

تأثیر پودر سنگ آهک بر مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنشی

نوشین محمدزاده چاوشان*

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گرایش سازه، دانشگاه زنجان.

حمید رحمانی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان.

چکیده

بتن پودری واکنشی یک نوع بتن پر مقاومت بر پایه مصالح سیمانی با عیار بالا است. در تولید این بتن سنگ‌دانه‌های درشت حذف و از مصالح پودری بسیار ریزدانه مانند ماسه سیلیسی، دوده سیلیس و پوزولان‌ها استفاده می‌شود که تشکیل بتنی همگن با ریزساختار عالی را می‌دهد. در این پژوهش تأثیر پودر سنگ آهک بر مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنشی مورد بررسی قرار گرفته است. پودر سنگ آهک با درصدهای مختلف جایگزین ماسه سیلیسی شده و مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جمع‌شدگی و درصد جذب آب نمونه‌های ساخته شده در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه این بتن‌ها بیش‌تر از ۱۰۰ مگاپاسکال بوده و خواص مکانیکی بتن‌ها با افزایش میزان پودر سنگ آهک بهبود می‌یابد به طوری که طرح اختلاط با جایگزینی ۵۴ درصد پودر سنگ آهک بالاترین مقاومت فشاری و کم‌ترین درصد جذب آب را داراست. همچنین جایگزینی ماسه سیلیسی با پودر سنگ آهک باعث افزایش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن و کاهش جمع‌شدگی ذاتی بتن‌های پودری واکنشی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بتن پودری واکنشی، پودر سنگ آهک، ماسه سیلیسی، دوده سیلیس.

۱- مقدمه

خواص مطلوب و هزینه پایین تر در مقابل فولاد، می تواند جایگزین مناسبی برای آن باشد که هم اکنون تحت مطالعه بسیاری از کشورها نیز قرار گرفته است [۷].

مطالعات زیادی بر روی بتن RPC و جایگزینی مواد پوزولانی، شبه‌سیمانی و پرکننده‌ها با عمل‌آوری‌های مختلف صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است [۸-۱۲]. یازدهم و همکاران [۸] به بررسی تاثیر سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی با هدف کاهش میزان سیمان و دوده سیلیس پرداختند که نتایج آزمایش‌ها نشان داد جایگزینی ۱۰ درصد خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی مقاومت فشاری ۲۸۱ مگاپاسکال را بدست می‌دهد. آن‌ها همچنین [۹] به بررسی تأثیر عمل‌آوری‌های مختلف (آب، اتوکلاو و بخار) بر روی خواص بتن پودری واکنشی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از افزایش مقاومت فشاری به بیش از ۲۵۰ مگاپاسکال با عمل‌آوری اتوکلاو بود. ویژگی‌های همکاران [۱۰] مطالعاتی بر روی جایگزینی دوده سیلیس با خاکستر پوسته برنج در بتن پودری واکنشی انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که جایگزینی ۳۰ درصد دوده سیلیس با خاکستر پوسته برنج مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بالاتری را نسبت به مخلوط‌های دیگر نشان می‌دهد.

چاخارلو و شروانی تبار [۱۱] به مطالعه تأثیر پودر سنگ آهک به‌عنوان جایگزین ماسه سیلیسی در بتن پودری واکنشی پرداختند. در پژوهش آن‌ها جایگزینی ۲۰ درصد پودر سنگ آهک به جای ماسه سیلیسی بیش‌ترین مقاومت فشاری را کسب کرد و افزودن پودر سنگ آهک باعث کاهش جذب آب نمونه‌ها گردید. لیو و همکاران [۱۲] به بررسی اثر پودر سنگ آهک بر مشخصات بتن RPC پرداختند. آن‌ها توانستند به مقاومت فشاری ۱۶۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۳۶/۹ مگاپاسکال با افزودن پودر سنگ آهک به میزان ۱۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب و با نسبت آب به سیمان ۰/۲ برسند. هر چند در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در خصوص بتن پودری واکنشی خصوصاً تأثیر سنگدانه‌های مختلف صورت گرفته است [۱۳-۱۵]، اما تحقیقات جدیدتری در خصوص استفاده از پودر سنگ آهک در بتن RPC انجام نشده است.

در دهه‌های مختلف محققان زیادی تلاش کردند تا نقاط ضعف بتن معمولی از جمله مقاومت و دوام پایین در برابر عوامل مهاجم را با روش‌های نوین از بین ببرند. در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰، یودنفرند^۱ و همکاران [۱] به بتنی با مقاومت فشاری ۲۳۰ مگاپاسکال با تخلخل پایین دست یافتند. اعمال دما و فشار زیاد برای نخستین بار توسط روی^۲ و همکاران [۲] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها موفق شدند با اعمال فشاری بین ۱۷۰ تا ۳۵۰ مگاپاسکال و دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مقاومت فشاری ۵۱۰ مگاپاسکال دست یابند. در سال ۱۹۹۵، ریچارد و چیریژی^۳ [۳] بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC)^۴ را به‌عنوان نوعی بتن فوق‌توانمند معرفی کردند. مصالح تشکیل‌دهنده این بتن شامل سیمان، دوده سیلیس، مواد پوزولانی، ماسه سیلیسی، الیاف و فوق‌روان‌کننده می‌باشد. بتن پودری واکنشی نوعی بتن پر مقاومت با عملکرد بالا (UHPC)^۵ با عیار بالای سیمان و دوده سیلیس است به نحوی که بخش عمده‌ای از سیمان به‌عنوان پرکننده عمل کرده و واکنش دوده سیلیس و هیدروکسید کلسیم آزاد شده از هیدراتاسیون سیمان به‌عنوان ماده چسباننده عمل می‌کند. از دیگر ویژگی‌های این بتن می‌توان به مقاومت سایشی زیاد، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالا به دلیل وجود الیاف، تخلخل پایین و نفوذپذیری کم اشاره کرد.

