

بررسی تأثیر مصرف تنها و ترکیبی ضایعات گرانیت و ضایعات سرامیک پرسلان بر رفتار بتن پودری واکنشی

حسین اسماعیلی ملک آبادی، سید بهزاد طلایی طبا*

گروه مهندسی عمران، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران.

* talaeetaba@iaukhsh.ac.ir

چکیده

در ساخت بتن پودری واکنشی (RPC)، حجم زیادی ماسه‌ی سیلیسی مصرف می‌شود. برای کاهش مصرف ماسه‌ی سیلیسی، استفاده از ضایعات، گزینه مناسب و کم هزینه‌ای است. در این تحقیق تأثیر جایگزینی پودر ضایعات گرانیت (GWP) و همچنین جایگذاری ضایعات سرامیک پرسلان (PCW) و پودر ضایعات گرانیت به صورت ترکیبی به جای ماسه‌ی سیلیسی در ساخت بتن RPC، با ۹ طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. میکروسیلیس با دو مقدار ۱۲/۵ و ۲۵٪ وزن سیمان مصرف شد. در همه طرح‌ها نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۲۰٪ و ابر روان کننده برابر ۲٪ وزن سیمان در نظر گرفته شد. ۵۰ و ۷۵٪ وزن ماسه‌ی سیلیسی با ضایعات گرانیت به تنهایی یا ترکیبی با خرده سرامیک پرسلان جایگزین شد. نمونه‌ها با بخار آب در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد برای آزمایش مقاومت فشاری و خمشی به مدت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد طرحی که حاوی مواد سیمانی با ۲۵٪ میکروسیلیس و مواد ماسه‌ای متشکل از ۵۰٪ ماسه‌ی سیلیسی و ۵۰٪ ضایعات ترکیبی بود، بالاترین مقاومت فشاری در تمام سنین را بدست آورد. همچنین در سایر حالات جایگزینی ماسه‌ی سیلیسی، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد به طور میانگین بیش از ۹٪ افزایش نشان داد. کمترین مقاومت فشاری در طرح حاوی میکروسیلیس ۱۲/۵٪ و ۷۵٪ ضایعات گرانیت تنها دیده شد. در آزمایش مقاومت خمشی به طور میانگین ۱۶/۴٪ افزایش در نمونه‌های حاوی ضایعات دیده شد. بالاترین افزایش مقاومت خمشی (۳۷٪) در دو طرح که یکی حاوی ۷۵٪ ضایعات ترکیبی و ۱۲/۵٪ میکروسیلیس و دیگری حاوی ۵۰٪ ضایعات گرانیت و ۲۵٪ میکروسیلیس بود مشاهده شد. میانگین مقاومت همه طرح‌های اختلاط ۱۵۹ مگاپاسکال شد؛ که برای یک بتن RPC قابل قبول است.

کلمات کلیدی

بتن پودری واکنشی_ مقاومت فشاری_ ضایعات گرانیت_ ضایعات سرامیک_ مقاومت خمشی

یکی از مسائل چالش برانگیز جهانی، استفاده از مواد زائد به دست آمده از صنایع مختلف، مانند ضایعات سرامیکی، کارخانه جات و سنگ‌های مختلف است. به عنوان نمونه سالانه میلیون‌ها تن ضایعات سرامیک تنها در قاره‌ی اروپا تولید می‌شود. این در کنار چند نمونه ضایعات دیگر مانند ضایعات شیشه، بتن و ضایعات کارخانه‌های سنگبری دغدغه‌های جدی در حوزه ساختمان ایجاد کرده است. صنعت ساخت و ساز می‌تواند نقش بسیار مهمی در استفاده دوباره از ضایعات برای کاهش خطرات زیست محیطی ایفا کند [۱].

در ساخت بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، مقدار بسیار زیادی مواد خام مصرف می‌شود. این امر سطح بالایی از انتشار کربن به همراه داشته و بعنوان یکی از خطرات زیست محیطی در عرصه ساخت و ساز محسوب می‌شود. استفاده از ضایعات صنعتی یا ساختمانی (مانند خرده بتن بازیافتی، خرده لاستیک، خرده شیشه، ...) به عنوان جایگزین سنگدانه‌های بتنی سالهاست که در دنیا مطرح است. علاوه بر این استفاده از ضایعات (مانند پودر گرانیات، پودر شیشه، سبوس برنج، ...) بعنوان جایگزین درصدی از سیمان نیز می‌تواند انتشار کربن را کاهش دهد؛ پس می‌توان نتیجه گرفت، پژوهش در خصوص توسعه بتن حاوی ضایعات با عملکرد مکانیکی و دوام بالا امری ضروری و قابل کاربرد است.

بتن پودری واکنش پذیر (RPC)^۱ به عنوان یکی از انواع بتن با توانمندی بسیار بالا می‌باشد که در دهه‌های اخیر توجه محققان زیادی را به خود جلب نموده است. بتن RPC در دهه ۱۹۹۰ توسط بخش علمی بویگ در فرانسه بصورت کاملاً حرفه‌ای و با افزایش مشخصه‌های مکانیکی توسعه یافت. به عنوان نمونه در سال ۱۹۹۵ میلادی چیریزی و همکاران اصول ساخت و نکات این بتن را معرفی نمودند. از مشخصه‌های این بتن می‌توان به حداقل مقاومت فشاری ۱۵۰ مگاپاسکال، تراکم حجمی بالا، نفوذپذیری بسیار کم، دوام زیاد، مقاومت سایشی و خوردگی بسیار خوب اشاره داشت؛ همچنین شایان ذکر است که تمام مواد در این بتن از ذرات بسیار ریز پودری بوده و از نظر شیمیایی بسیار واکنش پذیر هستند [۲-۵].

ترکیب ماسه‌ی سیلیسی، میکروسیلیس و سایر مواد ریز در این بتن فعالیت پوزولانی را بهبود می‌بخشد و به متراکم شدن ذرات کمک می‌کند. استفاده از ابر روان کننده برای کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، موجب بهبود مشخصه‌های مکانیکی می‌شود [۲]. این نوع بتن مزایای زیادی همچون: افزایش همگنی اندازه ذرات، متراکم شدن ذرات به دلیل حذف سنگدانه‌های درشت و استفاده از ماسه‌ی بسیار ریز (۱۵۰ تا ۶۰۰ میکرون) دارد [۴]. این امر موجب ایجاد ناحیه انتقال بسیار قوی در بتن و تشکیل ساختاری متراکم و بسیار مستحکم می‌شود.

RPC را می‌توان بر اساس مقاومت، به دو گروه با مقاومت ۲۰۰ و ۸۰۰ مگاپاسکال طبقه بندی کرد. مقاومت فشاری اولی در محدوده ۱۵۰ تا ۲۳۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی از ۲۰ تا ۵۰ مگاپاسکال است. مقاومت فشاری دومی در محدوده ۵۰۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی در محدوده ۴۵ تا ۱۴۰ مگاپاسکال است [۵، ۶].

سایر خواص مکانیکی، همانطور که در مقالات گزارش شده است، شامل مدول یانگ در محدوده ۵۰-۷۰ گیگاپاسکال، مدول گسیختگی در محدوده ۲۵-۱۵۰ مگاپاسکال، کرنش کششی نهایی در حدود ۱٪ و انرژی شکست در محدوده ۱۲-۴۰ کیلوژول بر متر مربع [۵، ۷، ۸].

اولین سازه RPC ساخته شده پل عابر پیاده و دوچرخه رو در شهر شبروک است که در سال ۱۹۹۷ ساخته شد [۹]. مکان‌های دیگری که با موفقیت از این بتن در ساخت آن‌ها استفاده شد، که می‌توان به پل تپه مریخ در آیووا، ایالات متحده، پل پیاده ساکاتا میرای در ژاپن و پل عابر پیاده ۱۲۰ متری تک سئول کره که به طور کامل با استفاده از RPC ساخته شده است، اشاره کرد [۱۰].

از آنجایی که تقاضای RPC در جهان افزایش یافته است، بسیاری از کشورها از جمله استرالیا، کانادا، چین، فرانسه و کره جنوبی تولید تجاری آن را طی چند سال گذشته شروع کرده‌اند [۱۱].

^۱ Reactive Powder Concrete

تا به امروز، بسیاری از محققان سعی کرده اند تا از ضایعات مختلفی در عرصه ساخت بتن RPC استفاده و یا با جایگزین کردن ضایعات بعنوان بخشی از سیمان، مصرف این ماده را کاهش دهند [۱۲-۱۶]؛ همچنین با جایگزین آن‌ها بجای ماسه، میزان وابستگی به ماسه‌ی سیلیسی را نیز کاهش دهند [۱۷-۲۰].

مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است، که برخی از آن‌ها به شرح زیر است:

صدیق و همکاران در سال ۲۰۲۱ در یک مطالعه روی بتن RPC با جایگزین پودر ضایعات سرامیک و شیشه به جای دوده سیلیس مشاهده کردند که ضایعات شیشه پودری و ضایعات کاشی سرامیک پودری را می‌توان با هم به عنوان ماده پوزولانیک مورد استفاده قرار داد. نسبت اختلاط بهینه برای این ماده پوزولانی ۸۰ درصد شیشه و ۲۰ سرامیک است. مقاومت فشاری RPC حاوی پودر ضایعات تا ۲۵ درصد جایگزینی دوده سیلیس، بالاتر بوده و جذب آب RPC با افزایش محتوای پودر ضایعات افزایش می‌یابد. درصد بهینه جایگزینی پودر ضایعات جای دوده سیلیس در RPC، ۱۵ درصد است که بیشترین افزایش در مقاومت فشاری را همراه دارد [۴].

اولویچ و هالبنیک، در سال ۲۰۱۶ در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر استفاده از ضایعات سرامیک در بتن پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که مقاومت فشاری ملات سیمان حاوی ضایعات سرامیکی با میزان تکه تکه شدن این ضایعات افزایش می‌یابد. استفاده از قطعات خرد شده کمتر از ۰/۲ میلی متر، ملات سیمانی با مقاومت کششی خوب و قابلیت جذب آب کم را حاصل می‌کند. همچنین افزایش میزان مصرف ضایعات سرامیکی باعث افزایش مقاومت فشاری بتن‌های مورد بررسی شد. بیشترین مقاومت فشاری (با افزایش ۱۲/۳ درصدی نسبت به نمونه شاهد) در بتن‌های حاوی ۳۰ درصد ضایعات سرامیکی دیده شد. این بتن پس از ۱۵۰ سیکل انجماد و یخ زدایی نسبت به نمونه‌های شاهد ۱۰ درصد کاهش مقاومت نشان داد [۲۱].

ماس و همکاران، در یک تحقیق برای ساخت بتن حاوی ضایعات، بخشی از سیمان مصرفی آن را با ضایعات سرامیک (CW)^۱ پرسلان جایگزین کردند. ضایعات سرامیک را از ۱۵٪ تا ۵۰٪ وزنی برای جایگزینی سیمان پرتلند به جهت ارزیابی رفتار پوزولانی این ماده استفاده کردند. نمونه‌ها را در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به مدت زمان‌های مختلف تحت عمل آوری قرار دادند. آن‌ها دریافتند که ترکیب CW برای واکنش با پرتلندیت تشکیل شده در طی هیدراتاسیون سیمان پرتلند برای تشکیل ترکیبات سیمانی از طریق واکنش پوزولانی مناسب است. کارایی ملات‌های حاوی CW شبیه به کارایی ملات شاهد بود. مواد افزودنی در محدوده ۱۵ تا ۳۵٪ وزنی، مقاومت خوبی را کسب کردند و به ترتیب پس از عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه، بالاتر از ۷۵ و ۸۵٪ نسبت به نمونه شاهد هستند [۲۲].

چان و چو در سال ۲۰۰۴ در تحقیقی بر روی RPC گزارش دادند که استفاده از میکروسیلیس در RPC به همراه الیاف فولادی، موجب رشد چسبندگی بین الیاف فولادی و مواد سیمان شد. بهترین درصد جایگزینی میکروسیلیس به جای سیمان بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بود [۷].

