

بررسی اثر نوع الیاف بر خواص بتن پودری واکنش‌پذیر

لیلا معراجی^۱، حسن افشین^{۲*}، کریم عابدی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۵/۲/۵ پذیرش ۹۵/۹/۷

چکیده

بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) که در زمره بتن‌های فوق توانمند (UHPC) قرار دارد دارای مقاومت فشاری زیاد، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری قابل ملاحظه، نفوذپذیری کم و دوام بسیار بالا می‌باشد. به کار بردن الیاف در بتن RPC نقش اساسی در افزایش مقاومت خمشی و شکل‌پذیری آن دارد؛ به طوری که در برخی موارد مقاومت خمشی آن حتی به ۴۰ MPa نیز رسیده است. در این تحقیق که در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام شده است، تأثیر به کار بردن سه نوع الیاف شامل الیاف کربن ریز و دو نوع الیاف فولادی قلاب‌دار بلند و مستقیم کوتاه بر خواص بتن پودری واکنش‌پذیر مورد مطالعه قرار گرفته است و اثر این الیاف بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی خمشی و چقرمگی و یا ظرفیت جذب انرژی کرنشی کل آن بررسی شده است. نتایج بیانگر آن هستند که افزودن الیاف فولادی به بتن RPC، بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری و کششی خمشی آن دارد. الیاف فولادی قلاب‌دار، تقریباً ۱۰٪ و الیاف فولادی کوتاه، حدود ۹٪، مقاومت فشاری را افزایش دادند. در این میان، تأثیر الیاف فولادی قلاب‌دار بر مقاومت کششی خمشی و ظرفیت جذب انرژی کرنشی کل، قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. افزودن الیاف کربن سبب کاهش اندکی در مقاومت فشاری و کششی خمشی بتن RPC شد؛ ولی ظرفیت جذب انرژی کل آن را تا حدی بهبود بخشید.

واژگان کلیدی: بتن پودری واکنش‌پذیر، الیاف، مقاومت فشاری، مقاومت کششی خمشی، ظرفیت جذب انرژی کرنشی کل.

۱- مقدمه

راحتی قابل دسترس یا قابل کنترل در هنگام مصرف نبودند تا این که بتن‌های فوق توانمند^۳ معرفی شدند و در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. در سال ۱۹۹۵، Richard و Cheyrezy [۵] بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) را به عنوان نوعی بتن فوق توانمند معرفی کردند. بتن پودری واکنش‌پذیر بتنی است با مقاومت فشاری بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال و با تخلخل بسیار پایین. دوام و خواص مکانیکی این نوع بتن به دلیل ترکیب همگن آن است که از دلایل آن، جایگزینی درشت‌دانه‌ها با ماسه سیلیسی بسیار ریز و پودر کوارتز (پودر سیلیس) می‌باشد. همچنین از دیگر مشخصات ترکیب این نوع بتن، استفاده از میکروسیلیس، مصرف مقدار قابل توجه سیمان، نسبت آب به سیمان پایین و متعاقباً استفاده از مقدار زیادی فوق روان‌کننده می‌باشد [۵-۹]. مقدار میکروسیلیس در نقش بهبود دهنده خواص بتن و پرکننده حفرات به منظور کاهش تخلخل، می‌تواند بین ۲۵ تا ۳۰ درصد سیمان مصرفی باشد [۱۰-۱۳]. همچنین برای افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی در این نوع بتن،

در دهه‌های مختلف، محققین 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 دهه ۱۹۸۰، مواد سیمانی اصلاح شده با پلیمر^۱ (MDF) معرفی شدند [۳]. این مواد مقاومتری بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال داشتند.

Bache [۴] نوعی ماده 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

3- Ultra-high-performance concrete
4- Reactive powder concrete

1- Macro-defect-free
2- Densified small particles

مورد استفاده قرار گرفته است. میکروسیلیس به کار رفته، میکروسیلیس ازنا، محصول کارخانه صنعتی فروآلیاژ ایران با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) می باشد. پودر سیلیس از ملایر تهیه شده و طبق گزارش کارخانه دارای بیش از ۹۹٪ سیلیس بوده و ذرات آن به طور متوسط کمتر از ۱۰ میکرومتر می باشند. ماسه سیلیسی مصرفی، در سیرجان تولید شده و اندازه بزرگترین ذرات آن ۷۰۰ میکرومتر بوده و حاوی ۸۵ تا ۹۰ درصد سیلیس می باشد. همچنین نوعی فوق روان کننده با پایه پلی کربکسیلات اثر و با چگالی نسبی ۱/۱۲ و مقدار PH برابر ۷ به کار رفته است. آب مصرفی، آب شرب دانشگاه سهند می باشد. دو نوع الیاف فولادی شامل الیاف قلاب دار بلند و الیاف مستقیم کوتاه و همچنین نوعی الیاف کربن که در آزمایشگاه به طول تقریباً ۷ میلی متر بریده شده اند، به کار رفته اند. شکل (۱)، نمونه هایی از الیاف مصرفی، جدول (۲) مشخصات الیاف و شکل ۲، منحنی های رفتاری آن ها را نشان می دهند. در تهیه بتن RPC با الیاف کربن، مقدار مصرف این الیاف، ۲/۵٪ وزن سیمان مصرفی در نظر گرفته شده و مقدار مصرف الیاف فولادی کوتاه و قلاب دار به ترتیب در حدود ۲/۵٪ و ۲٪ حجمی می باشد. با توجه به طول الیاف فولادی قلاب دار و ابعاد قالب ها، مقدار این نوع الیاف، کمتر در نظر گرفته شده است. در جدول (۳)، نسبت های وزنی اختلاط بتن های تهیه شده با الیاف مختلف ارائه شده اند.

