

# بررسی مشخصات مکانیکی بلندمدت (۳ ساله) بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس

میلاد عقیلی لطف (دانشجوی دکتری)

امیرمحمد رمضان پور\* (دانشیار)

محمد یاسر چمنی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشگاه مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۳)  
دوره ۴۰، شماره ۳، صص. ۱۶۴-۱۷۵، (پادداشت فنی)

از مسائل مطرح در زمینه‌ی استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و پوزولان‌های جایگزین سیمان، عملکرد بلندمدت آن‌هاست. به‌منظور بررسی مسئله‌ی کنونی، با استفاده از یک نوع درشت‌دانه‌ی 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 درصد شد، اما در بلندمدت اثر پوزولان‌های مصرفی کاهش یافت و به ۱۰-۲ و ۵-۸ درصد رسید. همچنین داده‌های درصد جذب آب و عمق نفوذ آب نشان داد که استفاده از میکروسیلیس تأثیر بیشتری برای بهبود خواص دوامی بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی نسبت به زئولیت دارد، اما خواص دوامی همچنان ضعیف‌تر از نمونه‌ی بدون سنگ‌دانه‌ی بازیافتی است.

**واژگان کلیدی:** سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، زئولیت، میکروسیلیس، بتن بازیافتی، خواص بلندمدت.

## ۱. مقدمه

پایدار در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، از جمله ایران، همچنان این مباحث علمی فقط در حوزه‌های آکادمیک بحث و بررسی می‌شوند و در کارهای واقعی موضوعیت پیدا نکرده‌اند. تا آنجا که در جدیدترین ویرایش آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا) بعد از مدت‌ها، امکان استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی در تولید بتن معمولی تا سقف ۲۵٪ مجاز اعلام شد که مجدداً در اصلاحیه‌ی آیین‌نامه، این بند حذف شده است.<sup>[۱]</sup> با این حال، پژوهشگران فعال در حوزه‌ی دانش تکنولوژی بتن، پژوهش‌های متعددی را پیرامون کاربرد سنگ‌دانه‌های بازیافتی در تولید بتن و ملات تعریف و اجرا کرده‌اند.<sup>[۱۱-۱۴]</sup> همه‌ی پژوهش‌های اخیر با هدف ایجاد یک بستر مناسب علمی و تولید اسناد علمی پشتیبان برای سیاست‌گذاری در حوزه‌ی توسعه‌ی پایدار و مدیریت کلان منابع کشور، طراحی و اجرا شده‌اند. در ادامه‌ی بحث، بیان مسئله و نوآوری‌های پژوهش حاضر شرح داده شده است.

بتن پس از آب، به‌عنوان پرمصرف‌ترین محصول اصلی در صنعت ساخت، جایگاه ویژه‌ی دارد. 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.<sup>[۱]</sup> همین مسئله نتایجاً تقاضای قابل ملاحظه‌ی در بتن، سیمان، فولاد، مصالح، و منابع طبیعی ایجاد کرده است. به‌طوری کلی در تأمین دو جزء سیمان و مصالح سنگ‌دانه‌ی برای تولید بتن، صنعت ساخت با مشکلات عدیده‌ی مواجه است. درخصوص سیمان باید عنوان کرد که در حال حاضر ۷٪ از دی اکسیدکربن در جهان ناشی از فعالیت کارخانه‌های تولید سیمان است.<sup>[۲]</sup> از دهه‌های گذشته تاکنون، کاربرد سنگ‌دانه‌های بازیافتی (RCA)<sup>۱</sup> در تولید بتن، محور کلیدی بسیاری از پژوهش‌های حوزه‌ی تکنولوژی بتن بوده است.<sup>[۳-۹]</sup> اما علی‌رغم انجام همه‌ی پژوهش‌های مذکور به‌دلیل عدم اولویت مبنای توسعه‌ی

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴.

استناد به این مقاله:

عقیلی لطف، میلاد، رمضان پور، امیرمحمد، و چمنی، محمدیاسر، ۱۴۰۳. بررسی مشخصات مکانیکی بلندمدت (۳ ساله) بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۳)، صص. ۱۶۴-۱۷۵. DOI:10.24200/J30.2023.62511.3250

نشانگر تأثیر بیشتر میکروسیلیس در سنین کم است و هر چه سن نمونه‌ها بالاتر می‌رود، اختلاف مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد.

جلیلی‌فر و ساجدی (۲۰۲۱)<sup>[۲۶]</sup> در پژوهشی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۶، از زئولیت به‌عنوان ماده‌ی افزودنی استفاده کردند. با افزایش درصد جایگزینی زئولیت در بتن، مقاومت فشاری کاهش و جذب آب افزایش یافت و وضعیت ریزساختار بتن افول کرد و ضعیف‌تر شد و در ۳۰٪ جایگزینی سیمان با زئولیت، ترک‌هایی از ناحیه‌ی انتقال به درون خمیر سیمان تشکیل شده بود. تام و تام<sup>۴</sup> (۲۰۰۸)<sup>[۲۷]</sup> 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، ۳۰ و ۳۵ درصد درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی بتنی انتخاب شد و فرآیند اختلاط اجزاء بتن با روش‌های اختلاط یک و دو مرحله‌ی صورت پذیرفت. در پژوهش جامع اخیر، سه گروه طرح اختلاط در نظر گرفته شد: در گروه اول، بتن بازیافتی بدون میکروسیلیس و روش اختلاط یک مرحله‌ی در نظر گرفته شد؛ در گروه دوم، ۲٪ از وزن درشت‌دانه‌ی بازیافتی بتنی با میکروسیلیس جایگزین و روش اختلاط دو مرحله‌ی اعمال شد؛ و در گروه سوم، که بیشترین مقدار مواد سیمانی را شامل می‌شد، علاوه بر کاربرد میکروسیلیس، درصدی از درشت‌دانه‌ی بازیافتی نیز مجدداً با سیمان پرتلند جایگزین و روش اختلاط دو مرحله‌ی 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 بهتری نسبت به طرح‌های گروه اول دارند. پژوهشگران اذعان داشتند که در گروه دوم به‌دلیل کاربرد میکروسیلیس، ناحیه‌ی انتقال سطحی، بهبود مطلوبی یافته است و همچنین تخلخل ملات چسبیده به سنگ‌دانه‌های بازیافتی نیز کمتر شده است؛ اما در گروه سوم، این بهبود مضاعف شده و عملاً لایه‌ی ضعیف از ملات سیمانی جدید در ناحیه‌ی انتقال سطحی قدیمی شکل گرفته و ملات چسبیده به سنگ‌دانه‌های بازیافتی نیز به متراکم‌ترین حالت خود تبدیل شده‌اند.

کو و پون<sup>۵</sup> (۲۰۰۶)<sup>[۲۸]</sup> مشاهده کردند که بتن بازیافتی ساخته‌شده 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<sup>۶</sup> (۲۰۰۹)<sup>[۲۹]</sup> نیز در بتن ساخته‌شده با ۱۰۰٪ درشت‌دانه و ریزدانه‌ی بازیافتی، ۳۰٪ خاکستر بادی و ۱۵٪ میکروسیلیس به‌کار بردند. همچنین از نسبت آب به سیمان ۰/۴ برای بتن‌های بازیافتی و برای کنترل کارایی از افزودنی‌های شیمیایی استفاده شد. بتن بازیافتی دارای خاکستر بادی یا میکروسیلیس، مقاومت فشاری یکسان یا بیشتری نسبت به بتن بازیافتی (در همه‌ی سنین) داشت، این موضوع بدان معناست که با افزودن ۱۵٪ میکروسیلیس به بتن حاوی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌ی بازیافتی می‌توان عملکرد مقاومتی بسیار بهتری نسبت به بتن معمولی داشت.

