تحقیقات بتن
سال پنجم، شماره دوم
پاییز و زمستان ۹۱
ص۱۸-۷
تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۱۱
تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۱۶

بررسی امکان تولید بتن پودری واکنش‌پذیر با مصالح موجود در ایران

لیلا معراجی*
دانشجوی دکترای مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
حسن افشین
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
کریم عابدی
استاد دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده:
بتن پودری واکنش‌پذیر[1] (RPC) به عنوان نوعی بتن فوق‌توانمند، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این بتن با مقاومت فشاری حداقل ۱۵۰ مگاپاسکال، دارای تراکم حجمی بالا، نفوذپذیری بسیار کم، دوام زیاد، مقاومت سایشی و خوردگی بسیار بالایی می‌باشد. الیاف فولادی ریز به کار رفته در این بتن، باعث افزایش مقاومت خمشی و شکل‌پذیری زیاد آن شده است. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از مصالح موجود در کشور بتوان به این نوع بتن دست یافت و مناسب‌ترین مصالح را از بین مصالح در دسترس، انتخاب نمود. همچنین تأثیر انواع روش‌های عمل‌آوری بر خواص این بتن بررسی شده است. نتایج نشانگر این نکته است که با استفاده از مصالح موجود و به کار بردن الیاف و با عمل‌آوری گرمایی می‌توان به مقاومت فشاری حدود ۱۶۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۲۵ مگاپاسکال در این نوع بتن دست یافت.

واژه‌های کلیدی: بتن پودری واکنش‌پذیر، عمل‌آوری، روانی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، طاقت خمشی

[1] Reactive Powder Concrete

* نویسندهٔ مسؤول: Meraji.Leila@gmail.com

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های مختلف، محققان زیادی تلاش کردند تا از طریق کاهش تخلخل مواد سیمانی، به مقاومت فشاری بالایی برسند. در اوایل ۱۹۷۰، Yudenfreund و همکاران [۱] به بتنی با مقاومت فشاری ۲۳۰ مگاپاسکال با تخلخل پایین از طریق کاربرد روش اختلاط بتن در خلاء دست یافتند. اعمال دما و فشار زیاد برای نخستین بار توسط Roy و همکاران [۲] انجام شد. آنها موفق شدند به مقاومت فشاری ۵۱۰ مگاپاسکال با استفاده از اعمال فشار ۵۰ مگاپاسکال و دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد دست یابند. در اوایل دهۀ ۱۹۸۰، مواد سیمانی اصلاح شده با پلیمر[۱] (MDF) معرفی شدند [۳]. این مواد مقاومتی بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال داشتند. Bache (۱۹۸۱) [۴] نوعی مادۀ سیمانی با عنوان DSP[۲] را به ثبت رساند که تخلخل آن با به کار بردن میکروسیلیس و فوق‌روان‌کننده کاهش یافت. این امر منجر به کسب مقاومت فشاری بین ۱۲۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال شد. بسیاری از این بتن‌های ویژه، به راحتی قابل دسترس یا قابل کنترل در هنگام مصرف نبودند تا اینکه بتن‌های فوق‌توانمند معرفی شدند و در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. در سال ۱۹۹۵، Richard و Cheyrezy [۵] بتن پودری واکنش‌پذیر را به عنوان نوعی بتن فوق‌توانمند معرفی کردند.

بتن پودری واکنش‌پذیر نوعی بتن با مقاومت بسیار بالا، مقاومت سایشی زیاد، شکل‌پذیری بالا، تخلخل پایین، نفوذپذیری کم و دوام زیاد می‌باشد. مواد تشکیل‌دهندۀ RPC عبارت‌اند از: سیمان، ماسۀ کوارتزی ریز، کوارتز شکسته، میکروسیلیس، الیاف فولادی و فوق‌روان‌کننده. برخلاف بتن معمولی، RPC به دلیل وجود الیاف فولادی، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالایی از خود نشان می‌دهد. همۀ این موارد در صنعت ساخت‌وساز سازه‌های بتنی، باارزش می‌باشند. همچنین RPC به لحاظ کاهش دادن وزن سازه و مقاومت بالا در مقابل انفجار یا بارگذاری ضربه‌ای مورد توجه است [۵-۸].

بتن پودری واکنش‌پذیر با مواد و روش متفاوتی تهیه می‌شود:

۱- این بتن، فاقد سنگ‌دانه‌های درشت می‌باشد و تنها از پودرهای بسیار ریز ماسه (حداکثر اندازۀ دانه درشت ۶۰۰ میکرومتر)، کوارتز شکسته (متوسط اندازۀ دانه‌ها ۱۰ میکرومتر) و میکروسیلیس در حدود ۰/۲۵ وزن سیمان استفاده می‌شود [۵ و۹].

۲- به این نوع بتن، الیاف فولادی در حدود ۲٪ حجمی افزوده می‌شود. این الیاف سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت کششی و خمشی بتن می‌شوند. همچنین تحقیقات نشان داده است که با به کار بردن الیاف فولادی، علاوه بر مقاومت خمشی و کششی، مقاومت فشاری آزمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. این الیاف معمولا دارای طولی در حدود ۱۳ میلی‌متر و قطری در حدود ۰/۱۵ میلی‌متر و با مقاومت بالا می‌باشند [۵].