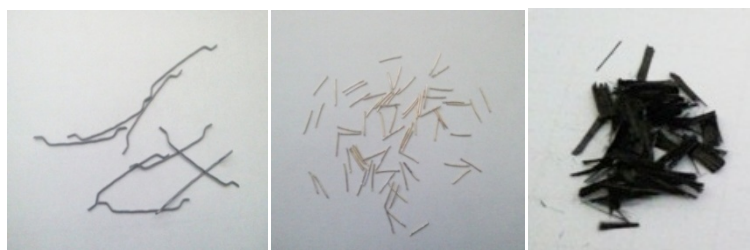
در استفاده از الیاف کربن اشاره به این نکته ضروری است که این الیاف در کارخانه به نوعی مواد چسبی آغشته می شوند تا از تابیدگی و چسبیده شدن الیاف به هم جلوگیری به عمل آید. قبل از به کار بردن این الیاف در بتن، حرارت دادن آن ها منجر به پلیمریزاسیون و تجزیه این مواد چسبی می شود که به نظر می رسد این عمل، مانع از عدم چسبندگی بین الیاف و بتن شود [۲۲]. در این تحقیق به منظور اطمینان از این گمان، الیاف کربن بعد از بریده شدن به طول های کوچک تر، به مدت ۴۰ دقیقه در کوره در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند.

الیاف به ترکیب آن افزوده می شوند. RPC بدون الیاف شکننده می باشد. مطالعات مختلفی بر روی انواع جنس الیاف، ابعاد و اشکال آن ها انجام شده است [۱۴، ۱۵]. تحقیقات نشان داده اند که الیاف فولادی به طور قابل ملاحظه ای مشخصات مکانیکی RPC را بهبود می بخشد؛ ولی الیاف پروپیلن و شیشه ای به دلیل مقاومت کم خود، مقاومت ها را افزایش نمی دهند [۱۶]. با افزایش مقدار الیاف فولادی از ۰٪ تا ۵٪، مقاومت کششی RPC به صورت خطی افزایش یافت [۱۷]. جهت کاهش مقدار الیاف مصرفی و در عین حال دستیابی به عملکرد مطلوب، ترکیب دو یا سه نوع مختلف الیاف فولادی استفاده شد [۱۸، ۱۹]. اثر ترکیب الیاف ریز و درشت بر روی عملکرد خمشی RPC توسط Kim و همکاران [۲۰] انجام شد و نتایج تحقیق نشان داد که با ترکیب ۱٪ الیاف فولادی ریز و ۱٪ الیاف فولادی درشت، ظرفیت جذب انرژی و ظرفیت تغییر شکل، ۴۵/۴-۷۵/۹٪ و ۶۷/۹٪-۴۸/۷ بیش تر از مقادیر آن با ۲٪ الیاف ریز بود. در این تحقیق که در آزمایشگاه بتن و ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی سهند تبریز صورت گرفته است، بتن پودری واکنش پذیر با استفاده از مصالح موجود در کشور و با استفاده از الیاف مختلف فولادی و کربن، تهیه شده و اثر این الیاف بر مقاومت فشاری و خواص خمشی آن بررسی شده است.

۲- برنامه آزمایش ها

۲-۱- مصالح مصرفی و طرح اختلاط

همان طور که قبلاً اشاره شد، مصالح مصرفی در ساخت RPC شامل سیمان، ماسه سیلیسی، پودر سیلیس، میکروسیلیس، فوق روان کننده، الیاف و آب می باشند. مصالح و طرح اختلاط به کار رفته در تحقیق حاضر، بر اساس نتایج تحقیق قبلی صورت گرفته توسط نویسندگان می باشند [۲۱]. سیمان پرتلند نوع ۱ محصول کارخانه سیمان شهرکرد، با مشخصات فیزیکی و شیمیایی نشان داده شده در جدول (۱)،



(ج)

(ب)

(الف)

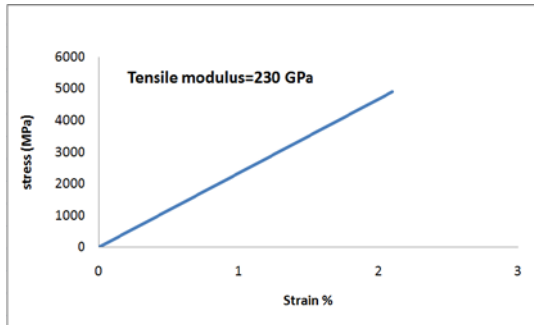
شکل ۱- تصاویر الیاف: (الف) الیاف کربن ریز شده، (ب) الیاف فولادی، (ج) الیاف فولادی قلاب دار

جدول ۱- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان و میکروسیلیس (ترکیبات شیمیایی بر حسب درصد وزنی عناصر می باشند)

