggregate and its use in concrete mixtures. Master's thesis in civil-road and transportation engineering [Master's thesis]. University of Tehran; ۱۳۹۶.

۱۵. Djerbi Tegguer A. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. Constr Build Mater. ۲۰۱۲ Feb;۲۷(۱):۱۱۲–۶.

۱۶. Hewlett P, Liska M. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. ۵th ed. Elsevier; ۲۰۱۹.

۱۷. McNeil K, Kang THK. Recycled Concrete Aggregates: A Review. Vol. ۷, International Journal of Concrete Structures and Materials. Korea Concrete Institute; ۲۰۱۳. p. ۶۱–۹.

۱۸. Thomas J, Thaickavil NN, Wilson PM. Strength and durability of concrete containing

F fly ash. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed. ۲۰۰۶ Dec;۲۱(۴):۱۳۰–۶.
۲۹. Corinaldesi V, Moriconi G. Influence of mineral additions on the performance of ۱۰۰٪ recycled aggregate concrete. Constr Build Mater. ۲۰۰۹ Aug;۲۳(۸):۲۸۶۹–۷۶.
۳۰. Tangchirapat W, Buranasing R, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Influence of rice husk–bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. Constr Build Mater. ۲۰۰۸ Aug;۲۲(۸):۱۸۱۲–۹.
۳۱. De Brito J, Agrela F, Silva RV. Legal regulations of recycled aggregate concrete in buildings and roads [Internet]. New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete. Elsevier Ltd; ۲۰۱۸. ۵۰۹–۵۲۶ p. Available from: http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱۶/B۹۷۸-۰-۰۸-۱۰۲۴۸۰-۵.۰۰۰۱۸-X
۳۲. ASTM C ۱۹۲. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. ASTM International. ۲۰۰۲;
۳۳. ASTM C ۱۳۱–۰۳. Standard test method for resistance to degradation of smallsize coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. Annual Book of ASTM Standards. ۲۰۰۶;
۳۴. EN BS ۱۲۳۹۰-۳. Testing Hardened Concrete: Compressive Strength of Test Specimens. British Standard Institution. ۲۰۰۹;
۳۵. ASTM C ۴۹۶. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International. ۲۰۰۴;
۳۶. ASTM C ۶۴۲. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. Annual book of ASTM standards. ۲۰۰۶;
۳۷. DIN ۱۰۴۸. Testing of hardened concrete DIN . German Institute for Standardization Testing concrete. ۱۹۹۱;
recycled concrete aggregates. Journal of Building Engineering. ۲۰۱۸ Sep ۱;۱۹:۳۴۹–۶۵.
۱۹. Aghililotf M, Palassi M, Ramezanianpour AM. Mechanical and durability assessment of unconfined recycled concrete aggregates and natural aggregates used in road constructions. International Journal of Pavement Engineering. ۲۰۲۱ Oct ۱۵;۲۲(۱۲):۱۵۱۸–۳۰.
۲۰. Lotf MA, Ramezanianpour AM, Palassi M. Evaluating the Frost Resistance of Recycled Concrete Aggregate by Various Standards. Journal of Materials in Civil Engineering. ۲۰۱۸ Jun;۳۰(۶):۰۴۰۱۸۱۱۷.
۲۱. Katz A. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering. ۲۰۰۴ Dec;۱۶(۶):۵۹۷–۶۰۳.
۲۲. Dimitriou G, Savva P, Petrou MF. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. Constr Build Mater. ۲۰۱۸ Jan ۱۵;۱۵۸:۲۲۸–۳۵.
۲۳. Mehta PK. CONCRETE. STRUCTURE, PROPERTIES AND MATERIALS. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; ۱۹۸۶.
۲۴. Dilbas H, Şimşek M, Çakir Ö. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. Constr Build Mater. ۲۰۱۴ Jun ۳۰;۶۱:۵۰–۹.
۲۵. Kou SC, Poon CS, Agrela F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. Cem Concr Compos. ۲۰۱۱ Sep;۳۳(۸):۷۸۸–۹۵.
۲۶. Jalilifar H, Sajedi F. Micro-structural analysis of recycled concretes made with recycled coarse concrete aggregates. Constr Build Mater. ۲۰۲۱ Jan ۱۸;۲۶۷.
۲۷. Tam VWY, Tam CM. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. Constr Build Mater. ۲۰۰۸ Oct;۲۲(۱۰):۲۰۶۸–۷۷.
۲۸. Kou S, Poon CS. Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-

Assessing long-term (۳-year) mechanical properties of recycled aggregate concrete containing zeolite and silica fume

Milad Aghililotf [۱], Amir Mohammad Ramezanianpoor [۲], Mohammad Yaser Chamani [۳]

۱-Ph.D. Candidate, Faculty of civil engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: m.aghili@ut.ac.ir

۲-Associate professor, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: ramezanian@ut.ac.ir

۳-MSc. Student, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: m.yaser.chamani@ut.ac.ir

Abstract

Using recycled concrete aggregate as a sustainable solution has been the subject of much research in recent years. The use of recycled aggregate has led to a reduction in the quality of concrete in various studies. A promising approach to enhance the concrete properties of recycled aggregate concrete involves the use of pozzolans as supplementary cementitious materials. In this study, cement was replaced by silica fume in ۸٪ of the specimens, while in other specimens, cement was replaced by zeolite in ۱۵٪. Natural aggregate was substituted with recycled concrete aggregate in varying proportions of ۳۰٪, ۵۰٪, and ۱۰۰٪. Subsequently, various mechanical and durability tests were conducted to evaluate the properties of each specimen. Compressive and tensile tests were carried out to assess the mechanical properties of the specimens. The tests revealed that specimens containing recycled aggregate exhibited inferior properties compared to natural aggregate concrete. Over the long term (۳ years), the specimens containing recycled aggregate also displayed lower compressive strength. Specimens containing silica fume demonstrated higher compressive strength in the short term when used with natural aggregate concrete, but showed similar performance over the ۳-year period. In specimens containing recycled aggregate, silica fume had a more pronounced effect, leading to higher compressive strength in the short term but similar or reduced strength over the ۳-year period. A similar trend to that observed in compressive strength was found in splitting tensile strength. As the percentage of recycled aggregate replacement increased, tensile strength decreased. The use of silica fume increased splitting tensile strength, even over the ۳-year period. On the other hand, using zeolite did not result in a significant change, and specimens exhibited similar or reduced compressive strength over the ۳-year period. In general, it can be inferred that the use of supplementary cementitious materials can enhance mechanical properties in the short term. However, durability tests, including water penetration depth and water absorption percentage, demonstrated almost the opposite trend. This suggests that the use of supplementary cementitious materials generally has a negative impact on concrete properties in the long term.

Keywords: recycled concrete aggregate, zeolite, silica fume, recycled aggregate concrete, long term properties