میهوب و همکاران در سال ۲۰۲۱ در تحقیقی بر روی خواص بتن RPC نشان دادند که استفاده از روش عمل آوری اتوکلاو با استفاده از دوز کم سیمان برابر با ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌تواند نتایج مقاومت فشاری بالاتری نسبت به عمل آوری با بخار داشته باشد. درصد افزایش مقاومت فشاری به ۳۳٪ در هنگام استفاده از خاکستر بادی با ۴۰٪ جایگزینی سیمان تحت عمل آوری اتوکلاو منتهی شد. درصد افزایش مقاومت فشاری در هنگام استفاده از خاکستر پسته برنج با ۳۰ درصد جایگزینی دوده سیلیس تحت عمل آوری با بخار به ۴۵٪ افزایش یافت. ترکیب نانو مواد نیز، با جایگزینی ۳٪ از سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۱۲٪ شد [۲۳].

سانجوان و آندراده در سال ۲۰۲۱ در یک مطالعه بر روی دوام بتن RPC نشان دادند: در RPC ضریب نفوذپذیری هوا حدود ۵۰ برابر کمتر و انتشار کلرید حدود ۳۰ برابر پایین‌تر از بتن C۸۰ و عمق کربناته شدن در RPC پس از دو سال قرار گرفتن در معرض شرایط طبیعی تقریباً صفر بود. نرخ خوردگی در RPC حدود ۲۵ برابر کمتر نسبت به بتن C۸۰ بود [۲۴]. هیرمات و و یاراگال در سال ۲۰۱۷ در تحقیقی بروی تأثیر مدت زمان اختلاط بر روی RPC، با انجام آزمایش SEM^۲ یافتند که به طور کلی، با افزایش مدت زمان اختلاط، درصد حفره‌های هوای محبوس شده نیز افزایش می‌یابد؛ همچنین RPC تهیه شده با مدت زمان

¹ Ceramic Waste

² Scanning Electron Microscopy

اختلاط ۱۵ دقیقه در مقایسه با سایر مخلوط‌های RPC تهیه شده با مدت زمان اختلاط ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه، مقاومت بالاتری را نشان داد [۱۸].

احمد و همکاران در سال ۲۰۲۳ در یک تحقیق برای ساخت بتن معمولی از ضایعات سرامیک (CW) استفاده کردند. نتایج حاکی از این بود که تجزیه و تحلیل هزینه نشان می‌دهد که CW تا ۷۵٪ می‌تواند برای کاربردهای سازه‌ای استفاده شود که هزینه بتن را ۹/۸۱٪ کاهش می‌دهد. CW به علت ایجاد تخلخل در بتن موجب کاهش مقاومت می‌شوند با این حال مصرف CW تا ۱۰٪ می‌تواند برای بتن با مقاومت معمولی استفاده شود [۲۵].

دوورکین و همکاران در سال ۲۰۲۴ برای بهینه سازی بتن اسفنجی از ضایعات خرد شده گرانیت استفاده کردند. مقاومت فشاری بتن اسفنجی ساخته شده با خرده‌های گرانیت (۲/۵ تا ۵ میلی‌متر) بیشتر از بتن ساخته شده خرده‌های گرانیت (۵ تا ۱۰ میلی‌متر) بود. خرده‌های ریزتر (۲/۵ تا ۵ میلی‌متر) به دلیل کاهش تخلخل، منجر به چگالی بالاتر بتن شده و مقاومت و کیفیت بتن را نیز افزایش داد [۲۶].

منحاج الدین و سها (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای با استفاده از پودر ضایعات گرانیت (WGP^۱) در بتن مشاهده کردند که مقاومت فشاری بتن با پودر ضایعات گرانیت تا ۴۰ درصد جایگزینی افزایش می‌یابد که این افزایش مقاومت به دلیل کاهش بسیار زیاد تخلخل و تسریع هیدراتاسیون می‌باشد. اما بعد از ۴۰٪ به دلیل افزایش تخلخل، مقاومت کاهش می‌یابد. اما با جایگزینی ۵۰٪ WGP مقاومت خمشی ۲۹٪ افزایش داشت. همچنین با استفاده از WGP ۶/۳۲ درصد هزینه‌ها کاهش می‌یابد [۲۷].

هاتس و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی با اضافه کردن غبار گرانیت در کنار دوده سیلیس در بتن پودری یافتند که با مصرف ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب دوده سیلیس و مقدار ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب غبار گرانیت، به ترتیب ۲۵، ۴۶ و ۵۶ درصد افزایش در مقاومت ۲۸ روزه حاصل شد. همچنین مهمترین عامل که در تمام مراحل بر مقاومت فشاری تأثیر می‌گذارد، مقدار دوده سیلیس است که افزایش آن تا ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، بسته به میزان گرد و غبار گرانیت، موجب به افزایش ۲۵ تا ۴۰ درصدی مقاومت در سن ۱ روزه بتن می‌شود. تأثیر غبار گرانیت در ۳ روزگی عمل‌آوری بیشتر مشخص می‌شود [۲۸].

توافیک و همکاران در سال ۲۰۲۳، پودر سرامیک بازیافتی و پودر آجر بازیافتی را در درصدهای ۵ تا ۱۵٪ به جای سیمان در بتن پرمقاومت جایگزین نمودند [۲۹]. مزیت مهم این کار در جایگزینی ۱۵٪، کاهش میزان مصرف انرژی مورد نیاز در فرآیند تولید سیمان به میزان ۱۳٪ بود. همچنین با جایگزینی ۵ و ۱۰٪ از سیمان مصرفی در بتن پرمقاومت، نتایج تحقیق یاد شده نشان داد که ماتریس متراکم تری در خمیر سیمان هیدراته شده حاصل خواهد شد؛ هرچند در تمام درصدهای جایگزینی مقاومت فشاری بتن حاصل کم شده بود.

صفری و ریسی در سال ۲۰۲۰ با جایگزین نمودن ضایعات گرانیت در بتن پودری واکنشی دریافتند که ۳۰٪ جایگزینی ماسه سیلیسی با گرانیت و دارابودن ۲۵٪ میکروسیلیس منجر به بهترین میزان افزایش مقاومت فشاری خواهد شد [۳۰]. هاتس و همکاران در سال ۲۰۲۴ در یک پژوهش آزمایشگاهی - تحلیلی تأثیر استفاده از غبار گرانیت و میکروسیلیس به صورت توأم را بر خواص فیزیکی و مکانیکی و ریزساختار RPC بررسی نمودند [۲۸]. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن غبار گرانیت به طرح مخلوط این بتن تا حدود ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب منجر به افزایش مقاومت فشاری تا بیش از ۵۰٪ خواهد شد. همچنین در این حالت خمیر سیمان هیدراته شده ریزساختار متراکم تری را از خود نشان داده بود.

محمد و همکاران در سال ۲۰۲۰ مقاومت فشاری RPC را در حالت استفاده از مصالح گوناگون مورد بررسی قرار دادند [۳۱]. این مصالح دانه‌های سرامیک پرس‌لان، دانه‌های خرده شیشه و دانه‌های گرانوله کربن فعال بود. نتایج تحقیق یاد شده افزایش مقاومت فشاری در حالت جایگزینی ۲۰٪ از سنگدانه ماسه‌ای با مواد پیش گفته بود. البته در تمام حالات مورد بررسی در آن پژوهش حداکثر افزایش مقاومت فشاری زیر ۳۰٪ بود.

^۱ Waste Granite Powder

ونکاتسان و همکاران در سال ۲۰۲۱ مقاومت و دوام بتن RPC حاوی پودر گرانیات و پودر شیشه را مورد ارزیابی قرار دادند [۳۲]. این دو ماده به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به کار رفت. نتایج نشان داد که درصد جایگزینی ۱۵٪ و ۳۵٪ گرانیات و شیشه، رضایت بخش ترین نتیجه را در مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر یون کلر به همراه خواهد داشت.

شنگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ سرباره فولادی را به میزان بسیار زیاد (بیش از ۵۰٪) به عنوان جایگزین سیمان در RPC استفاده نمودند [۳۳]. همچنین از الیاف فولادی نیز در نمونه های مورد بررسی آن پژوهش استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی ایشان نشان داد که تمام شاخصه های عملکردی RPC بهبود یافته است.

گارسیا و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی به منظور دستیابی بتن پودری واکنشی ارزان تر، جایگزینی سیمان و دوده سیلیس در RPC را با پودر شیشه و کربنات کلسیم بررسی کردند [۳۴]. در آن پژوهش که با فرآیندهای بهینه سازی همراه بود مصرف سیمان، پودر شیشه بازیافتی و کربنات کلسیم به میزان ۶۰۳، ۳۶۸ و ۱۱۸ کیلوگرم بر متر مکعب، علاوه بر تأمین ویژگی های مقاومتی RPC، از نظر زیست محیطی مقرون به صرفه ترین حالت را ایجاد میکرد.

ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ بر اساس فن آوری همگن سازی کریستال یخ یک RPC نوآورانه را معرفی نمودند [۳۵]. با این روند توانستند با مصرف ۱۵٪ میکروسیلیس، ضمن دست یابی به مقاومت فشاری حدود ۳۰۰ مگاپاسکال، و کاهش حدود ۵۰ درصدی جذب آب بهینه ترین حالت از نظر توسعه مصالح پایدار و انتشار کربن را حاصل کردند.

فرهان و همکاران در سال ۲۰۲۵ یک بتن پودری واکنشی قلیا فعال حاوی الیاف فولادی ساختند [۳۶]. الیاف فولادی و الیاف بازیافتی حاصل از تیرهای دور ریز در آن پژوهش با درصد حجمی ۱ تا ۴٪ مورد استفاده قرار گرفت. افزوده شدن جریان پذیری، مقاومت فشاری و کششی و مدول الاستیسیته به ویژه در حالت استفاده از ۳٪ الیاف بازیافتی از مهمترین نتایج آن پژوهش بود.

ژو و همکاران در سال ۲۰۲۴ پودر شیشه فوق ریز بازیافتی را در RPC برای کاربرد در پرینترهای سه بعدی مورد بررسی قرار دادند [۳۷]. دانه های شیشه بازیافتی با بعد ۱۰ میکرومتر به عنوان جایگزین صفر تا ۲۵ درصد سیمان به کار رفت. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که افزودن حدود ۲۰٪ پودر شیشه علاوه بر دست یابی به خواص مکانیکی مناسب برای RPC، پتانسیل قابل توجهی در رسیدن به بتن پایدار را از خود نشان میدهد.

الخالی و همکاران در سال ۲۰۲۲ بتن پودری واکنشی حاوی خاکستر پوسته برنج و پودر کوارتزیت ساختند [۳۸]. عمده توجه ایشان در آن تحقیق بر خواص مکانیکی این نوع بتن متمرکز بوده است. این محققین توانستند با مصرف سیمان کمتر در طرحهای حاوی خاکستر پوسته برنج و کوارتزیت، به مقاومت فشاری مورد قبول برای بتن پودری واکنشی برسند.

کاتیرول و مورالی در سال ۲۰۲۳ سرباره گرانوله کوره بلند و پودر کوارتز را برای ساخت بتن پودری واکنشی استفاده کردند [۳۹]. RPC ساخته شده در آن پژوهش که حاوی الیاف هم بود توانست مشخصات مکانیکی قابل قبولی را نشان دهد. بهترین نتیجه مربوط به نمونه حاوی ۱٪ الیاف و ۳۰٪ کواتزیت بود.

آرسلان و همکاران در سال ۲۰۲۲ نانوپلیتهای گرافن و سنگدانه های شیشه بازیافتی را در ساخت RPC استفاده کردند [۴۰]. ایشان موفق شدند با افزودن ۱۴٪/۰ نانوپلیت گرافن و ۳۰٪ پودر شیشه بازیافتی، حدود ۳۸٪ مقاومت فشاری بتن پودری واکنشی را افزایش دهند. همچنین مشاهده شد که با کاهش مصرف سیمان، ویژگی های دوام و محیط زیستی این بتن بهبود خواهد یافت.

با نگاهی به تاریخچه و ادبیات موضوع استفاده از ضایعات در بتن از یک سو و کاربرد بتن پودری واکنشی به دلیل خواص منحصر به فرد آن از سوی دیگر، در کنار مصرف زیاد سیمان و ماسه سیلیسی در این نوع بتن و همچنین موارد گزارش شده در تحقیقات گذشته در خصوص تأثیرات مثبت استفاده از ضایعات گرانیات و پرسیلان به نظر میرسد میتوان خواص بتن RPC را با جایگزینی پودر سرامیک پرسرانی و یا پودر ضایعات گرانیات به جای ماسه سیلیسی، بهبود بخشید. هدف از انجام تحقیق پیش رو، مقایسه عملکرد بتن RPC حاوی ضایعات گرانیات و یا پرسیلان به جای درصدی از ماسه سیلیسی است.

