

## Experimental Investigation of Compressive and Tensile Strength of Steel Fiber Reactive Powder Concrete

M.A. Dashti Ramatabadi<sup>1</sup>, F. Shahabian<sup>2\*</sup>, Haji Kazemi H.<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yazd Branch., Islamic Azad University, Yazd, Iran.

2- Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

### ABSTRACT

Reactive powder concrete (RPC) is one of the ultra high performance concrete (UHPC) with superior physical and mechanical properties. Reactive powder concrete is produced using cement and very fine powdered materials including crushed quartz, silica fume and low water to cement ratio using super plasticizer. In this study, an optimum mixing ratio of RPC has been used, in which water / binder ratio ( $W/B$ ) was equal to 0.15 and the ratio of super plasticizer to cement ( $SP/C$ ), was equal to 3%. For a long time, the idea of adding fibers to various types of concrete has been considered to improve its physical and mechanical properties. In this research, by performing several experiments, the influence of adding steel fibers on the compressive and tensile strength of RPC has been investigated. The results show that the average compressive strength of samples with 1, 2 and 3 percent volumetric fibers increases about 6, 20 and 5 percent, respectively, compared to non-fibrous specimens. This increase in tensile strength is 46, 73 and 66 percent, respectively for the same amounts of steel fiber.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 14 January 2019

**Revise Date:** 06 March 2019

**Accept Date:** 01 May 2019

### Keywords:

Reactive powder Concrete  
Ultrahigh performance  
Concrete  
Compressive Strength  
Tensile Strength  
Steel fibers

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.167555.1762

\*Corresponding author: F. Shahabian  
Email address: shahabf@um.ac.ir

## بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری و کششی بتن پودری (RPC)

### دارای الیاف فولادی

محمد علی دشتی رحمت آبادی<sup>۱</sup>، فرزاد شهابیان<sup>۲\*</sup>، حسن حاجی کاظمی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- استاد گروه عمران، گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد گروه عمران، گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

#### چکیده

بتن پودری (RPC) از جمله بتن های فوق توانمند (UHPC) با ویژگی های فیزیکی و مکانیکی برتر است. RPC با بهره گیری از سیمان و مصالح پودری بسیار ریز دانه شامل ماسه کوارتزی، میکروسیلیس، مقادیر کم نسبت آب به سیمان و استفاده از فوق روان کننده تولید می شود. نتایج آزمایش های انجام شده به منظور استخراج طرح اختلاط بهینه برای بتن پودری نشان می دهد که نسبت آب به مصالح پودری (W/B) که متناظر با حداکثر مقاومت فشاری است برابر با ۰/۱۵ بوده که مربوط به طرح اختلاط با نسبت فوق روان کننده به سیمان (SP/C) برابر با ۳ درصد است. دیر زمانی است که ایده اضافه کردن الیاف به انواع مختلف بتن به منظور بهبود ویژگی های فیزیکی و مکانیکی آن مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش تاثیر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت فشاری و کششی RPC با انجام آزمایش هایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش بیانگر آن است که میانگین مقاومت فشاری نمونه های با ۱، ۲ و ۳ درصد حجمی از الیاف، به ترتیب افزایشی در حدود ۶، ۲۰ و ۵ درصد نسبت به نمونه های بدون الیاف را نشان می دهد. این افزایش در مقاومت کششی به ترتیب مشابه برابر ۴۶، ۷۳ و ۶۶ درصد می باشد.

کلمات کلیدی: بتن پودری، بتن فوق توانمند، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، الیاف فولادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.167555.1762	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.167555.1762	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۱۱	۱۳۹۸/۰۲/۱۱	۱۳۹۷/۱۲/۱۵	۱۳۹۷/۱۰/۲۴
فرزاد شهابیان shahabf@um.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در حال حاضر انواع خاصی از بتن نظیر بتن فوق توانمند (UHPC) دست‌یابی به برخی از ویژگی‌های مطلوب بتن از جمله مقاومت بالا را میسر می‌سازد. بتن پودری (RPC) از جمله بتن‌های فوق توانمند است که به دلیل عملکرد بسیار مناسب آن در دو دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این نوع بتن با بهره‌گیری مناسب از خواص پوزولانی فعال میکروسیلیس با درجه خلوص بالا، کاهش نسبت آب به سیمان، اصلاح دانه‌بندی مصالح ریزدانه و استفاده از روش‌های عمل‌آوری مناسب منجر به تولید محصولی با مشخصات مکانیکی برتر می‌گردد.

امروزه با استفاده از انواع الیاف طبیعی و مصنوعی تولید انواع بتن‌های خاص در کاربردهای مختلف صنعتی ممکن گردیده است و به کارگیری آن‌ها در کشورهای پیشرفته مورد قبول بخش ساختمان و عمران واقع گردیده است. بتن الیافی خواص مناسبی همچون شکل‌پذیری بالا، مقاومت فوق‌العاده، قابلیت جذب انرژی و پایداری در برابر ترک خوردن را دارا می‌باشد که متناسب با آن‌ها می‌توان موارد کاربرد فراوانی برای آن یافت. به طور مثال در ساخت کف سالن‌های صنعتی می‌توان از این نوع بتن به جای بتن‌های متداول سود جست. این نوع بتن از بهترین مصالح مورد استفاده در ساخت بناهای مقاوم به ضربه، همچون سازه پناهگاه‌ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره به شمار می‌رود و بنای شکل گرفته از بتن، قابلیت فوق‌العاده‌ای در جذب انرژی حاصل از ضربه دارد. همچنین در ساخت باند فرودگاه‌ها به خوبی می‌توان از این نوع بتن کمک گرفت. موارد دیگر به کارگیری این نوع بتن، ساخت قطعات پیش ساخته ساختمانی همچون پل، پانل‌های سایبان و یا پاشش بتن روی سطح‌های دارای انحنا همچون تونل‌ها می‌باشد.