تانگچیراپات<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۸)<sup>[۳۰]</sup> تأثیر افزودن خاکستر شلتوک برنج<sup>۸</sup> را در مقاومت مکانیکی بتن ساخته‌شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۸ و ۱۰۰٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی، ۱۰۰٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی و ۵۰٪ ریزدانه‌ی

سنگ‌دانه‌های بازیافتی عموماً عملکرد کیفی به‌مراتب کمتری نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی دارند، که در مطالعات پیشین به این مهم اشاره شده است.<sup>[۱۷-۱۵]</sup>

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 بیان‌شده مستقیماً در کیفیت بتن ساخته‌شده تأثیر می‌گذارد. از طرف دیگر، بتن اولیه یا بتن مادر نیز معمولاً در مشخصه‌های رفتاری، مکانیکی، و عملکردی سنگ‌دانه‌های بازیافتی تولیدی اثرگذار است. در برآیند پژوهش‌های صورت‌گرفته بر روی بتن ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، عموماً جذب آب بیشتر، چگالی کمتر، مقاومت‌های فشاری، کششی، و خمشی کمتر و خواص دوامی ضعیف‌تری نسبت به بتن معمولی مشاهده شده است.<sup>[۲۰-۱۸]</sup> لذا در بخشی از پژوهش‌های تعریف‌شده در این حوزه، ارائه‌ی رویکردهایی که بتواند عملکرد کیفی و رفتاری بتن ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی را بهبود بخشد، مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. یکی از این رویکردها، استفاده از مواد جایگزین سیمان، مانند پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی است؛ که استفاده از آن‌ها برای بهبود خواص بتن و سنگ‌دانه‌ها، موضوع پژوهش‌های مختلفی در دهه‌های گذشته تاکنون بوده است.<sup>[۲۱ و ۲۲]</sup> این مواد دارای اکسیدهای سیلیسیم و آلومینیم و اکتنش‌زای زیادی بوده و با کلسیم‌هیدروکسید حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش می‌دهند و CSH<sup>۱</sup> تولید می‌کنند، که عامل اصلی افزایش مقاومت بتن است و به این صورت باعث بهبود ریزساختار بتن و پُرشدن خلل و فرج موجود در بتن می‌شوند.<sup>[۲۳]</sup> از طرف دیگر، استفاده از پوزولان‌های مذکور به‌عنوان یک رویکرد مبتنی بر توسعه‌ی پایدار مطرح است؛ که استفاده از آن‌ها باعث کاهش آلودگی ناشی از محصول‌های جانبی صنایع دیگر می‌شود، به این صورت که به جای دفن مواد مذکور، که برای محیط زیست نیز مضر هستند، به‌عنوان ارزش افزوده در صنعت ساخت استفاده می‌شوند. همچنین با جایگزینی مواد ذکرشده با سیمان، نیاز به سیمان و مواد اولیه‌ی موردنیاز و آلودگی ناشی از تولید سیمان نیز کاهش می‌یابد.

دیلباس<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴)<sup>[۲۴]</sup> با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵، نمونه‌هایی با جایگزینی سیمان و میکروسیلیس ساختند. نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و بدون میکروسیلیس دچار افت مقاومت فشاری شدند و نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی با ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس افزایش و کاهش در مقاومت فشاری را تجربه کردند.

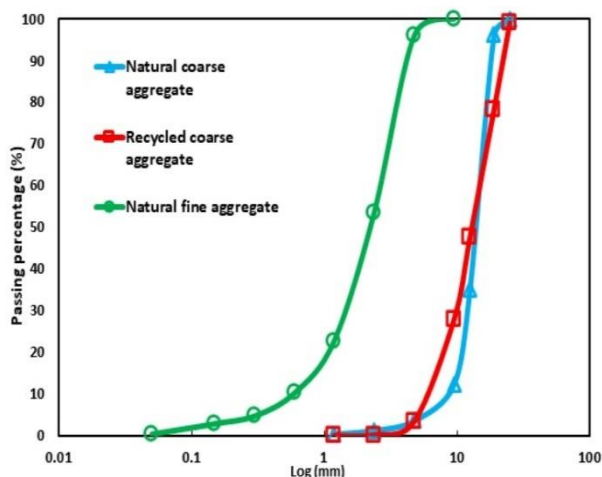
کو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۱)<sup>[۲۵]</sup> با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵، افزایش مقاومت در سنین مختلف را برای نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و میکروسیلیس بررسی کردند و نمونه‌های حاوی درشت‌دانه‌ی طبیعی و ۵۰ و ۱۰۰ درصد درشت‌دانه‌ی بازیافتی با و بدون میکروسیلیس را ساختند و آزمایش‌های مختلفی روی آن‌ها انجام دادند. در پژوهش اخیر، نمونه‌های حاوی به ترتیب ۰، ۵۰، و ۱۰۰ درصد درشت‌دانه‌ی بازیافتی و ۱۰٪ میکروسیلیس در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه‌ی شاهد ساخته‌شده با درشت‌دانه‌ی طبیعی بدون میکروسیلیس مقاومت فشاری بیشتری داشتند، در حالی که در سن ۹۰ روزه، مقاومت فشاری افزایش کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است، که

<sup>۵</sup> Kou and Poon<sup>۶</sup> Corinaldesi and Moriconi<sup>۷</sup> Thangchirapat<sup>۸</sup> Rice husk ash (RHBA)<sup>۱</sup> Calsium Silicate Hydrate<sup>۲</sup> Dilbas<sup>۳</sup> Kou<sup>۴</sup> Tam & Tam

در جدول ۱، مشخصات طرح اختلاط بتن مادر سنگدانه‌های بازیافتی تولیدشده ارائه شده است همچنین برای یکسان‌بودن شکل سنگدانه‌ها، در سنگدانه‌های طبیعی نیز از سنگدانه‌های شکسته استفاده شده است. برای جایگزینی سنگدانه‌ها، نیز فقط درشت‌دانه‌ها با درشت‌دانه‌ی بازیافتی جایگزین شدند و در تمام نمونه‌ها از ریزدانه‌ی طبیعی استفاده شده است. دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده‌شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است. سیمان استفاده‌شده نیز سیمان تیپ II بود و از میکروسیلیس و ژئولیت به‌عنوان مواد جایگزین سیمان

جدول ۱. طرح مخلوط بتن مادر.

۰/۳۴	نسبت آب به سیمان
۴۲۰	سیمان ( $\text{Kg/m}^3$ )
۳۳۵	سنگدانه‌ی $9/5-19 \text{ mm}$ ( $\text{Kg/m}^3$ )
۲۵۸	سنگدانه‌ی $4/75-12 \text{ mm}$ ( $\text{Kg/m}^3$ )
۱۲۳۸	سنگدانه‌ی $0-6 \text{ mm}$ ( $\text{Kg/m}^3$ )



شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده‌شده.

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح سنگدانه‌ی استفاده‌شده.

درشت‌دانه‌ی طبیعی	درشت‌دانه‌ی بازیافتی	ریزدانه‌ی طبیعی	درشت‌دانه‌ی طبیعی	درشت‌دانه‌ی بازیافتی
۳/۴۱	۷/۴۵	جذب آب حالت اشباع (%)	۲/۷۰	۲۷/۷۲
۲/۵۱	۲/۳۵	چگالی SSD ( $\text{ton/m}^3$ )	۲/۶۲	۲/۳۵
*	۲۷/۷۲	آزمایش سایش لس آنجلس (%)	۱۵/۹۳	۲۷/۷۲

بازیافتی و ۱۰۰٪ درشت‌دانه و ریزدانه‌ی بازیافتی بررسی کردند. در پژوهش اخیر، سیمان پرتلند در نسبت‌های جایگزینی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد با خاکستر شلتوک برنج جایگزین شد و نتایج نشان داد که برای بتن ساخته‌شده با ۱۰۰٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی، افزودن ۲۰ یا ۳۵ درصد خاکستر شلتوک برنج منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ی در مقاومت فشاری می‌شود. همچنین جایگزینی ۵٪ سیمان پرتلند با خاکستر شلتوک برنج در همه‌ی طرح‌ها منجر به افت شدید مقاومت (کمترین مقاومت فشاری) شد.