به دلیل این که بتن RPC عمدتاً با استحکام فوق العاده بالا شناخته می‌شود، تمرکز اصلی در این تحقیق بر روی مقاومت فشاری RPC حاوی ضایعات برای یافتن طرحی که تا حد امکان از این مواد زائد بهره گیرد، بود. در روند انجام پژوهش پیش رو، درصدهای ۵۰ و ۷۵٪ از ماسه سیلیسی یک بار به تنهایی با ضایعات گرانیات و یک بار با ترکیب ضایعات گرانیات و پرسلان جایگزین شده است. همچنین میکروسیلیس به عنوان یکی از مهمترین مصالح در ساخت RPC در دو میزان مختلف با اختلاف ۵۰٪ نسبت بهم در طرح اختلاط های مورد بررسی، استفاده شده است.

۲- مصالح و روش آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

از آنجایی که بتن RPC یک بتن پودری می‌باشد، سعی بر آن شد که تا حد امکان از مصالح بسیار ریز که میکروسیلیس ریزترین و ماسه سیلیسی با حداکثر سایز ۵۰۰ میکرون، درشت‌ترین آن‌ها بود، استفاده شود تا ناحیه انتقال بسیار قدرتمندی پدید آید. در جدول ۱ آنالیز شیمیایی مصالح مصرفی مشخص شده است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی مصالح مصرفی [۴۱-۴۴].

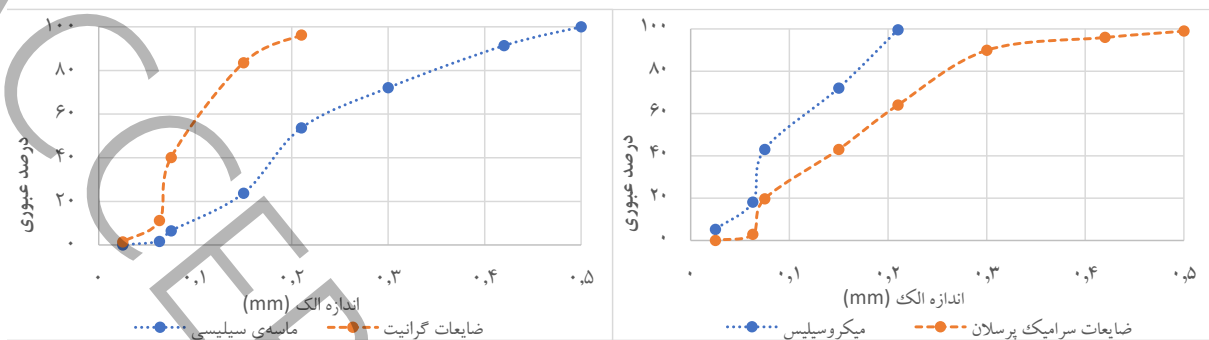
Table 1. Chemical analysis of used materials

گرانیات (%)	ماسه سیلیس (%)	میکروسیلیس (%)	سیمان (%)	
۶۱/۳۵	۹۶ - ۹۹	۸۵	۲۲/۸	SiO _۲
۱۶/۹۷	۰/۴ - ۱/۷	۱	۵/۷	Al _۲ O _۳
۶/۴۴	۰/۰۲ - ۰/۰۶	۲	۳/۶	Fe _۲ O _۳
۶/۵۰	۰/۰۷ - ۰/۲	۱/۵	۵۹/۱۱	CaO
۰/۰۴۸	---	---	۲/۵۴	SO _۳
۲/۴۷	---	۱/۵	۲/۳۸	MgO
۱/۳۰	۰/۰۲ - ۰/۰۶	---	۰/۲۷	K _۲ O
۳/۲۸	۰ - ۰/۰۱	---	۰/۷۴	Na _۲ O
۰/۱۵	۰/۰۱ - ۰/۳۵	۳/۵	۲/۱۶	L.O.I
---	---	---	۹	C _۳ A
۰/۱۷	---	---	---	MnO
۰/۲۴	---	۰/۱۰	---	P _۲ O _۵
---	---	۰/۵	---	Sic
---	---	۳	---	C
۰/۹۲	---	---	---	TiO _۲

۲-۱-۱- منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی

برای رسم منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی، آزمایش دانه‌بندی با الک مطابق با استاندارد ASTM-C136 انجام شد؛ اما این استاندارد صرفاً برای دانه‌بندی حداکثر تا الک ۲۰۰ تعریف شده است و از آنجایی که مصالح مصرف شده از الک شماره ۲۰۰ قابل عبور است، به استاندارد ASTM-C117 که مربوط به ذرات عبوری از الک ۲۰۰ است، مراجعه شد [۴۵-۴۷]. منحنی دانه بندی مصالح مصرفی در شکل ۱ قابل مشاهده است. همانگونه که در مقدمه نیز بیان شد در کنار نسبت پایین آب به سیمان و مصرف بالای سیمان، بسیار ریز بودن سنگدانه ها عامل اساسی در دستیابی به خواص مکانیکی ویژه RPC است. به طوری که عمده سنگدانه ها بعدی بین ۱۵۰ تا ۶۰۰ میکرون دارند. با بررسی منحنی دانه بندی ماسه، پودر گرانیات و پودر سرامیک پرسیلانی

موجود و مقایسه با مراجع موجود [۵-۲] در پژوهش حاضر میتوان این مصالح را از نظر ابعاد در محدوده متعارف برای ساخت RPC دانست.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی

Figure 1. Granulation curve of consumable materials

۲-۱-۲- سیمان

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۱-۳۲۵ کارخانه سیمان اصفهان [۴۳]، مطابق با استاندارد ASTM C150 [۴۸] استفاده شد. این مدل سیمان در کارهای بتنی و بنایی به صورت عمومی در جاهایی که محدودیت خاصی برای مصرف وجود نداشته باشد، مصرف می‌شود.

۲-۱-۳- ماسه‌ی سیلیسی

ماسه‌ی سیلیس، با مرغوبیت بسیار بالا، به عنوان پرکننده استفاده شد. ماسه‌ی سیلیسی مصرفی در این تحقیق از شرکت چپروک است [۴۴]. نفوذ پذیری مناسب و تأخیر در واکنش قلیایی دانه‌های ماسه، از دیگر ویژگی این ماده معدنی است. ماسه‌ی سیلیسی از نظر شیمیایی بی اثر است، به این معنی که با اکثر مواد واکنش شیمیایی نمی‌دهد. این ویژگی آن را در محیط‌هایی با قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی بالا یا آب و هوای شدید، که در آن مواد دیگر ممکن است خورده یا تخریب شوند، ایده‌آل می‌کند. یکی از مهم ترین ویژگی‌ها و مزیت‌های ماسه‌ی سیلیسی این است که معادن آن فراوان و دسترسی به آن آسان است.

۲-۱-۴- میکروسیلیس

میکروسیلیس به دلیل بالا بودن محتوای سیلیس آمورف، بعنوان یک ماده بسیار مهم در تولید RPC است که باعث بهبود واکنش پوزولانی می‌شود [۴۹-۵۱].

میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق در کارخانه فروسیلیس ایران (IFC)، تولید شده است [۴۱]. این محصول طبق استاندارد ASTM-C1240 به عنوان یک افزودنی به سیمان استفاده شد [۵۲]. خواص فیزیکی این پودر در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲. خواص فیزیکی میکروسیلیس [۴۱]
Table 2. Physical properties of micro silica

چگالی kg/m^3	چگالی ویژه	ساختار	رنگ	سطح مخصوص
۳۱۰ - ۳۵۰	۲/۲	آمورف	خاکستری روشن	۱۵ - ۳۰

۲-۱-۵- ابر روان کننده

در این تحقیق از ابر روان کننده سیکا ۵۱۱۰ (Sika ViscoCrete -5110 IR) که از نسل سوم افزودنی برای بتن و ملات می‌باشد و باعث افزایش و حفظ کارایی بتن برای مدت طولانی می‌گردد، مطابق با ASTM C494 استفاده شد [۵۳]. این ابر روان کننده برپایه‌ی پلی کربکسیلات و با چگالی ۱/۱ کیلوگرم بر لیتر است. این افزودنی با مکانیزم اثر دوگانه جذب سطحی و ایجاد ممانعت فضایی مولکول‌های پلیمری، باعث جدایی ذرات چسباننده از هم شده و موجب عدم نیاز به ویبره و کاهش میل به جمع شدگی در بتن می‌شود. همچنین امکان کاهش بسیار زیاد آب را فراهم می‌کند که باعث افزایش مقاومت و تراکم می‌شود و اینکه اثر پلاستیسیته (روانی) عالی دارد که در نتیجه بهبود رفتار تراکمی، قالب گیری و روانسازی بتن حاصل می‌شود. به دلیل عدم وجود ذرات کلراید، برای بتن‌های مسلح کاملاً بی ضرر بوده و میزان واکنش کربناسیون در بتن را کاهش می‌دهد.

۲-۱-۶- ضایعات سرامیک پسران

اصلی ترین و مهم ترین ویژگی سرامیک‌های پسرانی، تخلخل بسیار کم آن‌هاست که در اثر پخت در دمای بالا اتفاق می‌افتد همین تخلخل کم، مقاومت خمشی بالا و ویژگی‌ها و خواص منحصربه‌فرد دیگری را نیز برای این محصول فراهم می‌کند. سرامیک پسران بدلیل ساختار بسیار سخت، متراکم و با جذب آب بسیار پایین، به نظر می‌رسد می‌تواند تا حدودی نیازهای بتن RPC با ضایعات را برآورده کند.

۷-۱-۲- ضایعات گرانیت

سنگ گرانیت یکی از سنگ‌هایی است که در ایران معادن زیادی دارد و از اصلی‌ترین محصولات کارخانه‌های سنگبری به‌شمار می‌آید [۵۴]. ضایعات سنگ گرانیت مصرفی در این تحقیق از نوع گرانیت سیاه نطنز است که در شهر اصفهان به فراوانی یافت می‌شود. این سنگ به دلیل چقرمگی و استحکام بالا، قدرت مقاومت در شرایط سخت آب و هوایی را دارد. کیفیت این سنگ از دید ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در جدول ۳ شرح داده شده است. ضایعات گرانیت مورد استفاده به صورت لجن خشک شده از کارخانه تهیه شده و سپس با استفاده از دستگاه تست لس آنجلس خرد شدند. این محصول برای الک کردن و دانه بندی استفاده شد.

جدول ۳. کیفیت سنگ گرانیت مشکی نطنز از دید ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی [۴۲]

Table 3. Quality of Natanz black granite in terms of physical and mechanical properties

توصیف	پارامتر
بسیار پایین	تخلخل
بسیار پایین	جذب آب آزاد
بالا	مقاومت خمشی
بالا	مقاومت فشاری تک محوری
بالا	مقاومت کششی

۸-۱-۲- آب

از آنجایی که با افزودن آب به ترکیب مصالح مصرفی فعل و انفعالات شیمیایی بتن شروع می‌شود، آب نقشی بسیار حیاتی را در ساخت بتن به همراه دارد؛ لذا مقدار مصرف آب باید مناسب باشد تا فرآیند واکنش‌های سیمان به خوبی به انجام برسد. برای تولید و پخت بتن RPC از آب آشامیدنی که از شبکه آب شهری خمینی شهر بود، استفاده شد.

۲-۲- طرح‌های اختلاط

از آنجایی که این تحقیق بصورت آزمایشگاهی و طرح‌های اختلاط با حجم کم ساخته شد، یک ترازو با حساسیت ۰/۰۱ گرم برای وزن‌کشی مصالح مصرفی استفاده شد.

در تمامی طرح‌های اختلاط نسبت آب به مواد سیمانی ۲۰٪ (W/CM) و مقدار ابر روان‌کننده مصرفی ۲٪ (SP) وزن سیمان ثابت بود. میکروسیلیس با دو دوز مصرف ۱۲/۵ و ۲۵٪ وزن سیمان استفاده شد، همچنین ماسه‌ی سیلیسی با پودر ضایعات گرانیت با دو مقدار ۵۰ و ۷۵٪ جایگذاری شد و در طرح‌های ترکیبی ضایعات سرامیک پسران به جای ۵۰٪ از پودر ضایعات گرانیت جایگذاری شد.