از خواص متمایز بتن RPC نسبت به بتن‌های معمولی می‌توان به حذف سنگدانه‌های درشت، استفاده از مواد پودری ریز، رسیدن به تراکم بالا با استفاده از دانه‌بندی مصالح، بهبود ریزساختار ماده با استفاده از الیاف و نسبت آب به سیمان پایین اشاره کرد [۴]. برخی از محققان بر این باورند که به دلیل عدم استفاده از سنگدانه‌های درشت RPC بتن محسوب نمی‌شود و باید آن را ملات نامید، اما با این حال برخی دیگر از محققان استفاده از الیاف و مقدار بالای سیمان را دلیلی کافی برای نام‌گذاری آن به‌عنوان بتن می‌دانند [۵]. بتن پودری واکنشی قابلیت رقابت با بتن‌های با عملکرد بالا و فولاد را دارد، این بتن به مراتب گران‌تر از بتن‌های با مقاومت معمولی و با عملکرد بالا است، ولی از طرفی از فولاد که مقاومت فشاری مشابهی با بتن RPC دارد، ارزان‌تر می‌باشد. لذا براساس

⁴ Reactive Powder Concrete

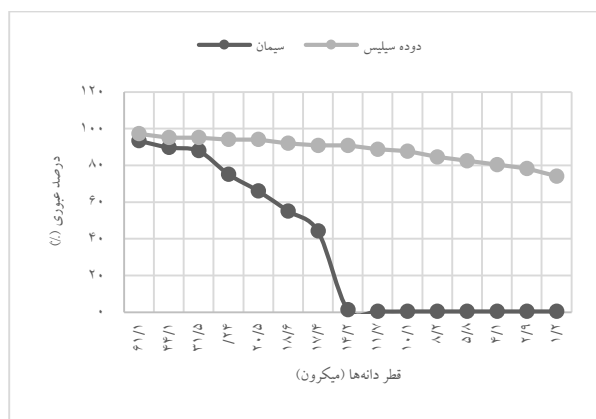
⁵ Ultra High Performance Concrete

¹ Yudenfreund

² Roy

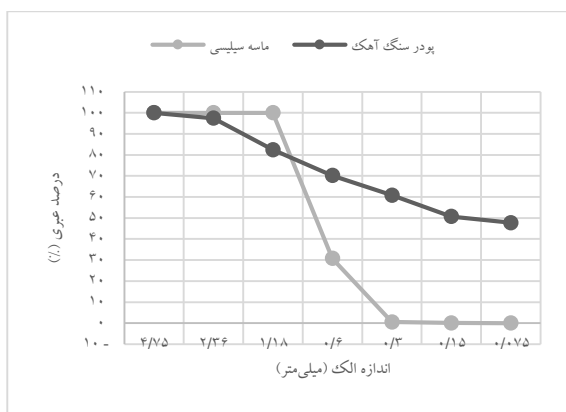
³ Richard & Cheyrez

شکل ۲ ارائه شده و درصد جذب آب آن نیز طبق استاندارد ASTM C128، ۰/۷ درصد و مدول نرمی آن ۲/۶۸ بدست آمد. چنانچه در نمودار مشخص است حداکثر اندازه سنگدانه ۱/۱ میلی‌متر بوده و دانه بندی فاقد دانه‌های ریزتر از ۳۰۰ میکرون می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود پودر سنگ آهک با پر کردن این شکاف عملکرد مناسبی داشته باشد.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی سیمان و دوده سیلیس

پودر سنگ استفاده شده در این تحقیق، پودر سنگ آهک ضایعاتی کارخانه سنگ‌بری کسری واقع در شهرک صنعتی زنجان می‌باشد. نمودار دانه‌بندی پودر سنگ نیز در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه سیلیسی و پودر سنگ آهک

چنانکه مشاهده می‌شود حداکثر اندازه‌ی اسمی پودر سنگ ۲ میلی‌متر می‌باشد و بیش از ۵۰ درصد آن نیز کوچک‌تر از ۷۵ میکرون است. همچنین درصد جذب آب پودر سنگ برابر با یک درصد اندازه‌گیری گردید. گفتنی است برای اندازه‌گیری درصد جذب آب پودر سنگ بر اساس استاندارد ASTM C128، ابتدا درصد مشخصی از ماسه سیلیسی با پودر سنگ ترکیب شده و سپس

در ایران به دلیل وجود معادن سنگ زیاد، ضایعات قابل توجهی از پودر سنگ آهک در سنگبری‌ها ایجاد می‌شود که باعث مشکلات زیست محیطی زیادی نیز می‌گردد. به کارگیری این ضایعات در بتن به دلیل خواص مناسب آن همچون مقاومت بالا، جذب آب بسیار پایین، تخلخل بسیار کم و بافت به هم پیوسته بسیار مفید خواهد بود [۱۶]. پساب کارخانه‌های سنگ‌بری پس از برش سنگ که حاوی پودر سنگ می‌باشد به دو صورت جمع‌آوری می‌گردد: الف) هدایت پساب به استخر جمع‌آوری پساب (روش سنتی)، ب) هدایت پساب کارخانه‌های سنگ‌بری به سیستم بازیافت آب با فیلتر پرسی با صفحات باز شونده (روش مدرن) که در هر دو روش پودر سنگ باقیمانده غالباً به عنوان ضایعات در نظر گرفته شده و با آن همانند نخاله رفتار می‌شود. لذا در این تحقیق به دلیل دانه‌بندی ریز پودر سنگ آهک از این پودر ضایعاتی برای تولید بتن پودری واکنشی استفاده گردید که نقش پرکنندگی حفرات خالی را دارد. همچنین به علت افزایش میزان مصرف این پودر در ساخت بتن، پودر سنگ ضایعاتی جایگزین سنگ‌دانه‌های مصرفی گردید و خواص مکانیکی و فیزیکی بتن‌های ساخته‌شده مورد بررسی قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر

سیمان استفاده شده در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ II کردستان با سطح مخصوص ۳۲۵۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و جرم حجمی ۳/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. دوده سیلیس مورد استفاده از کلینیک بتن تهیه شده و وزن مخصوص آن برابر ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سطح ویژه‌ی آن ۲۰۰۰۰ مترمربع بر کیلوگرم و به رنگ خاکستری روشن با ساختار آمورف می‌باشد. آنالیز شیمیایی سیمان و دوده سیلیس در جدول ۱ و نمودار دانه‌بندی آن‌ها در شکل ۱ آمده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان و دوده سیلیس

ترکیبات	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% CaO	% MgO	% SO ₃	% Na ₂ O	% K ₂ O	% L.O.I
سیمان کردستان	21.5	4.69	4.32	64	1.45	2.34	0.17	0.56	4.1
دوده سیلیس	96.4	1.32	0.87	0.49	0.97	0.1	0.31	1.01	—

ماسه سیلیسی از شهرداری زنجان تهیه شده که وزن مخصوص آن ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. نمودار دانه بندی آن در