۳- در این نوع بتن چون نسبت آب به سیمان کم است (معمولا کمتر از ۰/۲)، بنابراین جهت روانی خمیر از فوق‌روان‌کننده استفاده می‌شود [۵].

۴- سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند معمولی است. مقدار سیمان مصرفی در بتن پودری واکنش‌پذیر معمولا بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. مطالعات نشان داده است که سیمان دارای C_3A کمتر، تاثیر بهتری بر خواص این نوع بتن دارد [۱۰-۱۲].

۵- دانه‌بندی به منظور دستیابی به یک مخلوط با تراکم بسیار بالا بهینه‌سازی می‌شود [۵].

۶- در عمل‌آوری این بتن حرارت نقش مهمی دارد. نمونه‌های این نوع بتن می‌توانند تحت درجۀ حرارت‌های مختلف قرار گیرند، بنابراین مقاومت فشاری آنها از ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال تغییر می‌کند. تحقیقات نشان داده است با عمل‌آوری در حرارت بالا، بسیاری از خواص RPC بهبود می‌یابد. همچنین نمونه‌ها می‌توانند قبل از گیرش و در طول گیرش، تحت فشار قرار گیرند که این نیز در بهبود خواص آن موثر است. عمل‌آوری در دمای بین ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، بتنی با مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال می‌دهد. تولید بتن RPC با مقاومت بالای ۸۰۰ مگاپاسکال نیاز به اعمال فشار قبل از گیرش و عمل‌آوری در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد دارد. این نوع بتن (با مقاومت فشاری ۸۰۰ مگاپاسکال) تنها در عناصر پیش‌ساخته می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این ماده، مقاومت فوق‌العاده‌ای در برابر

[۱] Macro-Defect-Free
[۲] Densified Small Particles

Archive of SID
www.SID.ir

ضربه دارد و می‌تواند برای سازه‌ها و تجهیزات نظامی مورد استفاده قرار گیرد [۵ و۶].

۲- برنامهٔ آزمایش‌ها

در این تحقیق، سعی شده است بتن پودری واکنش‌پذیر با استفاده از مصالح موجود در کشور، با مقاومت فشاری حداقل ۱۵۰ مگاپاسکال و همچنین از الیاف فولادی، تهیه شود. بدین منظور برخی مصالح مورد نیاز در تهیه این بتن از جمله انواع فوق‌رواکننده، ماسهٔ سلیسیی و پودر سیلیس (کوارتز شکسته) از نقاط مختلف کشور تهیه شدند تا مناسب‌ترین و سازگارترین آنها انتخاب گردند. پارامترهای مورد مطالعه شامل انتخاب مصالح مناسب از بین مصالح ذکر شده با بررسی تأثیر آنها بر مقاومت فشاری و روانی بتن و سپس بررسی تاثیر انواع روش‌های عمل‌آوری بر خواص مذکور و در نهایت تعیین طرح اختلاط مناسب و استفاده از الیاف فولادی برای رسیدن به مقاومت فشاری و خمشی بیشتر با روانی قابل قبول می‌باشد. جهت سنجش روانی بتن‌ها از روش ASTM C 230/C 230M [۱۳] و برای تعیین مقاومت خمشی آنها از روش ASTM C 1609/C 1609M [۱۴] استفاده شده است. لازم به ذکر است که آزمایش‌ها در آزمایشگاه بتن و ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام گرفته‌اند.

۲-۱- مصالح مصرفی و طرح اختلاط

همانطور که قبلاً اشاره شد، مصالح مصرفی در ساخت RPC شامل سیمان، ماسهٔ سیلیسی، پودرسیلیس، میکروسیلیس، فوق‌روان‌کننده، الیاف فولادی و آب می‌باشد. از بین مصالح مصرفی، نوع سیمان و میکروسیلیس در تمامی آزمایش‌ها یکسان می‌باشد. طی تحقیقات انجام شده قبلی در دانشگاه سهند ثابت شده بود که از بین سیمان‌های در دسترس، سیمان پرتلند نوع ۱ محصول کارخانه سیمان شهرکرد، تأثیر خوبی بر مقاومت بتن‌های با مقاومت بالا دارد. بنابراین در این تحقیق نیز، این نوع سیمان مورد استفاده قرار گرفته است. میکروسیلیس به کار رفته، میکروسیلیس ازنا، محصول کارخانهٔ صنعتی فروآلیاژ ایران و آب مصرفی، آب شرب دانشگاه سهند می‌باشد. خواص الیاف فولادی مصرف شده در بخش مربوط آمده است. در تمامی آزمایش‌ها به جز آزمایش‌های بخش اصلاح طرح اختلاط و بررسی اثر الیاف، از نسبت‌های اختلاط ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است.

۲-۲- تهیهٔ آزمونه‌های آزمایشی

در اختلاط بتن RPC، ابتدا مواد به صورت خشک به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شدند. سپس نصف آب و نصف فوق‌روان‌کننده اضافه شده و به مدت چهار دقیقه دیگر مخلوط شدند. در نهایت بقیهٔ آب و فوق‌روان‌کننده افزوده شده و چهار دقیقه دیگر نیز مخلوط گردیدند. سه عدد آزمونهٔ مکعبی در ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری و سه عدد آزمونه منشوری به ابعاد ۳۴×۷/۵×۷/۵ سانتی‌متر برای سنجش مقاومت خمشی تهیه شدند. این آزمونه‌ها، به مدت ۴۸ ساعت درون قالب و در زیر پوشش نفوذناپذیر قرار گرفتند. در مرحلهٔ اول آزمایش‌ها یعنی مرحلهٔ انتخاب مصالح مناسب، آزمونه‌ها بعد از درآوردن از قالب، تا دو روز در آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۴ روز در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند.

۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- انتخاب فوق‌روان‌کننده

تحقیقات نشان داده است که موثرترین نوع فوق‌روان‌کننده‌ها بر خواص بتن RPC، فوق‌روان‌کننده‌هایی با پایهٔ پلی کربکسیلات اتر می‌باشند [۱۰]. در این تحقیق سه نوع فوق‌روان‌کننده با پایه پلی کربکسیلات اتر از کارخانه‌های مختلف با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ تهیه شدند تا اثر آنها بر مقاومت فشاری و روانی بتن بررسی شده و مناسب‌ترین آنها انتخاب گردد. طبق جدول ۲، سه نوع طرح اختلاط با نسبت‌های اختلاط مشابه (مطابق جدول ۱) و مصالح یکسان ولی با نوع فوق‌روان‌کننده متفاوت تهیه شدند.

اشکال ۱ (الف) و (ب) تأثیر نوع فوق‌روان‌کننده بر روانی و مقاومت فشاری آزمونه‌ها را نشان می‌دهند. با بررسی این اشکال

Archive of SID

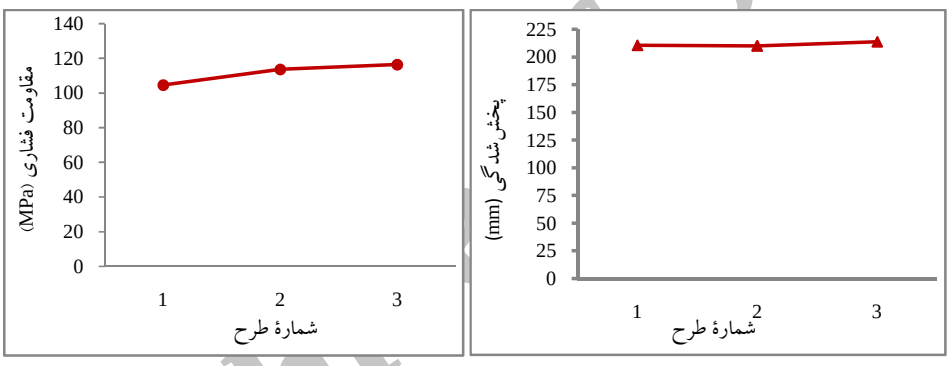
www.SID.ir

جدول۱- نسبت‌های اختلاط (بر حسب وزن سیمان)

مصالح	سیمان	میکروسیلیس	ماسهٔ سیلیسی	پودر سیلیس	فوق‌روان‌کننده	آب
نسبت وزنی به وزن سیمان	۱	۰/۲۵۶	۱/۴۴۰	۰/۲۵۶	۰/۰۶۵	۰/۲۲۵
مقادیر (kg/m^3)	۷۵۵	۱۹۴	۱۰۸۵	۱۹۴	۴۹	۱۷۰/۵

جدول۲- مشخصات فوق‌روان‌کننده‌های مصرفی

شماره طرح	شمارهٔ فوق‌روان‌کننده	چگالی نسبی	PH	رنگ
۱	۱	۱/۱۵	۶	قهوه‌ای
۲	۲	۱/۰۷۵	۶/۵	قهوه‌ای روشن
۳	۳	۱/۱۲	۷	سبز تیره



(الف) (ب)

شکل۱- اثر فوق‌روان‌کننده‌ها بر (الف) پخش‌شدگی (ب) مقاومت فشاری

می‌توان گفت که نتایج آزمونه‌ها تقریباً مشابه است ولی به دلیل مسائل اقتصادی و ارزان بودن فوق‌روان‌کننده نوع ۲، در تمامی آزمایش‌های بعدی، از این نوع فوق‌روان‌کننده استفاده شد.

۳-۲- انتخاب ماسهٔ سیلیسی

در این مرحله، سه نوع ماسه سیلیسی با مشخصات نشان داده شده در جدول ۳ و با دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۲ از نقاط مختلف کشور تهیه شدند. به منظور تعیین ماسهٔ سیلیسی مناسب، سه طرح اختلاط با نسبت‌های اختلاط یکسان (جدول ۱) و مصالح مشابه ولی با نوع ماسهٔ سیلیسی متفاوت تهیه شدند.

با مقایسه منحنی‌های دانه‌بندی مشخص است که ماسهٔ ملایر، ریزدانه‌ترین، ماسهٔ قزوین، درشت‌دانه‌ترین و ماسهٔ سیرجان، مابین این دو حالت می‌باشد. بررسی مشخصات بتن‌های تهیه شده در شکل ۳ و منحنی‌های دانه‌بندی (شکل ۲)، نشان می‌دهد که ماسهٔ سیرجان عملکرد بهتری نسبت به دو نوع دیگر دارد. در واقع ماسهٔ سیلیسی ملایر به علت تاثیر منفی آن بر مقاومت فشاری حذف شد و از بین دو ماسهٔ قزوین و سیرجان، ماسهٔ سیرجان به علت توزیع یکنواخت اندازهٔ دانه‌ها انتخاب شد.