فن‌آوری تولید بتن فوق توانمند نتیجه توسعه صنعت ساخت سازه‌های بتنی محسوب می‌شود. در بتن سخت شده مقاومت و دوام دو عامل اصلی بوده و هر چه مقاومت فشاری بتن بیشتر شود بتن تردتر شده و در نتیجه مقاومت کششی آن به نسبت افزایش مقاومت فشاری افزایش نمی‌یابد و نیز از تحمل کرنش پایین‌تر برخوردار است. یک راه افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از گسترش ترک و به ویژه افزایش شکل‌پذیری، استفاده از الیاف در بتن می‌باشد. مقدار افزایش یا تغییر این ویژگی‌ها بستگی به مقاومت بتن، نوع و شکل الیاف و مقدار آن دارد.

Cheyrezy و Richard [۱] آزمایش‌های کششی بر روی نمونه‌های RPC ساخته شده از دانه‌های کوارتز و حاوی الیاف فلزی انجام دادند و دریافتند که مقاومت کششی با افزایش مقدار الیاف فلزی به صورت خطی افزایش می‌یابد. آن‌ها از نظریه احتمالاتی ویبول برای پیش‌بینی خواص کششی نمونه‌های RPC استفاده کردند.

Long و همکاران [۲] دریافتند که نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری با افزایش مقدار الیاف مصرفی و نسبت طول به قطر آن‌ها افزایش می‌یابد. مطالعات Collepari و همکاران [۹] در مورد نوع الیاف بر ویژگی‌های مکانیکی RPC نشان داد که استفاده از الیاف فولادی با نسبت طول به قطر ۷۲، بیشترین مقاومت خمشی را نشان می‌دهد. استفاده از الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و کربن در مطالعات Wong و همکاران [۳] گزارش شده است. Zhang و همکاران [۴] مقاطع خمشی ساخته شده از RPC را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با بررسی نمونه‌ها دریافتند که افزایش مقدار الیاف فلزی مصرفی سبب افزایش مقدار چقرمگی نمونه‌ها و مقاومت پس از ترک‌خوردگی می‌گردد. مطالعات Habel و همکاران [۵] در مورد بتن فوق‌توانمند مسلح به الیاف (UHPFRC) با استفاده از الیاف ترکیبی نشان داد که الیاف کوتاه سبب دوخت دو بخش مجاور ریزترک‌ها می‌گردد. استفاده از این الیاف، سختی UHPFRC را افزایش می‌دهد، همچنین سبب مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و تأمین ضریب کشسانی بیش از ۴۵ گیگاپاسکال می‌گردد. Hoang و همکاران [۶] ویژگی‌های خمشی بتن مسلح به چهار نوع الیاف مختلف شامل الیاف مارپیچ، الیاف T شکل، الیاف قلاب‌دار و الیاف پلی‌اتیلن را بررسی نمودند. مطالعات آن‌ها نشان داد که الیاف پلی‌اتیلن بیشترین تغییر شکل را از خود نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر تاثیر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت فشاری و کششی RPC با انجام آزمایش‌هایی بررسی شده است. برای این کار مقاومت فشاری RPC مسلح به الیاف فولادی با ساخت و آزمایش نمونه‌های مکعبی مورد سنجش قرار گرفته است. مقاومت کششی

RPC مسلح به الیاف فولادی با استفاده از آزمایش نمونه‌های دمبلی شکل (بریکت) تعیین شده است و میزان اثربخشی الیاف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- بتن RPC بدون الیاف

### ۲-۱- مصالح مصرفی

نوع و کیفیت مصالح مصرفی در ساخت RPC، تاثیر زیادی بر ویژگی‌های آن دارد. انتخاب نوع و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مصالح، نیازمند دقت و توجه کافی است. محدودیت‌های موجود در تهیه مصالح به‌خصوص بخشی از آن‌ها که وارداتی است، استفاده از مصالح تولید داخل و بومی را توجیه‌پذیر می‌سازد.

از ویژگی‌های اساسی بتن پودری عیار زیاد سیمان مصرفی است. لازم به ذکر است که سیمان مصرفی در بتن معمولی حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب است، اما این مقدار در RPC حدود ۱۰۰۰ کیلوگرم در متر مکعب است. مصرف زیاد سیمان، ناشی از سطح جانبی زیاد مصالح پودری بسیار ریز و نیاز به دوغاب سیمان جهت پوشش آن است [۷]. برای دستیابی به نتایج مطلوب، با بررسی‌هایی که به عمل آمد، سیمان تیپ دو تولیدی کارخانه سیمان آباده انتخاب گردید [۸].

میکروسیلیس<sup>۱</sup> (SF) محصول جانبی کارخانه تولید آلیاژهای سیلیسیم به‌ویژه فروسیلیس است. این ماده با واکنش پوزولانی خود علاوه بر وظیفه پرکنندگی فضاهای بسیار ریز، سبب بهبود ویژگی‌های مقاومتی و دوام RPC می‌گردد. میکروسیلیس مصرفی در RPC فضاهای خالی بسیار ریز موجود را پر نموده و به کمک ذرات بسیار ریز کروی خود روانی بتن حاصل را نیز بهبود می‌بخشد [۹]. دو نوع میکروسیلیس با نام‌های میکروسیلیس سمنان و میکروسیلیس ازنا در ایران تولید می‌شود. در این پژوهش از میکروسیلیس ازنا محصول شرکت فروآلیاژ ایران، به دلیل کیفیت برتر آن استفاده شده است [۱۰].

