

Mechanical properties of Reactive Powder Concrete containing steel and PVA fibers

Reza pourhossein¹, Mahdi Nematzadeh²

- 1- Masters student, Faculty of Civil Engineering, , University of Mazandaran
- 2- Assistant Professor of Structural Engineering, University of Mazandaran

Abstract:

Reactive powder concrete (RPC) is a type of ultra-high-performance concrete and a cement-based material with dense microstructure that composed of very fine powder materials with very high compressive and flexural strength. Adding steel fibers to the concrete, it will improve the mechanical properties and increase the ductility and energy absorption. In the present study, it has been tried to investigate the effect of steel and polyvinyl alcohol fibers together with curing regime on reactive powder concrete properties and how to produce it. For this purpose, a type of small hooked-end and crimped brass coated steel fibers and small and polyvinyl alcohol fibers were used. The maximum dosage of steel and polyvinyl alcohol fibers were 3% and 0.75% by volume, respectively, were considered. RPC cylindrical specimens contained two mentioned fibers were produced and the effect of these fibers on the concrete properties including compressive strength and splitting tensile strength was investigated. The results showed that RPC containing steel fibers provided the best compressive performance. Although, contrary to the expectations, the addition of polyvinyl alcohol fibers did not lead to the desired compressive strength, but it somewhat improved the splitting tensile strength of concrete.

Keywords: Reactive Powder Concrete, Mechanical Behavior, Steel Fiber, PVA Fiber

کد موضوع مقاله: C

خصوصیات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر حاوی الیاف های فولادی و پلی وینیل الکل

رضا پورحسین^۱، مهدی نعمت زاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته سازه، دانشگاه مازندران

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه مازندران

چکیده:

بتن پودری واکنش پذیر نوعی بتن فوق توانمند بر پایه سیمان با ریزساختار متراکم می باشد که از مصالح پودری بسیار ریزدانه تشکیل شده است و دارای مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بسیار بالا می باشد. افزودن الیاف فولادی به این بتن، خصوصیات مکانیکی آن را بهبود خواهد داد و سبب افزایش شکل پذیری و جذب انرژی می گردد. در این تحقیق سعی شده است تا اثر استفاده از الیاف فولادی و پلی وینیل الکل و نیز اثر عمل آوری حرارتی بر روی خواص مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر و نحوه ی ساخت آن بررسی شود. در این راستا، الیاف فولادی موجدار دو سر قلاب کوتاه با روکش برنج و الیاف پلی وینیل الکل با طول کوتاه مورد استفاده قرار گرفت. حداکثر مقدار الیاف فولادی به میزان ۳٪ حجمی و حداکثر مقدار الیاف پلی وینیل الکل به میزان ۰/۷۵٪ حجمی در نظر گرفته شد. نمونه های استوانه ای از بتن پودری واکنش پذیر با بکار بردن این دو الیاف ساخته شده و اثر این الیاف بر روی خواص بتن از جمله مقاومت فشاری و مقاومت کششی بررسی شد. نتایج نشان داد که بتن تهیه شده با الیاف فولادی بهترین عملکرد فشاری را دارا می باشد. افزودن الیاف پلی وینیل الکل به بتن پودری واکنش پذیر، بر خلاف انتظار، منجر به مقاومت فشاری مطلوب نشد ولی مقاومت کششی را تا حدی افزایش داد.

واژه های کلیدی: بتن پودری واکنش پذیر، رفتار مکانیکی، الیاف فولادی، الیاف پلی وینیل الکل

۱- مقدمه

بتن پودری واکنش پذیر^۱ (RPC) با نام تجاری DUCTAL [۱]، نوعی بتن حاوی مواد سیمانی با مقاومت بسیار بالا، تخلخل پایین و شکل پذیری زیاد می باشد و در طبقه بندی شناخته شده به نام بتن با عملکرد فوق العاده بالا شناخته می شوند [۲]. مواد تشکیل دهنده این نوع بتن عبارتند از: سیمان پرتلند، میکروسیلیس، ماسه کوارتزی ریز، کوارتز شکسته، فوق روان کننده، آب و الیاف فولادی [۳-۶].

