



## ارزیابی تأثیر پارامترهای کلیدی طرح اختلاط بتن پودری واکنشی (RPC) بر مقاومت فشاری

سید جلال موسوی فرد، محمد رئیسی\*

دانشکده مهندسی عمران و مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۱۴  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۲-۰۲  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۳۰  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۷-۱۴

### کلمات کلیدی:

بتن پودری واکنشی  
نسبت آب به مواد سیمانی  
دوده سیلیس  
ماسه‌ی سیلیسی  
مقاومت فشاری

**خلاصه:** بتن پودری واکنشی نوع جدیدی از بتن‌های توانمند است که به دلیل ریزی مواد پودری و پوزولانی مورد استفاده در آن و نیز مقدار زیاد موادی که به صورت هیدرولیکی فعال هستند، به این نام شناخته می‌شود. مشخصات بتن پودری واکنشی، حساسیت زیادی به نوع و مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت آن دارد؛ بنابراین برای دستیابی به مشخصات فیزیکی و مکانیکی مطلوب لازم است در انتخاب مصالح و انتخاب نسبت‌های مخلوط دقت نمود. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)، میزان مواد سیمانی (CM)، نسبت دوده سیلیس به مواد سیمانی (SF/CM)، نوع سیمان و نوع دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی بر مقاومت فشاری RPC بود؛ بدین منظور ۲۱ مخلوط بتن پودری واکنشی طراحی و ساخته شد. در هر گام از انجام این تحقیق، یکی از پارامترهای موثر بررسی شد و بر اساس نتایج بدست آمده گام‌های بعدی تحقیق انجام شد. نمونه‌های ساخته شده به مدت ۷ روز در آب ۹۰ عمل‌آوری شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که با استفاده از سیمان تیپ ۵، مواد سیمانی به میزان  $1100 \text{ kg/m}^3$ ، نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۲، نسبت دوده سیلیس به مواد سیمانی برابر ۰/۲ و استفاده از ماسه‌ی سیلیسی با ریزترین دانه‌بندی، می‌توان به بیش‌ترین مقاومت فشاری دست یافت.

تولید می‌گردد. RPC از مزایای زیر نسبت به بتن‌های متداول دیگر

برخوردار است [۱-۱۱].

۱- با حذف درشت‌دانه و استفاده از سنگ‌دانه‌های بسیار ریز در محدوده‌ی ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌متر، همگنی مخلوط افزایش می‌یابد؛ در ضمن با حذف درشت‌دانه، ناحیه‌ی انتقال بین درشت‌دانه و خمیر سیمان حذف می‌شود.

۲- با کاهش W/CM و رساندن آن به ۰/۲ و حتی کم‌تر و استفاده از فوق‌روان‌کننده، مشخصات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و خمشی بهبود می‌یابد.

۳- اضافه کردن مواد پوزولانی به‌ویژه دوده سیلیس با ایجاد واکنش‌های پوزولانی با  $\text{Ca(OH)}_2$  حاصل از هیدراسیون سیمان،

### ۱- مقدمه

بتن پودری فعال یا واکنشی<sup>۱</sup> (RPC) یک ماده‌ی پایه سیمانی جدید می‌باشد و جزو دسته‌ی بتن‌های فوق توانمند (UHPC) تقسیم‌بندی می‌شود و برای اولین بار در اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی توسط ریچارد و چیرزی ساخته شد [۱]. این نوع بتن برای اولین بار در ساخت پل شبروک در کانادا مورد استفاده قرار گرفت. بتن RPC با بهره‌گیری از مواد سیمانی زیاد، استفاده از مصالح پودری بسیار ریز مانند ماسه‌ی کوارتزی یا سیلیسی با حداکثر ابعاد ۰/۶ میلی‌متر و مواد پوزولانی مثل دوده سیلیس، مقادیر کم نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM) و استفاده از مقدار قابل توجهی فوق‌روان‌کننده

1 Reactive Powder Concrete (RPC)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mreisi@iaukhsh.ac.ir



ساخته شده است، نسبت آب به مواد سیمانی در محدوده ۰/۱۵-۰/۲۴، میزان سیمان در محدوده  $1400-950 \text{ kg/m}^3$ ، ماسه‌ی کوارتزی در محدوده  $1400-1000 \text{ kg/m}^3$ ، مقدار دوده‌سیلیس به سیمان (SF/C) در محدوده  $0/35-0/15$ ، الیاف فولادی در محدوده  $250-190 \text{ kg/m}^3$ ، نسبت وزنی الیاف به مواد سیمانی در محدوده  $0/3-0/15$  قرار دارد.

در RPC نسبت آب به مواد سیمانی کم است؛ لذا از فوق‌روان‌کننده برای تامین روانی استفاده می‌شود. فوق‌روان‌کننده‌های بر پایه‌ی پلی‌کربکسیلات، نفتالین سولفونات و ملامین سولفونات قابلیت تامین روانی و تولید بتن همگن و با تراکم مناسب را دارند. بهترین نوع فوق‌روان‌کننده بر پایه‌ی پلی‌کربکسیلات است؛ اما این فوق‌روان‌کننده به دلیل خاصیت دیرگیری که دارد ممکن است در کارهای عملی مشکلاتی را ایجاد کند [۱۱].

RPC بدون الیاف نیز دارای مقاومت فشاری بالایی است؛ اما این بتن تُرد می‌باشد؛ بنابراین از الیاف برای افزایش مقاومت کششی و بهبود شکل‌پذیری این نوع بتن استفاده می‌شود [۱-۲۴]. الیاف همچنین از باز شدن ترک‌ها جلوگیری می‌کنند و لذا باعث کاهش عرض ترک و نفوذپذیری بتن می‌شوند. از نظر جنس الیاف، الیاف فولادی بیش از سایر الیاف‌ها در تحقیقات محققین مورد استفاده قرار گرفته است. داکتال میزان مناسب الیاف فولادی در RPC را  $6/2\%$  وزن بتن گزارش نموده است [۲۵]. معراجی و همکاران تاثیر استفاده از سه نوع الیاف که شامل الیاف کربن ریز، الیاف فولادی قلاب‌دار بلند و الیاف فولادی مستقیم کوتاه بود، را بر مقاومت فشاری، خمشی و جذب انرژی مورد بررسی قرار دادند [۲۶]. نتایج بدست آمده نشان داد که افزودن الیاف فولادی به RPC بیش‌ترین تاثیر را بر مقاومت فشاری و خمشی دارد. الیاف فولادی قلاب‌دار و الیاف فولادی کوتاه به ترتیب  $10\%$  و  $9\%$  مقاومت فشاری را افزایش دادند. تاثیر الیاف فولادی قلاب‌دار بر مقاومت خمشی و ظرفیت جذب انرژی قابل ملاحظه‌تر از سایر الیاف بود. الیاف کربن مقاومت فشاری و خمشی بتن را اندکی کاهش داد؛ اما ظرفیت جذب انرژی را تا حدی بهبود بخشید. ایپک تاثیر طول و قطر الیاف فولادی را بر مقاومت خمشی RPC مورد بررسی قرار داد [۲۷]. برای این منظور ۳ نوع الیاف که شامل: (۱) الیاف بدون قلاب به قطر  $0/16 \text{ mm}$  و طول  $6 \text{ mm}$ ، (۲) الیاف قلاب‌دار به قطر  $0/75 \text{ mm}$  و طول  $30 \text{ mm}$  و (۳) الیاف قلاب‌دار به قطر

$\text{Ca(OH)}_2$  ضعیف را مصرف می‌کند و باعث تشکیل زنجیره‌های قوی سیلیکات کلسیم هیدراته‌ی (C-S-H) اضافی می‌شود؛ در ضمن دوده‌سیلیس باعث پُر نمودن حفرات بین C-S-H ها می‌شود. دو عملکرد فوق باعث افزایش مشخصات مکانیکی و دوام بتن می‌شود.

۴- استفاده از الیاف فولادی در خمیر سیمان باعث بهبود مشخصات مکانیکی به‌ویژه شکل‌پذیری، مدول گسیختگی و مقاومت کششی RPC می‌شود.

۵- اعمال فشار به بتن قبل از گیرش بتن و همچنین استفاده از بخار آب یا اتوکلاو جهت عمل‌آوری بتن باعث بهبود ریزساختار می‌شود.