۳-۳- انتخاب پودر سیلیس

پودر سیلیس (پودر شیشه) به عنوان پرکننده در RPC به کار می‌رود ولی برخی تحقیقات نشان داده‌اند که پودر

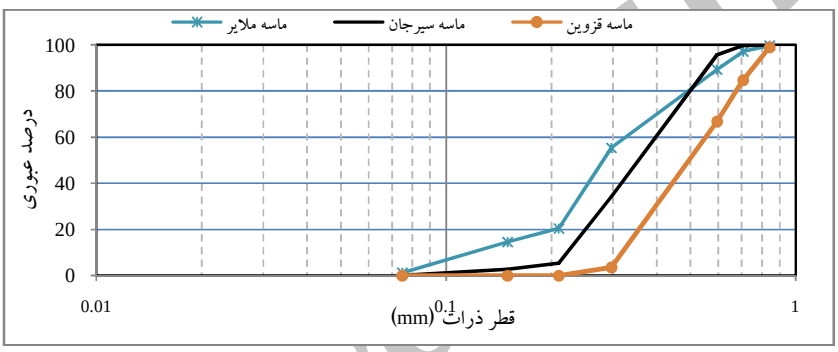
www.SID.ir

سیلیس تحت عمل‌آوری گرمایی با خمیر سیمان واکنش می‌دهد [۱۰]. در این تحقیق سه نوع پودر سیلیس، همگی با ریزدانه‌هایی با ابعاد کمتر از ۱۰ میکرومتر و با مقدار سیلیس اشاره شده در جدول ۴ تهیه شدند.

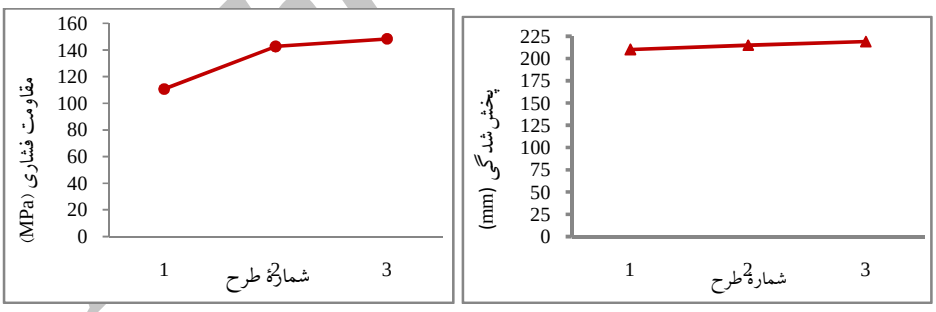
سه نوع طرح اختلاط با نسبت‌های اختلاط یکسان (جدول ۱) و مصالح مشابه ولی با نوع پودر سیلیس متفاوت تهیه شدند. بررسی خواص این سه نوع بتن که در شکل ۴ نشان داده شده است، نشانگر مناسب بودن پودر سیلیس نوع ۱ (ملایر) می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات انواع ماسهٔ سیلیسی

شماره طرح	۱	۲	۳
محل تولید ماسه	ملایر	قزوین	سیرجان
مقدار سیلیس (طبق گزارش کارخانه)	≥۹۹٪	۹۸٪-۹۹٪	۸۵٪-۹۰٪



شکل ۲- منحنی‌های دانه‌بندی انواع ماسهٔ سیلیسی

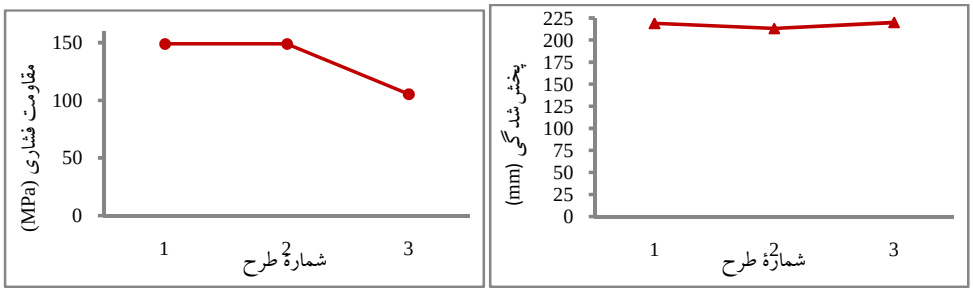


شکل ۳- تاثیر انواع ماسهٔ سیلیسی بر (الف) پخش‌شدگی (ب) مقاومت فشاری

جدول ۴- مشخصات انواع ماسهٔ سیلیسی

شمارهٔ طرح	۱	۲	۳
محل تولید پودر سیلیس	ملایر	قزوین	تبریز
مقدار سیلیس (طبق گزارش کارخانه)	≥۹۹٪	۹۸٪-۹۹٪	۸۵٪-۹۰٪

www.SID.ir



(الف) (ب)

شکل ۴- اثر انواع پودر سیلیس بر (الف) پخش‌شدگی (ب) مقاومت فشاری

بنابراین برای ادامهٔ آزمایش‌ها، سیمان شهرکرد، میکروسیلیس ازنا، فوق‌روان‌کنندهٔ شماره ۲، ماسهٔ سیلیسی سیرجان و پودر سیلیس ملایر، مناسب‌ترین مصالح در تهیهٔ بتن پودری واکنش‌پذیر انتخاب شدند.