به منظور نامگذاری نمونه‌ها از سه شاخص S--، G-- و P-- که به ترتیب بیانگر میزان درصد میکروسیلیس، درصد جایگزینی ماسه سیلیسی با پودر ضایعات گرانیت و میزان درصد جایگزینی ماسه سیلیسی با خرده سرامیک پسران هستند استفاده شده شده است. میکروسیلیس در دو میزان ۲۵٪ و ۱۲٫۵٪ سیمان استفاده شده است. به این ترتیب در نامگذاری نمونه‌ها از دو شاخص S25 یا S12 استفاده شده است. میزان جایگزینی ماسه سیلیسی با پودر گرانیت ۰٪، ۵۰٪ یا ۷۵٪ بوده است. به این ترتیب در نامگذاری نمونه‌ها از شاخص G00، G50 یا G75 استفاده شده است. در مورد جایگزینی پودر سرامیک پسران به جای ماسه سیلیسی، در نامگذاری‌ها، شاخص P00 به معنای جایگزینی ۰٪، P25 به معنای جایگزینی ۲۵٪ و P37 به معنای جایگزینی ۳۷/۵٪ از ماسه سیلیسی با پودر سرامیک است. خاطر نشان میشود که در نمونه‌های اخیر، همزمان با این میزان جایگزینی

¹ Water/Cement Material

² Super Plasticizer

پرسلان، به میزان مساوی (با همان درصد ۲۵٪ یا ۳۷/۵٪) از ضایعات گرانیت استفاده شده است. در جدول ۴ مشخصات طرح اختلاط نشان داده شده است.

طرح شاهد با ۸۴۵ کیلوگرم مواد سیمانی، میکروسیلیس به میزان ۲۵٪ وزن سیمان، ماسه‌ی سیلیسی به میزان ۱۲۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب و بدون ضایعات ساخته شد. در طراحی طرح اختلاط S25G50P00 نصف ماسه‌ی سیلیسی طرح شاهد (طرح شماره ۱) با پودر ضایعات گرانیت جایگذاری شد. برای طراحی طرح S25G75P00، به مقدار ۷۵٪ از ماسه‌ی سیلیسی طرح شاهد با ضایعات گرانیت جایگذاری شد. برای ساخت طرح S12G50P00، مقدار میکروسیلیس مصرف شده در طرح S25G50P00 که ۲۵٪ است به ۱۲/۵٪ کاهش یافت؛ همچنین طرح S12G75P00 نیز با کاهش مقدار میکروسیلیس مصرفی در طرح S25G75P00 از ۲۵٪ به ۱۲/۵٪، طراحی شد.

در این تحقیق به صورت کلی ۹ طرح اختلاط طراحی شد که تا به اینجا نحوه‌ی شکل گیری ۵ طرح اختلاط اول شرح داده شد اما برای طراحی ۴ طرح اختلاط دیگر صرفاً نیمی از ضایعات گرانیت در طرح‌های شماره ۱ تا ۴ در جدول ۴ با ضایعات سرامیک پرسلان جایگذاری شدند. خاطر نشان میشود که مبنای طرح اختلاط بتن RPC مورد استفاده در نمونه شاهد (شماره ۰) در جدول ۴)، به ویژه پارامترهای اساسی آن مانند نسبت آب به سیمان، میزان سیمان و میکروسیلیس با عنایت به تحقیقات گذشته انتخاب شده است [۲-۶].

جدول ۴. میزان مصالح مصرفی در هر طرح اختلاط

Table 4. Amount of materials used in each mixing plan

شماره طرح	نام طرح	مصالح مصرفی بر حسب (kg/m ^۳)							
		CM	C	SF	SS	GWP	PCW	SP	W/CM
۰	S25G00P00	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۱۲۶۹	--	--	۲	۲۰
۱	S25G50P00	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۶۳۴/۵	۶۳۴/۵	--	۲	۲۰
۲	S25G75P00	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۳۱۷/۲۵	۹۵۱/۷۵	--	۲	۲۰
۳	S12G50P00	۸۴۵	۷۳۹	۱۰۶	۶۳۴/۵	۶۳۴/۵	--	۲	۲۰
۴	S12G75P00	۸۴۵	۷۳۹	۱۰۶	۳۱۷/۲۵	۹۵۱/۷۵	--	۲	۲۰
۵	S25G25P25	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۶۳۴/۵	۳۱۷/۲۵	۳۱۷/۲۵	۲	۲۰
۶	S12G25P25	۸۴۵	۷۳۹	۱۰۶	۶۳۴/۵	۳۱۷/۲۵	۳۱۷/۲۵	۲	۲۰
۷	S12G37P37	۸۴۵	۷۳۹	۱۰۶	۳۱۷/۲۵	۴۷۵/۹	۴۷۵/۹	۲	۲۰
۸	S25G37P37	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۳۱۷/۲۵	۴۷۵/۹	۴۷۵/۹	۲	۲۰

C = سیمان، SF = میکروسیلیس، S = ماسه، GW = ضایعات گرانیت، PCW = ضایعات سرامیک پرسلان، W = آب،

CM = مواد سیمانی، SP = ابر روان کننده،

۳-۲- آماده سازی نمونه‌ها

برای مخلوط کردن مصالح از یک میکسر سرعت بالا که حداکثر سرعت آن ۳۶۰ دور بر دقیقه و در سه حالت دور کند با ۱۲۰ دور، دور متوسط با ۲۴۰ دور و دور تند با ۳۶۰ دور بر دقیقه قابل تنظیم بود، استفاده شد.

¹ Cement

² Silica fume

³ Sand

⁴ Granite waste

⁵ Porcelain ceramic waste

⁶ Cementitious materials

ابتدا سیمان و میکروسیلیس با هم به داخل مخزن میکسر اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه با دور کند مخلوط شدند زیرا ساختار پودری میکروسیلیس بسیار سبک است و اگر با دور متوسط و یا دور تند مخلوط شود، بخش زیادی از آن در هوا پخش می‌شود. سپس ماسه‌ی سیلیسی اضافه شده و با دور کند به مدت ۲ دقیقه مخلوط شد. بعد از آن ضایعات اضافه شده و ۲ دقیقه دیگر با دور کند مخلوط شدند تا ساختاری کاملاً یک پارچه و در هم آمیخته ایجاد شود. در آخر آب حاوی ابر روان کننده اضافه شد که برای تأثیر بهتر و قدرتمندتر ابر روان کننده، ابتدا آب مصرفی به دو قسمت تقسیم شده که به قسمت اول ۳۰٪ و به قسمت دوم ۷۰٪ ابر روان کننده اضافه شده بود؛ سپس هر یک از دو قسمت آب یاد شده به خوبی مخلوط شدند تا ابر روان کننده ها کاملاً در آب حل و یک پارچه شوند. برای افزودن آب، ابتدا قسمت اول آب که حاوی ۳۰٪ ابر روان کننده است را اضافه کرده و به مدت ۱ دقیقه با دور کند مخلوط شد تا از پاشیده شدن آب به جداره‌های مخزن جلوگیری شود زیرا اگر آب با دور متوسط و یا تند مخلوط شود مقداری از آن با پاشیده شدن به اطراف هدر می‌رود بعد از آنکه آب به خوبی به خورد مصالح رفت، باقی مانده آب که حاوی ۷۰٪ ابر روان کننده است، به تدریج به مخلوط اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه با دور تند مخلوط شد تا مصالح کاملاً ترکیب شوند.

۲-۴- قالب ها

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری از قالب‌های سه خانه فولادی به ابعاد $7 \times 7 \times 7$ سانتی‌متر که در شکل ۲- الف مشخص شده است، و برای مقاومت خمشی از قالب‌های سه خانه فولادی به ابعاد $4 \times 4 \times 16$ سانتی‌متر که در شکل ۲- ب مشخص شده است، استفاده شد.



شکل ۲. قالب های مورد استفاده
Figure 2. formworks used

۲-۵- عمل آوری

بعد از ویبره کردن، قالب‌ها داخل پوشش نایلون قرار داده شدند تا از تبخیر رطوبت نمونه‌ها جلوگیری شود. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب ماندند و بعد از قالب خارج شده و داخل مخزن بخار آب قرار گرفتند. از دستگاه تولید بخار آب، مدل MATEST-C307 برای عمل آوری استفاده شد، که در شکل ۳ قابل مشاهده است. دمای دستگاه بر روی ۹۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد، همچنین نرخ افزایش دمای این دستگاه حداکثر ۲۲ درجه سانتی‌گراد بر ساعت بود.



شکل ۳. مخزن تولید بخار آب

Figure 3. Steam generation tank

۲-۶- آزمایش‌ها

برای سنجش خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده از دو آزمایش مقاومت فشاری و خمشی استفاده شد. یک نکته بسیار مهم که صحت نتایج آزمایش‌ها را از بین می‌برد این است که اگر نمونه‌ها دچار شوک حرارتی شوند آزمایش‌ها با خطا همراه می‌شود و اعداد بدست آمده صحیح نیستند. به همین علت پس از آنکه نمونه‌ها عمل آوری شدند، برای جلوگیری از وارد شدن شوک حرارتی به نمونه‌ها، ابتدا دستگاه خاموش شد تا دمای داخل دستگاه کاهش یابد و تا حد امکان به دمای محیط نزدیک شود، سپس درب دستگاه برداشته شد و نمونه‌ها از داخل دستگاه بخار خارج شدند.

۲-۶-۱- آزمایش مقاومت خمشی

در این تحقیق از یک دستگاه آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM-C 78 استفاده شد [۵۵]. در آزمایش مقاومت خمشی، سرعت بارگذاری دستگاه در محدوده ۰/۹ تا ۱/۱۲ میلی متر بر دقیقه تنظیم شد. سپس تنش ترک خوردگی (مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی) مطابق رابطه ۱ بدست آمد.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

که در این رابطه تنش خمشی، P حداکثر نیروی اعمال شده، L فاصله بین دو تکیه گاه، b عرض نمونه و d ضخامت نمونه است. شکل ۴ دستگاه آزمایش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. دستگاه آزمایش مقاومت خمشی
Figure 4. Bending strength testing device

۲-۶-۲- آزمایش مقاومت فشاری

یکی از اصلی ترین و مهمترین ویژگی های بتن سخت شده مقاومت فشاری بتن آن است. اهمیت مقاومت فشاری بتن به حدی زیاد است که می توان آن را به عنوان معیاری برای سنجش اولیه تمام ویژگی های بتن دانست. در واقع در پژوهش حاضر مقاومت فشاری به جهت مشخص نمودن خواص مکانیکی نمونه های RPC تولید شده مورد استفاده قرار گرفته است. برای سنجش مقاومت فشاری نمونه ها از یک جک بتن شکن با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM-C109 انجام شده است [۵۵]. سرعت وارد کردن نیرو به نمونه ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه تنظیم شد. همچنین دقت شد که نمونه کاملاً در وسط دستگاه قرار گیرد. برای تعیین مقاومت فشاری نمونه ها، با ثبت میزان نیرویی که از جانب دستگاه به نمونه ها وارد شد، مقاومت فشاری تعیین گردید. شکل ۵ دستگاه آزمایش مقاومت خمشی را نشان می دهد.



شکل ۵. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

Figure 5. Compressive strength testing device

۳- نتایج

در این مطالعه، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا به تحلیل دقیق‌تری از رفتار مکانیکی آن‌ها پرداخته شود. هر ۹ طرح اختلاط در ۴ سری برای تعیین مقاومت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه ساخته شدند. در هر مرتبه ۶ نمونه مقاومت فشاری و ۶ نمونه مقاومت خمشی ساخته شد که در مجموع ۲۱۶ نمونه مقاومت فشاری و ۲۱۶ نمونه مقاومت خمشی ساخته شدند. پس از انجام آزمایش‌ها میانگین اعداد به دست آمده را حساب نموده و سپس عددی که نهایتاً ۵٪ با عدد میانگین فاصله داشت، قابل قبول واقع شد. ولی چنانچه عدد فاصله‌ی بیشتر از ۵٪ با میانگین اعداد داشت، بعنوان عدد مردود در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و خمشی در جدول ۵ قابل مشاهده هستند.