۶- استفاده از توزیع بهینه‌ی اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها باعث افزایش تراکم بتن می‌شود.

پل شبروک در کانادا که در سال ۱۹۹۷ ساخته شد و دارای طول دهانه‌ی  $60 \text{ m}$  است، اولین سازه‌ی است که از RPC در ساخت آن استفاده شده است. بتن RPC مورد استفاده در ساخت این پل دارای مقاومت فشاری  $150 \text{ MPa}$  بود و از الیاف فولادی در ساخت آن استفاده نشده است. تیرهای اصلی این پل به مدت ۲ روز توسط بخار آب  $90^\circ$  درجه‌ی سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. از آن زمان تا کنون پل‌های زیادی در کشورهای مثل ژاپن، کره، آمریکا و استرالیا با این بتن ساخته شده است [۱۲]. نازک‌ترین قطعه‌ی بتنی ساخته شده با RPC مربوط به سقف یک ایستگاه قطار به ابعاد  $5 \times 6 \text{ m}$  می‌باشد که دارای ضخامت  $20 \text{ mm}$  می‌باشد. بتن RPC مورد استفاده در این سازه دارای مقاومت فشاری  $150 \text{ MPa}$  می‌باشد [۱۲]. تحقیقاتی نیز در مورد امکان‌سنجی استفاده از بتن RPC در ساخت قطعات نمای پیش‌ساخته بتنی و یا در دال بتنی ریل‌های راه‌آهن انجام شده است [۱۳، ۱۴].

بررسی تاریخچه‌ی تحقیقات انجام شده بر روی RPC نشان می‌دهد که بتن‌های ساخته شده توسط محققین دارای مقاومت فشاری در محدوده‌ی  $800-1000 \text{ MPa}$ ، مقاومت خمشی در محدوده‌ی  $60-30 \text{ MPa}$ ، مقاومت کششی در محدوده‌ی  $4-8 \text{ MPa}$ ، مدول الاستیسیته در محدوده‌ی  $40-70 \text{ GPa}$ ، چگالی در محدوده‌ی  $2500-3000 \text{ kg/m}^3$  و انرژی شکست در محدوده‌ی  $1200-40000 \text{ m}^3$  می‌باشند [۴-۲۳]. بررسی تاریخچه‌ی تحقیقات همچنین نشان می‌دهد که در مخلوط‌های بتنی که توسط محققین

عمل‌آوری به مدت ۷ روز در آب °C ۲۲۰ و ۶ عمل‌آوری در دستگاه اتوکلاو به مدت ۳ روز در دمای °C ۱۲۵ و سپس عمل‌آوری به مدت ۷ روز در آب °C ۲۲۰. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که عمل‌آوری در دستگاه اتوکلاو به مدت ۳ روز در دمای °C ۱۲۵ و سپس عمل‌آوری به مدت ۷ روز در آب °C ۲۲۰ بیش‌ترین تاثیر را بر افزایش مقاومت فشاری RPC دارد.

تحقیقات انجام شده توسط محققین همچنین نشان داده است که اعمال فشار بر بتن RPC قبل از اینکه بتن دچار گیرش شود، باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. ایپک و همکاران نشان دادند که با اعمال فشار ۲۵ MPa بر RPC قبل از گیرش سیمان، مقاومت فشاری بتن تقریباً ۲ برابر می‌شود [۴]. هلمی و همکاران تاثیر عمل‌آوری حرارتی و اعمال نیروی فشاری قبل از گیرش را بر RPC مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. نتایج بدست آمده نشان داد که با استفاده از فشار کل حجم حفرات کاهش می‌یابد اما حجم حفرات موئین افزایش می‌یابد. آن‌ها این‌طور نتیجه‌گیری کردند که عمل‌آوری حرارتی، واکنش هیدراسیون و پوزولانی را تسریع می‌کند و باعث تشکیل محصولات هیدراسیون در داخل شبکه‌ی موئین می‌شود؛ اما عمل‌آوری حرارتی و اعمال فشار تأثیری بر ناحیه‌ی انتقال بتن ندارد. در ۲۰ سال اخیر، محققین تلاش نموده‌اند که با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر مشخصات مکانیکی به‌ویژه مقاومت فشاری، طرح اختلاط بهینه‌ای برای RPC ارائه کنند؛ اما با این وجود روش مشخصی برای طرح اختلاط این نوع بتن تا کنون ارائه نشده است. احمد و مصلح‌الدین ۲۷ مخلوط بتن RPC که شامل ۳ نسبت آب مواد سیمانی برابر ۰/۱۵، ۰/۱۷۵ و ۰/۲، ۳ مقدار سیمان برابر ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۳ نسبت دوده‌سیلیس به سیمان برابر ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ بود، ساختند مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی مخلوط‌های بتنی ساخته شده که همگی عمل‌آوری معمولی بر روی آن‌ها انجام شده بود، نزدیک به یکدیگر و در محدوده‌ی ۱۳۸/۵-۱۲۳/۳ MPa بودند. نتایج بدست آمده نشان داد که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، افزایش میزان سیمان و افزایش نسبت دوده‌سیلیس به سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری بتن RPC می‌شود.

آیدین و همکاران در سال ۲۰۱۰، اثر نوع ماسه بر روی بتن RPC

۱ و طول ۵۰ mm بود، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج بدست آمده نشان داده است که الیاف قلاب‌دار به قطر ۰/۷۵ mm و طول ۳۰ mm دارای بیش‌ترین مقاومت خمشی می‌باشد.

در بتن معمولی استفاده از ۱۸٪ دوده‌سیلیس به جای مواد سیمانی برای مصرف نمودن کل  $Ca(OH)_2$  که از هیدراسیون سیمان حاصل می‌شود، کافی است [۲۲]؛ اما به دلیل خاصیت پُرکنندگی که دوده‌سیلیس در RPC دارد، مقدار آن در RPC تا ۳۰٪ وزن سیمان می‌تواند افزایش یابد [۲].

عمل‌آوری حرارتی معمولاً پس از گذشت زمان گیرش نهائی سیمان بر روی RPC انجام می‌شود. دمای عمل‌آوری که معمولاً استفاده می‌شود، بین ۹۰ تا ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. استفاده از حرارت جهت عمل‌آوری RPC باعث تسریع در واکنش پوزولانی بین دوده‌سیلیس و  $Ca(OH)_2$  می‌شود و زنجیره‌های C-S-H را بلندتر می‌کند؛ در ضمن تحقیقات زانی و همکاران نشان می‌دهد که میزان دوده‌سیلیسی که در واکنش پوزولانی شرکت می‌کند، رابطه‌ی مستقیم با درجه‌ی حرارت عمل‌آوری بتن دارد [۲۸، ۲۹]. نتایج تحقیقات آن‌ها همچنین نشان داد که اگر RPC با آب با دمای °C ۲۰ عمل‌آوری شود، حتی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، زنجیره‌های C-S-H بسیار کوتاه هستند و واکنش‌های پوزولانی نیز ضعیف می‌باشند؛ با افزایش حرارت عمل‌آوری تا °C ۹۰ و °C ۲۵۰، زنجیره‌های C-S-H بلندتر و واکنش‌های پوزولانی نیز قوی‌تر می‌شوند. همچنین نتایج نشان داد که مدت زمان عمل‌آوری حرارتی تأثیر بسیار زیادی بر میزان طول زنجیره‌های C-S-H دارد. پس از ۴۸ ساعت عمل‌آوری حرارتی در دمای °C ۹۰ یا °C ۲۵۰، نتایج بدست آمده نشان داده است که سنگ‌دانه‌های کوارتزی نیز وارد واکنش‌های شیمیائی می‌شوند.