گذاشت، دانه‌بندی مصالح نیز مهم می‌باشد. در این تحقیق ابتدا دانه‌بندی مصالح مصرفی بر اساس دستیابی به دانه‌بندی ایده‌آل بهینه‌یابی شده و درصد تشکیل دهنده مصالح تعیین گردید. سپس بر اساس تحقیقات انجام شده که عیار مواد سیمانی در بتن پودری واکنشی را معمولاً بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۵۰ کیلوگرم توصیه نموده‌اند [۱۷، ۱۸]، و با توجه به نتایج بهینه‌یابی، عیار مواد سیمانی ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد که در تمامی طرح اختلاط‌ها ثابت می‌باشد. درصد جایگزینی دوده سیلیس به جای سیمان نیز بر اساس دانه‌بندی ایده‌آل و تحقیقات گذشته برابر با ۲۵ درصد انتخاب گردید. هر چند در بتن‌های معمولی دوده سیلیس کمتر از ۱۰ درصد جایگزین سیمان می‌گردد، اما در بتن‌های پودری واکنشی به دلیل تغییر اساسی در دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها و نیاز به مواد سیمانی بیشتر استفاده از مقادیر زیاد دوده سیلیس میسر خواهد بود [۶، ۱۳]. نسبت آب به سیمان در بتن پودری نیز کم‌تر از ۰/۲۵ توصیه شده است [۲۱-۱۹] که در این تحقیق نسبت آب به سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۲۷ می‌باشد. منظور از مواد سیمانی سیمان و دوده سیلیس می‌باشد. جدول ۳ طرح‌های اختلاط این پژوهش را برای ساخت هر مترمکعب بتن نشان می‌دهد. الیاف بازالت نیز به میزان یک درصد وزنی سیمان استفاده شده است. میزان ابرروان‌کننده مورد استفاده نیز بر اساس آزمایش میز جریان برای هر طرح اختلاط بر اساس ایجاد کارایی ثابت بدست آمد. با توجه به اینکه نتایج بهینه‌یابی دانه‌بندی نشان می‌داد که در صورت جایگزینی ۵۴ درصد پودر سنگ به جای ماسه سیلیسی بهترین دانه بندی ایجاد می‌گردد، و از طرف دیگر با افزایش میزان جایگزینی پودر سنگ انتظار افت خواص بتن می‌رفت، لذا در این تحقیق چهار طرح اختلاط ساخته شد که در آن پودر سنگ آهک با حروف اختصاری (LP) و با درصدهای صفر، ۱۸، ۳۶ و ۵۴ درصد جایگزین ماسه سیلیسی شده است.

در اکثر تحقیقات در زمینه بتن پودری واکنشی، ابتدا مصالح خشک مخلوط شده و بعد از آن آب و فوق‌روان‌کننده اضافه می‌شود. ولی زمان و سرعت مخلوط کردن متفاوت می‌باشد [۸، ۱۰ و ۲۲]. لذا در این تحقیق جهت ساخت بتن RPC ابتدا کلیه مصالح پودری به صورت خشک به مدت ۵ دقیقه با سرعت کم در مخلوط‌کن سه سرعت مخلوط شدند، سپس آب و ابرروان‌کننده به مخلوط اضافه شده و مخلوط کن برای مدت ۵ دقیقه دیگر با

درصد جذب آب مخلوط اندازه‌گیری شد. سپس با انجام محاسبات درصد جذب آب پودر سنگ محاسبه شد. علت این امر ریزی نسبتاً بالای پودر سنگ بود که تشخیص حالت اشباع با سطح خشک را با مشکل مواجه می‌نمود.

الیاف بازالت از ذوب سنگ بازالت بدون استفاده از هیچ‌گونه افزودنی تولید می‌شود. مواد پایه بازالتی هیچ مشکلی برای محیط زیست ایجاد نمی‌کنند و خطرناک نیستند. الیاف بازالت دارای ترکیب بی‌نظیر با ویژگی‌های فنی بالا از جمله مقاومت در مقابل خوردگی و حرارت می‌باشد. این ویژگی‌ها به علاوه قیمت پایین الیاف بازالت این امکان را برای این الیاف فراهم می‌کند که در رقابت با الیاف شیشه موفق باشد. لذا در این تحقیق از الیاف بازالت نشان داده شده در شکل ۳ با طول ۲۰ میلی‌متر و قطر ۱۵ میکرون استفاده شده است. مشخصات الیاف بازالت در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات الیاف بازالت

محدوده ذوب (°C)	چگالی t/m ³	مدول الاستیسیته (Gpa)	مقاومت کششی (cN/Text)	طول الیاف بریده شده (mm)	قطر الیاف (µm)
1460-1550	2.8	82-92	≥50	5×n (n=1-18)	13-24(±1)



شکل ۳- الیاف بازالت

ابرروان‌کننده مورد استفاده با نام تجاری ABAPLAST WR-4610 بوده که محصول شرکت شیمی آبادگران و بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات می‌باشد. وزن مخصوص آن ۱/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

۲-۲- طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها

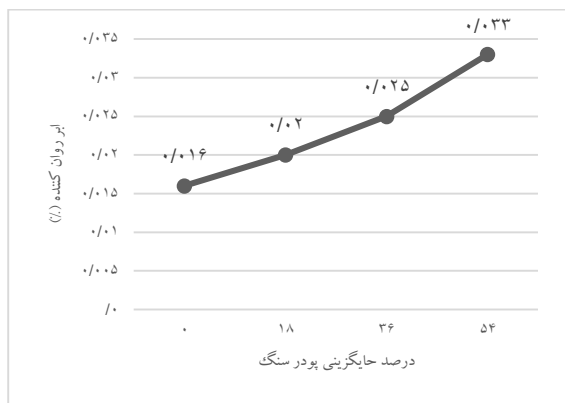
برای ساخت بتن پودری واکنشی علاوه بر این که نوع مصالح مصرفی تأثیر زیادی بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن خواهد

سرعت متوسط به حرکت در می آید. سپس مخلوط کن را به مدت ۳۰ ثانیه خاموش کرده و با کاردک ملات چسبیده شده به دیواره های جام مخلوط کن را می تراشیم و مجدداً مخلوط کن را به مدت ۵ دقیقه دیگر با سرعت بالا به حرکت در می آوریم. کل زمان اختلاط تقریباً ۱۶ دقیقه به طول می انجامد. با این شیوه ی اختلاط همگن بودن بتن در این تحقیق کاملاً محسوس بود.