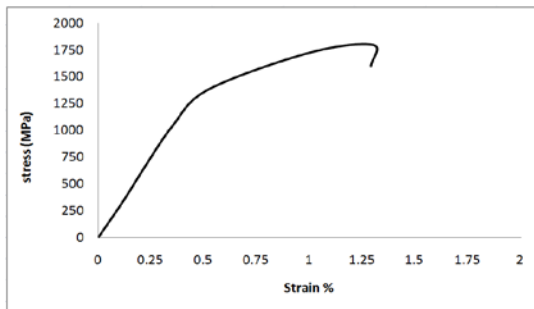
مشخصات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	C	Na ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	S	CaO	بلین (cm ² /gr)	سطح ویژه (m ² /gr)
سیمان	۲۰/۷-۲۱/۱	۵/۱-۵/۴	۳/۸-۳/۹۵	-	-	-	≤۱/۶۵	-	۶۵-۶۵/۴	≥۳۲۰۰	-
میکروسیلیس	۹۰-۹۵	۰/۶-۱/۲	۰/۳-۱/۳	۰/۲-۰/۴	۰/۳-۰/۵	۰/۲-۰/۵	۰/۵-۲	۰/۰۴-۰/۰۸	۰/۵-۱/۵	-	۲۰-۲۵

جدول ۲- مشخصات الیاف به کار رفته

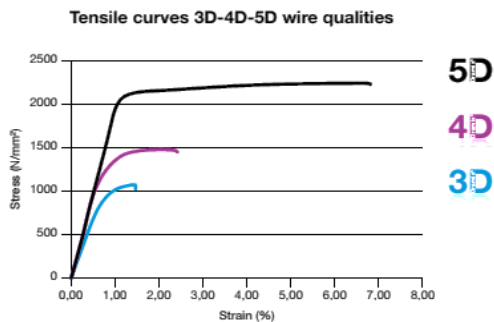
نوع الیاف	کربن	فولادی مستقیم کوتاه	فولادی قلابدار بلند
طول (mm)	۷	۵	۳۶
قطر (mm)	-	۰/۴	۰/۸
مقاومت کششی نهایی (MPa)	۴۹۰۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰
نسبت ظاهری (طول / قطر)	-	۱۲/۵	۴۵
چگالی	۱/۸۱	۷/۸۵	۷/۸۵



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- منحنی‌های تنش-کرنش الیاف: (الف) الیاف کربن، (ب) الیاف فولادی کوتاه، (ج) الیاف فولادی قلابدار (در این تحقیق، از الیاف نوع 3D استفاده شده است).

جدول ۳- نسبت‌های اختلاط بتن‌های RPC دارای الیاف و بدون

الیاف (بر حسب وزن سیمان)

مصالح	بدون الیاف	با الیاف کربن	با الیاف فولادی کوتاه	با الیاف فولادی قلابدار
سیمان	۱	۱	۱	۱
میکروسیلیس	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
ماسه سیلیسی	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱
پودر سیلیس	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱
فوق‌روان‌کننده	۰/۰۴۷	۰/۰۸۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۱
W/C	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳
الیاف	-	۰/۰۲۵	۰/۲۳	۰/۱۸
درصد حجمی الیاف (%)	-	۱/۰۷	۲/۵	۲

آزمایش مقاومت فشاری با الیاف کربن حرارت دیده و حرارت ندیده انجام شد و نتایج نشان از بهبود مقاومت در الیاف کربن حرارت دیده، داشت (مقاومت فشاری در آزمون با الیاف کربن حرارت دیده، ۱۴۹ مگاپاسکال (شکل (۲)) و در آزمون با الیاف کربن حرارت ندیده، ۱۲۵ مگاپاسکال بود).

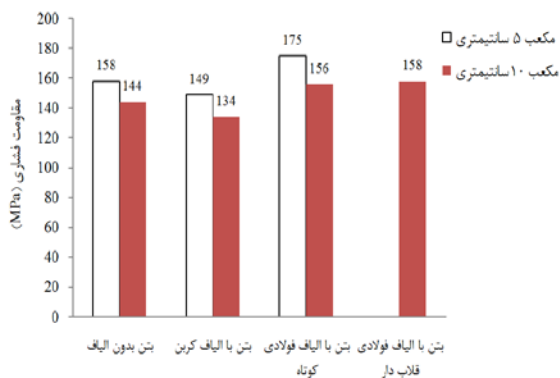
۲-۲- تهیه آزمون‌ها

برای اختلاط بتن RPC، یک مخلوط‌کن تاوهای^۱ با ظرفیت مفید ۳۵ لیتر مورد استفاده قرار گرفت. در تهیه آزمون‌هایی با الیاف فولادی، ابتدا مواد به صورت خشک

اختلاط بود که جهت کسب روانی کافی، مجبور به استفاده از مقدار بیشتری فوق روان کننده گردید و به دلیل افزودن تدریجی فوق روان کننده، مدت زمان اختلاط طولانی تر شد و احتمالاً این امر در کیفیت بتن تهیه شده اثر گذاشته است.

در مقابل با افزودن ۲/۵٪ حجمی الیاف فولادی کوتاه، مقاومت فشاری بدون تأثیرپذیری از ابعاد، حدود ۹٪ نسبت به مقاومت فشاری آزمونهای بدون الیاف افزایش یافته است. آزمون بتن RPC دارای الیاف فولادی کوتاه و با عمل آوری حرارتی در بعد ۵ سانتی متر، بهترین نتیجه را از لحاظ مقاومت فشاری (۱۷۵ مگاپاسکال) دارا می باشد. در آزمونهایی با ۲٪ حجمی الیاف قلاب دار، این نسبت افزایش، ۱۰٪ می باشد. این نرخ مشابه در افزایش یا کاهش مقاومت فشاری (منظور، بدون تأثیرگذاری ابعاد) که با افزودن الیاف حاصل شده است، بیانگر این نکته می باشد که توزیع الیاف تأثیر قابل ملاحظه ای بر مقاومت فشاری ندارد حتی اگر قالبهای مکعبی در ابعاد مختلف استفاده شوند.