ماسه سیلیسی با خلوص بالا دارای سختی زیاد است و کیفیت سطح ذرات آن چسبندگی خوبی با خمیر سیمان ایجاد می‌کند. ماسه‌های سیلیسی موجود در بازار در بسته‌بندی‌های متفاوت و با نام‌های تجاری مختلف عرضه می‌شوند. در این پژوهش با توجه به مطالعات پیشین [۱۳]، از دو نوع ماسه سیلیسی موجود با نام‌های تجاری M50 با محدوده دانه‌بندی ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر و M15 با محدوده دانه‌بندی ۰/۵ تا ۱/۴ میلی‌متر استفاده شد.

استفاده از نسبت‌های بسیار کم آب به مواد پودری (W/B)، تنها با استفاده از فوق‌روان‌کننده (SP) امکان‌پذیر است. استفاده از انواع مختلف فوق‌روان‌کننده در ساخت RPC گزارش شده است. در این پژوهش، از Glenium-55p که در داخل کشور قابل تهیه است، استفاده گردید.

### ۲-۲- طرح اختلاط

در انتخاب یک طرح اختلاط مناسب برای RPC، لازم است که علاوه بر توجه به ویژگی‌های مقاومتی، در دسترس بودن مصالح نیز مدنظر قرار گیرد. از این رو در پژوهش حاضر، ویژگی‌های مصالح بومی، خصوصاً میکروسیلیس و سیمان مصرفی مورد توجه قرار گرفت و با بهره‌گیری از نتایج مطالعات پیشین و انجام بررسی‌های لازم، نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شد و مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری گردید. با بررسی نتایج، یک طرح اختلاط که دارای بیشترین مقاومت بود، انتخاب گردید. مشخصات طرح اختلاط در جدول ۱ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>-Silica Fume

جدول ۲: مشخصات طرح اختلاط برای RPC.

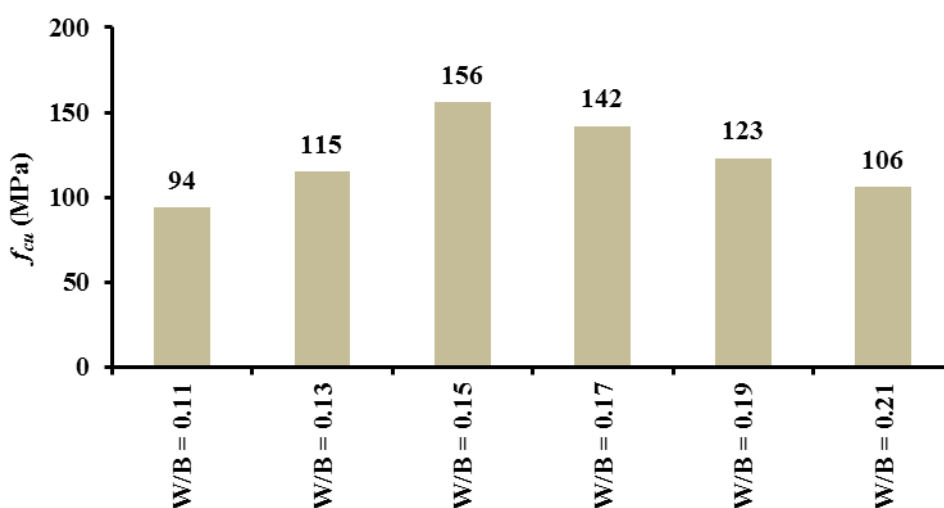
مصالح	مقدار مصالح در طرح اختلاط ( $\text{kg/m}^3$ )
سیمان	936
میکروسیلیس	280
پودر سیلیس 0-0.1 mm	374
پودر سیلیس 0.1-0.3 mm	268
پودر سیلیس 0.3-0.6 mm	268
آب	234
فوق روان کننده	28

## ۲-۳- مقاومت فشاری RPC

پس از انتخاب، توزین و اختلاط مصالح، از RPC حاصل برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌ها در قالب‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری ریخته شد و با تراکم دستی و میز ویبره متراکم گردید. برای سنجش میزان تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری RPC، نسبت آب به سیمان (W/C) برابر با ۰/۲۷، ۰/۲۵، ۰/۲۲، ۰/۲۰، ۰/۱۷ و ۰/۱۵ انتخاب گردید. بدین ترتیب، نسبت آب به مواد پودری (W/B) به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۱۹، ۰/۱۷، ۰/۱۵، ۰/۱۳ و ۰/۱۱ گردید. در کلیه مراحل فرایند فوق، نسبت فوق‌روان کننده به سیمان (SP/C) ثابت و برابر با ۳ درصد انتخاب گردید. برای هر نسبت آب به سیمان، شش نمونه مکعبی ۵ سانتی‌متری تهیه و پس از عمل‌آوری در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد، در سن ۲۸ روزه آزمایش گردید. متوسط نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها ( $f_{cu}$ ) در جدول ۲ شکل ۱ ارایه شده است.