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها

Table 5. Compressive and flexural strength test results of the samples

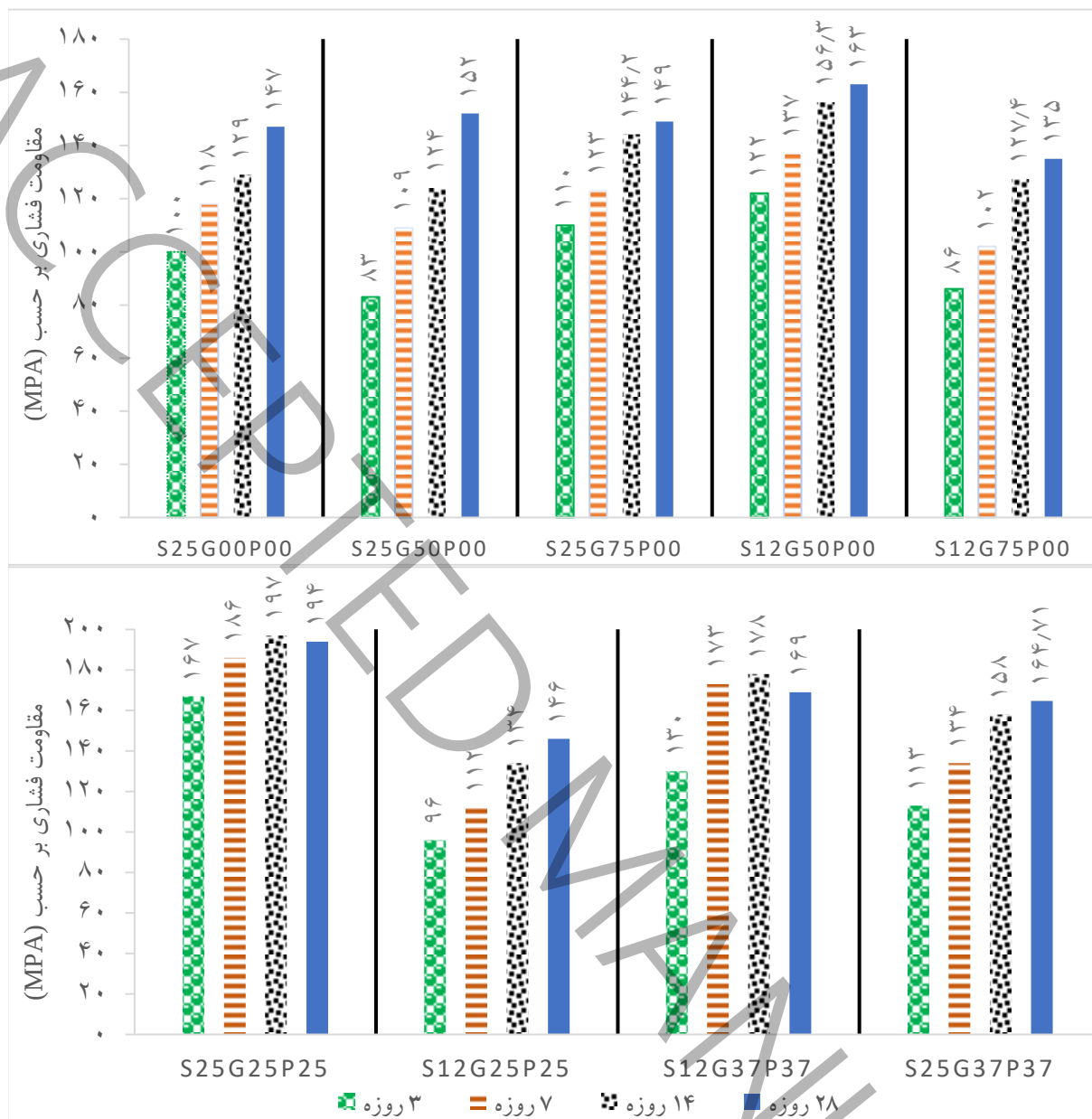
نام طرح	مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال (MPa)				مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال (MPa)			
	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۱۴	روزه ۲۸	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۱۴	روزه ۲۸
S25G00P00	۱۰۰	۱۱۸	۱۲۹	۱۴۷	۹	۱۴/۸	۱۷	۱۹
S25G50P00	۸۳	۱۰۹	۱۲۴	۱۵۲	۷/۷۱	۱۳	۲۰/۳	۲۳
S25G75P00	۱۱۰	۱۲۳	۱۴۴/۲	۱۴۹	۱۰	۱۵/۳۳	۱۸/۱۳	۲۱/۳
S12G50P00	۱۲۲	۱۳۷	۱۵۶/۳	۱۶۳	۱۵	۱۸/۷۴	۲۲/۹۱	۲۵/۹۴
S12G75P00	۸۶	۱۰۲	۱۲۷/۴	۱۳۵	۸/۶	۱۲	۱۵/۸۹	۱۷/۴
S25G25P25	۱۶۷	۱۸۶	۱۹۷	۱۹۴	۱۲/۴۲	۱۹	۲۱/۸۳	۲۳/۷۹
S12G25P25	۹۶	۱۱۲	۱۳۴	۱۴۶	۱۱	۱۶/۳۹	۱۹/۴۸	۱۹/۱۲
S12G37P37	۱۲۲	۱۷۵/۱	۱۶۹/۶	۱۶۵	۱۳	۱۸/۲	۲۰	۲۱
S25G37P37	۱۱۳	۱۳۴	۱۵۸	۱۶۴/۷۱	۱۴/۹	۱۹	۲۳/۷۴	۲۶

۳-۱- نتایج مقاومت فشاری

در شکل ۶ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها مشخص شده است. در یک نگاه کلی میتوان گفت که مقاومت فشاری همه نمونه‌ها با افزایش سن، روند افزایشی داشته است؛ اما طرح S25G25P25 در سن ۱۴ روز و طرح S12G37P37 در سن ۷ روز بیشترین مقاومت را از خود نشان داده اند. در ادامه در چهار بخش مجزا، تأثیر هر یک از عوامل "ضایعات گرانیته"، "ترکیب ضایعات گرانیته و پرسلان"، "ضایعات پرسلانی" و "میکروسیلیس" بر مقاومت فشاری مورد بررسی دقیق تر قرار خواهد گرفت.

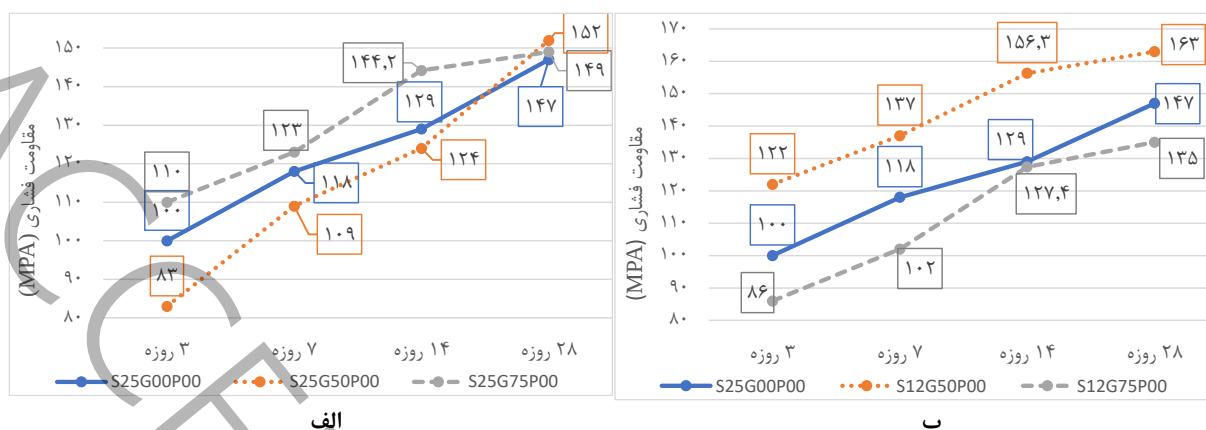
۳-۱-۱- تأثیر ضایعات گرانیته بر مقاومت فشاری

در شکل ۷ تأثیر میزان مصرف ضایعات گرانیته بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف نشان داده شده است. این تأثیر همچنین در دو دسته نمونه‌های دارای ۱۲/۵٪ و ۲۵٪ میکروسیلیس در این شکل قابل مشاهده است. با بررسی اعداد مقاومت فشاری ۲۸ روزه در شکل ۷ و جدول ۵ ملاحظه می شود که نمونه‌های حاوی ۵۰٪ ضایعات گرانیته به جای ماسه سیلیسی، بیشترین افزایش مقاومت فشاری را به خود اختصاص داده است. این افزایش برای نمونه‌های حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس در حدود ۳٪ و برای نمونه‌های حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس ۱۰٪ بوده است. نتیجه اول (نمونه‌های حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس) در تحقیقات گذشته نیز مشاهده شده است [۲۷]؛ لیکن نتیجه دوم (نمونه‌های حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس) از نتایج قابل توجه تحقیق حاضر است. دلیل این افزایش مقاومت را میتوان در سطح مخصوص بسیار بالای مصالح ریزدانه گرانیته و مقاومت ذاتی آنها جستجو کرد. این در حالی است که با افزایش درصد جایگزینی از ۵۰ به ۷۵٪، در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیشتر، درصد افزایش مقاومت فشاری تقریباً ۱٪ بوده است. ولی با کاستن از میزان میکروسیلیس و همزمان جایگزینی ۷۵٪ از ماسه سیلیسی با پودر گرانیته، مقاومت فشاری در حدود ۹٪ کاهش یافته است. دلیل این موضوع را میتوان کاسته شدن از وزن مجموع سیمان و میکروسیلیس و همچنین افزوده شدن نسبت آب به مواد سیمانی دانست.



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها
Figure 6. Compressive strength test results of the samples

در شکل ۷ همچنین نکته جالب توجه دیگر روند افزایش مقاومت در طی زمان تا ۲۸ روز است. این روند برای همه حالات عمدتاً افزایشی است؛ لیکن با افزایش درصد جایگزینی از ۵۰ به ۷۵٪ شیب منحنی کاسته شده است. همچنین بر اساس مراجع موجود میتوان این تغییر شیب را با افزایش تخلخل مرتبط دانست [۲۵].



شکل ۷. تأثیر میزان مصرف ضایعات گرانیت بر مقاومت فشاری
Figure 7. Effect of granite waste consumption on compressive strength

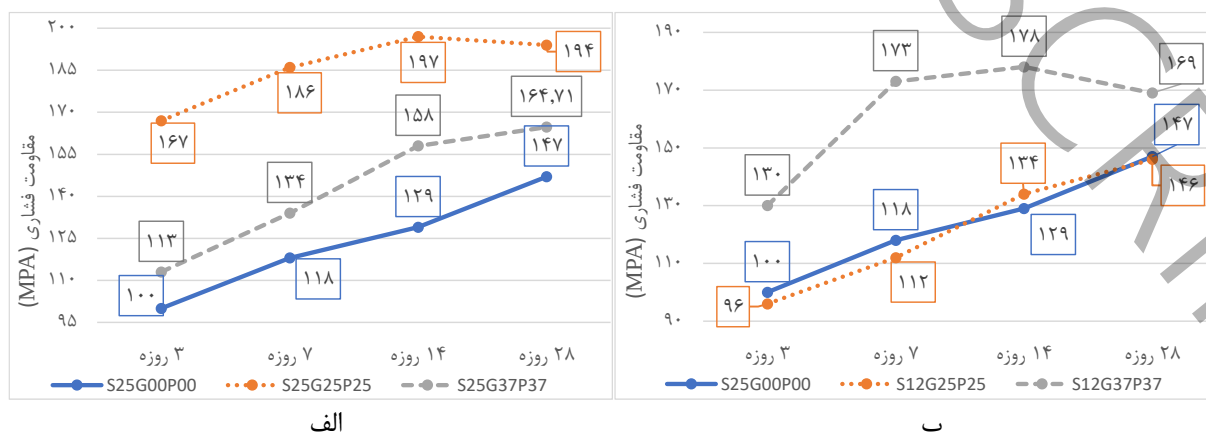
۳-۱-۲- تأثیر ضایعات ترکیبی بر مقاومت فشاری

در شکل ۸ نمودارهای تغییرات مقاومت فشاری نمونه های حاوی ضایعات ترکیبی در سنین مختلف در دو دسته نمونه حاوی ۲۵٪ و ۱۲/۵٪ میکروسیلیس نشان داده شده است.