۳-۴- انتخاب روش عمل‌آوری

در این مرحله، آزمونه‌های RPC با نسبت‌های اختلاط جدول ۱ و با مصالح انتخاب شده، تهیه شده و تحت روش‌های مختلف عمل‌آوری قرار گرفتند. نوع روش‌های عمل‌آوری و نتایج مربوط به ترتیب در جدول ۵ و شکل ۵ نشان داده شده‌اند. همانگونه که از شکل ۵ مشخص است تفاوت فاحشی بین مقاومت فشاری آزمونه‌های عمل‌آوری شدهٔ معمولی (با آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد) و آزمونه‌های عمل‌آوری شده در آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد وجود دارد و این، لزوم عمل‌آوری در درجه حرارت‌های بالا برای بتن RPC را نشان می‌دهد.

مقایسهٔ آزمونه بتن‌هایی که در مدت زمان‌های متفاوت از ۲ روز تا ۵ روز تحت عمل‌آوری حرارتی با آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد که زمان عمل‌آوری ۳ روز در آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد، برای تکمیل واکنش‌های هیدراسیون در بتن RPC کافی می‌باشد و طولانی شدن این عمل‌آوری، تاثیر زیادی بر نتایج ندارد.

علت پایین بودن مقاومت ۷ روزه در روش عمل‌آوری شمارهٔ ۳ (۵ روز در آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد) نسبت به مقاومت ۷ روزه در روش عمل‌آوری شمارهٔ ۲ (۳ روز در آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد)، کم بودن مقدار مقاومت یکی از سه آزمونه مورد آزمایش می‌باشد که از محاسبات حذف نشده و موجب پایین آمدن نتیجه شده است.

اگر نسبت مقاومت ۷ روزه به ۲۸ روزه در آزمونه‌های بتن، مورد بررسی قرار گیرد ملاحظه می‌شود که در آزمونه‌های عمل‌آوری شده در آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد تفاوت چندانی بین مقاومت‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه وجود ندارد و این نوع بتن حدود ٪۹۷ مقاومت خود را در ۷ روز اول کسب می‌کند، در حالی‌که آزمونه‌های بتن RPC عمل‌آوری شده در آب معمولی حدودا ٪۸۰ مقاومت ۲۸ روزهٔ خود را در ۷ روز اول به دست می‌آورد. لذا می‌توان گفت: اگر از روش عمل‌آوری در آب ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۳ روز استفاده شود، می‌توان با رعایت سایر ضوابط فنی، این نوع بتن را حتی در سنین کمتر از ۲۸ روز نیز تحت بارگذاری قرار داد.

۳-۵- اصلاح نسبت‌های اختلاط

با بررسی طرح‌های اختلاط بتن‌های RPC تهیه شده تا این مرحله از آزمایش‌ها و مقایسهٔ مشخصات بتن‌های تهیه شده، اصلاحات مطابق جدول ۶ در نسبت‌های اختلاط صورت گرفت و طرح ۱ به طرح ۲ تغییر یافت. همانطور که ملاحظه می‌شود با تغییر در ترکیب نسبت‌ها، بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری حاصل شده و مقاومت فشاری با ترکیب جدید تا ۱۶۱ مگاپاسکال افزایش یافته است.

۳-۶- اثر الیاف بر خواص RPC

در این بخش از تحقیق، با به کار بردن مصالح انتخاب شده

Archive of SID

www.SID.ir

و بـا اسـتفاده از طـرح اخـتلاط شـمارهٔ ۲ در جـدول ۶، آزمونه‌های بتن RPC با به کار بردن الیاف فولادی نشان داده شده در شکل ۶ (به مقدار ۲/۵٪ حجمی) تهیه شدند و اثر الیاف بر مقاومت فشاری و مقاومت خمشی آزمونه‌ها بررسی شد. الیاف به کار رفته، از کارخانهٔ Draco تهیه شده‌اند و دارای طول ۵ میلی‌متر، قطر ۰/۴ میلی‌متر و مقاومت کششی نهایی ۱۸۰۰ مگاپاسکال می‌باشند. در این بخش، جهت اختلاط از مخلوط‌کن کفی آزمایشگاهی[1] متشکل از دیگ استوانه‌ای شکل، با ظرفیت مفید ۵۰ لیتر که حول محور خود می‌چرخد و با دو بازوی متصل به یک تیغهٔ ثابت و یک تیغهٔ چرخان که هر کدام حول یک محور عمودی غیر از محور دیگ استوانه می‌چرخند و یک مسیر دایره‌ای را حول محور دیگ می‌پیمایند، استفاده شده است. بعد از تهیهٔ مخلوط بتن، الیاف، در آخرین مرحله و به تدریج به آن اضافه شدند و عمل اختلاط به مدت ۱۰ دقیقهٔ دیگر ادامه یافت. لازم به ذکر است که اثر منفی الیاف بر روانی بتن، با افزودن مقدار فوق‌روان‌کننده حل شده است. طرح‌های اختلاط بتن‌های دارای الیاف و بدون الیاف در جدول ۷ و نتیجهٔ آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۷ ارائه شده‌اند.