یکی از موضوعاتی که در کاربرد سنگدانه‌ی بازیافتی و پوزولان‌ها در تولید بتن مورد پرسش است، خواص بلندمدت بتن ساخته‌شده با سنگدانه‌ی بازیافتی و پوزولان است. این مسئله با توجه به نقش‌آفرینی پوزولان‌ها در افزایش مقاومت مکانیکی بسیار حائز اهمیت است.

برای استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی در کشورها استانداردهایی وضع شده است؛<sup>[۳۱]</sup> که سنگدانه‌های بازیافتی را با توجه به آلودگی آن‌ها، کیفیت و مقاومت آن‌ها دسته‌بندی کرده و اجازه‌ی استفاده تا حد مشخصی از آن‌ها را داده‌اند. در ایران، اما استاندارد مشخصی برای سنگدانه‌های بازیافتی وجود ندارد.

همچنین خود عملکرد سنگدانه‌ی بازیافتی در بلندمدت نیز سؤال‌برانگیز است؛ لذا در پژوهش حاضر، یک نوع درشت‌دانه‌ی بازیافتی با نسبت‌های جایگزینی ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد و همچنین دو نوع پوزولان شامل ۰.۸٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ ژئولیت در طرح‌های اختلاط استفاده شده است. همچنین نمونه‌های با سن ۳ ساله جهت ارزیابی عملکرد مکانیکی بلندمدت آزمایش شده‌اند.

## ۲. روش پژوهش

### ۲.۱. سیمان و مصالح سنگدانه‌ی

در پژوهش حاضر، یک نوع سنگدانه‌ی بازیافتی و یک نوع سنگدانه‌ی طبیعی استفاده شده است. سنگدانه‌های بازیافتی حاصل خردشدن دستی نمونه‌های مکعبی فشاری (۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر) بوده و در محیط آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران تولید شده‌اند. همه‌ی نمونه‌ها دارای طرح اختلاط واحد بودند و در بخشی از پروژه‌ی بازار بزرگ ایران (ایران مال) در حد فاصل سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۵ استفاده شده بودند. همچنین سن نمونه‌ها در حین خردایش به‌صورت متوسط ۶ ماه برآورد شده بود. برای تهیه‌ی سنگدانه‌های ذکرشده، استاندارد استفاده‌شده‌ی به‌دلیل نبود استاندارد در کشور مد نظر نبوده است.

در آزمایش جذب آب، درشت‌دانه‌ی بازیافتی استفاده‌شده، جذب آب بسیار بیشتری نسبت به درشت‌دانه‌ی طبیعی (۱/۷۵ برابر درشت‌دانه‌ی طبیعی) داشته و چگالی درشت‌دانه‌ی بازیافتی نیز ۱۰٪ از درشت‌دانه‌ی طبیعی کمتر بوده است. در آزمایش سایش لس آنجلس نیز باید عنوان کرد که سنگدانه‌ی بازیافتی به‌مراتب عملکرد کیفی ضعیف‌تری نسبت به سنگدانه‌ی طبیعی داشته است. در آزمایش اخیر، شاخص ۱۵/۹۳ و ۲۷/۷۲ درصد به ترتیب برای سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی محاسبه شد. همان‌طور که در پیشینه‌ی پژوهش اشاره شد، خمیر سیمان هیدراته‌شده‌ی چسبیده به سنگدانه‌ها در درشت‌دانه‌ی بازیافتی کیفیت عملکردی را به‌مراتب نسبت به مصالح سنگدانه‌ی طبیعی کاهش می‌دهد. تخلخل بیشتر و همچنین وجود ترک‌های متعدد بین خمیر سیمان هیدراته‌شده و سنگدانه در درشت‌دانه‌ی بازیافتی از دیگر علل کیفیت عملکردی پایین سنگدانه‌های بازیافتی است.

استفاده شده است، که مشخصات شیمیایی به‌دست‌آمده از آزمایش XRF هرکدام در جدول ۳ ارائه شده است.

### ۳.۲. آزمایش‌های انجام‌شده

در پژوهش حاضر، 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<sup>[۳۳]</sup> صورت گرفته و برای بررسی ریزساختار سنگدانه‌ها از آزمایش SEM استفاده شده است. همچنین جهت ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوامی نمونه‌های بتنی ساخته‌شده، آزمایش‌های متعددی در برنامه‌ی پژوهش حاضر در نظر گرفته شد؛ که در آن، مقاومت فشاری با استاندارد BS 1۲۳۹۰-۳ EN<sup>[۳۴]</sup> در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ ساله بر روی ۳ نمونه‌ی مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ (cm<sup>۳</sup>)، آزمایش مقاومت کششی باتوجه به استاندارد ASTM C۴۹۶<sup>[۳۵]</sup> بر روی دو نمونه‌ی استوانه‌ی ۳۰×۱۵ در سنین ۷ و

### ۲.۲. طرح مخلوط

در پژوهش حاضر، ۱۲ طرح اختلاط جهت دستیابی به اهداف پژوهش طراحی شده است. مقاومت ۲۸ روزه ی ۴۰ (MPa) مینای طراحی اختلاط طرح شاهد قرار داده شد. برای این منظور، نسبت آب به سیمان ۰/۵ به‌دست آمد. سپس درشت‌دانه‌های طبیعی با درصد‌های ۳۰، ۵۰، و ۱۰۰ با درشت‌دانه‌ی بازیافتی جایگزین شدند. همچنین سیمان نیز با میکروسیلیس 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 با توجه به استاندارد ASTM C۱۹۲<sup>[۳۶]</sup> انجام شد، اما به‌دلیل جذب آب بالای سنگدانه‌های بازیافتی، پیش از اختلاط،

### جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان، میکروسیلیس و

زئولیت مصرفی در پژوهش حاضر.

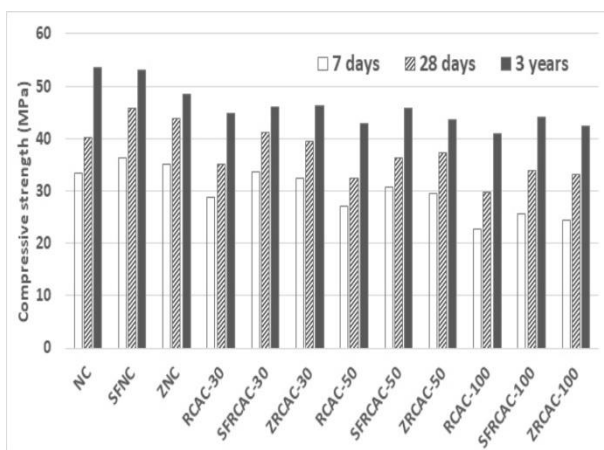
ترکیب شیمیایی	سیمان	میکروسیلیس	زئولیت
SiO <sub>۲</sub> (%)	۲۷/۳	۸۶/۱۸	۶۴/۹
Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub> (%)	۴/۶	۱/۴۴	۱۲/۳
Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub> (%)	۲/۷	۰/۲	۰/۳۶
CaO (%)	۴۶/۷	۳/۰۶	۲/۱
MgO (%)	۳/۵	۱/۳۲	۰/۹
SO <sub>۳</sub> (%)	۲/۰۴	۰/۳۳۷	۰/۱۹
Na <sub>۲</sub> O (%)	۰/۳۴	-	-
K <sub>۲</sub> O (%)	۰/۵۲	-	-