جدول ۳- نسبت مخلوط های استفاده شده در پژوهش (برای هر مترمکعب)

نسبت آب به مواد سیمانی w/b	نسبت آب به سیمان w/c	نسبت ابر روان کننده به مواد سیمانی (%)	الیاف بازالت kg/m ³	پودر سنگ آهک kg/m ³	ماسه سیلیسی kg/m ³	دوده سیلیس kg/m ³	سیمان kg/m ³	طرح اختلاط
۰/۲	۰/۲۷	۱/۶	۹	۰	۱۱۰۰	۳۰۰	۹۰۰	LP0
۰/۲	۰/۲۷	۲	۹	۱۹۸	۹۰۲	۳۰۰	۹۰۰	LP18
۰/۲	۰/۲۷	۲/۵	۹	۳۹۶	۷۰۴	۳۰۰	۹۰۰	LP36
۰/۲	۰/۲۷	۳/۳	۹	۵۹۴	۵۰۶	۳۰۰	۹۰۰	LP54

و تبادل رطوبتی آن با محیط از بین رفت و سپس اندازه گیری طول نمونه ها صورت گرفت.



شکل ۴- نمودار میزان فوق روان کننده لازم برای دستیابی به روانی یکسان در هر طرح اختلاط

۳- آزمایش های انجام شده و نتایج آن ها

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

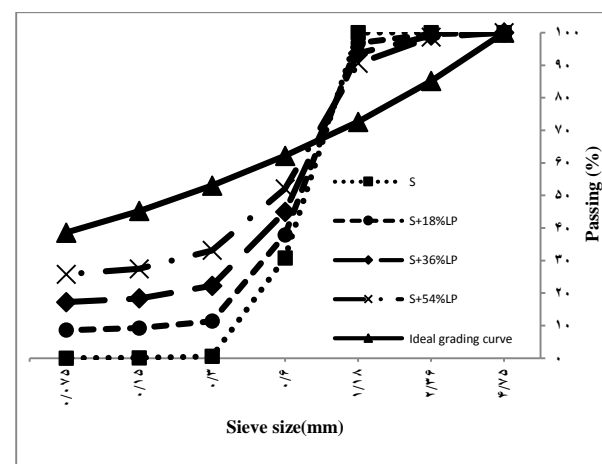
آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C109 [۲۴]، بر روی نمونه های مکعبی با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده است. برای این منظور نمونه ها پس از رسیدن به سن مورد نظر از وان آب خارج می شدند و سطح آن ها با حوله خشک می گردید. سپس ناصافی نمونه ها را در صورت وجود با سمباده و یا کاردک از بین برده و سطح نمونه صاف می گردد. صاف و هموار بودن نمونه تأثیر بسیاری بر مقاومت فشاری داشته و خطای آزمایش را به حداقل می رساند. نمونه ها با استفاده از جک بتن شکن ۲۰۰ تنی با اعمال بار ثابت تا پدیدار شدن

۳-۲- آماده سازی و عمل آوری نمونه ها

پس از اتمام زمان مخلوط کردن و قبل از قالب گیری، میزان قطر پخش شدگی بر حسب میلی متر با استفاده از آزمایش میزجریان بر اساس استاندارد ASTM C230/C230M [۲۳] برای بررسی کارایی و روانی بتن تازه انجام شد. برای از بین بردن تأثیر روانی در نتایج آزمایش ها، روانی تمامی طرح های اختلاط در محدوده ۱۸ تا ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد و بر اساس آن میزان ابر روان کننده مورد نیاز به دست آمد که نتایج آن در شکل ۴ آمده است. چنانچه در شکل دیده می شود با افزایش پودر سنگ نیاز به فوق روان کننده جهت تأمین کارایی افزایش می یابد. بعد از انجام آزمایش میزجریان، ملات در قالب هایی که از قبل روغن کاری شده بودند ریخته شد. برای انجام آزمایش های مقاومت فشاری و درصد جذب آب از قالب های مکعبی با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متر و برای آزمایش مقاومت خمشی از قالب منشوری با ابعاد ۴×۴×۱۶ سانتی متری استفاده شد. برای اندازه گیری جمع شدگی نیز از قالب های استاندارد به ابعاد ۲/۵×۲/۵×۲۸/۵ سانتی متری استفاده گردید. ملات طی دو مرحله درون قالب ها ریخته شد و با استفاده از میله متراکم گردید و سطح آن با استفاده از ماله صاف گردید. نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت درون قالب ماندند و پس از آن تمامی نمونه ها در وان آب با دمای ۲۳±۲ درجه سانتی گراد برای مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز قرار گرفتند. اما برای اندازه گیری جمع شدگی ناشی از خشک شدن، نمونه ها پس از ۲۸ روز عمل آوری در محیط آزمایشگاه قرار گرفت و برای اندازه گیری جمع شدگی ذاتی، ابتدا نمونه پس از خارج کردن آن از قالب به طور کامل آب بندی شده

ترک بر روی نمونه‌ها بارگذاری شدند. نتایج حاصل از مقاومت فشاری در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، حداقل مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب برابر با ۸۲، ۱۰۰ و ۱۲۱ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین همانطور که در شکل‌ها مشخص است با افزایش پودر سنگ آهک مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد به طوری که جایگزینی ۵۴ درصد پودر سنگ آهک به جای ماسه سیلیسی بیش‌ترین مقاومت فشاری را داراست. علت این امر چنانچه قبلاً اشاره گردید دانه‌بندی ماسه سیلیسی می‌باشد که فاقد دانه‌های ریز می‌باشد و پودر سنگ آهک توانسته است با اصلاح دانه‌بندی ماسه مقاومت فشاری نمونه‌ها را بهبود بخشد. این در صورتی است که انتظار می‌رود با افزایش ریزدانه‌ها و ثابت بودن مواد سیمانی مقاومت فشاری کاهش یابد.

اختلاط افزایش می‌یابد. چنانچه در شکل ۶ مشاهده می‌شود درصد افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه به ۲۸ روزه در تمامی طرح اختلاط‌ها بیش از ۲۰ درصد می‌باشد. این بدان معنی است که عمل‌آوری طولانی مدت بتن‌های RPC می‌تواند تأثیر زیادی در نتایج داشته باشد. همچنین نرخ افزایش مقاومت فشاری از ۷ به ۲۸ و از ۲۸ به ۹۰ روز بیانگر معنی‌دار بودن تأثیر عمل‌آوری در نتایج مقاومت فشاری حتی بعد از ۲۸ روز می‌باشد.