در بررسی مقاومت فشاری (شکل ۷)، ملاحظه می‌شود که با افزودن الیاف فولادی در حدود ۲/۵٪ حجمی، مقاومت فشاری آزمونه‌ها، در هر دو روش عمل‌آوری، حدودا ۱۰٪ افزایش یافته است. در هر دو نوع بتن RPC، عمل‌آوری حرارتی، مقاومت فشاری آزمونه‌ها را در حدود ۲۶٪ بهبود داده است. حداکثر مقاومت فشاری (۱۶۰ مگاپاسکال) در آزمونه‌هایی با عمل‌آوری گرمایی و دارای الیاف حاصل شده است.

تصویر خرابی آزمونه‌های فشاری در شکل ۸ ارائه شده است. تصویر ۸ (الف) نشان می‌دهد که در آزمونهٔ بدون الیاف، صفحات شکست با زوایای ۴۵ درجه و به صورت قطری در آزمونه گسترش یافته و محل تلاقی این صفحات به مغز آزمونه نزدیک شده است ولی در آزمونه‌های دارای الیاف (شکل ۸ (ب))، الیاف موجود، دو طرف ترک‌ها و صفحات ناشی از این ترک‌ها را به هم دوخته‌اند (پدیدهٔ پل زدن[2]) و از گسترش آنها در محدودهٔ مرکزی آزمونه جلوگیری کرده‌اند. بنابراین صفحات شکست به لایه‌های بیرونی آزمونه منتقل شده‌اند که در آنجا مهارشدگی الیاف در طرف بیرونی ترک یا صفحهٔ شکست، کم می‌باشد.

شکل ۹، آزمونهٔ منشوری را در دستگاه آزمایش مقاومت خمشی نشان می‌دهد. آزمایش خمشی توسط دستگاه UTM[3] و به صورت روش کنترل تغییر مکان[4] که قابلیت رصد اطلاعات تا مرحلهٔ نهایی شکست و گسیختگی را دارد، انجام شده است. همچنین نحوهٔ شکست آزمونه‌ها تحت بارگذاری خمشی در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌اند.

در آزمونه‌های بدون الیاف، گسترش ترک، آنی و سریع بوده و شکست بلافاصله بعد از به وجود آمدن اولین ترک رخ می‌دهد، ولی در آزمونه‌های دارای الیاف، بعد از به وجود آمدن ترک، الیاف موجود در بتن RPC، مانع گسترش آن شده و با پل زدن بین دو طرف ترک، گسترش آن را به تاخیر انداخته و طاقت خمشی یا چقرمگی[5] بتن را افزایش می‌دهند.

در شکل ۱۱، نمودارهای بار- تغییرشکل هر دو نوع آزمونه مشاهده می‌شود. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با به کار بردن الیاف، شکل‌پذیری آزمونهٔ در مقایسه با آزمونه بدون الیاف افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. سطح زیر منحنی بار- تغییرشکل در آزمونهٔ دارای الیاف، تقریباً ۷۹ N-m و در آزمونهٔ بدون الیاف در حدود ۰/۷۱ N-m است که این مطلب نشانگر اثر قابل ملاحظهٔ الیاف فولادی بر چقرمگی بتن RPC می‌باشد.

در شکل ۱۲ مقاومت خمشی آزمونه‌ها مقایسه شده‌اند. در بررسی مقاومت خمشی، نتایج نشان از افزایش مقدار آن از ۷ مگاپاسکال به ۲۵ مگاپاسکال با افزودن ۲/۵٪ الیاف فولادی دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که هر چند الیاف فولادی تاثیر اندکی در بهبود مقاومت فشاری بتن‌های

[1] Pan Mixer

[2] Bridging
[3] Universal Testing Machin
[4] Displacement Control
[5] Toughness

Archive of SID

www.SID.ir

RPC دارنـــد ولـــی مقاومـــت خمشـــی و طاقـــت خمشـــی (چقرمگی) آن را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند.

جدول ۵- انواع روش‌های عمل‌آوری

شمارهٔ روش عمل‌آوری	نوع روش عمل‌آوری
۱	۲ روز در آب 90^0C و ۲۴ روز در آب 20^0C
۲	۳ روز در آب 90^0C و ۲۳ روز در آب 20^0C
۳	۵ روز در آب 90^0C و ۲۱ روز در آب 20^0C
۴	۲۶ روز در آب 20^0C

شکل ۵- اثر انواع روش‌های عمل‌آوری بر مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزهٔ آزمونه‌ها

جدول ۶- طرح‌های اختلاط (kg/m^3)

شمارهٔ طرح اختلاط	سیمان	میکروسیلیس	ماسه سیلیسی	پودر سیلیس	فوق‌روان‌کننده	آب	W/C	مقاومت فشاری (MPa)	پخش‌شدگی (mm)
۱	۷۵۵	۱۹۴	۱۰۸۵	۱۹۴	۴۹	۱۷۰/۵	۰/۲۳	۱۵۰	۲۱۹
۲	۸۵۰	۲۱۲/۵	۹۳۵	۱۸۰	۴۰	۱۹۵/۵	۰/۲۳	۱۶۱	۲۱۹

