

ارزیابی مقاومت فشاری بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) با نسبت‌های مختلف اختلاط

علی اکبر امیری^۱، عباس درب هنزی^۲، مسلم یوسف وند^۳، مختار هواسی^۴

- ۱- کارشناس ارشد عمران- سازه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
- ۲- استادیار گروه مهندسی عمران - دانشگاه ولی عصر (عج)
- ۳- کارشناس ارشد عمران- سازه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
- ۴- کارشناس ارشد عمران - شرکت مهندسی و توسعه سروک آذر

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (Aliakbaramiri66@gmail.com)

چکیده

در این پژوهش افزایش مقاومت بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) تحت شرایط عمل‌آوری‌های یکسان با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و ماسه سیلیسی به سیمان در سنین مختلف بررسی شده است. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده، به مدت ۳ ساعت در اتوکلاو، ۷ روز در آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سپس به مدت ۲۰ روز در آب معمولی با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. نتایج آزمون نشان داد که تفاوت میان مقاومت فشاری در سنین مختلف در این روش عمل‌آوری چشمگیر نبوده، که عامل اصلی این پدیده عمل‌آوری در اتوکلاو در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲ مگاپاسکال است. با تغییر در نسبت آب به سیمان شاهد بودیم که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح RPC^۳ و کمترین مقاومت مربوط به طرح RPC^۷ است. همچنین بهینه‌ترین طرح اختلاط از لحاظ مقاومت فشاری و کارایی مربوط به طرح RPC^۳ است.

۱. مقدمه

بتن پرکاربردترین مواد در صنعت ساخت و ساز در کنار دریا محسوب می‌شود. بتن بر اساس ملاحظات مقاومت و دوام به بتن با مقاومت نرمال، بتن با مقاومت بالا، بتن با عملکرد بالا و بتن با عملکرد بسیار بالا تقسیم‌بندی می‌شود. بتن مقاومت بالا معمولاً در اجرای ساختمان‌های بلند و همچنین جهت ساخت بتن پیش‌تنیده مورد استفاده قرار می‌گیرد چون مقاومت بالایی را در تحمل تنش فشاری و برشی از خود نشان می‌دهد. استفاده از بتن با مقاومت بالا و بتن با عملکرد بالا به خاطر خواص مهندسی بهتر در سراسر جهان رو به افزایش است. نیاز بتن با عملکرد بالا به خاطر خرابی و زوال تدریجی سازه‌های بتنی در محیط تهاجمی ضروری است. نفوذ مواد مضر از جمله یون‌های کلراید و سولفات، کربن دی‌اکسید، آب و اکسیژن، عامل تخریب مقاومت بتن هستند. برای حل این مشکل، استفاده از افزودنی‌های معدنی سطح بالا، مانند میکرو سیلیس و خاکستر بادی، در تولید بتن با عملکرد بالا با کاهش تخلخل بتن ضروری است. ساختار منفذ بهبود یافته بتن با عملکرد بالا ورود مواد مضر به بدنه بتن را کاهش می‌دهد. بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC)، از بتن‌های با عملکرد بسیار بالا محسوب می‌شود که به‌عنوان یکی از مواد نوین می‌تواند در ساخت سازه‌های استراتژیک و دریایی کاربردی باشد و بسیاری از مشکلات موجود در این حوزه را مرتفع سازد.

در اوایل دهه ۱۹۹۰ توسط پی. ریچارد و م. چزی برای اولین بار آزمایشگاهی در فرانسه به تولید (RPC) پرداخت [۱]. (RPC) به دلیل پایین بودن نسبت آب به سیمان، تخلخل بسیار پایینی دارد، دوام بهتری دارد [۲].

ارتقا ویژگی‌هایی همچون بهبود در مقاومت و دوام با استفاده از بتن با مقاومت بالا، بسیاری از محققان، مهندسان و شاغلان در سراسر جهان را تشویق کرده است تا از RPC در بسیاری از کاربردهای عملی مانند سازه‌های پیش‌ساخته، سازه‌های بلند، پل‌های بلند و پیاده‌روها استفاده کنند [۳].

در این مطالعه، مقاومت فشاری ۲۸۵ مگاپاسکال با عمل‌آوری آب گرم در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و در عمل‌آوری بخار با فشار پایین به دست آمد [۴].