بتن RPC، برخلاف بتن معمولی حاوی درشتدانه نمی باشد و تنها از پودرهای بسیار ریز همچون ماسه کوارتزی با حداکثر اندازه ذرات ۶۰۰ میکرومتر، کوارتز شکسته با متوسط اندازه دانه ها ۱۰ میکرومتر و میکروسیلیس با متوسط قطر دانه ها ۰/۲ میکرومتر که تمامی این مولفه های پودری در طول واکنش هیدراتاسیون و بعد از آن واکنش می دهند، تشکیل می شود. در واقع حذف کامل درشتدانه ها و جایگزین کردن آن با ذراتی تا قطر ۶۰۰ میکرون منجر به حذف ناحیه انتقال میان چسب سیمان و سنگدانه و بهبود قابل توجه در بسیاری از خواص مکانیکی همچون مقاومت فشاری بسیار بالا در حدود ۲۰۰ مگاپاسکال (حدود ۴ برابر بتن معمولی است)، مقاومت خمشی بیش از ۴۰ مگاپاسکال، مقاومت کششی بین ۶-۱۳ مگاپاسکال و مدول یانگ بیش از ۵۰ گیگاپاسکال می شود. با محدود کردن نسبت آب به سیمان به کمتر از ۰/۲، باید جهت روانی خمیر از فوق روان کننده استفاده شود. تحقیقات ثابت کرده است که با بکار بردن الیاف فولادی مناسب می توان علاوه بر افزایش مقاومت خمشی و کششی، مقاومت فشاری را نیز افزایش داد. می توان بسیاری از خواص RPC را با عمل آوری در حرارت بالا بهبود بخشید و با اعمال فشار قبل و در طول گیرش و خارج کردن هوای محبوس و افزایش تراکم این نوع بتن می توان به مقاومت های بالا دست پیدا کرد [۶-۱۱].

در تحقیق حاضر که در آزمایشگاه بتن دانشکده فنی مهندسی دانشگاه مازندران صورت گرفته است، سعی شده است اثر نوع و مقدار حجمی الیاف فولادی و الیاف پلی وینیل الکل^۲ (PVA) و نیز اثر نوع عمل آوری بر روی خصوصیات مکانیکی همچون مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن RPC حاوی درصد های حجمی مختلف این دو الیاف بررسی گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن الیاف PVA به بتن RPC تاثیر مثبتی بر روی مقاومت فشاری ندارد و مقاومت کششی را کمی افزایش داده است، در حالیکه افزودن ۱٪ و ۳٪ حجمی الیاف فولادی به ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن RPC نسبت به بتن ساده دارد. استفاده از الیاف فولادی و الیاف PVA تا حدی منجر به بهبود نوع شکست همراه با علام هشدار دهنده قبل از شکست نهایی بتن شده است. عمل آوری حرارتی نیز باعث بهبود مقاومت فشاری بتن RPC بخصوص در بتن حاوی الیاف فولادی شده است.

۲- برنامه آزمایش ها

۱-۲- مصالح مصرفی و طرح اختلاط

همانطور که در بخش قبل ذکر شده است، مصالح مصرفی در ساخت RPC شامل سیمان، ماسه سیلیسی، پودر سیلیس، میکروسیلیس، فوق روان کننده، آب و الیاف فولادی می باشد. در این تحقیق، از سیمان پرتلند نوع ۱ محصول کارخانه سیمان فیروزکوه و میکروسیلیس از نا محصول کارخانه صنعتی فرو آلیاژ ایران با مشخصات فیزیکی و شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱، استفاده شده است. ماسه و پودر سیلیس که به ترتیب دارای حداکثر قطر ذرات ۶۰۰ و ۲۰ میکرومتر می باشند، با درجه خلوص بسیار بالا تهیه شده است که مشخصات شیمیایی آنها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نوعی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اثر با چگالی نسبی ۱/۱۲ و درصد مواد جامد در محلول ۴۲٪ با مقدار PH برابر ۷ استفاده شده است. الیاف استفاده شده در این

¹ Reactive Powder Concrete

² Polyvinyl Alcohol

تحقیق شامل الیاف فولادی سینوسی دوسر قلاب و الیاف سنتتیک PVA با مقاومت و مدول بالا می باشد. جدول ۳ مشخصات الیاف مصرف شده و شکل ۱، شکل ظاهری الیاف ها را نشان می دهند.