سنگدانه‌های بازیافتی به مدت ۶ ساعت در آب قرار داده شدند و روی آن‌ها با پلاستیک پوشانده شد. آب استفاده‌شده 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 شدند و ۲ دقیقه مخلوط و سپس قالب‌گیری صورت گرفت. پس از ساخت، قالب‌های حاوی بتن تازه به مدت ۲ ± ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شدند. بعد از خروج نمونه‌ها از قالب، نمونه‌های بتنی تا زمان انجام آزمایش در آب آهک اشباع در دمای ۲۰ ± ۲۵ °C نگهداری شدند. طرح اختلاط‌های ساخته‌شده در پژوهش حاضر در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

### جدول ۴. مشخصات طرح اختلاط‌های طراحی‌شده در پژوهش حاضر.

اسلامپ (cm)	فوق روان‌کننده (gr/m <sup>۳</sup> )	درشت‌دانه‌ی بازیافتی (kg/m <sup>۳</sup> )	درشت‌دانه‌ی طبیعی (kg/m <sup>۳</sup> )	ریزدانه (kg/m <sup>۳</sup> )	w/c	آب (kg/m <sup>۳</sup> )	زئولیت (kg/m <sup>۳</sup> )	میکروسیلیس (kg/m <sup>۳</sup> )	سیمان (kg/m <sup>۳</sup> )	
۸	۹۵۰	۰	۸۴۸	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	-	-	۳۵۰	NC
۸/۵	۱۲۴۰	۲۲۸	۵۹۴	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	-	-	۳۵۰	RCAC-۳۰
۷/۵	۱۲۰۰	۴۲۴	۴۲۴	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	-	-	۳۵۰	RCAC-۵۰
۸	۱۲۳۰	۷۶۱	۰	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	-	-	۳۵۰	RCAC-۱۰۰
۷/۵	۱۴۴۴	۰	۸۴۸	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	-	۲۸	۳۲۲	SFRCAC
۸	۱۴۵۱	۲۲۸	۵۹۴	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	-	۲۸	۳۲۲	SFRCAC-۳۰
۹	۱۴۹۲	۴۲۴	۴۲۴	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	-	۲۸	۳۲۲	SFRCAC-۵۰
۸	۱۴۷۴	۷۶۱	۰	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	-	۲۸	۳۲۲	SFRCAC-۱۰۰
۷	۱۵۲۶	۰	۸۴۸	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	۵۲/۵	-	۲۹۷/۵	ZRCAC
۷/۵	۱۴۹۸	۲۲۸	۵۹۴	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	۵۲/۵	-	۲۹۷/۵	ZRCAC-۳۰
۷/۵	۱۵۷۱	۴۲۴	۴۲۴	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	۵۲/۵	-	۲۹۷/۵	ZRCAC-۵۰
۸	۱۵۵۶	۷۶۱	۰	۹۷۹	۰/۵	۱۷۵	۵۲/۵	-	۲۹۷/۵	ZRCAC-۱۰۰

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 میکروسیلیس و زئولیت در درصدهای استفاده شده در پژوهش حاضر، تأثیر چندانی در بهبود مقاومت فشاری نخواهند داشت. اگرچه این مسئله باید در نظر گرفته شود که مبنای محاسبه‌ی طرح اختلاط حتی در کارهای سازه‌یی، همان سن ۲۸ روزه‌ی بتن است و عملاً مقاومت فشاری بلندمدت مدنظر طراحی قرار نمی‌گیرد. از طرفی، با بررسی طرح اختلاط‌های دارای درشت‌دانه‌ی بازیافتی نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی، مقاومت فشاری تمام طرح‌ها کاهش یافته است. به صورتی که در طرح RCAC-۳۰، در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به ترتیب به مقاومت فشاری ۲۸/۷، ۳۵/۱، ۴۴/۹ (MPa) اخذ شده است، که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۱۴، ۱۲، و ۱۶ درصد کاهش در مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد متناظر است. به همین ترتیب در طرح ۵۰-RCAC نیز مقاومت فشاری ۲۷/۱، ۳۲/۵، ۴۲/۹ (MPa) اخذ شده است، که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۱۹، ۱۹، و ۲۰ درصد کاهش در مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد متناظر است. طرح ۱۰۰-RCAC نیز مقاومت فشاری ۲۲/۸، ۲۹/۸، ۴۰ (MPa) را کسب کرده است، که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۳۲، ۲۶، و ۲۵ درصد کاهش در مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد متناظر است.



شکل ۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری.

۲۸ روزه و ۳ ساله انجام گرفت. همچنین آزمایش جذب آب با استاندارد ASTM C642<sup>[۳۶]</sup> بر روی سه نمونه‌ی مکعبی و آزمایش عمق نفوذ آب با استاندارد DIN ۱۰۴۸<sup>[۳۷]</sup> در سن ۲۸ روزه بر روی دو نمونه‌ی استوانه‌یی ۱۵×۳۰ سانتی‌متر جهت ارزیابی عملکرد دوامی نمونه‌های بتنی در نظر گرفته شد. در بخش بعد، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مصالح سنگ‌دانه‌یی و نمونه‌های بتنی ارائه شده است.

### ۳. تجزیه و تحلیل نتایج

#### ۱.۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

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

مقاومت فشاری طرح SFNC (طرح شاهد + ۸٪ میکروسیلیس) و ZNC (طرح شاهد + ۱۵٪ زئولیت)، هر کدام در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ ساله به ترتیب ۳۶/۳، ۴۵/۷، ۵۳/۱، ۴۳/۹، ۴۸/۵ (MPa) بود، که نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت استفاده از هر دو پوزولان در سنین کم است (۷ و ۲۸ روزه)، به‌گونه‌یی که طرح‌های SFNC و ZNC هر کدام در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۱۰ و ۱۴ درصد و ۵ و ۹ درصد افزایش مقاومت فشاری را نسبت به طرح شاهد (NC) نشان می‌دهند. در سن ۳ سال نیز همین طرح‌ها به ترتیب صفر و ۱۰ درصد کاهش در مقاومت فشاری را نسبت به طرح شاهد نشان دادند که مؤید آن است که با افزایش سن نمونه‌ی بتنی تا ۳ سال، عملاً پوزولان‌ها تأثیر چندانی در مقاومت فشاری کسب‌شده نسبت به طرح شاهد ندارند. به‌گونه‌یی که ۸٪ میکروسیلیس در سن ۳ سال تأثیر بسیار اندکی در افزایش مقاومت فشاری و ۱۵٪ زئولیت نیز تأثیر بسیار اندکی در کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد داشته‌اند. همچنین درصد کسب مقاومت نمونه‌های SFNC و ZNC نسبت به مقاومت در سن ۳ ساله، در سنین ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۶۸ و ۸۶ درصد و ۷۲ و ۹۰ درصد بوده است که نشان می‌دهد سرعت کسب مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی پوزولان بیشتر بوده است.

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

کد نمونه	مقاومت فشاری (MPa)			مقاومت کششی (MPa)		
	۷ روزه	۲۸ روزه	۳ ساله	۷ روزه	۲۸ روزه	۳ ساله
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

تا سن ۲۸ روزه تأثیر منفی جایگزینی ۳۰٪ از درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی توسط ۱۵٪ ژئولیت جبران می‌شود، اما بررسی همین طرح در سن ۳ ساله نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۱۴٪ نسبت به طرح شاهد (در سن ۳ ساله) کاهش یافته است. مسئله‌ی مورد توجه دیگر این است که در سن ۳ سال عملاً جایگزینی ۱۵٪ ژئولیت تأثیر قابل قبولی در افزایش و بهبود مقاومت فشاری طرح‌های دارای درشت‌دانه‌ی بازیافتی ندارد (۳، ۲، ۶ و ۷ درصد به ترتیب به ازاء نسبت‌های جایگزینی ۳۰، ۵۰، و ۱۰۰ درصد). بررسی و تحلیل داده‌های مقاومت فشاری طرح‌های حاوی ۸٪ میکروسیلیس و درشت‌دانه‌های بازیافتی نشان می‌دهد که در طرح‌های SFRACAC-۳۰، ۵۰، SFRACAC-۱۰۰، و SFRACAC-۱۰۰ مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ ساله نسبت به نمونه‌های بدون میکروسیلیس افزایش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت جایگزینی سیمان با میکروسیلیس در بتن حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی است. مقاومت فشاری طرح SFRACAC-۳۰ در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ ساله به ترتیب به ۴۶/۲، ۴۱/۲، ۳۳/۶ (MPa) رسید، که نسبت به طرح RCAC-۳۰ به ترتیب ذکر شده دارای ۱۷، ۱۷، و ۳ درصد بهبود در مقاومت فشاری است، که البته مشاهده می‌شود که در سن ۳ سال تغییر چندانی رخ نداده است.