جدول ۲: مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC با W/B متفاوت

W/C	0.27	0.25	0.22	0.20	0.17	0.15
W/B	0.21	0.19	0.17	0.15	0.13	0.11
$f_{cu}$ (MPa)	106	123	142	156	115	94



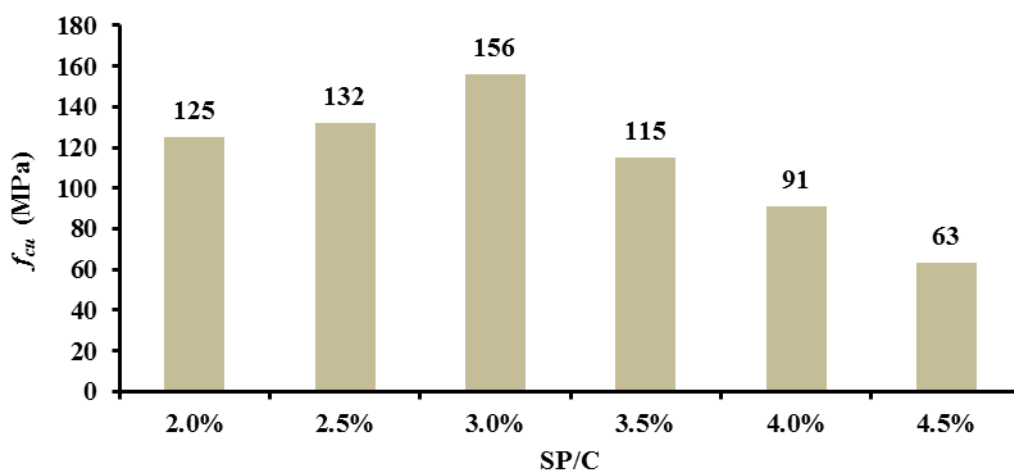
شکل ۱: مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC با W/B متفاوت.

همان طور که در جدول ۲ و شکل ۱ مشاهده می شود، با افزایش W/B تا ۰/۱۵ مقاومت فشاری افزایش و پس از آن کاهش می یابد. بدین ترتیب در سایر مراحل آزمایشگاهی، نسبت W/B بهینه که متناظر با حداکثر مقاومت فشاری است برابر با ۰/۱۵ انتخاب گردید.

درصد مصرف فوق روان کننده در RPC نسبت به بتن معمولی بیشتر است. این حقیقت ناشی از وجود ذرات بسیار ریز و بالطبع سطح جانبی زیاد این اجزا بوده که نیاز به مقدار بیشتر فوق روان کننده را توجیه می کند. استفاده از فوق روان کننده به مقدار بهینه، به پخش مناسب ذرات کمک و از گلوله ای شدن اجزا و ایجاد حفرات در مخلوط جلوگیری می نماید. برای بررسی میزان تاثیر نسبت فوق روان کننده بر مقاومت فشاری RPC، نسبت فوق روان کننده به سیمان (SP/C) برابر با ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، و ۴/۵ درصد انتخاب گردید. در کلیه مراحل فرایند فوق، نسبت آب به مصالح پودری (W/B) ثابت و برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. برای هر نسبت آب به مصالح پودری، شش نمونه مکعبی ۵ سانتی متری تهیه و پس از عمل آوری در آب ۲۰ درجه سانتی گراد، در سن ۲۸ روزه آزمایش گردید. متوسط نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها ( $f_{cu}$ ) در جدول ۳ و شکل ۲ ارایه شده است.

جدول ۳: مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC با SP/C متفاوت.

SP/C	2	2.5	3	3.5	4	4.5
$f_{cu}$ (MPa)	125	132	156	115	91	63



شکل ۲: مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC با SP/C متفاوت.

جدول ۳ و شکل ۲ بیانگر آن است که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط با ۳ درصد فوق روان کننده است. در درصدهای کمتر فوق روان کننده، کاهش مقاومت ملاحظه می گردد که به دلیل عدم کفایت فوق روان کننده در تأمین روانی لازم برای حصول به تراکم بهینه است. بدین ترتیب در سایر مراحل آزمایشگاهی، نسبت SP/C بهینه که متناظر با حداکثر مقاومت فشاری است برابر با ۳ درصد انتخاب گردید.

### ۳- بتن RPC مسلح به الیاف فولادی

#### ۳-۱- ویژگی های عمومی الیاف

از مهم ترین انواع الیاف مصرفی در بتن های توانمند می توان الیاف فولادی، الیاف شیشه، الیاف کربن و الیاف پلی پروپیلن را نام برد. الیاف فولادی دارای شکل و قطرهای گوناگونی بوده و نحوه ساخت آن ها نیز متفاوت است. با توجه به شکل پذیری فولاد، به راحتی می توان

گیرداری الیاف را در بتن تأمین کرد. به همین منظور می توان شکل های مختلف از قبیل: انتهای خمیده، انتهای قلابدار، دم پهن، موجدار و خورده تراشه نامنظم را تولید کرد.

همراه با شکوفایی صنعت پتروشیمی، ساخت انواع مختلف الیاف مصنوعی آغاز شد. برخی از این الیاف در صنایع مختلف از جمله صنعت نساجی (الیاف نایلون و کولار) و نیز جهت مسلح کردن و مقاوم نمودن برخی قطعات در صنایع اتومبیل و هواپیما سازی استفاده می شود. از دیگر محصولات صنعت پتروشیمی الیاف کربن و پلی پروپیلین می باشد. اگر چه الیاف شیشه، کربن و پلی پروپیلین کاربردهای فراوانی دارند، لیکن بیشترین کاربرد در بتن را الیاف فلزی دارند. الیاف فلزی مورد استفاده در بتن عمدتاً از جنس فولاد و در برخی موارد از جنس مس می باشند. دلایل این گستردگی استفاده عبارتند از:

الف- الیاف فولادی بالاترین افزایش را در مقاومت و شکل پذیری بتن ایجاد می کنند.