در پژوهش حاضر عمل‌آوری با اتوکلاو و فشار ۲ مگاپاسکال به مدت ۸ ساعت در ۲۱۰ سانتی‌گراد و عمل‌آوری با بخار به مدت ۳ روز در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. حداکثر مقاومت ۲۷۳ مگاپاسکال و ۲۵۵ مگاپاسکال به ترتیب با استفاده از اتوکلاو و عمل‌آوری بخار به دست آمد [۵].

در مطالعه اخیر روی فرآیند هیدراسیون و واکنش پوزولانی در RPC، تحت عمل‌آوری‌های مختلف با دماهای مختلف (۹۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۰۰ و ۲۵۰ سانتی‌گراد) پرداخته شده است [۶].

در این پژوهش جهت ساخت بتن دارای مقاومت بالا از ترکیب دو روش عمل‌آوری ATC و HWC در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. بالاترین مقاومت فشاری به دست آمده در این مطالعه برای مدت ۳ روز و ۵ روز در محدوده ۱۶۰-۲۰۰ مگاپاسکال بوده است [۷].

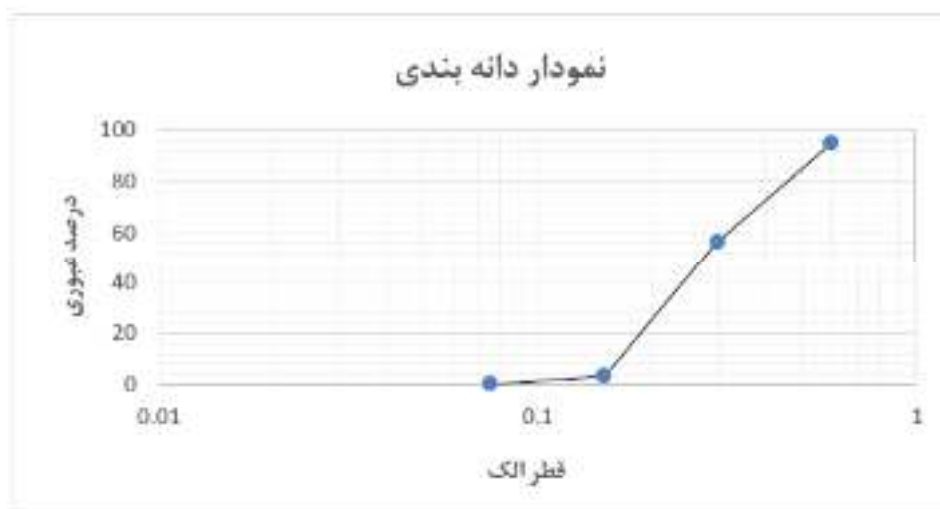
۲. برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق، بتن پودری واکنش‌پذیر با استفاده از مصالح موجود در کشور مقاومت فشاری آن بررسی شده است. پارامترهای مورد مطالعه شامل انتخاب مصالح مناسب با بررسی تأثیر آن‌ها بر مقاومت فشاری و روانی بتن و سپس بررسی تأثیر انواع روش‌های عمل‌آوری بر خواص مذکور و در نهایت تعیین طرح اختلاط مناسب برای رسیدن به مقاومت فشاری با روانی قابل قبول است. جهت سنجش روانی بتن‌ها از روش ASTM C۲۳۰/C۲۳۰M [۸] و برای تعیین مقاومت فشاری آن‌ها از استاندارد ASTM C۱۰۹/C۱۰۹M-۱۳ [۹]، استفاده شده است.

در این تحقیق از ماسه سیلیسی معدن بابک سیلیس شهر بابک استفاده شده است. از مزایای این معدن طبیعی بودن و به طبع آن گرد گوشه بودن این ماسه است که سبب کاهش مقدار آب اختلاط می‌شود. ماسه‌های این معدن زرد رنگ و منشأ آن سیلیس از نوع سیتین است و حداکثر اندازه‌ی اسمی این سنگ‌دانه ۰/۶ میلی‌متر است. مشخصات شیمیایی این ماسه در جدول (۱) و دانه‌بندی آن مطابق نمودار (۱) است. آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM C۱۳۶-۰۱ انجام گرفته است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی ماسه سیلیسی معدن شهر بابک

نوع	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	TiO ₂
ماسه	۹۳.۵۵	۶.۵۹	۰.۳۳	۰.۲۱	۰.۰۹	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۳



نمودار ۱- نمودار دانه‌بندی ماسه سیلیسی

سیمان: سیمان مورد استفاده، سیمان تیپ ۵ کارخانه سیمان ممتازان کرمان است. مشخصات شیمیایی این نوع سیمان مطابق جدول (۲) است.