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

در بررسی نتایج مقاومت فشاری، مسئله‌ی که حائز اهمیت است، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی طرح SFRACAC-۳۰ است، که برابر با ۴۱/۲ (MPa) محاسبه شد. مقایسه‌ی این مقاومت فشاری با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی طرح شاهد (۴۰/۱ MPa) نشان می‌دهد که جایگزینی ۸٪ از سیمان مصرفی با میکروسیلیس تأثیر منفی جایگزینی ۳۰٪ درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی در مقاومت فشاری را کاملاً 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) کاهش یافته است.

با مقایسه‌ی مقاومت فشاری نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود که استفاده از پوزولان‌ها در سن ۲۸ روزه، 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 و آن‌ها مقاومت فشاری بهتری نسبت به نمونه‌ی بدون

مقاومت کسب‌شده در سنین ۷ و ۲۸ روزه نسبت به مقاومت در سن ۳ سال در طرح‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی برای طرح‌های RCAC-۳۰، RCAC-۵۰، و RCAC-۱۰۰ به ترتیب ۶۴ و ۷۸ درصد؛ ۶۳ و ۷۶ درصد و ۵۷ و ۷۵ درصد بوده است. به تعبیر بهتر با استفاده از درشت‌دانه‌ی بازیافتی در طرح‌های اختلاط، در سن ۷ روزه، سرعت کسب مقاومت فشاری به‌خصوص در طرح RCAC-۱۰۰ اندکی کاهش یافت، اما در سن ۲۸ روزه 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 ۳۰ RCAC-۱۶ درصد، طرح RCAC-۵۰، ۲۰ درصد، و طرح RCAC-۱۰۰، ۲۵ درصد مقاومت فشاری کمتری نسبت به طرح شاهد دارند؛ اما با مقایسه‌ی داده‌ها با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی طرح شاهد (۴۰/۱ MPa) می‌توان نتیجه گرفت که با گذشت ۳ سال از ساخته شدن بتن حاوی ۱۰٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی، عملاً مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی طرح شاهد به‌صورت کامل حاصل می‌شود. این نتیجه‌گیری اگرچه از نقطه نظر 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 ویژه‌ی باشد و در طراحی مورد توجه قرار گیرد.

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

به همین ترتیب طرح ZRCAC-۵۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ ساله به مقاومت فشاری ۲۹/۴، ۳۷/۲، و ۴۳/۶ (MPa) رسیده است، که نسبت به طرح RCAC-۵۰ در همان سنین به ترتیب ۸، ۱، و ۲ درصد افزایش در مقاومت فشاری را نتیجه داده است.

طرح ZRCAC-۱۰۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ ساله به ترتیب مقاومت فشاری ۲۴/۳ a، ۳۳/۱، ۴۲/۵ (MPa) را اخذ کرده است، که نسبت به طرح RCAC-۱۰۰ در سنین ۷، ۱۱، و ۶ درصد بهبود در مقاومت فشاری هستند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تا جایگزینی ۳۰٪ از درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی مخصوصاً در سنین کم بهبود یافته 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 ژئولیت سنین ۷ و ۲۸ روزه نسبت به مقاومت در سن ۳ ساله برای نمونه‌های ZRCAC-۳۰، به ترتیب ۷۰ و ۸۶ درصد، برای طرح ZRCAC-۵۰ به ترتیب ۶۷ و ۸۵ درصد و برای طرح ZRCAC-۱۰۰، به ترتیب ۵۷ و ۷۸ درصد بوده است، که نشان‌دهنده‌ی افزایش سرعت کسب مقاومت در سنین کم است و در سن ۲۸ روزه 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٪ ژئولیت در افزایش سرعت روند کسب مقاومت فشاری است (تا سن ۲۸ روزه). یک نکته‌ی حائز اهمیت دیگر مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی طرح ZRCAC-۳۰ است، که برابر با ۳۹/۵ (MPa) محاسبه شده است. مقایسه‌ی داده‌ی مقاومت فشاری ۲۸ روزه این طرح با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی طرح شاهد نشان می‌دهد که

به گونه‌ای که بیشترین افزایش مقاومت کششی در سن ۷ روزه اتفاق افتاده است. همچنین با افزایش درصد جایگزینی، درصد بهبود مقاومت کششی نیز افزایش یافته و استفاده از میکروسیلیس مؤثرتر بوده است. اما در سن ۳ سال، تأثیر میکروسیلیس بسیار کم بوده است، تا جایی که در طرح SFRCAC-۵۰ مقاومت کششی ۳ ساله نسبت به طرح RCAC-۵۰، ۸٪ کاهش یافته است. بررسی نتایج مقاومت کششی طرح‌های دارای ۱۵٪ ژئولیت نیز نشان می‌دهد که طرح ZNC در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به مقاومت کششی ۲/۸، ۳/۸، و ۵/۹ (MPa) رسیده است، که نسبت به طرح NC، ۵، ۴، و ۲ درصد کاهش مقاومت کششی داشته‌اند، که این مهم از نظر آماری تغییر معناداری نیست و می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ژئولیت در مقاومت کششی تأثیر چندانی ندارد. طرح ZRCAC-۳۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به ترتیب به مقاومت کششی ۲/۹، ۳/۵، و ۵/۳ (MPa) را اخذ کرده است. به همین ترتیب، طرح ZRCAC-۵۰ در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به ترتیب به مقاومت کششی ۲/۸، ۳/۴، و ۵ (MPa) را اخذ کرده و طرح ZRCAC-۱۰۰ نیز در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به مقاومت کششی ۲/۴، ۲/۷، و ۴/۱ (MPa) رسیده‌اند.

این طرح‌ها نسبت به طرح‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی و بدون ژئولیت تغییر چندانی نداشته و مقاومت کششی تقریباً یکسانی داشته‌اند، به جز طرح ZRCAC-۱۰۰ که در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به ترتیب ۲۴، ۲۴، و ۱۰ درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به طرح RCAC-۱۰۰ داشته‌اند. از نتایج آزمایش اخیر می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ژئولیت در افزایش مقاومت کششی طرح‌های حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی تا جایگزینی ۵۰٪ تأثیر چندانی ندارد، اما برای 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 نداشته است، که نشان‌دهنده‌ی اثر ناچیز ژئولیت در سنین بالاست.