در این مطالعه، به علت حساسیت شدید بتن RPC به هر تغییر ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی یا توزیع اندازه ذرات اجزای آن، مخلوطی از بتن RPC با توجه به برخی از ترکیبات پیشنهاد شده و منتشر شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۱۸ طراحی شده است [۳، ۵ و ۱۲]. جزئیات طرح اختلاط بتن RPC به صورت نسبت های وزن به وزن سیمان در جدول ۴ ارائه شده است. برای معرفی نمونه ها در جدول ۴، اولین حرف یا حروف پس از RPC نشان دهنده نوع الیاف بکار رفته در بتن می باشد (N، ST و PVA به ترتیب بیانگر عدم وجود الیاف، وجود الیاف فولادی و وجود الیاف PVA می باشند)، عدد پس از آن معرف درصد حجمی استفاده شده از الیاف ها در بتن می باشد. حرف انتهایی در نام نمونه ها نشان دهنده نوع عمل آوری نمونه ها می باشد (C و H به ترتیب بیانگر عمل آوری استاندارد و عمل آوری با آب گرم می باشد).

در این مطالعه مخلوط هایی از بتن RPC با کسرهای حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ از الیاف فولادی و ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ از الیاف PVA ساخته شد، تا اثر عواملی همچون اثر نوع و حجم الیاف و نیز اثر نوع عمل آوری بر روی مقاومت فشاری، مقاومت کششی بتن RPC مورد بررسی قرار گیرد. به منظور کاهش خطا در گزارش نتایج، از هر طرح اختلاط به تعداد ۴ نمونه بتنی ساخته شد. نمونه های بتنی ساخته شده در این تحقیق، شامل نمونه های استوانه ای با قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی می باشد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی و فیزیکی مصالح سیمانی

ترکیبات شیمیایی	مصالح سیمانی	
	سیمان	میکروسیلیس
	%	%
SiO ₂	۲۰/۶	۹۰-۹۵
Al ₂ O ₃	۴/۸۶	۰/۶-۱/۲
Fe ₂ O ₃	۳/۳۷	۰/۳-۱/۳
CaO	۶۳/۵۶	۰/۵-۱/۵
MgO	۲/۱۸	۰/۵-۲
SO ₃	۲/۳	-
Na ₂ O	۰/۳۳	۰/۳-۰/۵
K ₂ O	۰/۵۴	۰/۳-۰/۵
C	-	۰/۲-۰/۴
S	-	۰/۰۴-۰/۰۸
MnO	-	۰/۰۲-۰/۰۷
P ₂ O ₅	-	۰/۴۰
L.O.I.	۲/۲	۰/۴-۳
I.R.	۰/۴۷	-
F.CaO	۱/۴۶	-
خصوصیات فیزیکی	سیمان	میکروسیلیس
Specific gravity (gr/cm ³)	۳/۰۷	۱/۹
Specific surface (m ² /g)	۳۱۲۰	۲۰-۲۵

Initial setting time (min)	۱۴۰	-
Final setting time (min)	۱۹۰	-
Autoclave Expansion %	۰/۰۷	-
Bulk density (kg/m ³)	-	۳۰۰-۵۰۰

جدول ۲: خصوصیات ماسه و پودر سیلیس

ترکیبات شیمیایی	مصالح	ماسه سیلیسی	پودر سیلیس
		%	%
SiO ₂		۹۹/۲	۹۹/۰۳
Fe ₂ O ₃		۰/۵	۰/۰۷
Al ₂ O ₃		۰/۰۳	۰/۰۴
CaO		۰/۰۳	۰/۴۸
MgO		۰/۰۰	۰/۱۵
Na ₂ O		۰/۰۶	۰/۰۰۵
K ₂ O		۰/۰۰	۰/۰۱
SO ₃		۰/۰۰	۰/۰۰۷
TiO ₂		۰/۰۱	-
P ₂ O ₅		۰/۰۱	-
LOI		۰/۱۳	۰/۴

جدول ۳: مشخصات الیاف ها

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	مقاومت کششی نهایی (MPa)
فولادی	۲۵	۰/۷۰	۱۱۴۰
پلی وینیل الکل	۶	۰/۰۱۱۴	۹۶۶



(ب)

(الف)