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان ممتازان کرمان

مشخصات شیمیایی	ASTM C150 (%)	سیمان ممتازان کرمان (%)
Loss of Ignition (LOI)	۷.۵ Max	۳ Max
(MgO)	۷.۴ Max	۵ Max
(SiO ₂)	۲۰.۳ Min	-
(Al ₂ O ₃)	۵.۵ Min	-
(Fe ₂ O ₃)	۴ Min	-
(CaO)	۶۲ Min	-
Free CaO	-	۱.۳
Insoluble Residue (IR)	۰.۶ Max	۰.۷۵ Max
(C ₃ A)	۷.۵ Max	۵ Max
(C ₂ S)	۵۳ Min	-
(C ₁ S)	۳۲ Max	-
(C ₄ AF)	۲.۰ Max	-

میکرو سیلیس: در این تحقیق از میکرو سیلیس ازنا لارستان استفاده شده که مشخصات آن در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- ترکیبات شیمیایی میکرو سیلیس ازنا لارستان

نوع	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ SiO ₅	Fe ₂ SiO ₅	SiO ₂	C	SiO ₂	SiO ₂	نوع
میکرو سیلیس	۹۰.۵	۳.۰	۰.۶	۰.۲	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	میکرو سیلیس

فوق روان کننده: در این تحقیق برای اختلاط بتن پودری واکنش پذیر از نسل سوم فوق روان کننده‌ها بر پایه پلی-کربوکسیلات اتر بانام تجاری Carboxal HF ۵۰۰۰، البرز شیمی آسیا استفاده شده که مشخصات آن در جدول (۴) است.

جدول ۴- مشخصات فوق روان کننده HF 5000 البرز شیمی آسیا

مشخصات	شرح
شکل ظاهری	مایع بی‌رنگ
رنگ	بی‌رنگ یا سفید
چگالت	۱۲۰۰
PH	۸-۹
H ₂ O	کمتر از ۱۰٪
ماده جامد	کمتر از ۱۳٪
چگالی	۱.۱۱ g/cm ³
میزان مصرف	۰.۲۴ - ۰.۳۰ لیتر در واحد وزنی سیمان

آب مصرفی: در این تحقیق آب مورد استفاده، آب شرب شهر رفسنجان است.

۴. طرح اختلاط بتن پودری

محققین برای ارائه ی بتن پودری واکنشی، از دو روش استفاده کرده‌اند. روش اول این است که طرح اختلاط بر اساس یک مترمکعب تنظیم شده و با ساخت آن یک متر مکعب به دست خواهد آمد. روش دوم بدین ترتیب بوده که طرح اختلاطها به صورت وزنی ارائه می‌شود. به زبان ساده‌تر برای مقادیر سیمان عدد واحد ۱ انتخاب شده و مابقی مقادیر به صورت ضربی از سیمان ارائه می‌شود. در این پژوهش از روش دوم برای طرح اختلاط مطابق جدول (۵) استفاده شده است.

جدول ۵- طرح اختلاط‌های مورد استفاده در پژوهش

آب	سیمان	سیمان واکنشی	فیلر	فیلر سنگریزه	فیلر شن	نوع طرح
۰.۲۷	۱	۰.۲۵	۱	۱	۱	RPC1
۰.۲۸	۱	۰.۲۵	۱	۱	۱	RPC2
۰.۲۹	۱	۰.۲۵	۱	۱	۱	RPC3
۰.۳۰	۱	۰.۲۵	۱	۱	۱	RPC4
۰.۳۱	۱	۰.۲۵	۱	۱	۱	RPC5
۰.۳۲	۱	۰.۲۵	۱	۱	۱	RPC6
۰.۳۳	۱	۰.۲۵	۱	۱	۱	RPC7