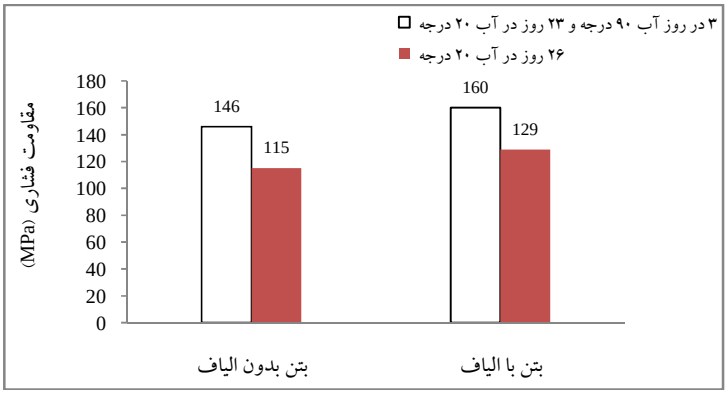
شکل ۶- آزمونهٔ الیاف فولادی به کار رفته

جدول ۷- طرح اختلاط بتن‌های RPC دارای الیاف و بدون الیاف (kg/m^3)

مصالح	سیمان	میکروسیلیس	ماسهٔ سیلیسی	پودر سیلیس	فوق‌روان‌کننده	الیاف فولادی	آب	W/C
مقادیر (بتن با الیاف)	۷۸۲	۱۹۵/۵	۸۶۰	۱۶۵	۴۱	۱۸۰/۵	۱۸۸	۰/۲۴
مقادیر (بتن بدون الیاف)	۸۱۰	۲۰۲/۵	۸۹۱	۱۷۱/۵	۴۳	-	۱۹۴	۰/۲۴

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۷- اثر الیاف بر مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ آزمونه‌ها

(ب) (الف)

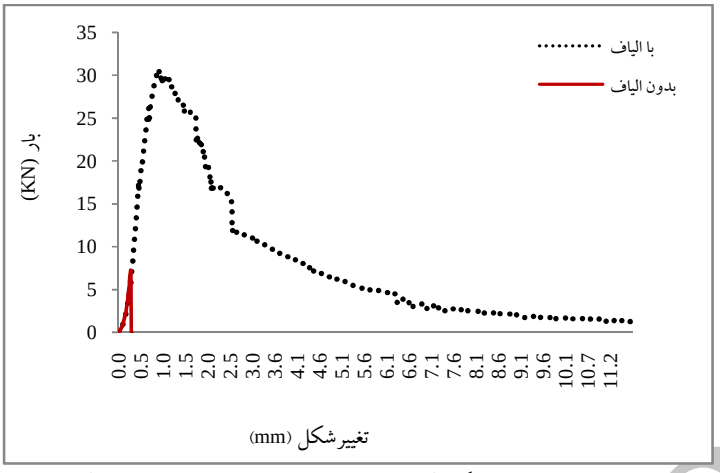
شکل ۸- شکست آزمونه‌ها تحت آزمایش فشار الف) بدون الیاف ب) با الیاف

شکل ۹- آزمونهٔ خمشی در حین آزمایش

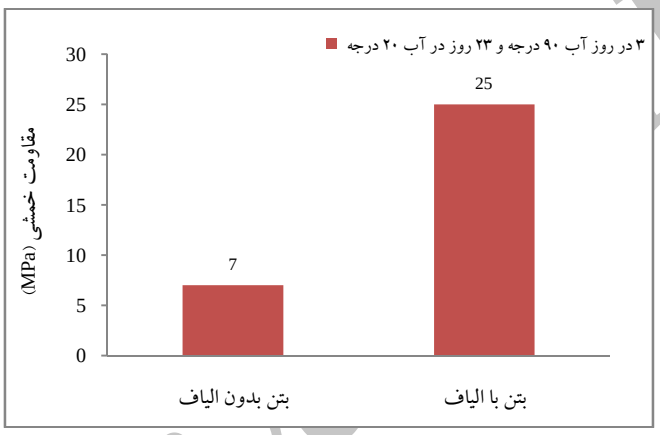
(ب) (الف)

شکل ۱۰- شکست آزمونه‌ها تحت آزمایش خمش الف) بدون الیاف ب) با الیاف

www.SID.ir



شکل ۱۱- نمودارهای بار-تغییرشکل آزمونه‌های باالیاف و بدون الیاف تحت آزمایش خمش



شکل ۱۲- مقاومت خمشی آزمونه‌های باالیاف و بدون الیاف

۴- نتیجه‌گیری

در محدودهٔ آزمایش‌های انجام یافته در این تحقیق، می‌توان گفت:

۱- با استفاده از مصالح موجود در کشور و طرح اختلاط مناسب، می‌توان به بتن پودری واکنش‌پذیر با مقاومت فشاری حداقل ۱۶۰ مگاپاسکال دست یافت.

۲- عمل‌آوری این نوع بتن‌ها در حرارت ۹۰ درجه سانتی‌گراد حداقل به مدت سه روز توصیه می‌شود.

۳- در صورت عمل‌آوری حرارتی، می‌توان این نوع بتن را جهت کارهای ترمیمی فوری مانند ترمیم پل‌ها و سایر شریان‌های حیاتی به کار برد.