به علاوه، نتایج با ابعاد آزمونها (در هر دو مورد آزمونهای بدون الیاف و با الیاف) مرتبط است. همان طور که انتظار می رفت مقاومت فشاری در آزمونهایی با ابعاد کوچک تر، مقدار بیشتری دارد. همچنان که در شکل (۳) مشاهده می شود، برای تمامی انواع بتن (بدون الیاف و با الیاف به جز آزمونهایی با الیاف قلاب دار)، نسبت مقاومت فشاری آزمونهای مکعبی ۱۰ cm به مقاومت فشاری آزمونهای مکعبی ۵ cm حدوداً بین ۸۹ تا ۹۱ درصد می باشد.



شکل ۳- مقاومت فشاری آزمونهای مکعبی ۵ و ۱۰ سانتی متری

(سیمان، میکروسیلیس، ماسه سیلیسی و پودر سیلیس) به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. سپس نصف آب و نصف فوق روان کننده اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه دیگر مخلوط گردیدند. در ادامه بقیه آب و فوق روان کننده افزوده شده و ۵ دقیقه دیگر مخلوط شدند. در نهایت الیاف فولادی به تدریج در مخلوط پخش شده و اختلاط به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه دیگر ادامه داشت تا زمانی که مخلوط، روانی کافی را یافت. در تهیه بتن با الیاف کربن روش اختلاط متفاوت بود، بدین صورت که بعد از اختلاط مواد خشک به مدت ۵ دقیقه، الیاف کربن به آن ها اضافه شده و ۵ دقیقه دیگر مخلوط شدند. سپس آب و فوق روان کننده، تدریجاً به مخلوط افزوده شده و اختلاط تا زمان کسب روانی کافی ادامه یافت. در تهیه RPC با الیاف کربن، همان طور که در جدول (۳) نیز مشاهده می شود، فوق روان کننده بیشتری جهت دستیابی به روانی قابل قبول، به کار رفته است. بتن ها بدون نیاز به ویرنه در قالبها ریخته شدند. سه آزمون مکعبی در هر کدام از ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متر و ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر برای آزمایش مقاومت فشاری و سه آزمون منشوری در ابعاد ۷/۵×۷/۵×۳۴ سانتی متر برای سنجش مقاومت کششی خمشی تهیه شدند. به دلیل نبود قالب در ابعاد دیگر، اندازه نمونه های خمشی تغییر داده نشد. لازم به ذکر است که با توجه به ابعاد الیاف قلاب دار، از بتن RPC حاوی این الیاف، آزمون مکعبی ۵×۵×۵ سانتی متری تهیه نگردید. همه آزمونها، به مدت ۴۸ ساعت درون قالب و زیر پوشش نفوذناپذیر قرار گرفتند. آزمونها بعد از درآوردن از قالب، سه روز در آب ۹۰ درجه سانتی گراد عمل آوری حرارتی شده و سپس ۲۳ روز در آب ۲۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند.

۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث

۳-۱- بررسی مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری آزمونهای بدون الیاف و با الیاف در جدول (۴) ارائه شده است. همچنان که در این جدول مشاهده می شود افزودن الیاف کربن به آزمونهای RPC، تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری ندارد. مقاومت فشاری آزمونهای با الیاف کربن، نسبت به آزمونهای بدون الیاف و بدون تأثیرپذیری از ابعاد آزمونها، ۶ تا ۷ درصد کاهش یافته است. شاید بتوان گفت دلیل این کاهش، مشکل بودن کار با الیاف کربن در حین

جدول ۴- مقاومت فشاری آزمون‌های بدون الیاف و با الیاف (MPa)

الیاف فولادی قلاب‌دار	الیاف فولادی کوتاه	الیاف کربن	بدون الیاف		ابعاد آزمون‌ها
-	۱۷۵	۱۴۹	۱۵۸	f_c	مکعب ۵×۵×۵ cm
-	۱/۱	۰/۹۴		f_c آزمون‌ه بالیاف f_c آزمون‌ه بدون الیاف	
۱۵۸	۱۵۶	۱۳۴	۱۴۴	f_c	مکعب ۱۰×۱۰×۱۰ cm
۱/۱	۱/۰۸	۰/۹۳		f_c آزمون‌ه بالیاف f_c آزمون‌ه بدون الیاف	



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

۳-۲- بررسی رفتار خمشی

آزمایش خمش توسط دستگاه UTM^۱ و به صورت روش کنترل تغییر مکان که قابلیت رصد اطلاعات تا مرحله نهایی شکست و گسیختگی را دارد، انجام شده است. جهت سنجش مقاومت کششی خمشی بتن‌ها از روش ASTM C1609/C 1609M [۲۳] استفاده شده است. شکل (۴) یک آزمون‌ه را تحت آزمایش خمش نشان می‌دهد. همچنین نحوه شکست آزمون‌ه‌ها تحت بارگذاری خمشی در شکل (۵) نمایش داده شده است. در آزمون‌ه‌های بدون الیاف، گسترش ترک، آنی و سریع بود و شکست بلافاصله بعد از به وجود آمدن اولین ترک رخ داد، 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 تأخیر انداخته و طاقت خمشی یا چقرمگی^۲ بتن را افزایش دادند، این مسأله به ویژه در آزمون‌ه‌هایی با الیاف فولادی و به خصوص الیاف فولادی قلاب‌دار بیشتر مشهود بود.