با بررسی مقادیر در شکل ۸ و جدول ۵ می توان دید که در نمونه های حاوی میکروسیلیس بیشتر، باز هم مشابه حالت استفاده از ضایعات گرانیت تنها، درصد جایگزینی ۵۰٪ تأثیر بهتری در افزایش مقاومت فشاری داشته است. از سوی دیگر با مقایسه با حالت استفاده از ضایعات گرانیت به تنهایی، مشخص میشود که استفاده همزمان از ضایعات گرانیت و پسران به میزان بسیار بیشتری بر مقاومت فشاری RPC مؤثر بوده است (افزایش ۳۲ درصدی مقاومت فشاری در این حالت در مقایسه با افزایش ۳ درصدی در حالت استفاده از گرانیت تنها). دلیل اصلی این تأثیر چشمگیر را میتوان در گوشه دار بودن خرده های سرامیک بازیافتی و همچنین جذب آب بسیار ناچیز این دانه ها دانست.

در کنار نتیجه پیش گفته، یک مورد بسیار جالب توجه دیگر آن است که در حالت استفاده از ضایعات ترکیبی آن هم به میزان ۷۵٪ وزن ماسه سیلیسی، با کاهش میزان میکروسیلیس مصرفی (آن هم به میزان ۵۰٪) هیچ تغییری در میزان افزایش مقاومت فشاری حاصل نشده است. این نتیجه را میتوان یکی از بهترین نتایج تحقیق حاضر دانست. دلیل این امر در مقایسه با حالت استفاده تنها از ضایعات گرانیت قابل تبیین است. به نظر میرسد که در این حالت تیز گوشه بودن و جذب آب کمتر دانه های پسران نقش عمده ای را ایفا نموده است.

با مقایسه شکل های ۸ و ۷ مشخص میشود که در روند عمل آوری تا ۲۸ روز، در این حالت نیز شیب منحنی افزایش مقاومت بر حسب سن بتن پس از ۱۴ روز، کم شده و حتی در حالاتی منفی شده است که این مسئله مربوط به درصد بالای جایگزینی و درصد پایین تر میکرو سیلیس هستند که هر دو با توجه به موارد پیش گفته قابل تفسیر می باشند.



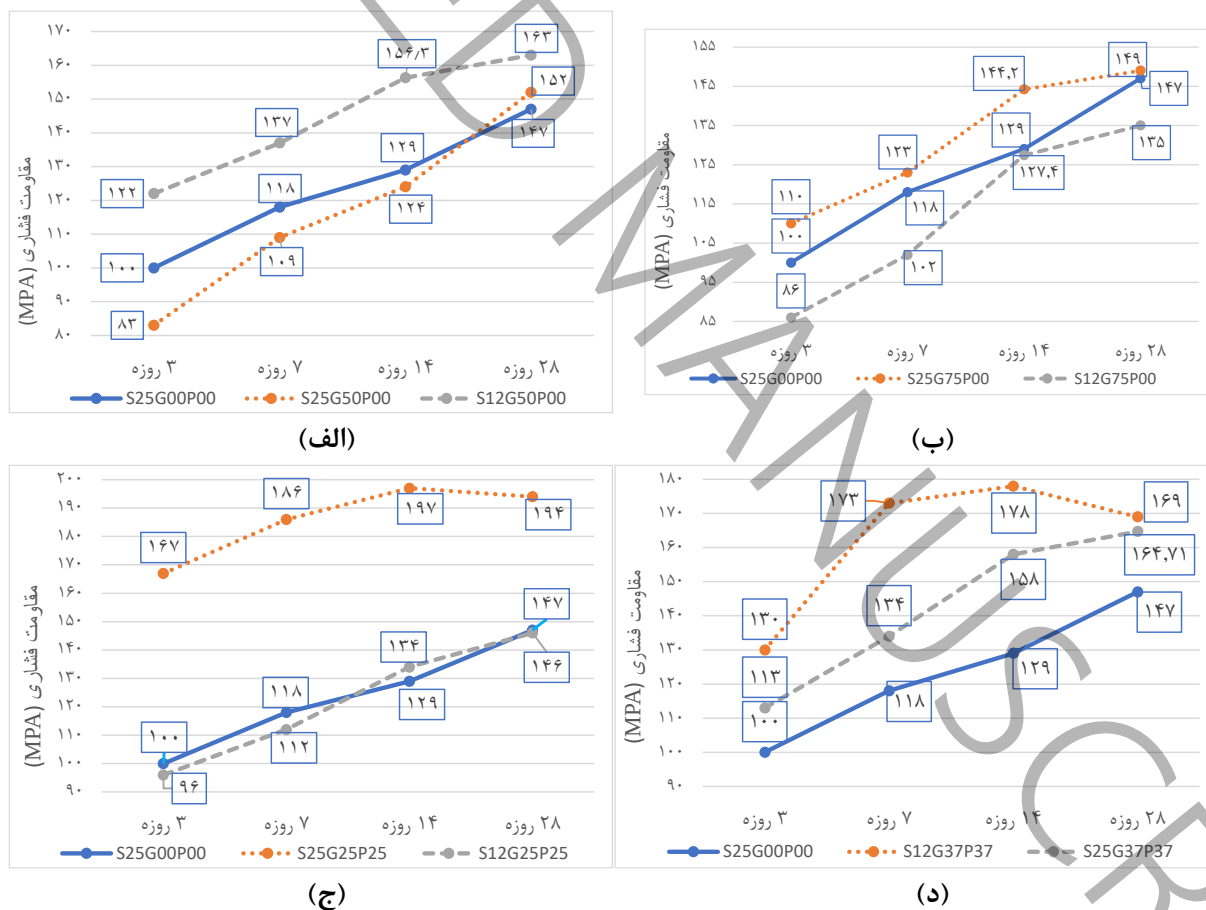
شکل ۸. تأثیر میزان مصرف ضایعات ترکیبی بر مقاومت فشاری

Figure 8. Effect of mixed waste consumption rate on compressive strength

۳-۱-۳- تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری

در شکل ۹ در قاب ۴ تصویر، تأثیر میزان میکروسیلیس در دو نسبت ۲۵٪ و ۱۲/۵٪ به همراه یا بدون ضایعات گرانیت و ضایعات ترکیبی قابل مشاهده است. با نگاهی به دو شکل ۹-الف و ۹-ب مشاهده می شود که در حالت جایگزینی ۵۰٪ از ماسه سیلیسی با ضایعات گرانیت تنها، در تمام سنین تا ۲۸ روز مقاومت فشاری نمونه ها با میزان میکروسیلیس کمتر (۱۲/۵٪)، بیش از نمونه های با میزان میکرو سیلیس بیشتر (۲۵٪) بوده است. این نتیجه در حالت جایگزین ۷۵٪ از ماسه سیلیسی نقض شده است. ولی در حالت جایگزینی ۷۵٪ از ماسه سیلیسی با ضایعات گرانیت تنها، در تمام مدت زمان تا ۲۸ روز، مقاومت از نمونه شاهد بالاتر بوده است. این در حالی است که در حالت جایگزینی ۵۰٪ از ماسه سیلیسی با ضایعات گرانیت و وجود ۱۲/۵٪ میکروسیلیس در تمام مدت تا ۲۸ روز مقاومت بیش از نمونه شاهد بوده ولی در حالت استفاده از ۲۵٪ میکروسیلیس بعد از ۱۴ روز مقاومت نمونه از نمونه شاهد بالاتر رفته است.

در حالت استفاده از ضایعات ترکیبی (شکل ۹-ج و ۹-د) نتایج متفاوت هستند. به این صورت که در جایگزینی ۵۰٪ نمونه دارای ۲۵٪ میکروسیلیس در تمام مدت تا ۲۸ روز مقاومت بالاتری نشان داد است ولی در حالت جایگزینی ۷۵٪ نمونه دارای ۱۲/۵٪ میکروسیلیس مقاومت بیشتری داشته است. علت این امر را میتوان افزایش میزان دانه های تیز گوشه پسران بیان نمود.



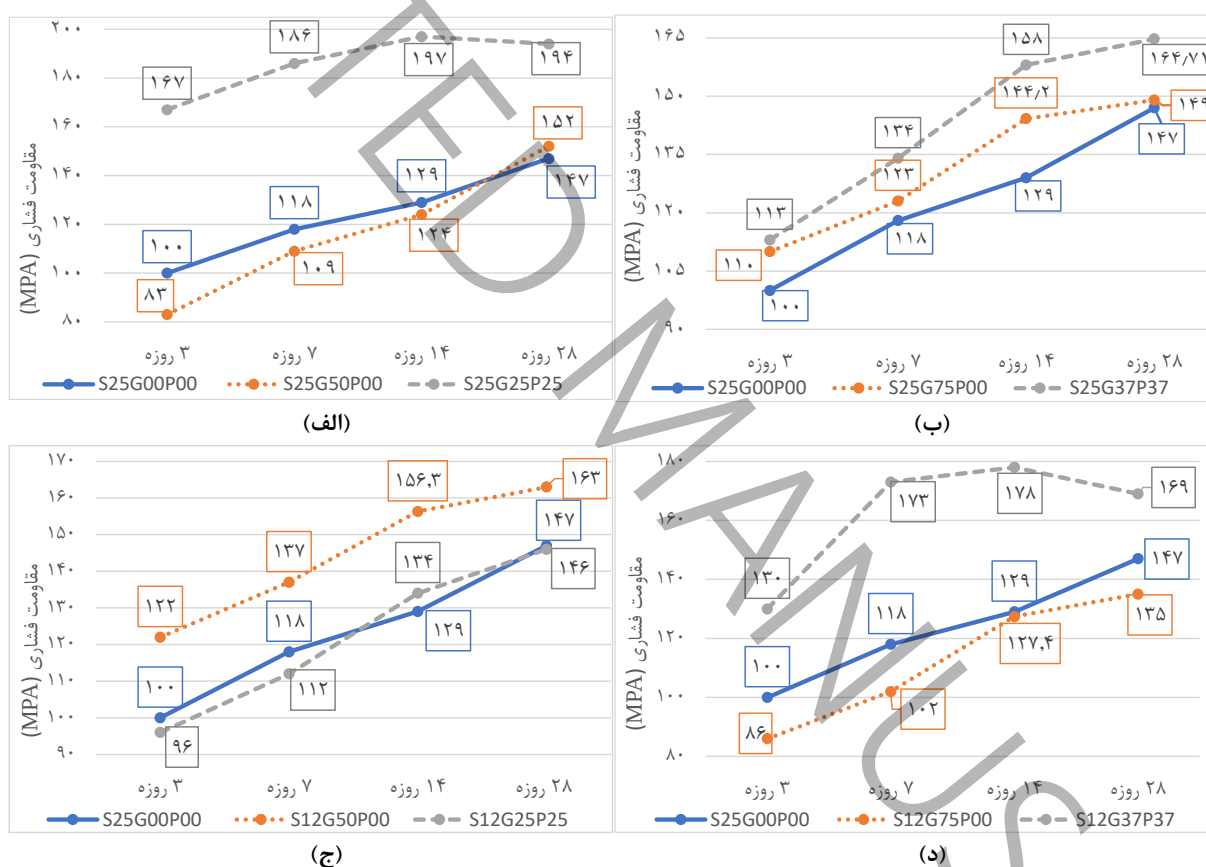
شکل ۹. تأثیر میزان مصرف میکروسیلیس بر مقاومت فشاری

Figure 9. Effect of microsilica consumption on compressive strength

۳-۱-۴- تأثیر ضایعات سرامیک پسران بر مقاومت فشاری

منحنی های نشان داده شده در شکل ۱۰ به گونه ای تنظیم شده اند که تفاوت تغییرات مقاومت فشاری در سنین مختلف را در یک میزان ثابت میکروسیلیس (۲۵٪ یا ۱۲/۵٪) بین نمونه های حاوی ضایعات گرانیتی تنها یا ضایعات ترکیبی نشان می دهند. همچنین در جدول ۵ ردیف های مربوط به نمونه های حاوی میکروسیلیس کمتر (۱۲/۵٪) با رنگ خاکستری مشخص شده اند.

در هر چهار منحنی شکل ۱۰ مشاهده میشود که جایگزینی ماسه سیلیسی با ضایعات ترکیبی در تمام مدت عمل آوری تا ۲۸ روز منجر به حصول مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه شاهد و نمونه های حاوی ضایعات گرانیت تنها شده است. علت این امر را نیز میتوان در "تیز گوشه بودن خرده های سرامیک"، "جذب آب کمتر آنها" و "بالا بودن مقاومت سنگدانه های سرامیک پسرلان" جستجو نمود. خاطر نشان می شود که دانه بندی سنگدانه های سرامیک پسرلان درشت تر از سنگدانه های گرانیت بوده است (شکل ۱). از این رو سطح مخصوص آنها کمتر است و میزان خمیر سمیان لازم برای پوشیده شدن این دانه ها کمتر است. به این ترتیب حتی با میزان کمتر میکروسیلیس نیز درصد افزایش مقاومت قابل توجه است.