ب- با شکل های ظاهری گوناگون جهت بهبود رفتار بتن قابل ساخت هستند.

پ- اختلاط آن ها با دیگر مواد بتن به سهولت انجام پذیر است.

برخی مشخصات الیاف مصرفی در بتن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصات انواع الیاف مورد استفاده در بتن الیافی [۱۱].

وزن مخصوص ( $gr/cm^3$ )	حداکثر تغییر طول (%)	ضریب کشسانی (Ksi)	مقاومت کششی (Ksi)	نوع الیاف
3.2	~ 0.6	$12-20 \times 10^3$	80-140	آزبست
2.5	1.5 - 3.5	$10 \times 10^3$	150-550	شیشه
0.95	~ 1	$0.02-0.06 \times 10^3$	~ 100	پلی اتیلن
7.8	0.5-35	$29 \times 10^3$	40-400	فولاد

به طور کلی کیفیت بتن الیافی به نسبت های مخلوط بتن، مشخصات هندسی الیاف، مهار مکانیکی و زبری سطح الیاف، مشخصات مکانیکی و جنس الیاف بستگی دارد. از دیگر عوامل موثر در مقاومت بتن الیافی زاویه قرارگیری الیاف می باشد. از جمله مهم ترین خصوصیات عمومی الیاف، شکل، اندازه و نسبت ظاهری الیاف است. پارامتر مناسبی که یک رشته از الیاف را تعریف می کند، نسبت ظاهری ( $l/d$ ) می باشد که نسبت طول الیاف به قطر معادل الیاف است. مقدار نسبت های ظاهری معمولاً بین ۳۰ تا ۱۵۰ است.

الیاف فولادی می تواند نقش مکملی برای میلگرد داشته باشد. الیاف فولادی با گسترش ترک ها مقابله می کند و مقاومت بتن را در برابر خستگی، ضربه، جمع شدگی و تنش های حرارتی افزایش می دهد. تنش ها به وسیله برش محیطی و در صورتی که رویه الیاف آجدار باشد به وسیله مقاومت چسبندگی (درون سطحی) از ماتریس به الیاف منتقل می شود. بنابراین مادامی که ماتریس بتن ترک نخورده است، تنش کششی بین الیاف و ماتریس تقسیم می شود و پس از ایجاد ترک، همه ی تنش به الیاف انتقال می یابد [۱۲].

### ۳-۲- ساخت بتن RPC الیافی

RPC مسلح به الیاف فولادی همانند RPC غیر مسلح ساخته، ریخته و متراکم می شود. روش طراحی مخلوط های RPC مسلح به الیاف فولادی شبیه طراحی RPC غیر مسلح است. با این وجود، باید برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت الیاف و جلوگیری از جداسدگی یا پدیده گلوله ای شدن<sup>۲</sup> و ایجاد یک مخلوط کارا جهت ریختن، تراکم و پرداخت RPC به عمل آید.

الیاف به خاطر آسانی پخش باید به صورت خشک وارد مخلوط شود. در فرایند ساخت RPC الیافی باید از ایجاد پدیده گلوله ای شدن جلوگیری به عمل آید. این مشکل اغلب به دلیل استفاده از مقادیر زیاد الیاف (بیش از ۲ درصد حجمی یا حتی ۱ درصد حجمی با

<sup>۲</sup> - Balling

نسبت طول به قطر بالا) و یا اضافه کردن خیلی سریع الیاف به مخلوطی که آب کافی و یا کارایی کافی ندارد بوجود می‌آید [۱۳]. در این پدیده الیاف نزدیک به هم جمع شده، سبب کاهش کارایی مخلوط بتن و کاهش مقاومت RPC سخت‌شده می‌شود.

الیاف مصرفی (شکل ۳) از جنس فولاد به شکل موج دار با انتهای قلاب دار و محصول کشور کره جنوبی می‌باشد. استفاده از چنین شکل‌هایی از الیاف فولادی در افزایش مقاومت بیرون کشیدگی تاثیر زیادی دارد. مشخصات مهم الیاف فولادی مورد استفاده به در جدول ۵ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳: الیاف فولادی. الف - به صورت توده. ب - به صورت تکی.

جدول ۵: مشخصات الیاف فولادی.

مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت طول به قطر (L/D)	قطر (D) (mm)	طول (L) (mm)
1000	7850	45	0.8	36

پس از اتمام اختلاط تمامی مصالح توسط مخلوط کن، الیاف فولادی که تمیز و عاری از هرگونه مواد زائد و روغن بود به تدریج به داخل مخلوط کن ریخته شد. پس از اتمام اضافه کردن الیاف به RPC، عمل اختلاط به مدت سه دقیقه دیگر ادامه یافت تا الیاف در تمام فضای مخلوط پخش شده و مخلوط یکنواختی حاصل گردد.