شکل ۴- آزمون‌ه تحت آزمایش خمش

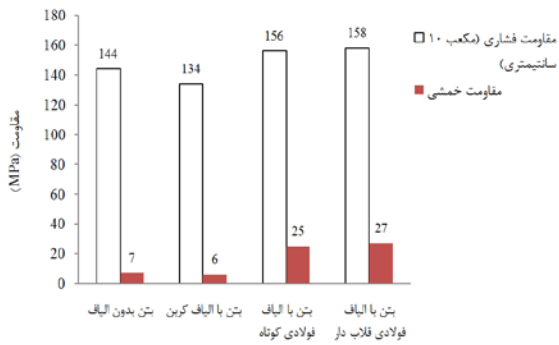
شکل ۵- شکست آزمون‌ه‌های خمشی: الف) بدون الیاف، ب) با

الیاف کربن، ج) با الیاف فولادی کوتاه، د) با الیاف فولادی

قلاب‌دار

6- Universal testing machin

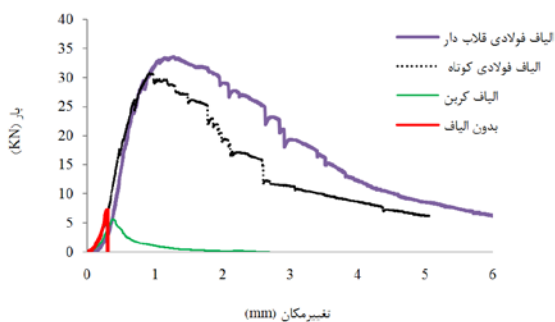
7- Toughness



شکل ۷- مقاومت فشاری و کششی خمشی آزمون‌های بدون الیاف و با الیاف

۳-۳- بررسی ظرفیت جذب انرژی کرنشی کل

نمودارهای بار- تغییر مکان آزمون‌ها در آزمایش خمش در شکل (۸) ارائه شده‌اند. مساحت زیر این نمودارها بیانگر مقدار جذب انرژی کرنشی کل یا چقرمگی می‌باشد. همان طور که انتظار می‌رفت افزودن الیاف سبب افزایش جذب انرژی شده است. شکل (۹) مقدار سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان آزمون‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل اثر قابل ملاحظه الیاف فولادی بر میزان جذب انرژی کرنشی کل بتن RPC ملاحظه می‌شود به طوری که مقدار آن در آزمون‌هایی با الیاف فولادی قلاب‌دار نسبت به آزمون‌های بدون الیاف، حدود ۱۳۰ برابر شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که هر چند الیاف فولادی تأثیر اندکی در بهبود مقاومت فشاری بتن RPC دارند، ولی مقاومت کششی خمشی و میزان جذب انرژی کرنشی کل آن را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. همچنین با این که مقاومت کششی خمشی آزمون‌های با الیاف کربن در مقایسه با مقاومت کششی خمشی آزمون‌های بدون الیاف افزایش نیافته (شکل (۶))، ولی چقرمگی یا جذب انرژی کرنشی کل آن‌ها بهبود یافته است.

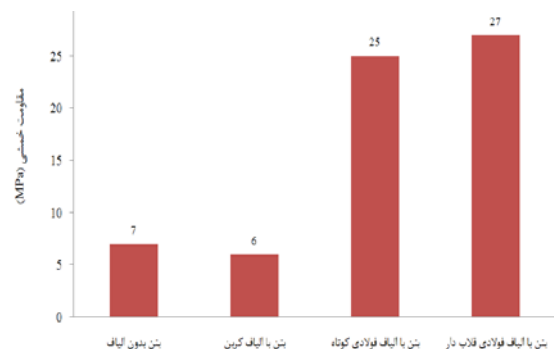


شکل ۸- نمودارهای بار- تغییر مکان آزمون‌های بدون الیاف و با الیاف تحت آزمایش خمش

مقاومت کششی خمشی آزمون‌های بدون الیاف و با الیاف در شکل (۶) مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که با افزودن الیاف فولادی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت کششی خمشی بتن‌ها به وجود آمده است، به طوری که مقاومت کششی خمشی آزمون‌هایی با الیاف کوتاه و قلاب‌دار در مقایسه با آزمون‌های بدون الیاف به ترتیب به بیش از ۳/۵ و ۳/۸ برابر رسیده است. در این میان الیاف قلاب‌دار، علی‌رغم کمتر بودن مقدار مصرفی آن‌ها در مقایسه با الیاف فولادی کوتاه، بیشترین تأثیر را داشته‌اند.

همچنین شکل (۶) نشان می‌دهد که افزودن الیاف کربن، تأثیر مثبتی بر مقدار مقاومت کششی خمشی نداشته است. از آنجایی که تأثیر پیوستگی سطح الیاف با ماتریس سیمانی در مقاومت خمشی بیش از مقاومت فشاری است، پیوستگی الیاف کربن با خمیر بتن خوب به وجود نیامده است. احتمالاً علاوه بر مشکل به وجود آمده در زمان اختلاط که قبلاً بدان اشاره شد، دما و مدت زمان لازم برای آماده‌سازی الیاف کربن (در بخش ۲-۱ توضیح داده شده است) مناسب نبوده است.