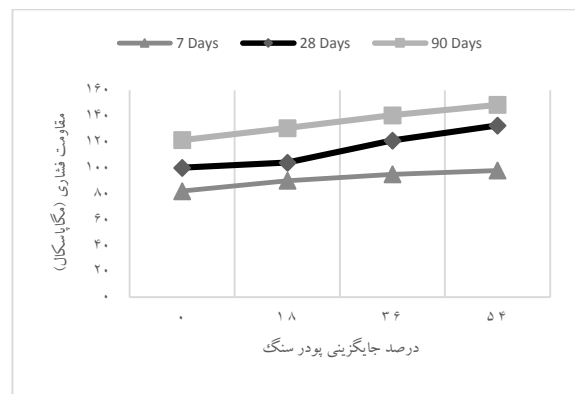


شکل ۷- مقایسه دانه‌بندی ترکیب ماسه و پودر سنگ با نمودار دانه‌بندی ایده‌آل

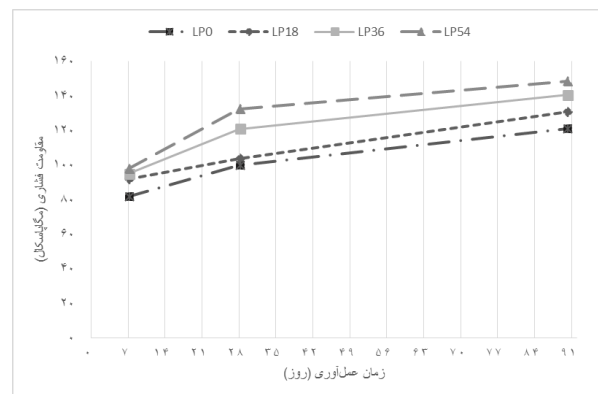
۲-۳- آزمایش مقاومت خمشی

نتایج حاصل از مقاومت فشاری در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، حداقل مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب برابر با ۸۲، ۱۰۰ و ۱۲۱ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین همانطور که در شکل‌ها مشخص است با افزایش پودر سنگ آهک مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد به طوری که جایگزینی ۵۴ درصد پودر سنگ آهک به جای ماسه سیلیسی بیش‌ترین مقاومت فشاری را داراست. علت این امر چنانچه قبلاً اشاره گردید دانه‌بندی ماسه سیلیسی می‌باشد که فاقد دانه‌های ریز می‌باشد و پودر سنگ آهک توانسته است با اصلاح دانه‌بندی ماسه مقاومت فشاری نمونه‌ها را بهبود بخشد. این در صورتی است که انتظار می‌رود با افزایش ریزدانه‌ها و ثابت بودن مواد سیمانی مقاومت فشاری کاهش یابد.

بر روی نمونه‌های مشوری با ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی‌متری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است. نتایج مقاومت خمشی در شکل ۸ آمده است. مقاومت خمشی طرح‌های اختلاط به دلیل داشتن الیاف بازالت در محدوده ۱۴ تا ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. این بدان معناست که الیاف بازالت توانسته است مقاومت خمشی بتن‌های تحت بررسی را بهبود بخشد. بدیهی است الیاف بازالت بر روی ترک‌های ناحیه انتقال تأثیر بیش‌تری خواهند داشت. با توجه به شکل ۸، افزودن پودر سنگ آهک به میزان ۱۸، ۳۶ و ۵۴ درصد باعث کاهش ۲، ۷ و ۱۲ درصدی مقاومت خمشی می‌شود که این



شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه‌ها بر حسب درصد جایگزینی پودر سنگ آهک



شکل ۶- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها

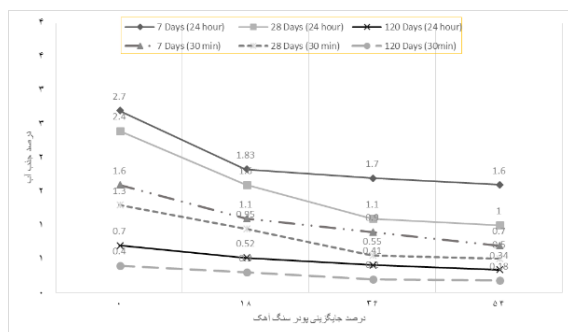
شکل ۶ نیز تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش زمان عمل‌آوری به دلیل انجام واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان مقاومت فشاری تمامی طرح‌های

۳-۳- آزمایش درصد جذب آب

آزمایش جذب آب بر روی نمونه‌های مکعبی ۵ سانتی متری بر اساس استاندارد ASTM C948 [۲۶] انجام شد. از هر اختلاط ۲ نمونه مکعبی ساخته شد و جذب آب نهایی بر اساس میانگین گیری از مقادیر جذب آب به دست آمده برای هر نمونه محاسبه شد. جذب آب در دو حالت جذب آب کوتاه مدت (جذب آب نیم ساعته) و جذب آب نهایی (جذب آب ۲۴ ساعته) بر روی نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز انجام شد. جذب آب نمونه‌ها در هر دو حالت از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{درصد جذب آب} = \frac{(W_{\text{ssd}} - W_{\text{dry}})}{W_{\text{dry}}} \times 100 \quad (1)$$

که در رابطه (۱) W_{dry} و W_{ssd} به ترتیب وزن نمونه در حالت اشباع با سطح خشک و وزن نمونه در حالت خشک در آون می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است با افزودن پودر سنگ آهک و افزایش زمان عمل آوری جذب آب نمونه‌ها در هر دو حالت جذب آب کوتاه مدت و جذب آب نهایی کاهش می‌یابد که علت آن به ترتیب اثر پرکنندگی پودر سنگ آهک و افزایش درجه هیدراتاسیون می‌باشد که حفرات موجود در ساختار بتن را پر می‌کند و باعث کاهش جذب آب می‌شود. افزودن پودر سنگ آهک از ۳۴ تا ۵۴ درصد تأثیر آنچنانی در کاهش جذب آب ندارد. لذا می‌توان با ۳۴ درصد پودر سنگ آهک نیز درصد جذب آب پایینی را به دست آورد.