شکل ۱: شکل ظاهری الیاف استفاده شده (الف) الیاف فولادی. (ب) الیاف پلی وینیل الکل

جدول ۴: طرح اختلاط بتن های RPC

نام طرح / مصالح	سیمان	میکروسیلیس	ماسه سیلیسی	پودر سیلیس	فوق روان کننده	الیاف فولادی	الیاف پلی وینیل الکل	آب*
RPC/N/H	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	-	-	۰/۲۲
RPC/N/C	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	-	-	۰/۲۲
RPC/ST1/H	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	۰/۰۸۴	-	۰/۲۲
RPC/ST2/H	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	۰/۱۶۹	-	۰/۲۲
RPC/ST3/H	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	۰/۲۶۲	-	۰/۲۲
RPC/ST3/C	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	۰/۲۶۲	-	۰/۲۲
RPC/PVA0.25/H	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	-	۰/۰۰۴	۰/۲۲
RPC/PVA0.5/H	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	-	۰/۰۰۷	۰/۲۲
RPC/PVA0.75/H	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	-	۰/۰۱۰	۰/۲۲
RPC/PVA0.75/C	۱	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۰/۰۳۲	-	۰/۰۱۰	۰/۲۲
*W/B = 0.18								

۲-۲- تهیه نمونه های آزمایشی

از آن جا که بتن RPC از مصالح بسیار ریزدانه تشکیل می شود، روش اختلاط مرسوم و قدیمی مناسب نمی باشد. ترتیب مخلوط کردن بتن RPC بر اساس مطالعات گذشته ای انجام شده [۴، ۸ و ۱۲]، به شرح زیر می باشد.

ابتدا تمام اجزای خشک به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط می شوند، سپس آب و فوق روان کننده که از قبل با هم مخلوط شده بودند به آرامی در مدت زمان ۱ دقیقه به مخلوط اضافه می گردد. بعد از ۴ دقیقه زمانی که مخلوط به نوعی ثبات پلاستیکی و یکنواختی رسید، الیافی که از قبل توسط دست از یکدیگر جدا شده اند به داخل مخلوط پاشیده می شوند. سپس اجازه داده می شود به منظور اطمینان از مخلوط شدن کامل الیاف در ترکیب، اختلاط تا ۲ دقیقه دیگر ادامه یابد. کل زمان روند اختلاط حدود ۱۱-۱۳ دقیقه می باشد و اختلاط توسط میکسر افقی پن تایپ با حجم ۰/۰۲ متر مکعب، انجام شده است.

بعد از اتمام اختلاط بتن RPC، بتن در ۲ لایه به داخل قالب ها ریخته می شوند. به منظور متراکم سازی نمونه های بتنی حاوی الیاف فولادی از میله کوبنده دستی با سطح مقطع مربعی شکل استفاده شده است. برای متراکم سازی و خارج کردن حباب های هوای محبوس شده در نمونه های حاوی الیاف PVA، از میز لرزه استفاده شده است.

نمونه های استوانه ای به مدت ۲۴ ساعت درون قالب و زیر پوشش نفوذ ناپذیر قرار گرفتند و به مدت حداقل ۲۸ روز به یکی از دو روش زیر عمل آوری شدند:

- سه روز در آب °C ۹۰ و سپس در آب °C ۲۰ تا روز آزمایش

- قرار دادن نمونه ها در یک مخزن حاوی آب آهک با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد تا روز آزمایش