با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی بازیافتی، اثرگذاری میکروسیلیس و ژئولیت در مقاومت کششی نمونه‌ها بیشتر شده و در درصدهای جایگزینی بیشتر از ۳۰٪، دو پوزولان اخیر تأثیرگذاری بیشتری داشته‌اند. بیشترین مقاومت کششی را نمونه‌ی SFNC در تمام سنین داشته و در سن ۳ سال دارای مقاومت کششی ۶/۳ (MPa) و کمترین مقاومت کششی را نمونه‌ی RCAC-۱۰۰ در تمام سنین داشته و در سن ۳ سال، دارای مقاومت کششی ۳/۷ (MPa) بوده است، که نشانگر اثر منفی سنگ‌دانه‌های بازیافتی در

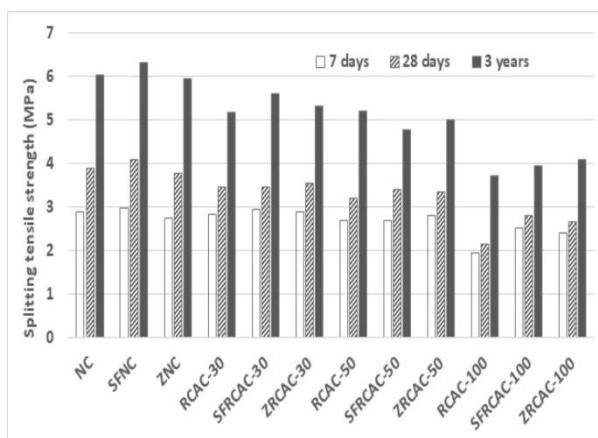
پوزولان و با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی داشته‌اند. اما در سن ۳ سال، تأثیر پوزولان کاهش یافته و مقاومت فشاری نمونه‌ها به نمونه‌ی شاهد نزدیک شده‌اند. نمونه‌های با پوزولان و سنگ‌دانه‌ی طبیعی (SFNC و ZNC) در سن ۳ سال، مقاومت فشاری کمتری داشته‌اند، که نشان‌دهنده‌ی اثر بیشتر پوزولان‌ها در سن کم بوده و در سن ۳ سال، تأثیر ناچیز یا حتی منفی داشته‌اند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که استفاده از ژئولیت 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 دو ماده‌ی مذکور در سنین کم است و با افزایش سن در نمونه‌های بدون پوزولان، حتی تأثیر منفی نیز داشته‌اند. با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌ی طبیعی با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، اثرگذاری دو پوزولان اخیر افزایش یافته و مانند قبل در سن ۲۸ روز، تأثیرگذاری آن‌ها 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 آن‌ها در سنین کم است.

### ۲.۳. نتایج آزمایش مقاومت کششی

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

از سوی دیگر، با افزودن ۸٪ میکروسیلیس، مقاومت کششی نمونه‌ی SFNC در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به ترتیب به ۳، ۴، و ۶/۳ (MPa) رسیده است، که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۳، ۵، و ۴ درصد افزایش مقاومت نسبت به طرح شاهد حتی در سن ۳ سال (برخلاف مقاومت فشاری) بوده است. در طرح‌های ساخته‌شده با درشت‌دانه‌ی بازیافتی و ۸٪ میکروسیلیس نیز بهبود در مقاومت کششی مشاهده شد و مقاومت کششی طرح ۳۰ - در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به ترتیب به ۳، ۳/۵، و ۵/۶ (MPa) رسیده است، که نسبت به طرح RCAC-۳۰ به ترتیب ۵، صفر، و ۸ درصد افزایش در مقاومت کششی را نشان می‌دهد. به همین ترتیب، مقاومت کششی طرح SFRCAC-۵۰ در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال به ترتیب به ۲/۷، ۳/۴، و ۴/۸ (MPa) رسیده است، که نسبت به طرح RCAC-۵۰ به ترتیب صفر، ۶، و ۸ درصد تغییر در مقاومت کششی را نشان می‌دهد.

مقاومت کششی طرح SFRCAC-۱۰۰ در سنین ۷ و ۲۸ روزه و ۳ سال نیز به ترتیب به ۲/۵، ۲/۸، و ۳/۹ (MPa) رسیده است، که نسبت به طرح RCAC-۱۰۰ به ترتیب ۳۰، ۳۰، و ۶ درصد افزایش مقاومت کششی را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی نتایج مقاومت کششی مشاهده می‌شود که در سنین کم و مخصوصاً در سن ۷ روزه، تأثیر میکروسیلیس در مقاومت کششی بیشتر است،



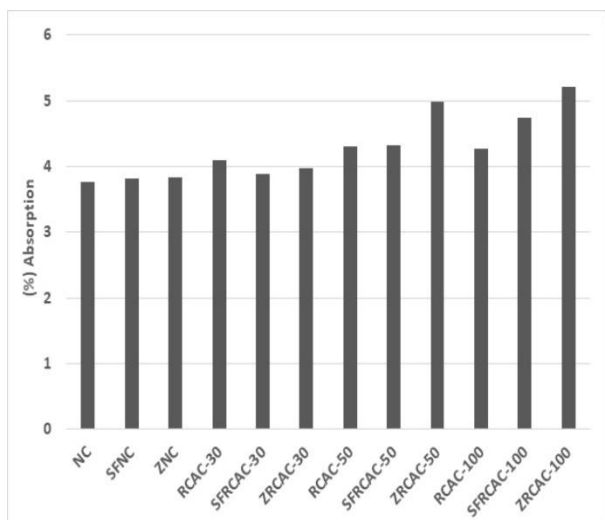
شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت کششی.

نیز با استفاده از میکرو سیلیس و ژئولیت، جذب آب افزایش یافته است اما این افزایش جذب آب بسیار جزئی بوده و قابل مقایسه با تغییرات جذب آب در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی نیست.

با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی تا ۳۰٪ با استفاده از هر کدام از پوزولان‌های ذکر شده، جذب آب کاهش یافته است، که این کاهش نیز چندان زیاد نبوده و قابل اغماض بوده است. اما با درصد‌های جایگزینی بیش از ۳۰٪، با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی، در صورت استفاده از ژئولیت درصد جذب آب افزایش یافته است، که برای ZRCAC-۱۰۰ بیشترین مقدار خود را داشته است. این اتفاق می‌تواند به دلیل ساختار متخلخل ژئولیت و تشکیل حباب‌های هوای ناخواسته در بتن باشد. اما میکروسیلیس تا ۵۰٪ جایگزینی درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی نیز تغییری در جذب آب ایجاد نکرده و با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه طبیعی با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، جذب آب در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نیز افزایش پیدا کرده است. در حالت کلی، استفاده از میکروسیلیس در زمان جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌ی طبیعی با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و ژئولیت در هر درصدی از جایگزینی سنگ‌دانه طبیعی

جدول ۶. جذب آب.

کد نمونه‌ها	جذب آب (%)
NC	۳/۸
SFNC	۳/۸
ZNC	۳/۸
RCAC-۳۰	۴/۱
SFRCAC-۳۰	۳/۹
ZRCAC-۳۰	۴
RCAC-۵۰	۴/۳
SFRCAC-۵۰	۴/۳
ZRCAC-۵۰	۵
RCAC-۱۰۰	۴/۳
SFRCAC-۱۰۰	۴/۷
ZRCAC-۱۰۰	۵/۲



شکل ۴. نتایج جذب آب.

مقاومت کششی بوده و بیشترین تأثیر را در کسب مقاومت کششی سن نمونه داشته است و با بیشتر شدن سن نمونه‌ها، مقاومت کششی نمونه‌ها به نمونه‌ی بدون پوزولان نزدیک شده و همگی افزایش یافته‌اند.