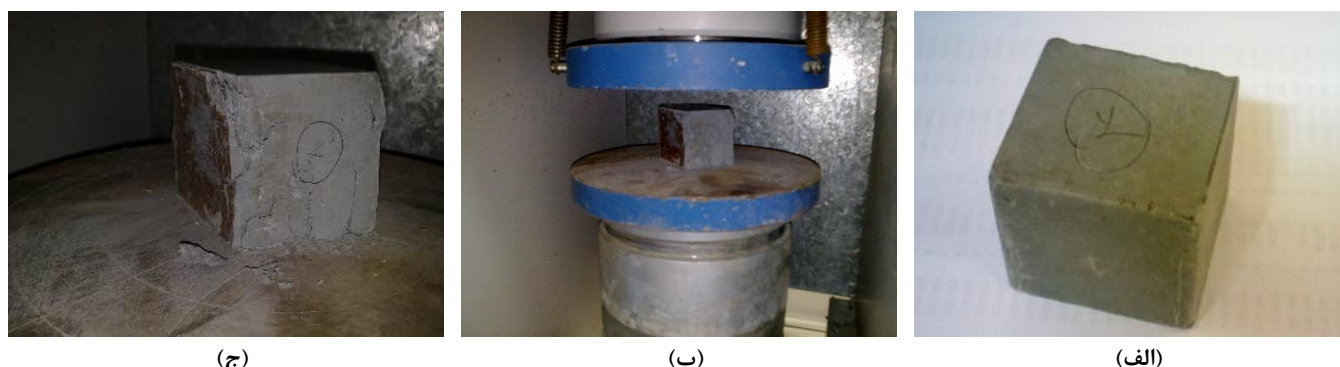
### ۳-۳- برنامه آزمایش

در پژوهش حاضر تاثیر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت فشاری و کششی RPC با انجام آزمایش‌هایی بررسی شده است. برنامه آزمایش‌ها شامل بررسی تاثیر میزان الیاف مصرف شده بر روی مقاومت فشاری و کششی RPC مسلح به الیاف فولادی است. مقاومت فشاری با نمونه‌های مکعبی ۵×۵×۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. مقاومت کششی از آزمایش نمونه‌های دمبلی شکل (بریکت) حاصل گردید. مقدار الیاف فولادی مصرفی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ حجم بتن می‌باشد. نمونه‌ها برای تعیین مقاومت فشاری و کششی در سن ۲۸ روزه مورد استفاده قرار گرفتند.

### ۳-۴- مقاومت فشاری RPC دارای الیاف

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری RPC مسلح به الیاف فولادی با نمونه‌های مکعبی ۵×۵×۵ سانتی‌متر (شکل ۴) در سن ۲۸ روزه در جدول ۶ و شکل ۵ ارائه شده است. مقدار میانگین، انحراف معیار و ضریب پراکندگی مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز تعیین شده است.





(ج)

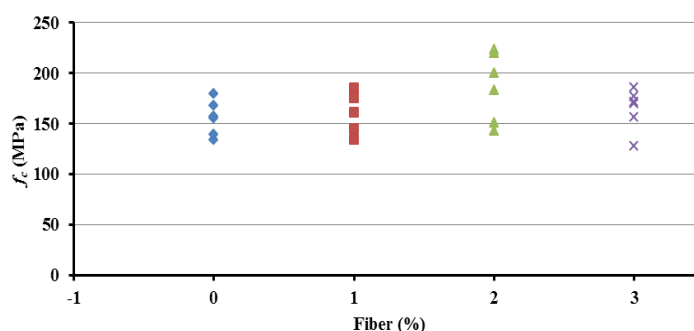
(ب)

(الف)

شکل ۴: نمونه‌های RPC برای تعیین مقاومت فشاری. الف- قبل از آزمایش، ب- در حال آزمایش، ج- پس از آزمایش.

جدول ۶: مقاومت فشاری نمونه‌های RPC با درصد‌های مختلف الیاف.

درصد الیاف				نمونه
3	2	1	بدون الیاف	
127.54	142.87	133.59	134.38	CU50,1
156.23	183.27	180.18	155.26	CU50,2
169.86	151.23	161.19	139.13	CU50,3
171.69	199.92	145.21	157.67	CU50,4
176.68	220.38	184.99	168.36	CU50,5
185.98	223.33	174.76	180.06	CU50,6
164.67	186.83	163.32	155.81	میانگین
20.61	34.18	20.50	17.24	انحراف معیار
13	18	13	11	ضریب پراکندگی (%)



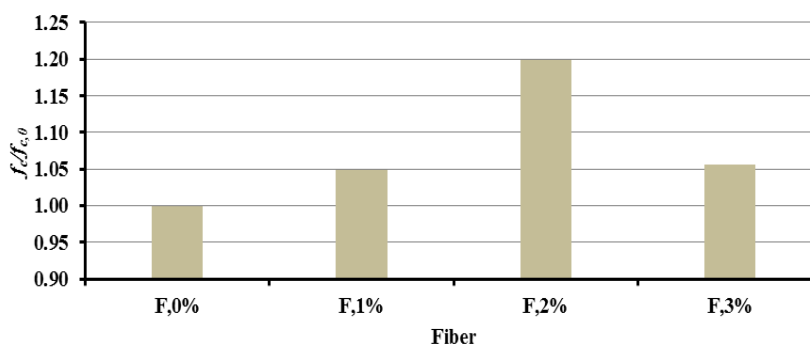
شکل ۵: مقاومت فشاری نمونه‌های RPC با درصد‌های مختلف الیاف.

میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف ۱۵۵/۸۱ مگاپاسکال است. این مقدار در نمونه‌های با ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف به ترتیب ۱۶۳/۳۲، ۱۸۶/۸۳ و ۱۶۴/۶۷ مگاپاسکال است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشانگر آن است که در حالت کلی با افزودن الیاف فولادی تا ۲ درصد مقاومت فشاری RPC افزایش می‌یابد اما مقدار مقاومت در سه درصد الیاف کمتر از دو درصد الیاف است. انحراف معیار و ضریب پراکندگی مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف متفاوت است به گونه‌ای که نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف که بیشترین مقاومت را دارند، انحراف معیار و ضریب پراکندگی بیشتری را نشان می‌دهند.

مقایسه نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های RPC مسلح با درصد‌های متفاوت الیاف به مقاومت فشاری نمونه‌های RPC بدون الیاف  $(f_c/f_{c,0})$  در جدول ۷ و شکل ۶ ارائه شده است.

جدول ۷: مقاومت فشاری و  $(f_c/f_{c,0})$  نمونه‌های RPC

درصد الیاف			بدون الیاف	نماد
3	2	1		
164.67	186.83	163.32	155.81	میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)
1.06	1.20	1.05	1.00	$(f_c/f_{c,0})$

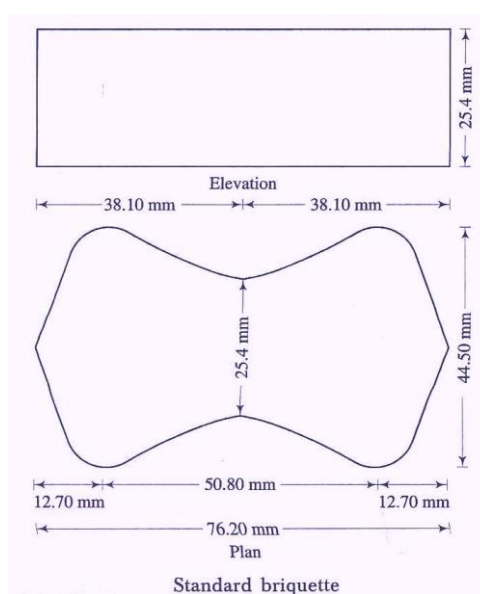


شکل ۶: نسبت  $(f_c/f_{c,0})$  نمونه‌های RPC.

مطابق نتایج بدست آمده، مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC با اضافه کردن الیاف به میزان ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به ترتیب ۵، ۲۰ و ۶ درصد افزایش پیدا می‌کند.

### ۳-۵- مقاومت کششی RPC دارای الیاف

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی RPC مسلح به الیاف فولادی با نمونه‌های دمبلی شکل مطابق استاندارد ASTM C307 (شکل‌های ۷ تا ۹) در سن ۲۸ روزه در جدول ۸ و شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقدار میانگین، انحراف معیار و ضریب پراکندگی مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز تعیین گردیده است.



شکل ۷: نمونه‌های RPC برای تعیین مقاومت کششی مطابق استاندارد ASTM C307.



شکل ۸: دستگاه آزمایش نمونه‌های RPC برای تعیین مقاومت کششی.

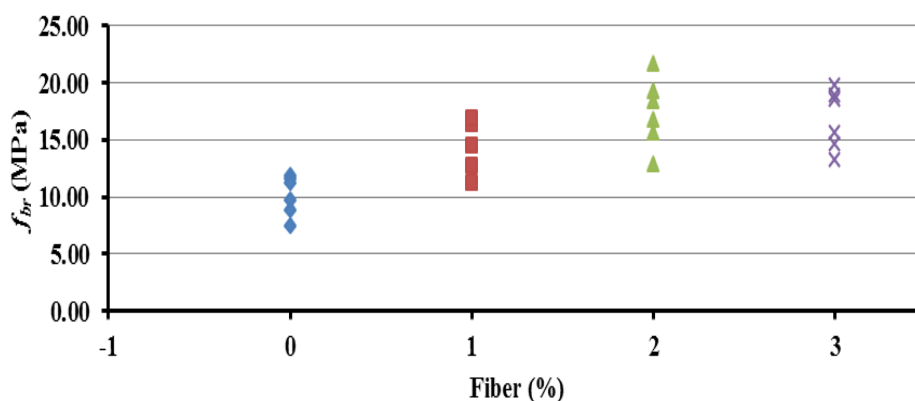


شکل ۹: یک نمونه RPC پس از آزمایش تعیین مقاومت کششی.

جدول ۸: مقاومت کششی نمونه‌های RPC با درصد‌های مختلف الیاف.

درصد الیاف				نمونه
3	2	1	بدون الیاف	
13.27	12.83	11.25	7.43	BR,1
14.64	16.80	12.73	11.82	BR,2
15.59	18.38	16.48	8.79	BR,3
18.48	21.61	16.37	11.59	BR,4
18.95	19.28	16.82	11.21	BR,5
19.73	15.64	14.53	9.69	BR,6
16.78	17.42	14.70	10.09	میانگین
2.63	3.05	2.29	1.76	انحراف معیار
0.16	0.18	0.16	0.17	ضریب پراکندگی (%)

همان طور که در جدول ۸ دیده می‌شود انحراف معیار و ضریب پراکندگی مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین مختلف متفاوت است به گونه‌ای که نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف که بیشترین مقاومت را دارند، انحراف معیار و ضریب پراکندگی بیشتری را نشان می‌دهند.