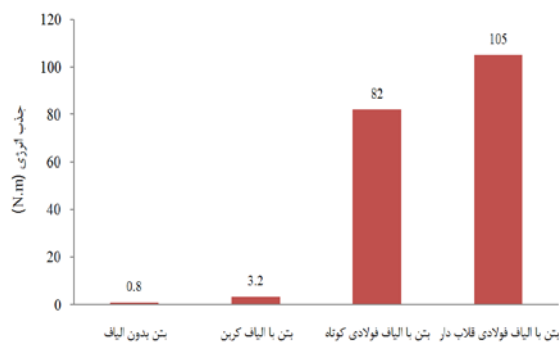
مقادیر مقاومت کششی خمشی در مقابل مقاومت فشاری آزمون‌های ۱۰×۱۰×۱۰ cm در شکل (۷) نشان داده شده است. در آزمون‌هایی با الیاف فولادی کوتاه و قلاب‌دار، مقاومت کششی خمشی، حدود ۱۷٪ مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی مذکور می‌باشد. در مقابل، در مورد آزمون‌های بتنی با الیاف کربن و بدون الیاف، مقاومت کششی خمشی درصد بسیار کمتری از مقاومت فشاری را بیان می‌کند (در حدود ۵٪). در نمونه‌های حاوی الیاف کربن، چون هر دو مقاومت فشاری و کششی خمشی افت داشته‌اند، بنابر این نسبت کمتر شده است.



شکل ۶- مقاومت کششی خمشی آزمون‌های بدون الیاف و با الیاف

۵- مراجع

- [1] Yudenfreund, M., Skalny, J., Mikhail, R. S., Brunauer, S., "Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, II. Exploratory Studies. Dimensional Changes", Cement and Concrete Research, 1972, 2, 331-348.
- [2] Roy, D. M., Gouda, G. R., Bobrowsky, A., "Very High Strength Cement Pastes Prepared by Hot Pressing and other High Pressure Techniques", Cement and Concrete Research, 1972, 2, 349-366.
- [3] Birchall, J. D., Howard, A. J., Kendall, K., "Flexural Strength and Porosity of Cements", Nature, 1981, 289, 388-390.
- [4] Bache, H. H., "Densified Cement/Ultrafine Particle-Based Materials", The 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, 1995, 25, 1501-1511.
- [6] Cheyrezy, M., Maret, V., Frouin, L., "Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)", Cement and Concrete Research, 1995, 25, 1491-1500.
- [7] Roux, N., Andrade, C., Sanjuan, M. A., "Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes", Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8, 1-6.
- [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, 1997, 94, 286-290.
- [9] Yazıcı, H., Yücel Yardımcı, M., Aydın, S., Karabulut, A. Ş., "Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing Mineral Admixtures Under Different Curing Regimes", Construction and Building Materials, 2009, 23, 1223-1231.
- [10] Chan, Y. W., Chu, S. H., "Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete", Cement and Concrete Research, 2004, 34, 1167-1172.
- [11] 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, 2011, 108, 46-54.
- [12] Cwirzen, A., Penttala, V., Vornanen, C., "Reactive Powder Based Concretes: Mechanical Properties, Durability And Hybrid use with OPC", Cement and Concrete Research, 2008, 38, 1217-1226.



شکل ۹- میزان جذب انرژی کرنشی کل آزمون‌های بدون الیاف و با الیاف تحت آزمایش خمش

۴- نتیجه‌گیری

در محدوده آزمایش‌های انجام یافته در این تحقیق، نتایج زیر به دست آمد:

- با افزودن ۲٪ حجمی الیاف فولادی قلاب‌دار، مقاومت فشاری حدود ۱۰٪ افزایش یافت. این نسبت در آزمون‌هایی با ۲/۵٪ حجمی الیاف فولادی کوتاه، به ۹٪ رسید. بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری در آزمون‌های دارای الیاف فولادی کوتاه به دست آمد (۱۷۵ MPa). الیاف کربن سبب کاهش مقاومت فشاری آزمون‌ها شد.
- همچنان که انتظار می‌رفت، مقاومت فشاری آزمون‌ها به ابعاد آن‌ها بستگی دارد. آزمون‌هایی با ابعاد کوچک‌تر، مقاومت فشاری بیشتری دارند.
- در آزمون‌های خمشی بتن RPC، با افزودن ۲٪ حجمی الیاف فولادی قلاب‌دار و ۲/۵٪ حجمی الیاف فولادی کوتاه، مقاومت کششی خمشی نسبت به آزمون‌های بدون الیاف، به ترتیب ۳۸٪ و ۳۵٪ افزایش داشت. ولی افزودن الیاف کربن، تأثیر مثبتی بر مقاومت کششی خمشی نداشت.
- در بتن‌های RPC با الیاف فولادی قلاب‌دار و کوتاه، مقاومت کششی خمشی حدود ۱۷٪ مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری بود. در حالی که این نسبت در بتن‌های RPC با الیاف کربن و بدون الیاف، بسیار کمتر شد.
- بیش‌ترین میزان جذب انرژی کرنشی کل مربوط است به آزمون‌هایی با الیاف فولادی به ویژه الیاف قلاب‌دار. با وجود این که الیاف کربن مقاومت کششی خمشی را افزایش نداد ولی مقدار جذب انرژی کل را تا حدی بهبود بخشید.