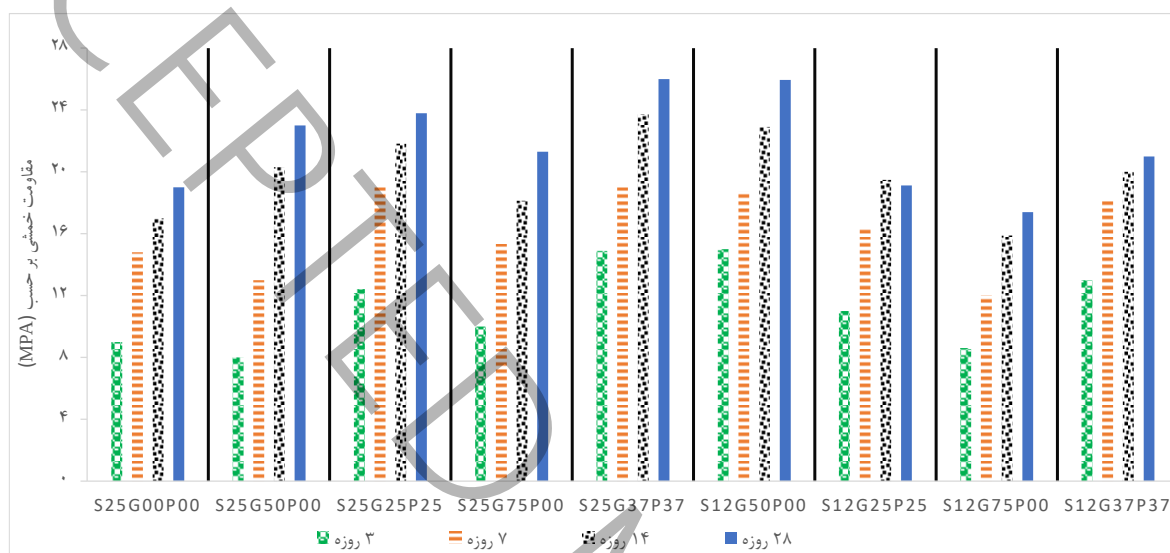


شکل ۱۰. تأثیر میزان مصرف ضایعات سرامیک بر مقاومت فشاری
Figure 10. Effect of ceramic waste consumption on compressive strength

۳-۲- نتایج مقاومت خمشی

پیش تر در جدول ۵ نتایج مقاومت خمشی برای هر ۹ طرح اختلاط بتن RPC ارائه شده بود. در شکل ۱۱ نتایج مقاومت خمشی نمونه ها در سنین مختلف تا ۲۸ روز به صورت نمودار میله ای نشان داده است. در این نمودار ابتدا مقاومت خمشی نمونه شاهد در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز آمده است. سپس نمودارهای میله ای مربوط به مقاومت خمشی نمونه های حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس به ترتیب جایگزینی با ضایعات گرانیت تنها و ضایعات ترکیبی آمده است. در آخر نیز نمودارهای مشابه برای نمونه های حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس نشان داده شده است. در این نمودار نکات زیر قابل توجه هستند:

- در تمام حالات با افزایش سن نمونه تا ۲۸ روز مقاومت خمشی افزوده شده است. به جز نمونه حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس و جایگزینی ۵۰٪ از ماسه سیلیسی با ضایعات ترکیبی گرانیات و پرسلان.
- در نمونه های حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی ماسه سیلیسی با ضایعات ترکیبی تأثیری بیشتری بر افزایش مقاومت کششی داشته است. این نتیجه در مورد مقاومت فشاری نیز دیده شد.
- در نمونه های حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس، به طور میانگین در حالات مختلف جایگزینی، مقاومت کششی افزایش یافته است. به جز نمونه حاوی ۷۵٪ جایگزینی ماسه سیلیسی با ضایعات گرانیات تنها.



شکل ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه ها

Figure 11. Results of flexural strength test of samples

۳-۲-۵- برآورد مقاومت خمشی نمونه ها

همانگونه که در مقدمه بیان شد، مقاومت خمشی قابل توجه بتن پودری واکنشی یکی از مزایای مهم آن است. در جدول ۵ مقادیر مقاومت خمشی (مدول گسیختگی یا f_r) و فشاری هر یک از بتن های ساخته شده با طرح اختلاط مورد نظر در پژوهش حاضر ارائه شد. حال در جدول ۶ نسبت مقاومت خمشی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه (f_c) و با جذر مقاومت فشاری ارائه شده است. شایان ذکر است که در مراجع موجود معمولاً مقاومت کششی یا به صورت درصدی از مقاومت فشاری ذکر میگردد و یا به صورت ضریبی از مقاومت فشاری ($f_r = \alpha \sqrt{f_c}$). به این ترتیب در جدول ۶ ضریب α برای نمونه های مورد بررسی ارائه شده است. در این جدول نسبت مقاومت خمشی و فشاری نمونه ها به نمونه شاهد نیز گزارش شده است.

جدول ۶- مقادیر مدول گسیختگی و نسبت آن با مقاومت فشاری و جذر مقاومت فشاری

Table 6 - Values of modulus of rupture and its ratio to compressive strength and root of compressive strength

نام طرح	f_c	% افزایش	f_r	% افزایش	$\alpha = f_r / \sqrt{f_c}$	f_r / f_c (%)
S25G00P00	۱۴۷	---	۱۹	---	۱/۵۷	۰/۱۳
S25G50P00	۱۵۲	+۳	۲۳	+۲۱	۱/۸۷	۰/۱۵
S25G75P00	۱۴۹	+۱	۲۱/۳	+۲۱	۱/۷۴	۰/۱۴
S12G50P00	۱۶۳	+۱۱	۲۵/۹۴	+۳۷	۲/۰۴	۰/۱۶
S12G75P00	۱۳۵	-۸	۱۷/۴	-۹	۱/۵۰	۰/۱۳

S25G25P25	۱۹۴	+۳۲	۲۳/۷۹	+۲۵	۱/۷۱	۰/۱۲
S12G25P25	۱۴۶	-۱	۱۹/۱۲	۰	۱/۵۸	۰/۱۳
S12G37P37	۱۶۵	+۱۲	۲۱	+۱۱	۱/۶۳	۰/۱۳
S25G37P37	۱۶۴/۷۱	+۱۲	۲۶	+۳۷	۲/۰۱	۰/۱۶

بررسی مقادیر جدول ۶ نیز نشان دهنده موارد زیر است:

اولاً در هر دو دسته نمونه های حاوی گرانیات تنها و حاوی ترکیب گرانیات و پرسلان، میزان مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. (به جز یک نمونه که مقاوما خمشی بدون تغییر مانده است. در مورد این یک نمونه میتوان کم شدن میزان میکروسیلیس را عامل ایجاد این نتیجه دانست.

ثانیاً بیشترین میزان افزایش مقاومت خمشی مربوط به دو نمونه S12G50P00 و S25G37P37 است. جالب توجه است که در نمونه اول جایگزین ۵۰٪ از ماسه سیلیسی با گرانیات تنها را داشته ایم و در نمونه دوم جایگزینی ۷۵٪ ماسه سیلیسی با دانه های ترکیبی. به این ترتیب مشاهده میشود که تأثیر جایگزینی ترکیبی حتی در حد ۷۵٪ از ماسه سیلیسی بر مقاومت خمشی تأثیر چشمگیری بوده است. علت این امر را میتوان در درگیری دانه های پرسلان به دلیل تیز گوشه بودن آنها دانست. این امر منجر به در هم قفل شدگی دانه ها^۱ و افزایش مقاومت خمشی شده است.

ثالثاً میزان افزایش نسبت مقاومت خمشی به فشاری در نمونه های حاوی گرانیات تنها نسبت به نمونه های حاوی ضایعات ترکیبی گرانیات و پرسلان بیشتر بوده است (۱۱٪ افزایش در مقایسه با ۱٪ افزایش در میانگین نسبت یاد شده به ترتیب).

رابعاً نسبت مقاومت خمشی به جذر مقاومت فشاری نیز در نمونه های حاوی ضایعات گرانیات به تنهایی، نسبت به نمونه های حاوی ضایعات ترکیبی گرانیات و سرامیک پرسلان، بیشتر بوده است.

دلیل این اتفاق را میتوان در موارد زیر جستجو نمود:

۱- سطح مخصوص بیشتر ضایعات گرانیات که نگاه به منحنی دانه بندی (شکل ۱) و ریزدانه تر بودن این مصالح نیز تطابق دارد.

۲- مقاومت ذاتی دانه های گرانیات.

شایان ذکر است که افزایش مقاومت خمشی که ارتباط مستقیم با مقاومت فشاری دارد از نتایج تحقیقات سایر محققان نیز قابل استخراج است [۲۷-۲۹]. لیکن در تحقیق حاضر اولاً در هر دو حالت استفاده از ضایعات گرانیات به تنهایی و یا در ترکیب با سرامیک پرسلانی، حتی با جایگزینی ۷۵٪ از ماسه سیلیسی مقاومت خمشی به میزان قابل توجه نسبت به نمونه شاهد افزوده شده است؛ ثانیاً حتی در حالت استفاده کمتر از میکروسیلیس (در حد ۵۰٪، ردیف های پررنگ شده در جدول ۶) با استفاده از ضایعات گرانیات به تنهایی یا در ترکیب با خرده سرامیک پرسلان، مقاومت خمشی افزایش مشهود داشته است.

۳-۳ مقایسه اقتصادی

بر اساس قیمتهای موجود در بازار مصالح ساختمانی قیمت هر کیلو ماسه سیلیسی ۵۰۰۰ تومان و هر کیلو ضایعات گرانیات ۳۲۰ تومان و هر کیلو ضایعات سرامیک ۲۱۴۰ تومان است. هزینه های فوق با احتساب حمل و نقل و خرد کردن سرامیک می باشد. بر اساس این قیمت ها با ۵۰٪ جایگزینی گرانیات به جای ماسه سیلیس، ۴۶/۸٪ و با ۷۵٪ جایگزینی گرانیات به جای ماسه سیلیس، ۷۰/۲ درصد هزینه ها کاهش یافت.

^۱ Aggregate Interlock

همچنین در طرح ۷۵٪ جایگزینی ترکیبی ۵۶/۵۵٪ و در طرح با ۵۰٪ جایگزینی ترکیبی ۳۷/۷٪ در هزینه ها صرفه جویی شد. این بررسی در حالی است که در ۴ دسته از طرح اختلاطهای ساخته شده در پژوهش حاضر، میزان میکروسیلیس نیز ۵۰٪ کاهش داشته که این خود به کم شدن قیمت تمام شده خواهد انجامید.

۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه، در این تحقیق طرحهای اختلاط بتن پودری واکنشی، با میکروسیلیس ۱۲/۵٪ و ۲۵٪ وزن سیمان، ضایعات به میزان ۵۰٪ و ۷۵٪ وزن ماسه‌ی سیلیسی با ضایعات گرانیت یا ضایعات ترکیبی گرانیت و سرامیک پوسلان به میزان مساوی تعریف و نمونه های تست مقاومت فشاری و خمشی ساخته شدند. در همه طرحها نسبت آب به مواد سیمانی ۲۰٪ و ابر روان کننده ۲٪ وزن سیمان تعیین شد. همچنین عمل آوری در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد با بخار آب انجام گرفت مهمترین نتایج حاصل شده به قرار زیر است:

۱- در تمام حالات با جایگزینی گرانیت افزایش مقاومت فشاری دیده شده مگر در حالتی که همزمان با ۷۵٪ جایگزینی با گرانیت میکروسیلیس مصرفی نصف شده است.

۲- در حالت ترکیبی با درصد جایگزینی ۵۰٪ و میکروسیلیس ۲۵٪، ۳۲٪ افزایش مقاومت فشاری ملاحظه شد.

۳- در این حالت حتی با نصف شدن میزان میکروسیلیس و ۷۵٪ جایگزینی ماسه سیلیسی، مقاومت فشاری رشد ۱۲ درصدی نشان داد.