مستوفی‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۶ تأثیر ۶ نوع روش عمل‌آوری مختلف را بر روی مقاومت فشاری RPC مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. ۶ روش عمل‌آوری استفاده شده عبارت بودند از: (۱) عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز در آب °C ۲۰، (۲) عمل‌آوری در بخار آب °C ۹۵ به مدت ۷ روز، (۳) عمل‌آوری در بخار آب °C ۹۵ به مدت ۷ روز و سپس عمل‌آوری به مدت ۲۴ ساعت در آب °C ۱۲۰، (۴) عمل‌آوری در بخار آب °C ۹۵ به مدت ۷ روز و سپس عمل‌آوری به مدت ۷ روز در آب °C ۱۲۰، (۵) عمل‌آوری در بخار آب °C ۹۵ به مدت ۷ روز و سپس عمل‌آوری به مدت ۷ روز در آب °C ۱۲۰ و در پایان

سیمان (SF/C) برابر ۰/۳، نسبت فوق‌روان‌کننده به سیمان (SP/C) برابر ۰/۰۳، مقدار میکروسیلیس برابر  $330 \text{ kg/m}^3$ ، مقدار سیمان برابر  $1100 \text{ kg/m}^3$  بود و نمونه‌ها قبل از آزمایش به مدت ۳ روز در دستگاه اتوکلاو با دمای  $125^\circ\text{C}$  و سپس به مدت ۷ روز در دمای  $220^\circ\text{C}$  قرار گرفته بودند.

تحقیقات چن و چو در سال ۲۰۰۴ نشان داد که استفاده از دوده‌سیلیس در RPC با الیاف فولادی، باعث افزایش چسبندگی بین الیاف فولادی و ماتریس سیمان می‌شود. آن‌ها بهترین درصد جایگزینی دوده‌سیلیس به جای سیمان را بین ۲۰ تا ۳۰ درصد گزارش نمودند [۱۷].

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)، میزان مواد سیمانی (سیمان + دوده‌سیلیس) (CM)، نسبت دوده‌سیلیس به مواد سیمانی (SF/CM)، نوع سیمان و دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی بر مقاومت فشاری بتن RPC می‌باشد. برای رسیدن به این اهداف، تحقیق حاضر به چند گام تقسیم می‌شود؛ به طوری که در هر گام یکی از پارامترهای فوق بررسی می‌گردد و با توجه به نتایج هر گام، طرح‌های اختلاط جدیدی جهت گام بعدی طراحی و ساخته می‌شود.

## ۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مورد استفاده

مشخصات بتن RPC حساسیت زیادی به نوع و مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت آن دارد؛ بنابراین برای دستیابی به بتن با مشخصات مکانیکی مطلوب، لازم است در انتخاب مصالح و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن، دقت لازم به عمل آید. برای رسیدن به اهداف این تحقیق از مصالح زیر جهت ساخت مخلوط‌های بتنی استفاده شده است.

#### ۲-۱-۱- سیمان

یکی از تفاوت‌های اصلی بتن RPC با بتن‌های معمولی، عیار سیمان مصرفی در یک متر مکعب بتن می‌باشد؛ به عبارت دیگر میزان سیمان مصرفی در بتن معمولی معمولاً حدود  $400 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد؛ این در حالی است که در بتن RPC مقادیر سیمان با توجه به نسبت آب به سیمان تا حدود  $1500 \text{ kg/m}^3$  نیز می‌رسد؛ لذا سیمان نقش

را بررسی نمودند [۶]. آن‌ها با استفاده از سنگدانه‌های بازالت، سنگ آهک، کوارتز، بوکسیت متخلخل و گرانیت در ساخت بتن با عمل‌آوری بدون اتوکلاو و با اتوکلاو به این نتیجه دست یافتند که، بیش‌ترین مقاومت فشاری بدست آمده مربوط به سنگدانه‌ی کوارتز می‌باشد. همچنین مقاومت فشاری بتن RPC را می‌توان با افزایش عمل‌آوری بخار در فرایند هیدراسیون بهبود داد. در صورت استفاده از عمل‌آوری توسط دستگاه اتوکلاو نسبت به عمل‌آوری بدون اتوکلاو، می‌توان مقاومت فشاری را ۲۱٪ تا ۵۹٪ افزایش داد.

تام و همکاران در سال ۲۰۱۰ شرایط بهینه برای تولید بتن RPC را مورد بررسی قرار دادند [۷]. در این تحقیق مخلوط‌های بتن RPC با نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۱۷، ۰/۲، ۰/۲۳ و ۰/۴ با استفاده از سه نوع ماسه‌ی سیلیسی با اندازه‌های  $0.3 \text{ mm}$  -  $0.15 \text{ mm}$ ،  $0.15 \text{ mm}$  -  $0.6 \text{ mm}$  و  $0.15 \text{ mm}$  -  $1.18 \text{ mm}$  ساخته شد و عمل‌آوری در دماهای متفاوت و در سنین مختلف انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد، بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاطی است که نسبت آب به مواد سیمانی در آن ۰/۲ می‌باشد. آن‌ها همچنین گزارش نمودند که استفاده از نسبت آب به مواد سیمانی کم‌تر از ۰/۲ باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود؛ زیرا در این حالت آب کافی جهت هیدراسیون ذرات سیمان در دسترس نمی‌باشد. در صورت استفاده از نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۲، مصرف ۲/۵٪ فوق‌روان‌کننده، ماسه با اندازه‌ی  $0.15 \text{ mm}$  -  $0.6 \text{ mm}$  و عمل‌آوری در دمای  $250^\circ\text{C}$ ، بهترین نتایج از لحاظ خواص مکانیکی بدست آمده است؛ به طوری که مقاومت فشاری  $200 \text{ MPa}$  حاصل شده است و همچنین بتن ساخته شده مقرون به صرفه می‌باشد.

مستوفی‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی، طرح اختلاط و شرایط عمل‌آوری بهینه در بتن RPC را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در این تحقیق مخلوط‌های بتنی با نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۱۳، ۰/۱۴، ۰/۱۵، ۰/۱۶، ۰/۱۷، ۰/۱۸ و ۰/۱۹، مقادیر سیمان برابر ۸۵۰، ۹۰۰، ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت دوده‌سیلیس به سیمان (SF/C) برابر ۰/۲۵ و ۰/۳ ساخته شد. عمل‌آوری نمونه‌ها در شرایط دمایی متفاوت انجام گرفت. مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در محدوده‌ی  $233 \text{ MPa}$  -  $85 \text{ MPa}$  قرار داشت. بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاطی بود که نسبت آب به مواد سیمانی در آن برابر ۰/۱۴، نسبت میکروسیلیس به

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان‌های پرتلند مورد استفاده محصول کارخانه‌ی سیمان شهرکرد [۳۰].

Table 1. Physical properties of used Portland cement manufactured by Shahrekord cement company [30]

نوع سیمان	سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	زمان گیرش ثانویه (دقیقه)	مقاومت فشاری ملات (MPa)		
				۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
پرتلند تیپ ۵	≥۲۹۰۰	۱۰۰ ± ۱۰	۱۷۰ ± ۲۰	≥۱۷	≥۲۹	≥۵۰
پرتلند تیپ ۲	≥۲۹۰۰	≥۴۵	≤۳۶۰	≥۲۲	≥۳۶	≥۵۳
پرتلند تیپ ۱-۴۲۵	≥۳۰۰۰	≥۱۰±۹۰۰	۱۷۰ ± ۲۰	-	≥۳۷	≥۵۴
پرتلند تیپ ۱-۵۲۵	≥۳۲۰۰	≥۴۵	≤۳۷۵	≥۱۲	≥۱۹	-

جدول ۲. آنالیز شیمیایی سیمان‌های پرتلند مورد استفاده در این تحقیق محصول کارخانه‌ی سیمان شهرکرد [۳۰].