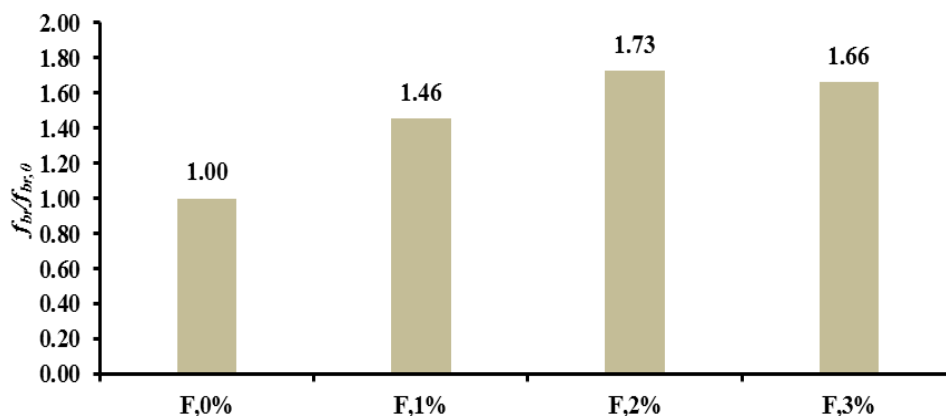
شکل ۱۰: مقاومت کششی نمونه‌های RPC با درصدهای مختلف الیاف.

در شکل ۱۰ مقاومت کششی ۲۸ روزه RPC را با درصدهای حجمی مختلف الیاف فولادی نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که مقاومت کششی RPC مسلح به الیاف فولادی با افزایش درصد الیاف، افزایش می‌یابد و این در حالی است که شیب منحنی در ابتدا ملایم بوده و سپس با افزایش درصد الیاف زیاد می‌شود.

مقایسه نسبت مقاومت کششی نمونه‌های RPC مسلح با درصدهای متفاوت الیاف به مقاومت کششی نمونه‌های RPC غیر مسلح ( $f_t/f_{t,0}$ ) در جدول ۹ و شکل ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۹: مقاومت کششی و  $(f_{br}/f_{br,0})$  نمونه‌های RPC.

درصد الیاف				نماد
3	2	1	بدون الیاف	
16.78	17.42	14.70	10.09	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
1.66	1.73	1.46	1.00	$(f_t/f_{t,0})$



شکل ۱۱: نسبت  $(f_t/f_{t,0})$  نمونه‌های RPC.

مطابق نتایج بدست آمده، مقاومت کششی ۲۸ روزه RPC با اضافه کردن الیاف به میزان ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به ترتیب ۴۶، ۷۳ و ۶۶ درصد افزایش پیدا می‌کند.

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت فشاری و کششی RPC با انجام آزمایش‌هایی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری با نمونه‌های مکعبی اندازه‌گیری شد. مقاومت کششی از آزمایش نمونه‌های دمبلی شکل (بریکت) حاصل گردید. مقدار الیاف فولادی مصرفی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ حجم بتن بوده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف نسبت به نمونه‌های بدون الیاف به ترتیب ۶، ۲۰ و ۵ درصد افزایش را نشان می‌دهد. همچنین، میانگین مقاومت کششی RPC با اضافه کردن الیاف به میزان ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به ترتیب ۴۶، ۷۳ و ۶۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. این رخدادهای، بیانگر آن است که درصد بهینه الیاف برای تاثیر گذاری بر روی نتایج حاصل، چیزی در حدود ۲ درصد حجمی RPC می‌باشد.

## مراجع

- [1] Richard, P., Cheyrezy, M. (1995), Composition of Reactive Powder Concretes. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.
- [2] Long, G., Wang, X. and Xie, Y. (2002). Very-High-Performance Concrete with Ultrafine Powders. Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 4, pp. 601-605.
- [3] Wong, A.C.L., Childs, P.A., Berndt, R., Macken, T., Peng, G.D. and Gowripalan, N. (2007). Simultaneous Measurement of Shrinkage and Temperature of Reactive Powder Concrete at Early-Age Using Fibre Bragg Grating Sensors. Cement and Concrete Composites, Vol. 29, No. 6, pp. 490-497.
- [4] Zhang, M.H., Tam, C.T. and Leow, M.P. (2003). Effect of Water-to-Cementitious Materials Ratio and Silica Fume on the Autogenous Shrinkage of Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 10, pp. 1687-1694.
- [5] Habel, K., Denarie, E. and Bruhwiler, E. (2006). Structural Response of Elements Combining Ultrahigh-Performance Fibre-Reinforced Concretes. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 11, pp. 1793 – 1799.
- [6] Hoang, K.H., Phat, B. and Van Chanh, N. (2008). Influence of Types of Steel Fibre on Properties of Ultra High Performance Concrete. The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA, pp.347-355.
- [7] Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D. (2003). Concrete. 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [8] Neville, A.M. (1995). Properties of Concrete. 4th Edition, Addison Wesley Longman Ltd., London.
- [9] Reschke, T. (2000). Influence of Granulometry of Fines on the Microstructure Development and the Strength of Concrete. Series of the Cement Industry, Issue 62. (In Germany)
- [10] Wild, S., Sabir, B.B. and Khatib, J.M. (1995). Factors Influencing Strength Development of Concrete Containing Silica Fume. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1567-1580.
- [11] Rhaei, A. and Zomorrodian, A. (2005). Restoration and reinforcement of composite polymer fiber reinforced concrete structures (FRP). Tafresh University Press. (In Persian)
- [12] Beddar, M. (2008). Development of steel fiber reinforced concrete from antiquity until the present day. Proceedings of International Conference on Concrete: Constructions sustainable option, Dundee, U.K., pp. 35-44.
- [13] Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., and Aitcin, P.C. (1997). Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes. ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 4, pp. 286-290.