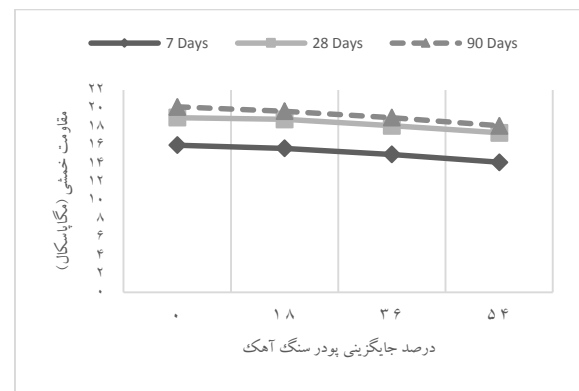


شکل ۱۰- درصد جذب آب نیم ساعته و ۲۴ ساعته نمونه‌ها

۳-۴- آزمایش جمع شدگی

آزمایش جمع شدگی بر اساس استاندارد ASTM C157 [۲۸] بر روی نمونه‌هایی با ابعاد ۲۸/۵×۲۸/۵×۲/۵ سانتی متری انجام شد. با توجه به اینکه جمع شدگی در خمیر سیمان رخ می‌دهد و در تحقیق حاضر حجم خمیر سیمان در طرح اختلاط‌ها ثابت می‌باشد، در این

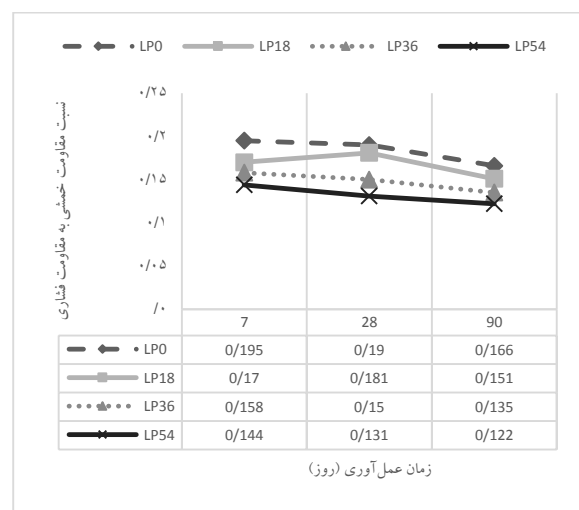
بدان معناست که افزودن پودر سنگ آهک به دلیل ریزی بالا علیرغم بهبود دانه‌بندی و کاهش فضای خالی بتن در بهبود ریزساختار بتن موثر نبوده و ریزترک‌ها را افزایش می‌دهد.



شکل ۸- مقاومت خمشی نمونه‌ها بر حسب درصد جایگزینی

پودر سنگ آهک

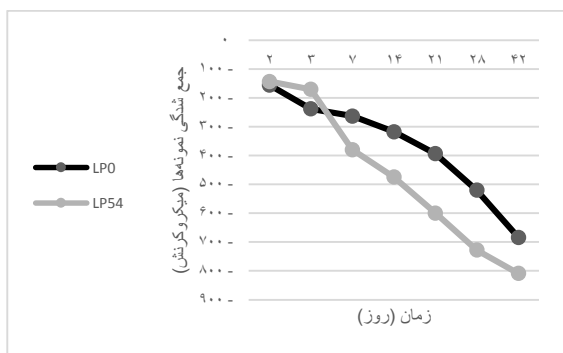
تغییرات نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری در بتن‌های با مقاومت بالا نسبت به بتن‌های معمولی کم‌تر می‌باشد ولی این مقادیر به علت استفاده از الیاف در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۲ قرار دارد. نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری با افزایش زمان عمل آوری و میزان پودر سنگ آهک کاهش می‌یابد. بدیهی است افزایش پودر سنگ هرچند تخلخل بتن را کاهش داده و موجب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد، ولی به علت ریزی بالا، نیاز به سیمان را نیز افزایش می‌دهد و با توجه به ثابت بودن میزان مواد سیمانی در طرح اختلاط‌ها کاهش مقاومت خمشی و در نتیجه‌ی آن کاهش نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری در بتن‌ها رخ داده است.



شکل ۹- نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری

اختلاط دو نمونه ساخته شد و تغییر طول نمونه‌ها در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. اولین اندازه‌گیری ۲۸ روز پس از قرار دادن نمونه‌ها در آب صورت گرفت و مابقی اندازه‌گیری‌ها پس از ۲، ۳، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۴۲ پس از قرار دادن نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه صورت گرفت.

نتایج آزمایش جمع شدگی ناشی از خشک شدن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در جمع شدگی ناشی از خشک شدن نمونه LP54 در سه روز اول جمع شدگی کم‌تری نسبت به نمونه LP0 دارد. اما پس از آن جمع شدگی نمونه حاوی پودر سنگ آهک بیشتر می‌شود. یعنی پودر سنگ آهک باعث افزایش میزان جمع شدگی نمونه‌ها شده است که این می‌تواند به دلیل جذب آب پودر سنگ و از دست دادن آن آب باشد. همچنین جمع شدگی نمونه‌ها پس از ۴۲ روز خشک شدن در حدود $10^{-6} \times 800 - 700$ می‌باشد که می‌تواند موجب ترک خوردگی این نوع بتن‌ها نیز گردد.



شکل ۱۲- جمع شدگی ناشی از خشک شدن نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب

۳-۴-۲- آزمایش جمع شدگی ذاتی

وقتی ذرات سیمان با آب واکنش نشان می‌دهند حجم محصولات خالص تولید شده کاهش می‌یابد، ولی به علت وجود آب در سیستم حفرات بتن‌های معمولی این کاهش حجم خود را نشان نمی‌دهد. اما در بتن‌های پودری واکنشی به دلیل کاهش آب مصرفی (نسبت آب به مواد سیمانی در حدود ۰/۲ می‌باشد) جمع شدگی ذاتی رخ داده و می‌تواند باعث ایجاد ترک داخلی در بتن گردد [۲۹]. برای اندازه‌گیری جمع شدگی ذاتی ابتدا طول اولیه نمونه‌ها پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب و پوشاندن نمونه به طور کامل با نوار چسب آلومینیومی و چسب آکواریوم اندازه‌گیری شد و سپس طول ثانویه پس از ۲۸، ۵۶ و ۷۰ روز