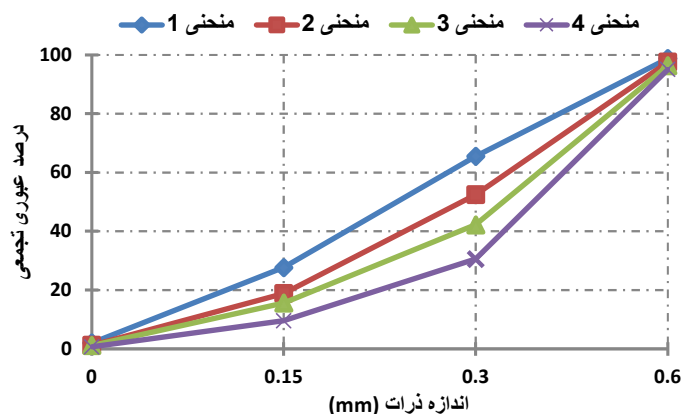
Table 2. Chemical analysis of used cement in this study manufactured by Sharekord cement company [30]

عناصر شیمیایی	سیمان تیپ ۵	سیمان تیپ ۲	سیمان تیپ ۱-۵۲۵	سیمان تیپ ۱-۴۲۵
SiO <sub>r</sub>	۲۲/۰۰ ± ۰/۳	۲۱/۸۵ ± ۰/۳	۲۱/۲۰ ± ۰/۲	۲۱/۷۰ ± ۰/۲
Al <sub>r</sub> O <sub>r</sub>	۴/۷۵ ± ۰/۲	۵/۳۵ ± ۰/۲	۵/۸۰ ± ۰/۱۵	۵/۳۰ ± ۰/۱۵
Fe <sub>r</sub> O <sub>r</sub>	۵/۳۰ ± ۰/۲	۴/۱۰ ± ۰/۱۲	۳/۴۰ ± ۰/۱۵	۳/۹۰ ± ۰/۱۵
CaO	۶۵/۷۰ ± ۰/۲	۶۵/۸۰ ± ۰/۲	۶۶/۹۰ ± ۰/۲	۶۶/۰۵ ± ۰/۲
MgO	≤ ۱/۶۰	≤ ۱/۷۰	≤ ۱/۶۰	≤ ۱/۷۰
SO <sub>r</sub>	≤ ۰/۴۰	≤ ۰/۳۰	≤ ۰/۴۰	≤ ۰/۴۰
Total alkali	≤ ۰/۶۰	≤ ۰/۷۰	≤ ۰/۷۰	≤ ۰/۷۰
LOI	≤ ۰/۵۰	≤ ۰/۵۰	≤ ۰/۵۰	≤ ۰/۵۰
Cl	≤ ۰/۳۰	≤ ۰/۳۰	≤ ۰/۳۰	≤ ۰/۳۰
Free CaO	≤ ۰/۹۰	≤ ۰/۹۰	≤ ۱/۶۰	≤ ۰/۹۰
I.R	≤ ۰/۲۵	≤ ۰/۲۵	≤ ۰/۲۵	≤ ۰/۲۵
C <sub>r</sub> A	≤ ۳/۵۰	≤ ۷/۵۰		

جدول ۳. آنالیز شیمیایی دوده‌سیلیس مصرفی (درصد وزنی عناصر) [۳۱].

Table 3. Chemical analysis of used silica fume (weight percent of ingredients) [31]

PH	L.O.I	K <sub>r</sub> O	Al <sub>r</sub> O <sub>r</sub>	Fe <sub>r</sub> O <sub>r</sub>	CaO	MgO	Na <sub>r</sub> O	SiO <sub>r</sub>	
۸-۹/۵	۱/۲-۵/۵	۰/۲ - ۰/۵	۰/۶ - ۱/۲	۰/۶ - ۱/۳	۰/۵ - ۱/۵	۰/۵ - ۲	۰/۳ - ۰/۵	۹۰ - ۹۵	دوده‌سیلیس مصرفی (%)
-	۶	-	-	-	-	-	-	۸۵	مقدار مجاز مطابق ASTM C ۱۲۴۰ [۳۲]



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌های سیلیسی مصرفی جهت ساخت مخلوط‌های بتنی.  
Fig. 1. Grading curve of used silica sands for making concrete mixes

جدول ۴. مشخصات شیمیایی ماسه سیلیسی مصرفی [۳۳].

Table 4. Chemical properties of used silica sand [33]

L.O.I	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	نوع عنصر
۰/۰۱-۰/۳۵	۰	۰-۰/۰۱	۰/۰۲-۰/۰۶	۰/۲-۰/۶	۰/۰۷-۰/۲	۰/۴-۱/۷	۹۷-۹۹	ماسه مصرفی (%)
-	-	۰/۰۳-۰/۰۸	۰/۰۲-۰/۰۸	۰/۲-۰/۷	۰/۰-۴/۷	۰/۵۱-۱/۶۳	۹۶-۹۸/۱	ماسه استاندارد (%)

که فوق‌روان‌کننده مصرفی کم‌ترین میزان حباب ریز هوا را در داخل بتن ایجاد کند و هم‌چنین گیرش بتن را به تاخیر نیندازد. در این تحقیق از فوق‌روان‌کننده‌ی Structuro ۳۳۵ محصول شرکت FOSROC که بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات‌اتر می‌باشد، استفاده می‌شود. وزن مخصوص این فوق‌روان‌کننده برابر ۱/۰۸ می‌باشد.

#### ۴-۱-۲- ماسه‌ی سیلیسی

برای بررسی دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی بر مقاومت فشاری RPC، در این تحقیق از ماسه‌ی سیلیسی محصول شرکت چپروک با ۴ نوع دانه‌بندی استفاده می‌شود. منحنی‌های دانه‌بندی و آنالیز شیمیایی ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۴ ارائه شده است [۳۳]. همان‌طور که مشاهده می‌شود ماسه‌ی سیلیسی مورد استفاده دارای درجه‌ی خلوص بیش از ۹۷٪ می‌باشد. وزن مخصوص ماسه‌ی سیلیسی مورد استفاده ۲/۷ می‌باشد.

#### ۳- طرح‌های اختلاط بتن

همان‌طور که در بخش قبلی عنوان شد، هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)، میزان

به‌سزایی در بتن RPC بر عهده دارد. در تحقیق حاضر برای بررسی تأثیر نوع سیمان بر مقاومت فشاری، سیمان‌های پرتلند تیپ ۵۲۵-۱، ۴۲۵-۱، ۲ و ۵ محصول کارخانه‌ی سیمان شهرکرد برای ساخت مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان‌های پرتلند استفاده شده در این تحقیق به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. سیمان‌های به‌کار برده شده دارای وزن مخصوص ۳/۱۵ می‌باشد.

#### ۲-۱-۲- دوده‌سیلیس

در این تحقیق از دوده‌سیلیس محصول کارخانه‌ی فروسیلیس ازنا استفاده می‌شود. آنالیز شیمیایی دوده‌سیلیس مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دوده‌سیلیس مصرفی بیش از ۹۰٪ سیلیس (SiO<sub>2</sub>) آمورف دارد که برای واکنش‌های پوزولانی بسیار مفید می‌باشد. همچنین اندازه‌ی ذرات کم‌تر از ۱ میکرون، وزن مخصوص ۲/۲ و سطح مخصوص ۱۵-۲۰ m<sup>2</sup>/gr است.

#### ۳-۱-۲- فوق‌روان‌کننده

آنچه که باید در انتخاب فوق‌روان‌کننده رعایت شود این است

کارایی یک مشخصه‌ی مهم بتن RPC به‌شمار می‌رود. در بتن RPC به دلیل سرعت بالای از دست دادن کارایی، باید جریان اسلامپ مناسبی هنگام قالب‌گیری انتخاب شود. در این تحقیق برای مقایسه‌ی طرح‌های اختلاط، میزان فوق‌روان‌کننده‌ی کلیه‌ی طرح‌های اختلاط طوری تنظیم گردید که قطر پخش‌شدگی در آزمایش جریان اسلامپ کوچک برابر  $10 \pm 200$  میلی‌متر شود. ظرف آزمایش جریان اسلامپ، یک مخروط ناقص با قطر کوچک ۷۰ mm، قطر بزرگ ۱۰۰ mm و ارتفاع ۶۰ mm می‌باشد. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمونه‌ای از آزمایش جریان اسلامپ کوچک.

Fig. 2. A sample of performed mini slump flow test

### ۱-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

نتایج تحقیقات هیرمات و پاراگال نشان داده است که مخلوط‌های بتنی که با مخلوط‌کن با سرعت کم ساخته می‌شوند، دارای ساختار متخلخل هستند و ناحیه‌ی انتقال بین خمیر سیمان و ریزدانه‌ها ضعیف می‌باشد [۳۴]. استفاده از مخلوط‌کن با سرعت دوران بالا در بتن RPC باعث بهبود کیفیت بتن ساخته شده می‌شود. این محققین بهترین سرعت مخلوط کردن مصالح را ۱۰۰ دور بر دقیقه و بهترین مدت زمان اختلاط را ۱۵ دقیقه اعلام نموده‌اند. در تحقیق حاضر، برای ساخت نمونه‌های بتنی از مخلوط‌کن ویژه‌ای که در شکل ۳ نشان داده شده است و دارای حداکثر سرعت دورانی ۳۶۰ دور بر دقیقه است، استفاده شده است.