۵. تهیه آزمون‌های آزمایشی

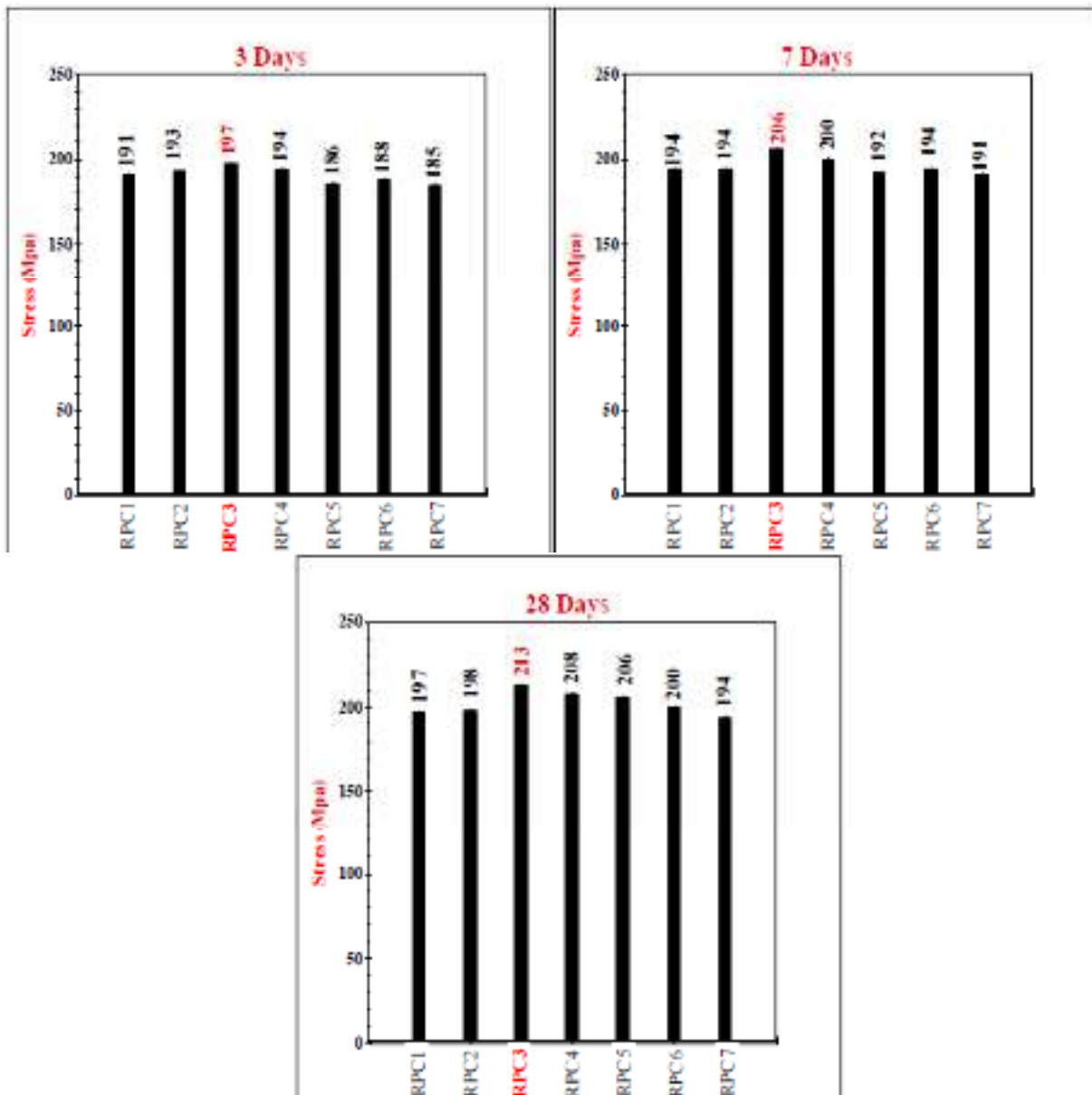
در اختلاط بتن RPC، ابتدا مواد به صورت خشک به مدت پنج دقیقه مخلوط شدند. سپس دوسوم آب و یکسوم فوق روان کننده با یکدیگر ترکیب شده و به مخلوط اضافه شده و به مدت پنج دقیقه دیگر مخلوط شدند. در نهایت بقیه آب و فوق روان کننده افزوده شده و پنج دقیقه دیگر نیز مخلوط گردیدند. ۹ عدد آزمون‌های مکعبی در ابعاد $5*5*5$ سانتی‌متر برای سنجش مقاومت فشاری در سنین سه، هفت و بیست و هشت روزه تهیه شدند. این آزمون‌ها، به مدت ۲۴ ساعت درون قالب و در زیرپوشش نفوذناپذیر قرار گرفتند. در مرحله اول آزمایش‌ها، آزمون‌ها بعد از درآوردن از قالب، به مدت سه ساعت در اتوکلاو در فشار ۲ مگاپاسکال سپس تا هفت روز در آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۰ روز در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند.