پژوهش جمع شدگی برای دو طرح اختلاط (بدون پودر سنگ آهک و بیش‌ترین میزان پودر سنگ آهک) بررسی شده است. با توجه به اینکه نسبت آب به مواد سیمانی در طرح اختلاط‌ها برابر با ۰/۲ می‌باشد جمع شدگی ذاتی در این بتن‌ها مهم خواهد بود. لذا در این تحقیق جمع شدگی ذاتی و جمع شدگی ناشی از خشک شدن مورد بررسی قرار گرفت. جهت اندازه‌گیری جمع شدگی ذاتی پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب‌گیری نمونه‌ها، آن‌ها را از قالب خارج کرده و پس از رسیدن نمونه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک، طول اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها با نوار آلومینیومی به‌طور کامل پوشانده شد (شکل ۱۱) تا تبادل رطوبتی با محیط اطراف نداشته باشد. همچنین دو سر نمونه‌ها که در آن مکان برای اندازه‌گیری طول نمونه بین تعبیه شده بود نیز با چسب آکواریوم آب‌بندی گردید. سپس اندازه‌گیری طول ثانویه آن در سنین مورد نظر صورت گرفت. کرنش ناشی از جمع شدگی و یا جمع شدگی نمونه در هر سن از تقسیم اختلاف طول ثانویه و اولیه بر طول اولیه نمونه محاسبه می‌شود [۲۷، ۲۸]. اما برای اندازه‌گیری جمع شدگی ناشی از خشک شدن، ابتدا طول اولیه نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری اندازه‌گیری شده و نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه قرار گرفت. سپس در سن مورد نظر طول ثانویه اندازه‌گیری شده و جمع شدگی ناشی از خشک شدن نیز محاسبه شد. قابل ذکر است که دو نمونه برای هر آزمایش در نظر گرفته شده و میانگین نتایج در اینجا ارائه شده است.



شکل ۱۱- نمونه‌های جمع شدگی ذاتی، پوشانده شده با نوار چسب آلومینیومی

۳-۴-۱- آزمایش جمع شدگی ناشی از خشک شدن

بر اثر خروج آب از حفرات مؤبینه در طی عملیات هیدراتاسیون سیمان پرتلند جمع شدگی ناشی از خشک شدن رخ می‌دهد [۲۹]. در این پژوهش برای اندازه‌گیری این جمع شدگی از هر طرح

گفت که عمل آوری طولانی مدت بتن های RPC می تواند تأثیر زیادی در نتایج داشته باشد.

- مقاومت خمشی نمونه های عمل آوری شده با آب در حدود ۱۴ تا ۲۰ مگاپاسکال می باشد و با افزایش جایگزینی پودر سنگ آهک به صورت جزئی کاهش می یابد. به دلیل استفاده از الیاف بازالت در تمامی طرح اختلاطها مقاومت خمشی طرح اختلاط های مذکور تفاوت قابل ملاحظه ای با یکدیگر ندارند.

- میزان جذب آب بتن های پودری واکنشی با افزایش پودر سنگ آهک کاهش یافت. کاهش جذب آب در نمونه ها به دلیل اثر پرکنندگی پودر سنگ آهک در ساختار بتن می باشد. همچنین نتایج درصد جذب آب با مقاومت فشاری نمونه ها همخوانی دارد. جذب آب ۱۲۰ روزه تمامی طرح های اختلاط کم تر از یک درصد می باشد. که کم تر از درصد جذب آب بسیاری از سنگ های طبیعی موجود همچون گرانیت می باشد. گفتنی است افزودن مقادیر پودر سنگ آهک بیش تر از ۳۴ درصد تأثیر چندانی در کاهش میزان جذب آب ندارد.

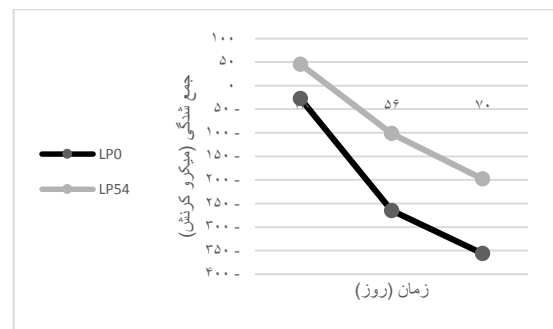
- جمع شدگی ناشی از خشک شدن نمونه ها با افزودن پودر سنگ آهک افزایش یافت. جمع شدگی ذاتی نمونه ها قابل توجه نبوده، اما جمع شدگی ذاتی نمونه ها با جایگزینی پودر سنگ آهک به جای ماسه سیلیسی کاهش یافت.

۵- مراجع

- [1] M. Yudenfreund, J. Skalny, R. S. Mikhail, and S. Brunauer, "Hardened portland cement pastes of low porosity II. Exploratory studies. Dimensional changes," Cem. Concr. Res., vol. 2, no. 3, pp. 331-348, May 1972.
- [2] D. M. Roy, G. R. Gouda, and A. Bobrowsky, "Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques," Cem. Concr. Res., vol. 2, no. 3, pp. 349-366, May 1972.
- [3] P. Richard and M. Cheyrezy, "Composition of reactive powder concretes," Cem. Concr. Res., vol. 25, no. 7, pp. 1501-1511, Oct. 1995.
- [4] M.-G. Lee, Y.-C. Wang, and C.-T. Chiu, "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material," Constr. Build. Mater., vol. 21, no. 1, pp. 182-189, Jan. 2007.
- [5] A. Sadrekarimi, "Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete," J. Adv. Concr. Technol., vol. 2, no. 3, pp. 409-417, 2004.
- [6] O. A. Mayhoub, E.-S. A. R. Nasr, Y. A. Ali, and

مجددا اندازه گیری و جمع شدگی ذاتی محاسبه شد.

شکل ۱۳ جمع شدگی ذاتی نمونه ها را نشان می دهد. چنانچه مشاهده می شود اولاً میزان جمع شدگی ذاتی نمونه ها پس از ۷۰ روز عمل آوری قابل توجه نبوده و ثانياً با افزودن پودر سنگ آهک جمع شدگی ذاتی نمونه ها کم تر می شود. علت این امر افزایش آب در نمونه های حاوی پودر سنگ می باشد که قبلاً توسط پودر سنگ جذب شده است. به عبارت دیگر عمل آوری داخلی در بتن های حاوی پودر سنگ رخ می دهد که باعث کاهش جمع شدگی ذاتی می گردد. همچنین با افزودن پودر سنگ آهک، کرنش نمونه پس از ۲۸ روز افزایش یافته است که نشان دهنده تورم در نمونه می باشد. این تورم نیز می تواند ناشی از عمل آوری داخلی نمونه حاوی پودر سنگ آهک باشد.