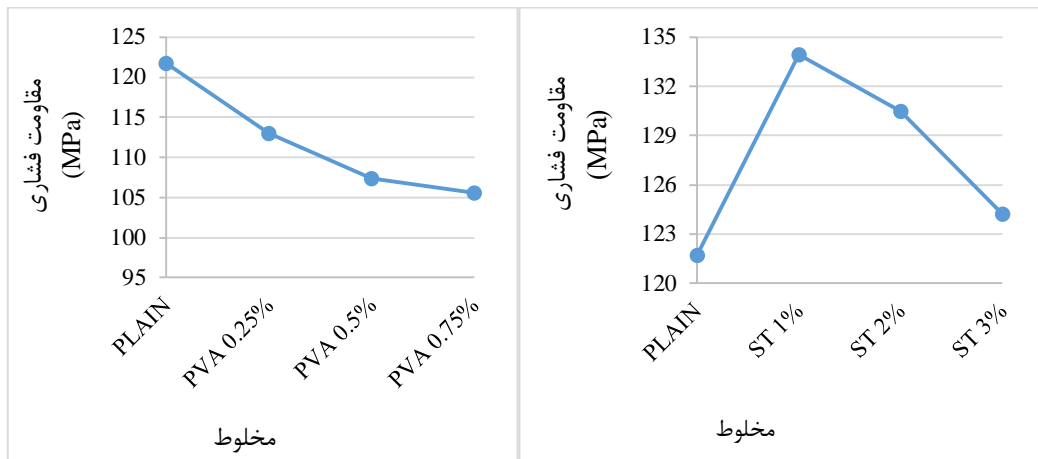
۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتنی پس از حداقل ۲۸ روز مراقبت و نگهداری به ترتیب بر اساس استاندارد ASTM C39 [۱۳] بر روی گروه‌های مختلف نمونه های بتنی انجام شده است و میانگین نتایج حاصله گزارش شده است. مقاومت فشاری نمونه های بتن RPC در شکل ۲ و جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، الیاف فولادی توانسته است مقاومت فشاری بتن را بهبود ببخشد در حالیکه الیاف PVA منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است. بتن RPC حاوی الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪ و ۲٪ و ۳٪ به ترتیب ۱۰٪ و ۷٪ و ۲٪ مقاومت فشاری را بهبود می بخشد که بیشترین بازدهی در درصد حجمی ۱٪ حاصل می شود. علت کاهش بهبود در مقاومت فشاری در مقادیر بالای حجم الیاف، افزایش تخلخل بتن و منقطع شدن چسب سیمان از مصالح سنگی می باشد. در بتن حاوی الیاف PVA، بیشترین افت مقاومت فشاری در ۷۵٪ رخ می دهد که به میزان ۱۳٪ می باشد. شاید بتوان گفت که علت کاهش مقاومت فشاری در بتن حاوی PVA، طول کوتاه الیاف، عدم اختلاط مناسب آن در مخلوط و در نتیجه تخلخل بالا و ناهمگن بودن نمونه های ساخته شده با آن می باشد. البته می توان در برخی مواقع برای ساخت بتن با الیاف سنتتیک از نوعی افزودنی‌ها جهت تسهیل اختلاط این نوع الیاف‌ها بکار برد که در این تحقیق مورد استفاده قرار نگرفته است.

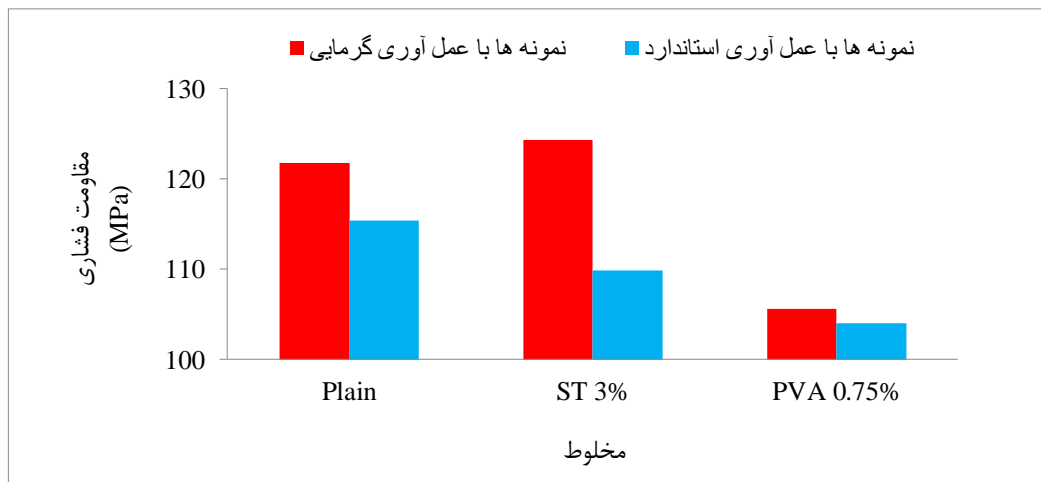
جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن های RPC

مقاومت نام طرح	مقاومت فشاری	مقاومت کششی
	(MPa)	(MPa)
RPC/N/H	۱۲۱/۷۴	۸/۵۶
RPC/N/C	۱۱۵/۳۲	-
RPC/ST1/H	۱۳۳/۹۳	۱۱/۰۳
RPC/ST2/H	۱۳۰/۴۹	۱۲/۴۹
RPC/ST3/H	۱۲۴/۲۵	۱۳/۳۸
RPC/ST3/C	۱۰۹/۸۶	-
RPC/PVA0.25/H	۱۱۳/۰۰	۸/۶۷
RPC/PVA0.5/H	۱۰۷/۴۱	۸/۲۷
RPC/PVA0.75/H	۱۰۵/۵۹	۸/۰۰
RPC/PVA0.75/C	۱۰۴/۰۲	-