۴- طرح S25G50P00 که حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس و ۵۰٪ جایگزینی با ضایعات گرانیت بود، نسبت به طرح شاهد ۳/۴٪ افزایش مقاومت داشت. این در حالی است که با کاهش میکروسیلیس از ۲۵٪ به ۱۲/۵٪، مقاومت فشاری طرح S12G50P00 حدود ۱۱٪ افزایش یافت.

۵- به طور میانگین مقدار ۵۰٪ ضایعات گرانیت، تأثیر بهتری نسبت به مقدار ۷۵٪، بر مقاومت فشاری داشت. در طرحهایی که ضایعات گرانیت از ۵۰٪ به ۷۵٪ افزایش یافت، درصد افزایش مقاومت فشاری بتن کاهش یافت.

۶- طرح S12G50P00 با حاوی ۵۰٪ ضایعات گرانیت و ۱۲/۵٪ میکروسیلیس بیشترین افزایش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد را در طرحهای حاوی ضایعات گرانیت تنها، کسب کرد (۳۶٪ افزایش).

۷- کمترین مقاومت فشاری در میان تمام طرحها با ۸٪ کاهش نسبت به طرح شاهد، در طرح S12G75P00 که حاوی ۷۵٪ ضایعات گرانیت به همراه ۱۲/۵٪ میکروسیلیس بود، مشاهده شد.

۸- بهترین عملکرد میکروسیلیس با دوز سیلیس ۱۲/۵٪، در طرح S12G37P37 که حاوی ۷۵٪ ضایعات ترکیبی بود، با ۱۵٪ افزایش مقاومت نسبت به طرح شاهد مشاهده شد.

۹- طرح S12G75P00 با ۱۲/۵٪ میکروسیلیس و ۷۵٪ ضایعات گرانیت، در حدود ۸/۵٪ نسبت به طرح شاهد، با افت مقاومت خمشی همراه بود؛ همچنین کمترین مقاومت را در بین تمام طرحها در سنین مختلف کسب کرد.

۱۰- در طرحهای حاوی ضایعات ترکیبی، مقاومت خمشی رابطه مستقیم با مقدار میکروسیلیس دارد؛ یعنی با افزایش درصد میکروسیلیس، مقاومت نیز افزایش می‌یابد.

۱۱- در طرحهای حاوی ضایعات ترکیبی، طرح S12G25P25 با ۵۰٪ ضایعات ترکیبی و ۱۲/۵٪ میکروسیلیس، کمترین مقاومت فشاری را که از طرح شاهد نیز کمتر بود، کسب کرد.

۱۲- مقاومت خمشی طرحهای حاوی ضایعات ترکیبی حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس مقاومت بهتری نسبت به طرحهای حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس از خود نشان دادند.

۱۳- نتایج حاصل از تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت خمشی، شباهت بسیاری به نتایج حاصل از تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری داشت؛ همچنین در طرحهای حاوی ضایعات گرانیت نیز این شباهت در فشار و خمش پا برجا بود.

- [1] H. Song, A. Ahmad, K.A. Ostrowski, M. Dudek, Analyzing the compressive strength of ceramic waste-based concrete using experiment and artificial neural network (ANN) approach, *Materials*, 14(16) (2021) 4518.
- [2] S. Ahmad, O.S.B. Al-Amoudi, S.M. Khan, M. Maslehuddin, Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 17 (2022) e01255.
- [3] M. Cheyrezy, V. Maret, L. Frouin, Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete), *Cement and concrete research*, 25(7) (1995) 1491-1500.
- [4] M.S. Radhi, Z.M.A. Rasoul, A.J. Alsaad, Mechanical behavior of modified reactive powder concrete with waste materials powder replacement, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(2) (2021) 649-655.
- [5] P. Richard, M.H. Cheyrezy, Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, *Special Publication*, 144 (1994) 507-518.
- [6] J. Song, S. Liu, Properties of reactive powder concrete and its application in highway bridge, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(1) (2016) 5460241.
- [7] Y.-W. Chan, S.-H. Chu, Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and concrete research*, 34(7) (2004) 1167-1172.
- [8] S. Ahmad, A. Zubair, M. Maslehuddin, Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 99 (2015) 73-81.
- [9] P.Y. Blais, M. Couture, PRECAST, prestressed pedestrian BRIDGE-WORLD'S first reactive powder concrete bridge, *PCI journal*, 44(5) (1999).
- [10] P.N. Hiremath, S.C. Yaragal, Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 154 (2017) 72-87.
- [11] J. Resplendino, F. Toulemonde, *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons, 2013.
- [12] B. Asteray, W. Oyawa, S. Shitote, Experimental investigation on compressive strength of recycled reactive powder concrete containing glass powder and rice husk ash, *Journal of Civil Engineering Research*, 7(4) (2017) 124-129.
- [13] R.S. Edwin, E. Gruyaert, N. De Belie, Influence of intensive vacuum mixing and heat treatment on compressive strength and microstructure of reactive powder concrete incorporating secondary copper slag as supplementary cementitious material, *Construction and building materials*, 155 (2017) 400-412.
- [14] E. Pawluczuk, Recycled concrete powder as partial cement replacement in fine-grained concrete, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17 (2017) 169-176.
- [15] B. Zegardło, M. Szeląg, P. Ogrodnik, Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes-The method of production and the interfacial transition zone, *Construction and Building Materials*, 122 (2016) 736-742.
- [16] P. Zhu, X. Mao, W. Qu, Z. Li, Z.J. Ma, Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete, *Construction and building materials*, 113 (2016) 246-254.
- [17] A. Tiwari, S. Singh, R. Nagar, Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: A review, *Journal of Cleaner Production*, 135 (2016) 490-507.
- [18] P.N. Hiremath, S.C. Yaragal, Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete, *Construction and Building Materials*, 141 (2017) 271-288.

- [19] H.S. Gökçe, Ç. Yalçinkaya, M. Tuyan, Optimization of reactive powder concrete by means of barite aggregate for both neutrons and gamma rays, *Construction and building materials*, 189 (2018) 470-477.
- [20] L. Xiaoying, L. Jun, L. Zhongyuan, H. Li, C. Jiakun, Preparation and properties of reactive powder concrete by using titanium slag aggregates, *Construction and Building Materials*, 234 (2020) 117342.
- [21] M. Ulewicz, J. Halbiniak, Application of waste from utilitarian ceramics for production of cement mortar and concrete, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52 (2016).
- [22] M.A. Mas, J. Monzó, J. Payá, L. Reig, M.V. Borrachero, Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement, *Advances in Cement Research*, 28(4) (2016) 221-232.
- [23] O.A. Mayhoub, E.-S.A. Nasr, Y. Ali, M. Kohail, Properties of slag based geopolymer reactive powder concrete, *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1) (2021) 99-105.
- [24] M.Á. Sanjuán, C. Andrade, Reactive powder concrete: Durability and applications, *Applied Sciences*, 11(12) (2021) 5629.
- [25] J. Ahmad, W. Alattiyih, Y.M. Jebur, M. Alqurashi, N. Garcia-Troncoso, A review on ceramic waste-based concrete: A step toward sustainable concrete, *Reviews on Advanced Materials Science*, 62(1) (2023) 20230346.
- [26] L. Dvorkin, O. Bordiuzhenko, T. Tracz, K. Mróz, Optimizing porous concrete using granite stone-crushing waste: composition, strength, and density analysis, *Applied Sciences*, 14(16) (2024) 6934.
- [27] A. Minhajuddin, A. Saha, Performance evaluation of geopolymer concrete with waste granite powder as a sustainable alternative to sand, *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20(1) (2025) 20.
- [28] A. Huts, J. Konkol, V. Marchuk, Granite Dust and Silica Fume as a Combined Filler of Reactive Powder Concrete, *Materials*, 17(24) (2024) 6025.
- [29] T.A. Tawfik, A. Sičáková, E. Kuzielová, Š. Kušnir, A. Eštoková, M. Bálintová, N. Junáková, Sustainable reuse of waste ceramic tiles powder and waste brick powder as a replacement for cement on green high strength concrete properties, *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(5) (2024) 166.
- [30] M.S. Savadkoobi, M. Reisi, Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in Reactive Powder Concrete, *Journal of Cleaner Production*, 266 (2020) 121973.
- [31] S.D. Mohammed, H.K. Awad, R.K. Aboud, Compressive strength performance of reactive powder concrete using different types of materials as a partial replacement of fine aggregate, *Key Engineering Materials*, 857 (2020) 39-47.
- [32] B. Venkatesan, V. Kannan, M. Sophia, Utilization of granite powder and glass powder in reactive powder concrete: Assessment of strength and long-term durability properties, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(6) (2022) 885-898.
- [33] G. Sheng, S. Jin, C. Li, Q. Bai, Uniaxial compressive stress-strain behavior of alkali activated steel slag powder-based reactive powder concrete (SSP-RPC), *Construction and Building Materials*, 453 (2024) 139038.
- [34] J. Abellan-Garcia, M. Molinares, N. Daza, Y.M. Abbas, M.I. Khan, Formulation of inexpensive and green reactive powder concrete by using milled-waste-glass and micro calcium-carbonate-A multi-criteria optimization approach, *Construction and Building Materials*, 409 (2023) 134167.
- [35] C. Jiang, W. Zhao, L. Li, Y. Qin, L. Lu, Influence of silica fume on pore structure, mechanical properties and carbon emission of reactive powder concrete prepared by ice crystal homogenization technology, *Case Studies in Construction Materials*, 21 (2024) e03972.

- [36] N.A. Farhan, M.N. Sheikh, M.N. Hadi, Alkali-activated reactive powder concrete with recycled and industrial steel fibres, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 178(6) (2024) 415-427.
- [37] Y. Zhou, H. Luo, K. Anand, A. Singh, Y.M. Xie, Sustainable use of ultrafine recycled glass in additive manufactured (3D printed) reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 419 (2024) 135556.
- [38] Y.R. Alkhaly, M. Hasan, Characteristics of reactive powder concrete comprising synthesized rice husk ash and quartzite powder, *Journal of Cleaner Production*, 375 (2022) 134154.
- [39] P. Kathirvel, G. Murali, Effect of using available GGBFS, silica fume, quartz powder and steel fibres on the fracture behavior of sustainable reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 375 (2023) 130997.
- [40] S. Arslan, N. Öksüzer, H. Gökçe, Improvement of mechanical and transport properties of reactive powder concrete using graphene nanoplatelet and waste glass aggregate, *Construction and Building Materials*, 318 (2022) 126199.
- [41] <https://www.iran-ifc.com>.
- [42] www.soroshstone.com.
- [43] www.isfahancement.com.
- [44] <https://chirook.ir>.
- [45] ASTM, ASTM C136/C136M, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, in, ASTM Standards West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- [46] B.S. Nasional, ASTM C117: 2012: Metode Uji Bahan yang Lebih Halus dari Saringan 75 mm (No. 200) dalam Agregat Mineral dengan Pencucian, Badan Standarisasi Nasional, 200 (2012).
- [47] A.S.f. Testing, Materials, Annual book of ASTM standards, ASTM C136-06 standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 2012.
- [48] M.A. Issa, Effect of portland cement (current ASTM C150/AASHTO M85) with limestone and process addition (ASTM C465/AASHTO M327) on the performance of concrete for pavement and bridge decks, Illinois Center for Transportation, 2014.
- [49] Y. Ju, K. Tian, H. Liu, H.-W. Reinhardt, L. Wang, Experimental investigation of the effect of silica fume on the thermal spalling of reactive powder concrete, *Construction and Building materials*, 155 (2017) 571-583.
- [50] K.P. Tian, Y. Ju, H.B. Liu, J.H. Liu, L. Wang, P. Liu, X. Zhao, Effects of silica fume addition on the spalling phenomena of reactive powder concrete, *Applied Mechanics and Materials*, 174 (2012) 1090-1095.
- [51] M. Vigneshwari, K. Arunachalam, A. Angayarkanni, Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete, *Journal of Cleaner Production*, 188 (2018) 264-277.
- [52] A. Committee, ASTM C 1240 Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures, in, United States: ASTM, 2005.
- [53] C. ASTM, 494: Standard Specifications for Chemical Admixtures for Concrete.[book auth.], ASTM International. Annual book of ASTM Standards. West Conshohocken: ASTM International, (2013).
- [54] ه. نیکوسخن, سنگ گرانیت نطنز, in, 1402.
- [55] A.S.f. Testing, Materials, ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), in, ASTM Philadelphia, 2001.