شکل ۱۳- جمع شدگی ذاتی نمونه های عمل آوری شده در آب

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر پودر سنگ آهک بر مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنشی که با درصدهای صفر، ۱۸، ۳۶ و ۵۴ درصد جایگزین ماسه سیلیسی شده بود، پرداخته شد. در این تحقیق مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، درصد جذب آب و جمع شدگی ذاتی و ناشی از خشک شدن در بتن های حاوی مقادیر مختلف پودر سنگ آهک بررسی گردید که نتایج آن به شرح زیر است:

- مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال بوده و با جایگزین نمودن پودر سنگ آهک به جای ماسه سیلیسی مقاومت فشاری افزایش می یابد به طوری که نمونه حاوی ۵۴ درصد پودر سنگ آهک بیش ترین مقاومت فشاری را داراست.

- با توجه به اینکه درصد افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه به ۲۸ روزه در تمامی طرح اختلاطها بیش از ۲۰ درصد است، می توان

- یاسوج، ۱۳۹۴.
- [18] K. Wille, A. E. Naaman, and G. J. Parra-Montesinos, "Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way.," *ACI Mater. J.*, vol. 108, no. 1, 2011.
- [19] S. Ahmad, A. Zubair, and M. Maslehuddin, "Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 99, pp. 73–81, Nov. 2015.
- [20] C. M. Tam, V. W. Y. Tam, and K. M. Ng, "Optimal conditions for producing reactive powder concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 62, no. 10, pp. 701–716, Oct. 2010.
- [۲۱] م. رئیسی و س. ح. موسوی فرد، "ارزیابی تأثیر پارامترهای کلیدی طرح اختلاط بتن پودری واکنشی (RPC) بر مقاومت فشاری"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۲۰۱۹.
- [22] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Sifeng, J. Chujie, and L. Jianzhong, "Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static–dynamic behaviors," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 9, pp. 831–838, Oct. 2008.
- [23] A. C230M-14, "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement," *ASTM Int.*, 2014.
- [24] A. C109M, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," *ASTM*, 2013.
- [25] A. C348-02, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars," *ASTM Int.*, 2002.
- [26] A. C948-81(2016), "Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete," *ASTM Int.*, 2016.
- [۲۷] م. شکرچی زاده، س. عسگرپور، س. خدبخش رشاد و ا. کامل، "جمع شدگی بتن های سبک و روش های اندازه گیری آن در استانداردها و ادبیات فنی"، پنجمین کنفرانس ملی بتن ایران. انجمن بتن ایران، تهران، ۱۳۹۲.
- [28] A. C. / C157M, "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and," *ASTM*, pp. 1–7, 2009.
- [۲۹] پ. ایتسین، س. مایندس، "بتن و توسعه پایدار"، ح. رحمانی، انتشارات دانشگاه زنجان، ۱۳۹۷.
- M. Kohail, "The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review," *Ain Shams Eng. J.*, Sep. 2020.
- [۷] ح. معصومی، س. نزهتی، ح. معصومی و ف. نجاتی، "بررسی ویژگی ها و مزایای بتن پودری واکنش زا،" ششمین همایش فرامنطقه ای پیشرفت های نوین در علوم مهندسی. موسسه آموزش عالی آیندگان، تنکابن، ۱۳۹۲.
- [8] H. Yazici, H. Yiğ iter, A. Ş. Karabulut, and B. Baradan, "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete," *Fuel*, vol. 87, no. 12, pp. 2401–2407, 2008.
- [9] H. Yazici, M. Y. Yardimci, S. Aydin, and A. Ş. Karabulut, "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 1223–1231, 2009.
- [10] M. Vigneshwari, K. Arunachalam, and A. Angayarkanni, "Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 188, pp. 264–277, Jul. 2018.
- [۱۱] ج. پاخرلو و ب. شروانی تبار، "استفاده از پودر سنگ آهک به عنوان جایگزین بخشی از ماسه سیلیسی در بتن پودری واکنش پذیر"، نهمین کنفرانس ملی بتن. انجمن بتن ایران، تهران، ۱۳۹۶.
- [12] J. H. Liu, S. M. Song, Y. M. Sun, and L. Wang, "Influence of Ultrafine Limestone Powder on the Performance of High Volume Mineral Admixture Reactive Powder Concrete," *Adv. Mater. Res.*, vol. 152–153, pp. 1583–1586, Oct. 2010.
- [13] M. S. Savadkoochi and M. Reisi, "Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in Reactive Powder Concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 266, p. 121973, Sep. 2020.
- [14] S. Grzeszczyk and G. Janus, "Reactive powder concrete with lightweight aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120164, Dec. 2020.
- [15] L. Xiaoying, L. Jun, L. Zhongyuan, H. Li, and C. Jiakun, "Preparation and properties of reactive powder concrete by using titanium slag aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 234, p. 117342, Feb. 2020.
- [۱۶] ع. حبیبی، "خصوصیات مکانیکی بتن با پودر سنگ آهک"، تحقیقات بتن، شماره دوم، ص. ۸۴–۷۱، ۲۰۰۹.
- [۱۷] س. هاشمی، م. دشتی رحمت آبادی و س. فائزی، "بتن پودری واکنش پذیر، از تئوری تا تولید"، چهارمین کنفرانس ملی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران. دانشگاه یاسوج،

The effect of Limestone powder on mechanical properties of Reactive Powder Concrete (RPC)

Nooshin Mohammadzadeh Chavoshan *

M.Sc. student in Structural Engineering, University of Zanjan.

Hamid Rahmani

Associate Professor, University of Zanjan, Civil Engineering Department.

Abstract

Reactive powder concrete (RPC) is a type of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high cementitious materials content. Coarse aggregates are removed in RPCs and ultra-fine powder materials such as silica sand, silica fume and pozzolans are used to provide a homogeneous concrete with excellent microstructure. In this study, the effect of limestone powder on mechanical properties of reactive powder concrete has been investigated. Limestone powder was replaced with different percentages of silica sand, and compressive strength, flexural strength, shrinkage, and water absorption percentage of samples were measured at 7, 28, and 90 days of age. Experimental results showed that the 28-day compressive strength of this concrete was greater than 100 MPa and the physical and mechanical properties of the concrete were improved by increasing the amount of stone powder. The mixture containing 54% replacement of limestone powder had the highest compressive strength and the lowest water absorption. Also, replacing silica sand with limestone powder increases shrinkage due to drying and reduces the Autogenous shrinkage of reactive powder concrete.

Keywords: Reactive Powder Concrete, Limestone Powder, Silica sand, Silica fume.

* Corresponding Author: Nooshin.mohamadzadeh@gmail.com