جهت ساخت مخلوط‌های بتنی نحوه‌ی اختلاط به صورت زیر در نظر گرفته شد:

- ۱- ابتدا تمام مصالح به صورت دقیق وزن می‌شوند.
- ۲- تمام فوق‌روان‌کننده به آب اضافه و با هم مخلوط می‌شوند.
- ۳- تمام مصالح خشک، به ترتیب سیمان، میکروسیلیس و ماسه سیلیسی درون مخلوط‌کن ریخته و به مدت ۲ دقیقه با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه مخلوط می‌شوند.
- ۴- تمام مخلوط آب و فوق‌روان‌کننده به مخلوط‌کن اضافه می‌گردد و به مدت ۲ دقیقه با سرعت ۲۴۰ دور بر دقیقه مخلوط می‌شوند.
- ۵- مخلوط‌کن به مدت ۱۰ ثانیه خاموش شده و سپس به مدت ۴ دقیقه با سرعت ۳۶۰ دور بر دقیقه عملیات ادامه می‌یابد.
- ۶- سپس از بتن ساخته شده، آزمایش جریان اسلامپ گرفته می‌شود و در صورت رسیدن به میزان جریان اسلامپ مورد نظر،



شکل ۳. مخلوط‌کن مورد استفاده در این تحقیق با حداکثر سرعت ۳۶۰ دور بر دقیقه.

Fig. 3. Used mixer in this study with maximum 360 rpm velocity

مواد سیمانی (CM)، نسبت دوده‌سیلیس به مواد سیمانی (SF/W/CM)، نوع سیمان و نوع منحنی دانه بندی ماسه‌ی سیلیسی بر مقاومت فشاری بتن RPC می‌باشد. برای بررسی تأثیر W/CM و CM، ۱۲ مخلوط بتن، برای بررسی تأثیر SF/CM، ۴ مخلوط بتن، برای بررسی تأثیر نوع سیمان ۴ مخلوط بتن و برای بررسی تأثیر دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی ۴ مخلوط بتنی در آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر طراحی و ساخته شد. نسبت‌های اختلاط هر کدام در جداول ۵ تا ۸ ارائه شده است.

آب به مواد سیمانی ۰/۲۳، میزان مواد سیمانی ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب انتخاب شده است. در مجموع ۱۲ مخلوط بتنی (Mix ۱ تا Mix ۱۲) ساخته شد. در ۱۲ مخلوط بتنی در نظر گرفته شده از میزان دوده سیلیس به مواد سیمانی (SF/CM) برابر ۰/۲، ماسه‌ی سیلیسی با دانه‌بندی نوع ۱ و از سیمان پرتلند نوع ۵ شهرکرد استفاده شده است. مشخصات طرح‌های اختلاط گروه اول در جدول ۵ نشان داده شده است. میزان فوق‌روان‌کننده‌ی هر ۱۲ طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۵ جهت رسیدن به قطر پخش شدگی  $200 \pm 10$  میلی‌متر تنظیم شده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر مواد سیمانی در هر ۳ نسبت آب به مواد سیمانی، میزان نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی (SP/CM) کاهش می‌یابد. علت را به این صورت می‌توان توجیه نمود که به‌طور کلی خمیر سیمان (سیمان + دوده سیلیس + آب) در بتن دو وظیفه بر عهده دارد. یکی ایجاد پوشش بر روی سنگ‌دانه‌ها و دیگری ایجاد روانی در بتن است. در یک مخلوط بتنی با W/CM ثابت، وقتی میزان مواد سیمانی افزایش می‌یابد، میزان خمیر سیمان افزایش می‌یابد و با توجه به کاهش میزان سنگ‌دانه، خمیر سیمان اضافی باعث افزایش روانی بتن می‌شود و لذا برای تامین روانی ثابت، نیاز به فوق‌روان‌کننده‌ی کم‌تری می‌باشد.

مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی این گروه در جدول ۵ ارائه شده است. در شکل ۴ تغییرات مقاومت فشاری بر حسب نسبت آب به مواد سیمانی و میزان مواد سیمانی نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقاومت سنگ‌دانه از خمیر سیمان بیش‌تر است؛ لذا میزان مواد سیمانی تا حدی لازم است که بتواند اطراف سنگ‌دانه‌ها را به‌طور کامل پوشش دهد و مقدار بیش از آن باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود. نتایج ارائه شده در شکل ۴ نیز گویای این مسئله می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در W/CM برابر ۰/۲ و ۰/۲۳، با افزایش مواد سیمانی در ابتدا مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد؛ اما در  $W/CM=0/17$  با افزایش مواد سیمانی در محدوده‌ی مورد بررسی با افزایش میزان مواد سیمانی، مقاومت فشاری زیاد می‌شود که نشان دهنده‌ی این است چون در این حالت نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پائین است با افزایش مواد سیمانی یا به عبارتی افزایش خمیر سیمان، خمیر سیمان باعث افزایش پوشش سطح سنگ‌دانه‌ها می‌شود و لذا مقاومت

قالب‌گیری انجام می‌شود و در غیر این صورت بتن آزمایش شده دوباره با تغییر میزان فوق‌روان‌کننده ساخته می‌شود تا جریان اسلامپ مورد نظر تامین شود. بعد از این مرحله، بتن آماده‌ی قالب‌گیری می‌شود. مینگ‌ژی و همکاران نمونه‌ی استاندارد برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری را نمونه‌ی مکعبی به ابعاد ۱۰۰ mm معرفی نمودند [۳۵]؛ لذا در تحقیق حاضر نیز برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، از هر مخلوط بتنی، ۳ نمونه‌ی مکعبی به ابعاد ۱۰۰ mm تهیه شد. در عمل‌آوری بتن RPC، حرارت نقش مهمی دارد و عمل‌آوری در دمای بالا با تشدید فعالیت پوزولانی دوده سیلیس، باعث انجام کامل‌تر فرآیند هیدراسیون و بهبود ریز ساختار بتن خواهد شد. در بخش مقدمه عنوان شد که محققین برای عمل‌آوری از روش‌های مختلفی استفاده نموده‌اند. در این تحقیق عمل‌آوری کلیه‌ی نمونه‌های مخلوط‌های بتنی در آب  $90^{\circ}C$  به مدت ۷ روز انجام می‌گیرد که دارای مصرف انرژی متوسط می‌باشد.

#### ۴- نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش قبلی عنوان شد، هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)، میزان مواد سیمانی (CM)، نسبت دوده سیلیس به مواد سیمانی (SF/CM)، نوع سیمان و نوع دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی بر مقاومت فشاری بتن RPC می‌باشد. برای رسیدن به این اهداف، تحقیق حاضر به چند گام تقسیم می‌شود و در هر گام یکی از پارامترهای فوق بررسی می‌گردد و سپس با توجه به نتایج هر گام، طرح‌های اختلاط جدیدی جهت گام بعدی طراحی و ساخته می‌شود.

##### ۴-۱- تأثیر مقادیر مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی

در گام اول از انجام این تحقیق، مخلوط‌های بتنی گروه اول، جهت بررسی تأثیر میزان مواد سیمانی (CM) و نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM) بر مقاومت فشاری، بتن RPC طراحی و ساخته شد. این مخلوط‌های بتنی شامل ۳ نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM) برابر ۰/۱۷، ۰/۲ و ۰/۲۳ است. در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۱۷، میزان مواد سیمانی ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲، میزان مواد سیمانی ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و در نسبت

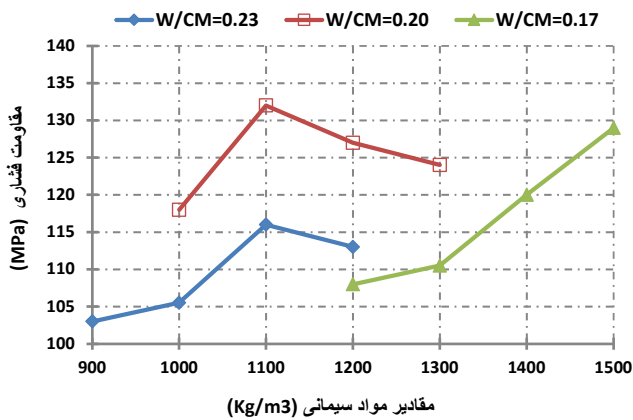


جدول ۵. طرح‌های اختلاط گروه اول برای بررسی تأثیر میزان مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری.