- [13] Shi, C. J., Wang, D. H., Wu, L. M., Wu, Z. M., "The Hydration and Microstructure of Ultra High-Strength Concrete with Cement-silica Fume-Slag Binder", *Cement and Concrete Composites*, 2015, 61, 44-52.
- [14] Zheng, W., Luo, B., Wang Y., "Compressive and Tensile Properties of Reactive Powder Concrete with Steel Fibers at Elevated Temperatures", *Construction and Building Materials*, 2013, 41, 844-851.
- [15] Graybeal, B., Baby, F., "Development of a Direct Tension Test Method for UHPFRC", *ACI Materials Journal*, 2013, 110, 177-186.
- [16] Canbaz, M., "The Effect of High Temperature on Reactive Powder Concrete", *Construction and Building Materials*, 2014, 70, 508-513.
- [17] Kang, S. T., Lee, Y., Park, Y. D., "Tensile Fracture Properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with Steel Fiber", *Composite Structures*, 2010, 92, 61-71.
- [18] Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., "Tensile Behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34, 172-184.
- [19] Qian, C. X., Stroeven, P., "Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fiber Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Research*, 2000, 30, 63-69.
- [20] Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., "Comparative Flexural Behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Different Macro Fibers", *Construction and Building Materials*, 2011, 25, 4144-4155.
- [21] Meraji, L., Afshin, H., Abedi, K., "Producing Reactive Powder Concrete Using Existing Materials in Iran", *The 4th International Conference on Concrete & Development*, Tehran, Iran, 29 April-1 May, 2013, pp 584-595.
- [22] Shaheen, E., Shrive, N. G., "Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete", *ACI Materials Journal*, 2006, 103, 444-451.
- [23] ASTM C 1609/C 1609M - 05, "Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)", *ASTM International*, West Conshohocken, 2005.

EXTENDED ABSTRACT

Investigation into the Effects of Fibers Type on the Properties of Reactive Powder Concrete

Leila Meraji ^a, Hassan Afshin ^{*}, Karim Abedi

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 24 April 2016; **Accepted:** 07 November 2016

Keywords:

Reactive powder concrete, Fibers, Compressive strength, Flexural strength, Energy absorption capacity

1. Introduction

In recent years, due to the progress in the field of concrete technology, some types of high-performance concrete and ultra-high-performance concrete have been developed. Reactive powder concrete (RPC), as a new type of ultra-high-performance concrete, was first patented by a French construction company in 1994. The superior properties of RPC such as high compressive strength (more than 150 MPa), high packing density, very low permeability and higher durability are achieved by eliminating the coarse aggregates and substituting them with fine silica sand aggregates, using high amount of silica fume and low water to cement ratio. Steel fibers are another materials used in RPC. The results of researches show that fibers have the main effect on the increasing of flexural strength, ductility and energy absorption, as in some cases, RPC's flexural strength has been reached up to 40 MPa [1].

2. Methodology

In the present research undertaken at the Concrete Laboratory in Sahand University of Technology, the effects of three types of fibers have been studied on RPC properties such as compressive strength, flexural strength and toughness or energy absorption capacity. The used fibers include: 1- carbon fibers are chopped to 7 mm in laboratory and added at 2.5% of cement by weight; 2- small straight steel fibers (5 mm in length, 0.4 mm in diameter, 1800 MPa ultimate tensile strength) added at 2.5% by volume; 3- long hooked steel fibers (36 mm in length, 0.8 mm in diameter, 1200 MPa ultimate tensile strength) added at 2% by volume. Table 1 represents the RPC compositions (by weight of cement).

Table 1. RPC compositions (by weight of cement)

Materials	Cement	Silica fume	Quartz sand	Quartz powder	Superplasticizer	W/C	Fibers	Fibers in vol.%
RPC without fibers	1	0.25	1.1	0.21	0.047	0.23	-	-
RPC with carbon fibers	1	0.25	1.1	0.21	0.080	0.23	0.025	1.07
RPC with small steel fibers	1	0.25	1.1	0.21	0.050	0.23	0.23	2.5
RPC with hooked steel fibers	1	0.25	1.1	0.21	0.051	0.23	0.18	2

* Corresponding Author

E-mail addresses: meraji.leila@gmail.com (Leila Meraji), hassanafshin@yahoo.com (Hassan Afshin), k_abedi@sut.ac.ir (Karim Abedi).

In addition, the effect of specimen size on the compressive strength was investigated. Two types of mold in 5×5×5 cm and 10×10×10 cm sizes were used. The specimens were heat-cured at 90 °C for 3 days.

3. Results and discussion

The results of compressive strength experiments for specimens with and without fibers are shown in Fig. 1. Adding carbon fibers has caused the decrease in results. Adding 2.5 vol.% of small steel fibers has increased compressive strength about 9%. For specimens with 2 vol.% of hooked steel fibers, this ratio has increased to 10%.

Also, as expected, the smaller the size of specimen is, the higher the compressive strength is. The ratio of compressive strength of the 10 cm cubic specimens to the 5 cm cubic specimens is 89% to 91%. The maximum compressive strength belongs to 5×5×5 cm cubes with small straight steel fibers.