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

با مقایسه‌ی مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز و ۳ سال نسبت به نمونه‌ی شاهد مرتبط می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سن نمونه‌ها باعث نزدیک شدن مقاومت کششی و فشاری طرح‌ها به طرح شاهد شده و پوزولان‌ها تأثیر به مراتب بیشتری در مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی داشته‌اند. همچنین افزایش درصد جایگزینی تأثیر بیشتری در مقاومت فشاری داشته است، 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 مشاهده می‌شود. 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 ژئولیت مصرفی باشد زیرا که ژئولیت 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 ژئولیت تشکیل می‌شوند، باعث افزایش جذب آب نمونه‌ها می‌شوند. روند مشخص دیگری که وجود دارد، افزایش جذب آب نمونه‌های دارای ژئولیت و میکرو سیلیس است هرچند این افزایش در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کمتر بوده و قابل اغماض می‌باشد. نمونه‌های حاوی ژئولیت و میکرو سیلیس دارای جذب آب بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت 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 ژئولیت در جذب آب بتن ساخته شده با درشت‌دانه‌ی بازیافتی است. در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌ی طبیعی

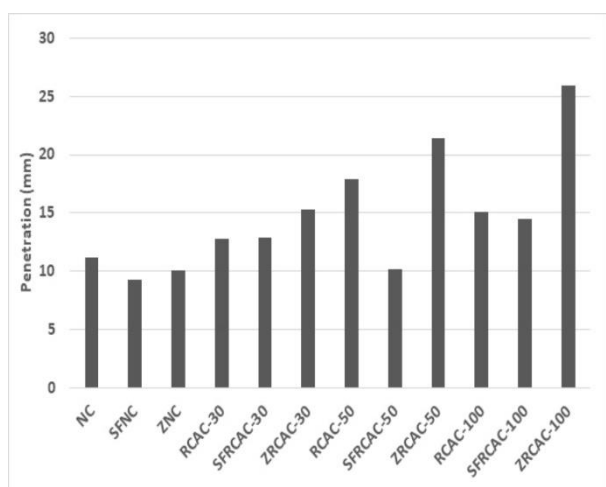


مهم‌ترین نتایجی که در پژوهش حاضر به دست آمد، مربوط به خواص ۳ ساله‌ی بتن‌های ساخته شده بوده است. همچنین آزمایش‌های دوامی نیز بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفته است، که نشان می‌دهد استفاده از پوزولان‌ها و مخصوصاً زئولیت می‌تواند آثار منفی در بتن داشته باشد. در ادامه، اهم یافته‌های پژوهش حاضر به اختصار شرح داده شده است:

- ۱- در سن ۳ سال، تأثیر میکروسیلیس در بهبود مقاومت‌های فشاری و کششی بسیار کاهش یافته است. استفاده از زئولیت نیز به اندازه‌ی میکروسیلیس مؤثر نبوده و بیشتر در سنین کم (۲۸ روزه) اثر خود را نشان داده است.
- ۲- استفاده از مواد جایگزین سیمان در سنین کم (۲۸ روز) بیشترین تأثیر را در عملکرد مکانیکی بتن داشته است، اما در سنین بالا (۳ سال) تأثیر محسوسی در عملکرد مکانیکی بتن نداشته است. به تعبیر بهتر نتایج نوشتار حاضر نشان داد که استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت عملاً فقط روند کسب مقاومت‌های فشاری و کششی را تسریع کرده و در بلندمدت، عملکرد مکانیکی مشابه با سیمان پرتلند و یا حتی ضعیف‌تر از آن داشته‌اند. اگرچه این مهم را باید در نظر گرفت که تأثیر استفاده از

جدول ۷. عمق نفوذ آب.

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



شکل ۵. عمق نفوذ آب.

با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، تأثیر مثبتی در جذب آب نداشته است و نتوانسته اثر منفی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی را خنثی کند. با افزایش جذب آب بتن نیز خطرهای دوامی متعددی ممکن است برای بتن یا میلگردهای کار شده در بتن به وجود آید. به این دلیل باید با احتیاط کامل در مورد استفاده از میکروسیلیس و زئولیت در بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی تصمیم‌گیری شود.

#### ۴.۳. نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در بتن

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در بتن در جدول ۷ و شکل ۵ ارائه شده است. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی، عمق نفوذ آب افزایش یافته است، به طوری که نمونه‌های RCAC-۳۰، RCAC-۵۰، و RCAC-۱۰۰ به ترتیب دارای ۱۴، ۶، و ۳۵ درصد عمق نفوذ آب بیشتر نسبت به نمونه‌ی طرح شاهد بوده‌اند، که این اثر نیز به دلیل نفوذپذیری و جذب آب بیشتر سنگ‌دانه‌های بازیافتی است. همچنین روند دیگری که در آزمایش کنونی وجود دارد، کاهش عمق نفوذ آب در نمونه‌های ساخته شده با درشت‌دانه‌ی طبیعی با استفاده از میکروسیلیس و زئولیت است، به طوری که در نمونه‌های SFNC و ZNC به ترتیب ۱۷ و ۱۰ درصد عمق نفوذ آب کاهش یافته است. از طرفی دیگر، نتایج نشان داده‌اند که در نمونه‌های ساخته شده با درشت‌دانه‌ی بازیافتی حاوی زئولیت، عمق نفوذ آب افزایش یافته و بیشتر از نمونه‌ی بدون پوزولان بوده 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 بوده است، که نشان‌دهنده‌ی اثر منفی زئولیت در عمق نفوذ آب در نمونه‌های بتنی بوده است. اما استفاده از میکروسیلیس در بتن حاوی ۵۰٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی باعث کاهش عمق نفوذ آب شده و نمونه‌ی SFRCAC-۵۰، ۴٪ کاهش عمق نفوذ آب را نشان داده است، که به معنی اثر مثبت میکروسیلیس در عمق نفوذ آب و بهبود ریزساختار بتن و پُردن خلل و فرج موجود در آن در درصد‌های جایگزینی ۵۰٪ سنگ‌دانه‌ی طبیعی با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی بوده است، که با افزایش درصد جایگزینی به ۱۰۰٪، این اختلاف کاهش یافته و در نمونه‌ی SFRCAC-۱۰۰ نسبت به نمونه‌ی RCAC-۱۰۰، به میزان 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 فوق‌روان‌کننده‌ی استفاده شده در بتن باشد، که این ناسازگاری باعث گیرافتادن هوا در بتن می‌شود، که یکی از عوامل اصلی تخلخل در بتن است.

#### ۴. نتیجه گیری

در نوشتار حاضر، نمونه‌های بتنی مختلفی با درصد‌های جایگزینی مختلف سنگ‌دانه‌ی طبیعی با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و با استفاده از ۸٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ زئولیت به عنوان جایگزین سیمان، ساخته شدند. آزمایش‌های مختلفی روی نمونه‌های بتنی انجام شد و اثر استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی و تأثیر میکروسیلیس و زئولیت در آن‌ها بررسی شد. همچنین جهت ارزیابی عملکرد بلندمدت نمونه‌های بتنی، داده‌های ۳ ساله برای مقاومت‌های فشاری و کششی اخذ و تحلیل شد.

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

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر 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 ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی را بهبود بخشد، اما خواص دوامی هنگام استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی بسیار تضعیف شده است و با استفاده از میکروسیلیس، بهبود بیشتری نسبت به زئولیت می‌توان انتظار داشت، اما همچنان عموماً نسبت به نمونه‌ی شاهد بدون سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، دوام کمتری در برابر شرایط محیطی داشته است. این نتیجه به آن معناست که با توجه به شرایط محیطی باید برای استفاده از سنگ‌دانه بازیافتی تصمیم‌گیری شود.

همچنین برای تسهیل استفاده از مصالح مذکور پیشنهاد می‌شود آیین‌نامه‌ی برای تولید، دسته‌بندی، و استفاده از آن در زمینه‌های مختلف تدوین شود و در پروژه‌های عمرانی درصدی از مصالح استفاده‌شده به مصالح بازیافتی تخصیص یابد، تا از این راه استفاده از مصالح بازیافتی تشویق شود.