Table 5. Mix design of group 1 to investigate effect of CM and W/CM on compressive strength

مقاومت فشاری (MPa)	مشخصات طرح		میزان مصالح مورد استفاده برای طرح‌های اختلاط (kg/m <sup>3</sup> )						شماره طرح اختلاط
	SP/CM (%)	W/CM	W	SP	S	SF	C	CM	
۱۰۸	۶	۰/۱۷	۱۷۵/۲	۷۲	۸۰۰	۲۴۰	۹۶۰	۱۲۰۰	Mix. ۱
۱۱۰/۵	۵		۱۹۵	۶۵	۶۸۲	۲۶۰	۱۰۴۰	۱۳۰۰	Mix. ۲
۱۲۰	۴		۲۱۵/۶	۵۶	۵۶۸	۲۸۰	۱۱۲۰	۱۴۰۰	Mix. ۳
۱۲۹	۳		۲۳۷	۴۵	۴۶۰	۳۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰	Mix. ۴
۱۱۸	۵/۴	۰/۲	۱۷۸/۵	۵۳/۷۵	۱۰۵۵	۲۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	Mix. ۵
۱۳۲	۳/۲		۲۰۶	۳۵	۹۴۰	۲۲۰	۸۸۰	۱۱۰۰	Mix. ۶
۱۲۷	۲		۲۳۰/۴	۲۴	۸۲۰	۲۴۰	۹۶۰	۱۲۰۰	Mix. ۷
۱۲۴	۲		۲۴۹/۶	۲۶	۶۷۳	۲۶۰	۱۰۴۰	۱۳۰۰	Mix. ۸
۱۰۳	۴/۷	۰/۲۳	۱۹۰	۴۲/۵	۱۱۳۸	۱۸۰	۷۲۰	۹۰۰	Mix. ۹
۱۰۵/۵	۲/۸		۲۱۹	۲۷/۵	۱۰۲۵	۲۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	Mix. ۱۰
۱۱۶	۱/۸		۲۴۵	۲۰	۸۸۱	۲۲۰	۸۸۰	۱۱۰۰	Mix. ۱۱
۱۱۳	۱/۵		۲۶۹	۱۷/۵	۷۴۲	۲۴۰	۹۶۰	۱۲۰۰	Mix. ۱۲

C = سیمان، SF = دوده سیلیس، S = ماسه‌ی سیلیسی، SP = فوق‌روان کننده، W = آب و CM = مواد سیمانی.



شکل ۴. نمودار تغییرات مقاومت فشاری بر حسب تغییرات مقادیر مواد سیمانی در نسبت‌های آب به مواد سیمانی.

Fig. 4. Variation of compressive strength with CM and SF/CM

سیلیسی با دانه‌بندی نوع ۱ استفاده شده است و فقط اختلاف این ۳ مخلوط بتنی در نوع سیمان مصرفی و میزان فوق‌روان‌کننده‌ی آن‌ها می‌باشد. مشخصات طرح‌های اختلاط در جدول ۶ ارائه شده است. میزان فوق‌روان‌کننده‌ی هر ۳ مخلوط ارائه شده در جدول ۶ جهت

فشاری را افزایش می‌دهد. نتایج ارائه شده در شکل ۴ و جدول نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاطی است که نسبت آب به مواد سیمانی در آن برابر ۰/۲ و مقدار مواد سیمانی برابر ۱۱۰۰ kg/m<sup>3</sup> می‌باشد؛ بنابراین برای ادامه‌ی تحقیق از طرح اختلاط با نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۲ و مقدار مواد سیمانی برابر ۱۱۰۰ kg/m<sup>3</sup> استفاده شده است.

#### ۲-۴- تأثیر نوع سیمان پرتلند بر مقاومت فشاری RPC

به منظور بررسی تأثیر نوع سیمان بر مقاومت فشاری بتن RPC، ۳ طرح اختلاط (Mix ۱۳ تا Mix ۱۵) (طرح‌های اختلاط گروه دوم) ساخته شد و مقاومت فشاری آن‌ها تعیین گردید. ۳ طرح اختلاط فوق با میزان مصالح برابر طرح اختلاط Mix ۶ که بیش‌ترین مقاومت فشاری را در طرح‌های اختلاط گروه اول داشت، ساخته شد؛ یعنی اینکه در ۳ مخلوط بتنی موردنظر از میزان مواد سیمانی (CM) برابر ۱۱۰۰ kg/m<sup>3</sup>، نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM) برابر ۰/۲، دوده سیلیس به مواد سیمانی (SF/CM) برابر ۰/۲ و ماسه‌ی

جدول ۶. طرح‌های اختلاط گروه دوم برای بررسی تأثیر نوع سیمان پرتلند بر مقاومت فشاری.

Table 6. Mix design of group 2 to investigate effect of cement type on compressive strength

مقاومت فشاری (MPa)	SP/CM (%)	میزان مصالح مورد استفاده برای طرح‌های اختلاط (kg/m <sup>3</sup> )								شماره طرح اختلاط
		W	SP	S	SF	C				
						نوع ۵	نوع ۲	نوع ۱-۴۲۵	نوع ۱-۵۲۵	
۱۳۲	۳/۲	۲۰۶	۳۵	۹۴۰	۲۲۰	۸۸۰	۰	۰	۰	Mix.۶
۱۱۱	۴/۰	۲۰۲/۵	۴۳/۷۵	۹۴۰	۲۲۰	۰	۰	۰	۸۸۰	Mix.۱۳
۱۱۹	۳/۵	۲۰۴/۵	۳۸/۷۵	۹۴۰	۲۲۰	۰	۰	۸۸۰	۰	Mix.۱۴
۱۰۴	۳/۳	۲۰۵/۶	۳۶	۹۴۰	۲۲۰	۰	۸۸۰	۰	۰	Mix.۱۵

C = سیمان، SF = دوده‌سیلیس، S = ماسه‌ی سیلیسی، SP = فوق‌روان کننده، W = آب و CM = مواد سیمانی.

و ایتسین [۳] نیز استفاده از سیمان با  $C_3A$  کم (کم‌تر از ۵٪) را برای ساخت بتن RPC توصیه می‌کنند.

### ۳-۴- تأثیر دوده‌سیلیس بر مقاومت فشاری RPC

به منظور بررسی تأثیر میزان دوده‌سیلیس بر مقاومت فشاری بتن RPC، ۳ طرح اختلاط (Mix ۱۶ تا Mix ۱۸) ساخته شد که به ترتیب در آن‌ها دوده‌سیلیس جایگزین ۱۰، ۱۵ و ۲۵ درصد مواد سیمانی گردید. در طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده از میزان نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM) برابر ۰/۲، مقدار مواد سیمانی (CM) برابر  $1100 \text{ kg/m}^3$ ، سیمان پرتلند نوع ۵ محصول کارخانه‌ی سیمان شهرکرد و ماسه‌ی سیلیسی با دانه‌بندی نوع ۱ استفاده شده است که مشابه طرح اختلاط Mix ۶ است که در مطالعات قبلی بیش‌ترین مقاومت فشاری را کسب کرده بود. مشخصات طرح‌های اختلاط این گروه به همراه طرح اختلاط Mix ۶ در جدول ۷ ارائه شده است. میزان فوق‌روان‌کننده‌ی طرح‌های اختلاط ارائه شده در جدول ۷ جهت رسیدن به قطر پخش‌شدگی  $200 \pm 10$  میلی‌متر تنظیم شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی دوده‌سیلیس به جای سیمان از ۱۰٪ تا ۲۰٪ مقاومت

رسیدن به قطر پخش شدگی  $200 \pm 10$  میلی‌متر تنظیم شده است. در جدول مشخصات مخلوط Mix ۶ نیز جهت مقایسه ارائه شده است. جدول ۶ نشان می‌دهد که طرح اختلاطی که در آن از سیمان پرتلند نوع ۵ استفاده شده است، به میزان نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی (SP/CM) کم‌تری نیاز دارد. علت این مسئله را می‌توان این صورت توجیه نمود که همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، سیمان نوع ۵ از سطح مخصوص کم‌تری برخوردار است. در یک مخلوط بتنی با W/CM ثابت، با کاهش سطح مخصوص ذرات سیمان، آب کم‌تری جهت پوشش سطح ذرات سیمان لازم می‌باشد و لذا میزان مصرف فوق‌روان‌کننده کاهش خواهد یافت؛ البته همان‌طور که ریچارد و چیرزی [۲] نیز در تحقیقات خود عنوان نموده‌اند، سیمان نوع ۵ به دلیل داشتن  $C_3A$  کم‌تر به میزان آب کم‌تری نیاز دارند.