شکل ۲: مقاومت فشاری نمونه های بتنی RPC

در این مطالعه به منظور بررسی اثر عمل آوری حرارتی بر روی مقاومت فشاری بتن RPC، نتایج نمونه‌های RPC شامل بتن؛ بدون الیاف، بتن با ۳٪ الیاف فولادی و بتن با ۰.۷۵٪ الیاف PVA در شکل ۳ با یکدیگر مقایسه شده اند. همانطور که در شکل مشاهده می گردد، عمل آوری حرارتی باعث بهبود مقاومت فشاری بتن RPC شده است. علت این افزایش مقاومت فشاری، تسریع در فرآیند هیدراسیون مواد سیمانی در دمای بالا و تشکیل ساختار چسب متراکم می باشد. بیشترین درصد افزایش مقاومت بتن RPC ناشی از عمل آوری حرارتی مربوط به نمونه های مکعبی حاوی ۳٪ الیاف فولادی و کمترین افزایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های حاوی ۰.۷۵٪ الیاف PVA است که به ترتیب ۳۷/۳٪ و ۱/۵٪ می باشد.

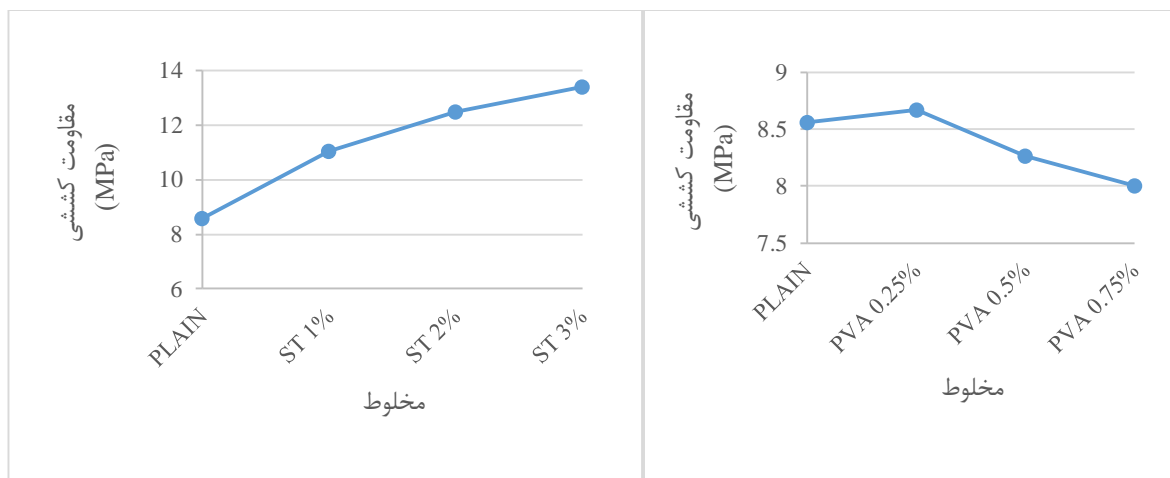


شکل ۳: نمودار اثر عمل آوری بر مقاومت فشاری بتن RPC

۳-۲- مقاومت کششی

آزمایش غیرمستقیم مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496 [۱۴] پس از حداقل ۲۸ روز عمل آوری بر روی گروه های نمونه های استوانه ای انجام شده است و نتیجه با میانگین گیری از نتایج حاصله گزارش شده است. نتایج مقاومت کششی شکافت نمونه های بتن RPC در شکل ۴ و جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از الیاف ها، به خصوص الیاف فولادی به دلیل وجود الیاف در ماتریس سیمانی شکننده، موجب کاهش عرض ترک خوردگی و پخش ریزترک ها و در نتیجه افزایش مقاومت کششی شکافت می شود. مطابق شکل ۴ و جدول ۵، استفاده از الیاف فولادی مقاومت کششی بتن RPC را به طور قابل توجهی تا میزان ۵۶٪ در کسر حجمی ۳٪ افزایش داده است درحالیکه استفاده از الیاف PVA منجر به یک افزایش مقاومت کششی ۱٪ در کسر حجمی ۲۵٪ شده است و با افزایش حجم الیاف، مقاومت کششی کاهش می یابد که مقدار آن ۶/۵٪ در کسر حجمی ۷۵٪ می باشد.