پوزولان‌های یادشده در بتن‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به مراتب بیشتر از بتن معمولی حتی در سن ۳ سال بوده است. ۳- مقاومت فشاری در سن ۳ سال با استفاده از درشت‌دانه‌ی بازیافتی با افزایش درصد جایگزینی کاهش یافته و در جایگزینی ۱۰۰٪، کمترین مقاومت فشاری را داشته و در مقاومت کششی با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی با بازیافتی از ۳۰ به ۵۰ درصد تغییری رخ نداده است، اما با افزایش درصد جایگزینی به ۱۰۰٪، مقاومت کششی کاهش یافته است، که نشان می‌دهد استفاده تا ۵۰٪ از درشت‌دانه‌ی بازیافتی، تأثیر منفی قابل‌ملاحظه‌ی در مقاومت کششی نداشته است، 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 ساخته‌شده با ۳۰٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی بتنی، مقاومت فشاری طرح شاهد را به صورت کامل پوشش داده و اختلاف جزئی با آن داشته است. به تعبیر دیگر، جایگزینی ۳۰٪ از درشت‌دانه‌ی طبیعی با درشت‌دانه‌ی بازیافتی و استفاده از پوزولان‌های مذکور در نسبت‌های ذکرشده، عملکرد مکانیکی یکسانی با طرح شاهد داشته‌اند (در سن ۲۸ روزه). با افزایش سن نمونه‌ها به ۳ سال، بهبود مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی حاوی پوزولان بسیار کم بوده و این افزایش مقاومت به دلیل استفاده از پوزولان‌ها نمی‌تواند کاهش مقاومت ناشی از استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی را جبران کند.

## References- منابع

- Tu, T.Y., Chen, Y.Y. and Hwang, C.L., 2006 May. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cem Concr Res*, 36(5) pp.943–50. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.11.022.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E. and Bahadori, A., 2013 Jul. Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *J Clean Prod*, 51 pp.142–61. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- Bai, G., Zhu, C., Liu, C. and Liu, B., 2020. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *240, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd*; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117978
- Aghili Lotf, M., Ramezani pour, A.M. and Palasi, M. 2020. Investigation the effect of different types of recycled concrete aggregates on the engineering properties of concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3) pp.179–92. DOI: 10.22065/jsce.2018.127001.1519. [In Persian].
- Aghili Lotf, M., Palassi, M. and Ramezani pour, A.M., 2018. Evaluation of the Freeze and Thaw Resistance of Recycled Concrete Aggregates and Natural Aggregates; *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 3(4) pp.65–76. DOI: 10.22075/jtie.2018.13497.1270. [In Persian].
- Aghili Lotf, M., Ramezani pour, A.M. and Palassi, M., 2020. Evaluating the deicer salt scaling resistance of recycled aggregate concrete. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 35.2(4.2) pp.21–31. DOI: 10.24200/j30.2018.5042.2194. [In Persian].
- Palassi, M., Aghili Lotf, M. and Ramezani pour, A.M., 2018. Evaluating the utilization of recycled concrete aggregate in road applications. *Journal of Transportation Research*, [Internet]. URL: [https://www.trijournal.ir/article\\_63096.html](https://www.trijournal.ir/article_63096.html). [In Persian].
- Aghili Lotf, M., Ramezani pour, A.M. and Habibi, A., 2018. Utilization of recycled concrete powder as cement replacement or filler in masonry mortar. *Concrete Research*, 11(4) pp.133–43. DOI: 10.22124/jcr.2018.10197.1285. [In Persian].

9. Aghili Lotf, M., Ramezaniapour, A.M., 2018 Sep 1. Investigation on the correlations between different physical and mechanical properties of concrete made with recycled concrete aggregate. *Mdrsjrms, [Internet]*, 18(3) pp.153–67. URL:<http://mcej.modares.ac.ir/article-16-25738-en.html> [In Persian]
10. آیین نامه ی بتن ایران، ویرایش دوم، ۱۴۰۰.
11. Aghililotf, M., Kuroshkarim, M., Chamani, M.Y., Ramezaniapour, A.M., 2023. A study on properties of masonry mortar containing recycled fine aggregate. *Concrete Research*. DOI: 10.22124/jcr.2023.21865.1565. [In Persian].
12. Sajedi, S.F. and Jalilifar, H., 2019. Evaluating and comparing the effect of zeolite, micro-silica, and fly ash on the mechanical properties of recycled concrete made of 100% recycled aggregates. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Special Issue 4) pp.165–80. DOI: 10.22065/jsce.2018.117501.1448. [In Persian].
13. Shorbi Niazi, H. and Khalilzadeh Vahidi, E., 2022. Investigation of properties of concrete containing recycled aggregates and waste rubber with micro silica. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(3) pp.1151–64. DOI:10.22060/ceej.2021.19279.7123. [In Persian].
14. Aghili lotf, M., Ramezaniapour, A.M., Masoud Palasi, 1396. 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. [In Persian].
15. Djerbi Tegger, A., 2012 Feb. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Constr Build Mater*, 27(1) pp.112–6. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018.
16. Hewlett, P. and Liska, M., 2019. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 5th Ed. Elsevier.
17. McNeil, K. and Kang, T.H.K., 2013. Recycled concrete aggregates: a review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Korea Concrete Institute, Vol. 7, pp. 61–9. DOI: 10.1007/s40069-013-0032-5.
18. Thomas, J., Thaickavil, N.N. and Wilson, P.M., 2018 Sep 1. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 19 pp.349–65. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.05.007.
19. Aghililotf, M., Palassi, M., Ramezaniapour, A.M., 2021 Oct 15. Mechanical and durability assessment of unconfined recycled concrete aggregates and natural aggregates used in road constructions. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(12) pp.1518–30. DOI: 10.1080/10298436.2019.1701190.
20. Lotf, M.A., Ramezaniapour, A.M. and Palassi, M., 2018 Jun. Evaluating the frost resistance of recycled concrete aggregate by various standards. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6) p.04018117. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002254.
21. Katz, A., 2004 Dec. Treatments for the improvement of recycled aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(6) pp.597–603. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(597).
22. Dimitriou, G., Savva, P., Petrou, M.F., 2018 Jan 15. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater*, 158 pp.228–35. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137.
23. Mehta, P.K., 1986. *Concrete. Structure, Properties And Materials*; Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
24. Dilbas, H., Şimşek, M. and Çakir, Ö., 2014 Jun 30. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Constr Build Mater*, 61 pp.50–9. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.057.
25. Kou, S.C., Poon, C.S. and Agrela, F. 2011 Sep. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cem Concr Compos*, 33(8) pp.788–95. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009.
26. Jalilifar, H. and Sajedi, F., 2021 Jan 18. Micro-structural analysis of recycled concretes made with recycled coarse concrete aggregates. *Constr Build Mater*, 267. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121041.
27. Tam, V.W.Y., Tam, C.M., 2008 Oct. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA<sup>sc</sup>. *Constr Build Mater*, 22(10), pp.2068–77. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.024.
28. Kou, S. and Poon, C.S., 2006 Dec. Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*, 21(4) pp.130–6. DOI: 10.1007/BF02841223.
29. Corinaldesi, V. and Moriconi, G., 2009 Aug; Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater*; 23(8) pp.2869–76. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004.
30. Tangchirapat, W., Buranasing, R., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., 2008 Aug. Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates.

- Constr Build Mater*, 22(8) pp.1812–9. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.004.
31. De Brito, J., Agrela, F. and Silva, R.V., 2018. Legal regulations of recycled aggregate concrete in buildings and roads [Internet], *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Elsevier Ltd. pp. 509–526. DOI:10.1016/B978-0-08-102480-5.00018X.
32. ASTM C 192., 2002. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. ASTM International.
33. ASTM C 131–03., 2006. *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.
34. EN BS 12390-3., 2009. Testing hardened concrete: compressive strength of test specimens. British Standard Institution.
35. ASTM C 496. 2004. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
36. ASTM C 642. 2006. *Standard Test Method For Density, Absorption, And Voids In Hardened Concrete*. Annual book of ASTM standards.
37. DIN 1048. 1991. Testing of hardened concrete DIN , German Institute for Standardization Testing concrete.