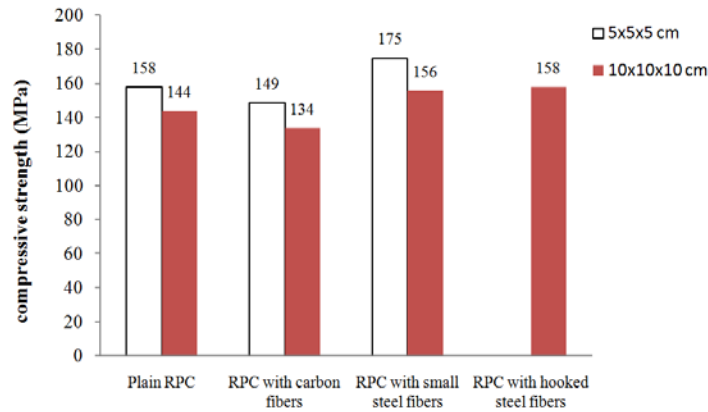


Fig. 1. The compressive strength of specimens with and without fibers

Fig. 2 shows the flexural strength of different specimens. Steel fibers, specially hooked fibers, increased flexural strength more than 3.5 times. The load-deflection curves of specimens obtained from a four-point bending test are shown in Fig. 3. Also, Fig. 4 presents the amount of energy absorption capacity of specimens. It can be seen from the figures that the effect of steel fibers, specially hooked fibers, on the amount of energy absorption capacity is considerable, however, carbon fibers has caused the flexural strength to be slightly decreased (Fig. 2) and improved slightly the energy absorption capacity.

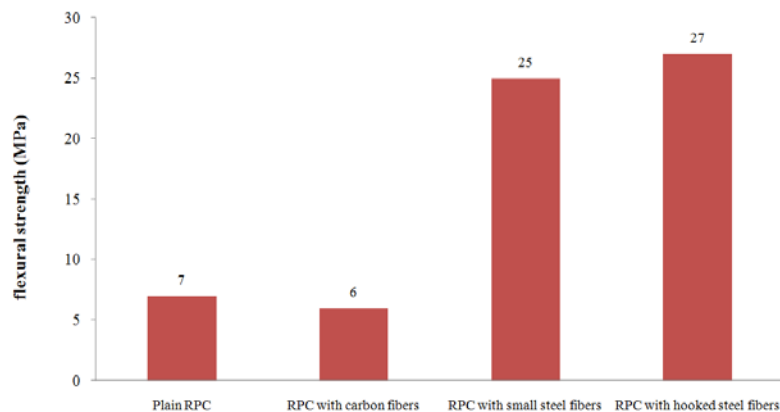


Fig. 2. Flexural strength of specimens

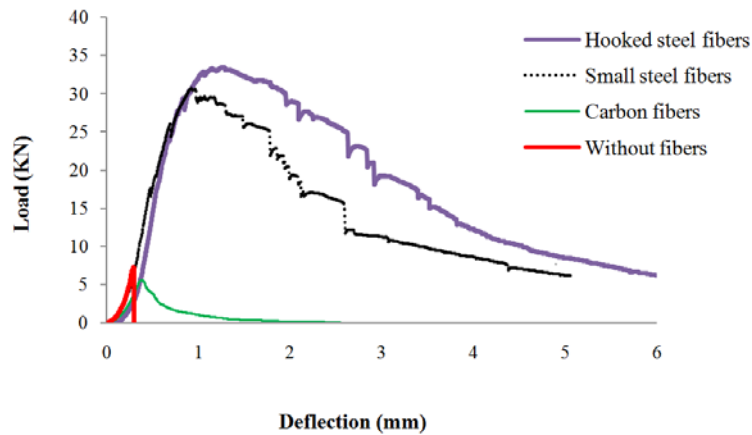


Fig. 3. Load-deflection curves of specimens obtained from four-point bending test

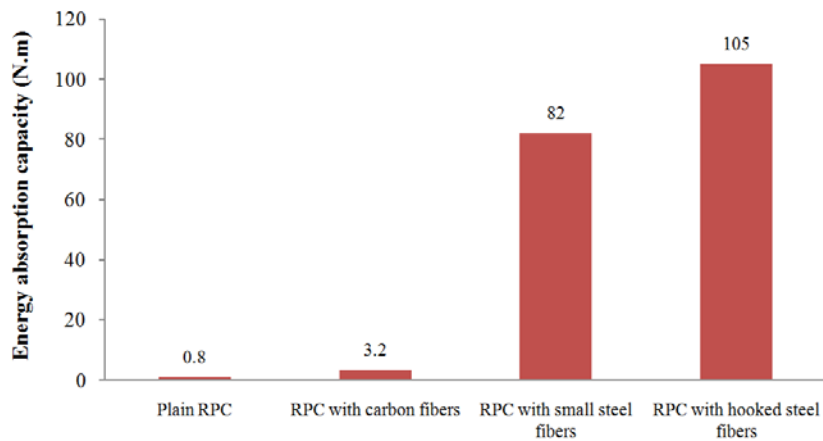


Fig. 4. Energy absorption capacity of specimens

4. Conclusions

The results represent that adding steel fibers has significant effect on the compressive and flexural strengths of RPC. The hooked and small steel fibers increased the compressive strength approximately more than 10% and 9%, respectively. Also, the effect of steel fibers, especially hooked fibers, on the flexural strength and energy absorption capacity is more considerable. Carbon fibers has caused the flexural strength to be slightly decreased and improved slightly the energy absorption capacity.

5. References

- [1] Richard, P., Cheyrezy, M., "Composition of Reactive Powder Concretes", Cement and Concrete Research, 1995, 25, 1501-1511.