باید توجه داشت که الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق به دلیل شکل موجدار و انتهای قلابدار، گیرداری محکمی در بتن تحت تنش های کششی ایجاد می کند و باعث جلوگیری از انتشار ترکهای پیوسته می شود؛ در نتیجه مقاومت کششی بطور قابل توجهی افزایش می یابد. این در حالی است که الیاف PVA با توجه به نسبت ظاهری بالای آن، پیوستگی و چسبندگی قابل توجهی در مخلوط بتنی ایجاد می کند که به طور موثر مانع گسترش میکروتترکها در مراحل اولیه بارگذاری شده اما قادر به تحمل تنش های کششی ایجاد شده به علت قطر کوچک آن نمی باشد. در نتیجه اثر قابل ملاحظه ای بر مقاومت کششی ندارد. هرچند، طول کوتاه الیاف PVA می تواند از علل دیگر عدم بهبود مقاومت کششی در بتن RPC باشد.



شکل ۴: نمودار مقاومت کششی بتن RPC

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر استفاده از الیاف فولادی و الیاف PVA بر خواص بتن RPC شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، اثر عمل آوری حرارتی روی خصوصیات بتن RPC ارزیابی شد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در این تحقیق، نتایج زیر می تواند حاصل شود:

- افزودن الیاف PVA به بتن RPC تاثیر مثبتی بر روی مقاومت فشاری ندارد، در حالیکه افزودن ۱٪ حجمی الیاف فولادی بیشترین تاثیر را بر روی مقاومت فشاری بتن RPC به مقدار ۱۰٪ افزایش نسبت به بتن ساده دارد.

- ۲- مقاومت کششی بتن RPC با افزون الیاف فولادی افزایش می یابد بطوریکه در نمونه حاوی ۳٪ الیاف فولادی یک افزایش ۵۶٪ مشاهده شد. همچنین، الیاف PVA تاثیر بسزایی بر روی مقاومت کششی بتن RPC نداشت بطوریکه حداکثر افزایش مقاومت کششی به میزان ۱۲٪ در کسر حجمی ۰/۲۵٪ الیاف رخ داده است.
- ۳- عمل آوری حرارتی باعث بهبود مقاومت فشاری بتن RPC بخصوص در بتن حاوی الیاف فولادی شده است. بیشترین درصد افزایش مقاومت فشاری ناشی از عمل آوری حرارتی مربوط به نمونه‌های مکعبی حاوی ۳٪ الیاف فولادی به میزان ۳۷/۳٪ می باشد.
- ۴- بطور کلی شکست بتن RPC ترد و شکننده می‌باشد. استفاده از الیاف فولادی، الیاف PVA و الیاف ترکیبی تا حدی منجر به بهبود نوع شکست همراه با علام هشدار دهنده قبل از شکست نهایی بتن شده است.

۵- مراجع

1. Rebentrost M, Cavill B. Reactive powder concrete bridges. In: Austroads 6th bridge conference: bridging the gap. Perth, Western Australia, Australia; 2006. p. 1-11.
2. Sahani, B. S., & Ray, N. H. S. (2014). A Comparative Study of Reactive Powder Concrete (RPC) and Ordinary Portland Cement (OPC) by Ultra High Strength Technology
3. Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 25(7), 1501-1511.
4. Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, É., Dugat, J., & Aïtcin, P. C. (1997). Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. *ACI Materials journal*, 94(4), 286-290.
5. Cheyrezy, M., Maret, V., & Frouin, L. (1995). Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete). *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1491-1500.
6. Roux, N., Andrade, C., & Sanjuan, M. A. (1996). Experimental study of durability of reactive powder concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(1), 1-6.
7. Tam, C. M., Tam, V. W., & Ng, K. M. (2012). Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 26(1), 79-89.
8. Chan, Y. W., & Chu, S. H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1167-1172.
9. Richard, P., & Cheyrezy, M. H. (1994). Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. *Special Publication*, 144, 507-518.
10. Bayard, O., & Ple, O. (2003). Fracture mechanics of reactive powder concrete: material modelling and experimental investigations. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(7), 839-851.
11. Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, C. (۲۰۰۲). *Design and Control of Concrete Mixtures*. : portland cement Association.
12. Shaheen, Ehab, and Nigel G. Shrive. "Optimization of mechanical properties and durability of reactive powder concrete." *ACI Materials Journal* 103.6 (2006): 444-451.

13. ASTM C39 / C39M - 12 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
14. ASTM C496 / C496M – 11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.