نتایج مقاومت فشاری این گروه از مخلوط‌های بتنی که در جدول ۶ ارائه شده است، نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به مخلوطی است که در آن از سیمان پرتلند نوع ۵ استفاده شده است (Mix ۶)؛ که دلیل این امر به دلیل کم بودن مقدار  $C_3A$  در این نوع سیمان می‌باشد اثر چسبانندگی  $C_3A$  کم می‌باشد و لذا در بتن RPC که بتن با مقاومت فوق‌العاده زیاد است عدم وجود یا مقدار کم  $C_3A$  باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. کوپولا و همکاران [۳۶]

جدول ۷. طرح‌های اختلاط گروه سوم برای بررسی تأثیر مقدار دوده سیلیس بر مقاومت فشاری.

Table 7. Mix design of group 3 to investigate effect of silica fume content on compressive strength

مقاومت فشاری (MPa)	مشخصات طرح		میزان مصالح مورد استفاده برای طرح‌های اختلاط ( $\text{kg/m}^3$ )					شماره طرح اختلاط
	(%) SP/CM	(%) SF/CM	W	SP	S	SF	C	
۱۳۲	۲/۳	۲۰	۲۰۶	۳۵	۹۴۰	۲۲۰	۸۸۰	Mix.۶
۱۱۱	۳/۷	۱۰	۲۰۴	۴۰	۹۴۰	۱۱۰	۹۹۰	Mix.۱۶
۱۲۰	۳/۴	۱۵	۲۰۵	۳۷/۵	۹۴۰	۱۶۵	۹۳۵	Mix.۱۷
۱۳۰/۵	۷/۳	۲۵	۲۰۴	۴۰	۹۴۰	۲۷۵	۸۲۵	Mix. ۱۸

C = سیمان، SF = دوده سیلیس، S = ماسه‌ی سیلیسی، SP = فوق‌روان کننده، W = آب و CM = مواد سیمانی.

جدول ۸ جهت رسیدن به قطر پخش شدگی  $10 \pm 200$  میلی‌متر تنظیم شده است. جدول ۸ نشان می‌دهد، طرح اختلاطی که در آن از درشت‌ترین منحنی دانه‌بندی (منحنی ۴) استفاده شده است، میزان نسبت فوق‌روان کننده به مواد سیمانی (SP/CM) کم‌تر است؛ زیرا در یک مخلوط بتنی با W/CM ثابت، با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها، سطح جانبی دانه‌ها کم‌تر شده و لذا آب کم‌تری جهت پوشش دانه‌ها لازم می‌باشد؛ بنابراین برای تامین روانی ثابت، میزان مصرف فوق‌روان کننده کاهش خواهد یافت.

نتایج مقاومت فشاری این گروه از مخلوط‌های بتنی در جدول ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاطی است که در آن از ریزترین منحنی دانه‌بندی (منحنی ۱) استفاده شده است؛ زیرا با ریز شدن اندازه‌ی سنگدانه‌ها ناحیه‌ی انتقال بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها تقویت می‌شود و این مسئله باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر جهت بررسی تأثیر پارامترهای تأثیرگذار طرح اختلاط بتن RPC بر مقاومت فشاری بتن، ۲۱ مخلوط بتنی RPC که شامل ۳ نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM) (۰/۱۷، ۰/۲ و ۰/۲۳)، ۵ مقدار مواد سیمانی (CM) (۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، ۴ نسبت دوده سیلیس به

فشاری افزایش و از ۲۰٪ تا ۲۵٪ کاهش می‌یابد؛ به عبارتی طرح اختلاطی که در آن دوده سیلیس جایگزین ۲۰٪ مواد سیمانی شده است (Mix ۶)، دارای بیش‌ترین مقاومت فشاری می‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد که استفاده از ۲۰٪ دوده سیلیس، در فرآیند هیدراسیون سیمان می‌تواند ضمن حذف بیش‌تر بلورهای ضعیف هیدروکسید کلسیم، بلورهای مقاوم بیشتری تشکیل می‌دهد.

#### ۴-۴- تأثیر نوع منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی بر مقاومت فشاری بتن RPC

به منظور بررسی تأثیر منحنی دانه‌بندی بر مقاومت فشاری بتن RPC، ۳ طرح اختلاط دیگر (Mix ۱۹ تا Mix ۲۱) ساخته شد. برای هر طرح اختلاط یک نوع دانه‌بندی خاص انتخاب شد، منحنی دانه‌بندی ماسه‌های سیلیسی مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های بتنی در شکل ۱ نشان داده شده است. در طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده میزان مواد سیمانی (CM) برابر  $1100 \text{ kg/m}^3$ ، نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM) برابر ۰/۲، میزان دوده سیلیس به مواد سیمانی (SF/CM) برابر ۰/۲ و سیمان پرتلند تیپ ۵ در نظر گرفته شد که مشابه طرح اختلاط Mix. ۶ است که در مطالعات قبلی بیش‌ترین مقاومت فشاری را کسب کرده بود. مشخصات طرح‌های اختلاط این گروه به همراه طرح اختلاط Mix. ۶ در جدول ۸ ارائه شده است. میزان فوق‌روان‌کننده‌ی طرح‌های اختلاط ارائه شده در

جدول ۸. طرح‌های اختلاط گروه چهارم، جهت بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی بر مقاومت فشاری.

Table 8. Mix design of group 4 to investigate effect of silica sand gradation on compressive strength

مقاومت فشاری (MPa)	مشخصات طرح SP/CM (%)	میزان مصالح مورد استفاده برای طرح‌های اختلاط (kg/m <sup>3</sup> )						شماره طرح		
		W	SP	منحنی دانه‌بندی ماسه					SF	C
				۴	۳	۲	۱			
۱۳۲	۳/۲	۲۰۶	۳۵	۰	۰	۰	۹۴۰	۲۲۰	۸۸۰	Mix. ۶
۱۲۵	۲/۹	۲۰۷/۲	۳۲	۰	۰	۹۴۰	۰	۲۲۰	۸۸۰	Mix. ۱۹
۱۲۰/۵	۲/۸	۲۰۷/۹	۳۰/۳	۰	۹۴۰	۰	۰	۲۲۰	۸۸۰	Mix. ۲۰
۱۱۴	۲/۶	۲۰۸/۵	۲۸/۷۵	۹۴۰	۰	۰	۰	۲۲۰	۸۸۰	Mix. ۲۱

C = سیمان، SF = میکروسیلیس، S = ماسه‌ی سیلیسی، SP = فوق‌روان کننده، W = آب و CM = مواد سیمانی.

۲- با توجه به اینکه نوع سیمان تأثیر زیادی بر مقاومت بتن RPC و میزان مصرف فوق‌روان کننده دارد؛ بنابراین انتخاب درست نوع سیمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج این تحقیق نشان داده است که بیش‌ترین مقاومت فشاری و کم‌ترین میزان مصرف فوق‌روان کننده، مربوط به طرح اختلاطی است که در آن از سیمان پرتلند نوع ۵ استفاده شده است.

۳- با توجه به اینکه دوده‌سیلیس به عنوان یک ماده‌ی پوزولانی مناسب، برای افزایش مقاومت فشاری بتن RPC می‌باشد، در شرایط عمل‌آوری انجام شده در این تحقیق یعنی ۷ روز قرارگیری نمونه در آب ۹۰ °C، بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاطی است که در آن دوده‌سیلیس جایگزین ۲۰ درصد مواد سیمانی شده است (SF/CM = ۲۰٪)، زیرا ۲۰ درصد دوده‌سیلیس در فرآیند هیدراسیون سیمان، می‌تواند بیش‌ترین تأثیر را در کاهش بلورهای ضعیف هیدروکسید کلسیم و افزایش تشکیل بلورهای مقاوم C-S-H داشته باشد.