۴- به منظور دست‌یابی به مقاومت خمشی و طاقت خمشی (چقرمگی) مناسب، استفاده از الیاف در این نوع بتن، لازم و ضروری می‌باشد.

۵- با توجه به عدم تولید الیاف فولادی مناسب برای کاربرد در این نوع بتن و پتانسیل بالای این بتن برای استفاده در سازه‌های استراتژیک، توصیه می‌شود اقداماتی در جهت تولید الیاف مناسب در داخل کشور صورت پذیرد.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از آقایان، کرباسی، محمدزاده و ملایی، عوامل فنی آزمایشگاه بتن و ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی سهند تبریز، به سبب تلاش‌ها و زحمات آنها، تقدیر و تشکر نمایند.

۷. مراجع

[1].Yudenfreund M, Skalny J, Mikhail RS, Brunauer S. "Hardened portland cement pastes of low porosity, II. Exploratory studies. Dimensional

Archive of SID
www.SID.ir

under different curing regimes", Construction and Building Materials, 23, 1223–1231, 2009.
[13].ASTM C 230/C 230M – 03, Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, p. 6, 2003.
[14].ASTM C 1609/C 1609M – 05, Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, p. 8, 2005.
[15].Yun-Wang Choi, Dae-Joong Moon, Jee-Seung Chung, Sun-Kyu Cho, “Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete,” Cement and Concrete Research 35, 776–781, 2005.
[16].Semiha Akçaozoglu, Cengiz Duran Atis, Kubilay Akçaozoglu, “An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete,” Waste Management 30, 285–290, 2010.
[17].O.Yazoghli Marzouk, R.M. Dheilly, M.Queneudec, “Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites,” Waste Manage 27, 310–318, 2007.
[18]. J.M.L. Reis, R. Chianelli-Junior, J.L. Cardoso, F.J.V. Marinho, “Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar,” Construction and Building Materials xxx, xxx–xxx, 2011.
[19].Kinda Hannawi, Siham Kamali-Bernard, William Prince, “Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates,” Waste Management 30, 2312–2320, 2010.
[20].Semiha Akçaözoğlu, Cengiz Duran Atiş, “Effect of Granulated Blast Furnace Slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates,” Construction and Building Materials 25, 4052–4058, 2011.
[21]. R. Jones, I.Facaroau, “Incerearea Nedistructiva a Betonului,” Editure Technica, Bucauresti, 1971.
changes", Cement and Concrete Research, 2(3), 331–348, 1972.
[2].Roy DM, Gouda GR, Bobrowsky A. "Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques", Cement and Concrete Research, 2, 349–366, 1972.
[3].Birchall JD, Howard AJ, Kendall K. "Flexural strength and porosity of cements", Nature, 289, 388–390, 1981.
[4].Bache HH. "Densified cement/ultrafine particle-based materials", In: 2nd international conference on superplasticizers in concrete, Ottawa, 10–12, June 1981
[5].Richard P, Cheyrezy M. "Composition of reactive powder concretes", Cement and Concrete Research, 25, 1501–1511, 1995.
[6].Cheyrezy M, Maret V, Frouin L. "Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete) ", Cement and Concrete Research, 25, 1491–1500, 1995. [7].Roux N, Andrade C, Sanjuan M.A. "Experimental study of durability of reactive powder concretes", Journal of Materials in Civil Engineering, 8, 1–6, 1996.
[8].Bonneau O, Lachemi M, Dallaire É, Dugat J, Aïtcin P.C. "Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes", ACI Materials Journal, 94, 286–290, 1997.
[9].Chan Y.W, Chu S.H. "Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete", Cement and Concrete Research, 34, 1167–1172, 2004.
[10].Wille K, Naaman A.E, Parra-Montesinos G. J. "Ultra-high performance concrete with compressive Strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way", ACI Materials Journal, 108, 46–54, 2011.
[11].Cwirzen A, Penttala V, Vornanen C. "Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC", Cement and Concrete Research, 38, 1217–1226, 2008.
[12].Yazıcı H, Yücel Yardımcı M, Aydın S, Karabulut A.Ş. "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures

Archive of SID

www.SID.ir

Investigation into the Possibility of Reactive Powder Concrete Production Using Available Materials in Iran

L. Meraji*
PhD candidate, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology
H. Afshin
Associate Professor of Structural Engineering, Sahand University of Technology
K. Abedi
Professor of Structural Engineering, Sahand University of Technology

(Received: 2013/8/2 - Accepted: 2013/11/20)

Abstract

Reactive powder concrete (RPC), as a new type of ultra-high-performance concrete, has attracted a lot of attention in recent years. This type of concrete with a compressive strength of more than 150 MPa, has high packing density, very low permeability, superior durability and very high abrasion and corrosion resistance. Small steel fibers, used in RPC, cause the increase of flexural strength and ductility. In the present study, it has been tried to produce reactive powder concrete using the most suitable available materials in Iran. Also, the effects of different curing methods on the properties of RPC have been investigated. The results show that using the available materials together with steel fibers and conducting heat treatment, reactive powder concrete with compressive strength up to 160 MPa and flexural strength of 25 MPa was produced.

Keywords: Reactive Powder Concrete, Curing, Flowability, Compressive Strength, Flexural Strength, Toughness

Archive of SID

* Corresponding author**:** Meraji.Leila@gmail.com

www.SID.ir