۶. نتایج آزمایش

نتایج مربوط به آزمون مقاومت فشاری مطابق نمودار (۲) در سنین مختلف آورده شده است. تصویر (۱) نحوه شکست نمونه‌ها را شاهدیم.



شکل ۱- نحوه شکست نمونه‌های ۲۸ روزه



نمودار ۲- نتایج مقاومت فشاری در سنین مختلف

۷. نتیجه‌گیری کلی

۱- ماسه سیلیسی معدن شهر بابک ظرفیت و پتانسیل تولید بتن پودری واکنش‌پذیر با مقاومت بالای ۲۰۰ مگاپاسکال را دارا است و مشخصات آن با بتن تولید شده از آن با نمونه‌های تجاری-کاربردی مطابقت دارد.

- ۲- طرح اختلاط RPC^3 با توجه به مقاومت فشاری و کارایی به دست آمده به عنوان طرح برتر، پیشنهاد می شود.
- ۳- هر چه نسبت آب به سیمان کمتر شود مقاومت فشاری نیز افزایش می یابد، البته در نسبت های آب به سیمان کمتر از ۰/۱۸ و نسبت های ماسه سیلیسی به سیمان بیشتر از ۱ به دلیل اینکه مقدار آب حجم مخلوط، کاهش می یابد؛ هر چند حداکثر مقاومت فشاری در نسبت آب به سیمان ۰/۱۸ به دست می آید، اما به دلیل کارایی پایین توصیه نمی شوند.
- ۴- عمل آوری نمونه ها با استفاده از اتوکلاو، مقاومت فشاری اولیه بتن پودری را به طور چشمگیری افزایش می دهد که به نظر یک فن مناسب جهت افزایش فضای ژلی است.

مراجع

- [۱] Richard, Pierre, and Marcel Cheyreyz. "Composition of reactive powder concretes." *Cement and concrete research* ۲۵,۷ (۱۹۹۵): ۱۵۰۱-۱۵۱۱.
- [۲] Dugat, J., Roux, N., & Bernier, G. (۱۹۹۶). Mechanical properties of reactive powder concretes. *Materials and structures*, ۲۹(۴), ۲۳۳-۲۴۰.
- [۳] Wang, Chong, et al. "Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials." *Cement and concrete composites* ۳۴,۴ (۲۰۱۲): ۵۳۸-۵۴۴.
- [۴] Wang, Chong, et al. "Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials." *Cement and concrete composites* ۳۴,۴ (۲۰۱۲): ۵۳۸-۵۴۴.
- [۵] Yazıcı, Halit, et al. "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes." *Construction and building materials* ۲۳,۳ (۲۰۰۹): 1223-1231.
- [۶] Zanni, Hélène, et al. "Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using ^{29}Si NMR." *Cement and Concrete Research* ۲۶,۱ (۱۹۹۶): ۹۳-۱۰۰.
- [۷] Loukili, A., P. Richard, and J. Lamirault. "A study on delayed deformations of an ultra high strength cementitious material." *Special Publication* ۱۷۹ (۱۹۹۸): ۹۲۹-۹۵۰.
- [۸] ASTM C۲۳۰/C۲۳۰M - ۰۳, Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, p. ۶, ۲۰۰۳.
- [9] ASTM C109. "C109/C109M13 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using ۲in. or [۵۰mm] Cube Specimens).