۵- دانه‌بندی ماسه سیلیسی بر مقاومت بتن RPC، تأثیرگذار می‌باشد. بیش‌ترین مقاومت فشاری بتن RPC، مربوط به مخلوطی است که در آن از ریزترین دانه‌بندی استفاده شده است. در بتن‌های با مقاومت بسیار زیاد، هر چه سنگ‌دانه‌ها ریزتر باشند، ناحیه‌ی انتقال بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه قوی‌تر

مواد سیمانی (SF/CM) (۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪)، ۴ نوع سیمان (نوع ۱-۴۲۵، نوع ۱-۵۲۵، نوع ۲ و نوع ۵) و ۴ نوع دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی بود، طراحی و ساخته شد. در هر گام از انجام این تحقیق، یکی از پارامترهای موثر بررسی شد و بر اساس نتایج بدست آمده گام‌های بعدی تحقیق انجام گردید. نمونه‌های ساخته شده از هز مخلوط بتنی به مدت ۷ روز در آب ۹۰ °C عمل‌آوری شدند. در زیر به نتایج کلی و اصلی بدست آمده از این تحقیق اشاره می‌شود.

۱- در بین نسبت‌های آب به مواد سیمانی (W/CM) و مقدار مواد سیمانی (CM) مورد بررسی، بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به مخلوط بتنی است که در آن  $W/CM = 0/2$  و  $m^3 / kg = 1100$  می‌باشد. همچنین استفاده از نسبت آب به مواد سیمانی کم‌تر از ۰/۲ باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود زیرا در این حالت آب کافی جهت هیدراسیون ذرات سیمان در دسترس نمی‌باشد؛ همچنین واکنش‌های پوزولانی توسط دوده‌سیلیس نیز به علت کمبود آب، کامل انجام نمی‌شود. همچنین با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲ به نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۳، مقاومت فشاری بتن RPC کاهش پیدا می‌کند، که علت آن این است که اصولاً میزان آب در بتن تا اندازه‌ای لازم است که بتواند ذرات سیمان را هیدراته کند و استفاده‌ی بیش از این مقدار، برای بتن مضر بوده و بر روی خواص بتن از جمله مقاومت فشاری اثر منفی می‌گذارد.

- Construction and Building Materials, 767-754 (2016) 123.
- [11]-S. Ahmad, A. Zubair, M. Maslehuddin, Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete, Construction and Building Materials, 81-73 (2015) 99.
- [12]-M. Helmi, M.R. Hall, L.A. Stevens, S.P. Rigby, Effects of high-pressure/temperature curing on reactive powder concrete microstructure formation, Construction and Building Materials, 562-554 (2016) 105.
- [13]-J. Yang, B. Kong, C. Cai, J.S. Wang, Behavior of High-Speed Railway Ballastless Track Slabs Using Reactive Powder Concrete Materials, Journal of Transportation Engineering, 04016031 (2016) (8)142.
- [14]-U. Mueller, N. Williams Portal, V. Chozas, M. Flansbjerg, I. Larazza, N. da Silva, K. Malaga, Reactive powder concrete for facade elements—A sustainable approach, Journal of Facade Design and Engineering, 66-53 (2016) (2-1)4.
- [15]-G. Long, X. Wang, Y. Xie, Very-high-performance concrete with ultrafine powders, Cement and concrete research, 605-601 (2002) (4)32.
- [16]-J. Ma, H. Schneider, Properties of ultra-high-performance concrete, Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER), 32-25 (2002) 7.
- [17]-Y.-W. Chan, S.-H. Chu, Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, Cement and concrete research, 1172-1167 (2004) (7)34.
- [18]-J. Kaufmann, F. Winnefeld, D. Hesselbarth, Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes, Cement and Concrete Composites, 549-541 (2004) (5)26.
- [19]-B.A. Graybeal, Material property characterization of ultra-high performance concrete, United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure ..., 2006.
- [20]-H. Yazıcı, H. Yiğiter, A.Ş. Karabulut, B. Baradan, Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete, Fuel, 2407-2401 (2008) (12)87.
- [21]-J. Liu, S. Song, L. Wang, Durability and micro-structure

می‌شود و در نتیجه مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. همچنین با ریزتر شدن سنگدانه‌ها، سطح مخصوص سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد و لذا برای تامین روانی میزان مصرف فوق‌روان کننده افزایش می‌یابد.

## مراجع

- [1]-P. Richard, M. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes, Cement and concrete research, (1995) (7)25 1511-1501.
- [2]-P.-C. Aitcin, B.B. Stern, High-performance concrete, E & FN Spon, London, 1998.
- [3]-P.-C. Aitcin, R.J. Flatt, Science and technology of concrete admixtures, Woodhead Publishing, 2015.
- [4]-M. Ipek, K. Yilmaz, M. Sümer, M. Saribiyik, Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase, Construction and Building Materials, 68-61 (2011) (1)25.
- [5]-A. Cwirzen, V. Penttala, C. Vornanen, Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC, Cement and Concrete Research, 1226-1217 (2008) (10)38.
- [6]-S. Aydin, H. Yazıcı, M.Y. Yardimci, H. Yiğiter, Effect of Aggregate Type on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete, ACI Materials Journal, 2010) (5)107).
- [7]-C.M. Tam, V.W. Tam, K.M. Ng, Optimal conditions for producing reactive powder concrete, Magazine of Concrete Research, 716-701 (2010) (10)62.
- [8]-H. Yazıcı, M.Y. Yardimci, S. Aydın, A.Ş. Karabulut, Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, Construction and Building Materials, (3)23 1231-1223 (2009).
- [9]-H. Yazıcı, The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures, Building and environment, (5)42 2089-2083 (2007).
- [10]-D. Mostofinejad, M.R. Nikoo, S.A. Hosseini, Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC),

- [28]-V.G. Papadakis, Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete, *Cement and Concrete Research*, 86-79 (1999) (1)29.
- [29]-H. Zanni, M. Cheyrezy, V. Maret, S. Philippot, P. Nieto, Investigation of hydration and pozzolan reaction in reactive powder concrete (RPC) using  $^{29}\text{Si}$  NMR, *Cement and Concrete Research*, 100-93 (1996) (1)26.
- [30]-<http://www.shahrekordcement.com>, in.
- [31]-<http://ferroazna.com>, in.
- [32]-ASTM C1240, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, in, 2005.
- [33]-<http://cfs.chirookco.ir>, in.
- [34]-P. Hiremath, S.C. Yaragal, Investigation on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete under Different Curing Regimes, *Materials Today: Proceedings*, (9)4 9762-9758 (2017).
- [35]-M.-z. An, L.-J. Zhang, Q.-X. Yi, Size effect on compressive strength of reactive powder concrete, *Journal of China University of Mining and Technology*, -279 (2008) (2)18 282.
- [36]-L. Coppola, R. Troli, T. Cerulli, M. Collepardi, The influence of materials on the performance of reactive powder concrete, in: *Proceedings of the International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, Florianopolis, 1996, pp. 513-502.
- of reactive powder concrete, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 509-506 (2009) (3)24.
- [22]-O. Mazanec, D. Lowke, P. Schießl, Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time, *Materials and structures*, 365-357 (2010) (3)43.
- [23]-K.M. Ng, C.M. Tam, V.W. Tam, Studying the production process and mechanical properties of reactive powder concrete: a Hong Kong study, *Magazine of concrete research*, 654-647 (2010) (9)62.
- [24]-X. Hou, S. Cao, Q. Rong, W. Zheng, G. Li, Effects of steel fiber and strain rate on the dynamic compressive stress-strain relationship in reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 581-570 (2018) 170.
- [25]-H.G. Russell, B.A. Graybeal, H.G. Russell, *Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report for the bridge community*, United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure ..., 2013.
- [26]-L. Meraji, H. Afshin, K. Abedi, Investigation into the Effects of Fibers Type on the Properties of Reactive Powder Concrete, *J. Civil and Env. Eng.*, 96-89 (2017) (44)46.
- [27]-M. Ipek, K. Yilmaz, M. Uysal, The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase, *Construction and Building Materials*, -459 (2012) (1)26 465.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S.J. Mosavi Fard, M. Reisi, Influence evaluation of key mix design parameters of reactive powder concrete on compressive strength, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 2663-2676.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16047.6114](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16047.6114)

