

Experimental study of the effect of different types of industrial steel fibers on the mechanical properties of reactive powder concrete

Meisam Mahboubi Niazmandi^{1,2*}, Morteza Gholizadeh³

1- Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of technology, Shiraz, Iran

2- University Lecturer, Faculty of Civil Engineering, Mehraeen Institute of Higher Education, Gilan, Iran

3- Ph.D. Candidate of Engineering and Construction Management, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

The present research aimed to evaluate the effect of industrial steel fibers on the mechanical properties of reactive powder concrete (RPC). A series of reinforced RPC specimens containing different percentages of steel fibers having different diameters were built. By performing resistance tests on the samples, the mechanical properties (compressive, bending and tensile strengths) of RPC were determined. The results of the compressive tests showed that by increase in the curing age from 7 to 42 days, the strength of RPC containing group 2 steel fibers (medium fibers: diameter 0.6 mm) increases from 25 MPa to 154.5 MPa compared to the control concrete. This is attributed to the continued reactions between the cement paste and the interlocking of most of the quartz-silica sand aggregates and micro-silica powder in the RPC specimens with steel fibers. The highest compressive strength of RPC compared to the control concrete was obtained for the sample containing 2% group 1 steel fibers (small fibers: diameter 0.4 mm) equal to 421 MPa (29.11% growth compared to the control concrete). By reduce in the diameter of fibers, the number of fibers in the sample and subsequently the interlocking between aggregates and fibers increases and the replacement distribution of aggregates improves. Also, 2% of group 2 steel fibers (medium fibers: diameter 0.6 mm) was determined as the optimal value of fibers to make RPC with higher compressive strength. Based on the flexural strength tests, 2% of group 1 and group 2 steel fibers and 3% of group 3 steel fibers (large fibers: with a diameter of 0.8 mm) were determined as the optimal value of fibers to achieve the maximum flexural strength of RPC. Based on the tensile tests, it was found that with the addition of 1%, 2% and 3% of group 1, group 2 and group 3 steel fibers, the growth of RPC tensile strength is completely upward. The reason for observing such behavior was attributed to the bridging effect of steel fibers in the concrete matrix. Empirical equations obtained from regression analysis have high accuracy for estimating resistance properties.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 February 2023

Revise Date: 22 May 2023

Accept Date: 28 May 2023

Keywords:

Laboratory studies,
Reactive powder concrete (RPC),
Industrial steel fibers,
Mechanical properties,
Empirical equations

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.385041.3032>

*Corresponding author: Meisam Mahboubi Niazmandi

Email address: m.mahboubi@sutech.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی اثرگذاری انواع مختلف الیاف فولادی صنعتی بر خواص مکانیکی بتن پودری واکنشی

میثم محبوبی نیازمندی^{۱*}، مرتضی قلی زاده^۲

۱- دکترای ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲- مدرس دانشگاه، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی مهرآیین، گیلان، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

هدف پژوهش حاضر ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر الیاف فولادی صنعتی (کارخانه‌ای) بر خصوصیات مکانیکی بتن پودری واکنشی (RPC) و ارائه معادلات تجربی برای تخمین این خصوصیات است. تعدادی نمونه RPC تقویت شده حاوی درصدهای مختلف الیاف فولادی دارای قطرهای متفاوت ساخته شد. با انجام آزمایش‌های مقاومتی روی نمونه‌ها، خواص مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی) RPC تعیین شد. نتایج آزمون‌های فشاری نشان داد که با افزایش سن عمل‌آوری از ۷ تا ۴۲ روز، مقاومت RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف متوسط: قطر ۰/۶ میلی‌متر) در مقایسه با بتن شاهد از ۲۵ مگاپاسکال تا ۱۵۴/۵ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. این به ادامه واکنش‌های بین خمیر سیمان و قفل‌وبست بیشتر سنگدانه‌های ماسه سلیس کوارتزی و پودر میکروسیلیس موجود در نمونه‌های RPC با الیاف فولادی نسبت داده می‌شود. بیشترین مقاومت فشاری RPC در مقایسه با بتن شاهد برای نمونه حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک: قطر ۰/۴ میلی‌متر) برابر ۴۲۱ مگاپاسکال (رشد ۲۹/۱۱٪ نسبت به بتن شاهد) به دست آمد. با کاهش قطر الیاف، تعداد الیاف در نمونه و متعاقباً قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها و الیاف افزایش یافته و توزیع جایگزینی سنگدانه‌ها بهبود می‌یابد. همچنین ۲٪ الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف متوسط: قطر ۰/۶ میلی‌متر) به عنوان مقدار بهینه الیاف جهت ساخت RPC با مقاومت فشاری بیشتر تعیین شد. براساس آزمون‌های مقاومت خمشی، ۲٪ الیاف فولادی گروه ۱ و گروه ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۳ (الیاف بزرگ: با قطر ۰/۸ میلی‌متر) به عنوان مقادیر بهینه الیاف جهت دستیابی به حداکثر مقاومت خمشی RPC تعیین شد. براساس آزمون‌های کششی مشخص شد که به ترتیب با افزودن ۱٪، ۲٪ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۱، گروه ۲ و گروه ۳، رشد مقاومت کششی RPC کاملاً صعودی است. دلیل مشاهده چنین رفتاری به اثر پل زدن الیاف فولادی در ماتریس بتن نسبت داده شد. معادلات تجربی حاصل از تحلیل رگرسیون، دقت بالایی برای تخمین خصوصیات مقاومتی دارد.

کلمات کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، بتن پودری واکنشی (RPC)، الیاف فولادی صنعتی، خواص مکانیکی، معادلات تجربی

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2023.385041.3032	۱۴۰۱/۱۲/۰۲	۱۴۰۲/۰۳/۰۱	۱۴۰۲/۰۳/۰۷	۱۴۰۲/۰۳/۰۷	۱۴۰۲/۱۱/۳۰
شناسه دیجیتال: 10.22065/jsce.2023.385041.3032	میثم محبوبی نیازمندی m.mahboubi@sutec.ac.ir				
*نویسنده مسئول:					پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

یکی از مهمترین و ارزان ترین مصالح موجود برای ساخت و ساز که در دنیا کاربرد وسیعی دارد، بتن است و مزایای بیشمار آن سبب شده که این ماده مورد علاقه اکثر مهندسين، طراحان و کارفرمایان باشد. از مزایای اصلی بتن می توان به شکل پذیری زیاد، دوام بالا، مقاومت در مقابل حریق و خوردگی، عدم نفوذ پايین، راحتی حمل و نقل و استفاده از آن در هر شکلی از قالب اشاره نمود [۱-۴]. مقاومت فشاری خوب بتن موجب گردیده تا محصولی مطمئن و مقرون به صرفه نسبت به فولاد همواره مدنظر باشد. با این حال بتن دارای نواقصی از جمله ضعف در کشش، خمش، ضعف در سیکل های متوالی ذوب و یخبندان و حمله یون های مضر می باشد که می توان این نواقص را تا حدودی با استفاده از میلگردهای کششی جبران نمود [۵]. به کارگیری بتن غیر مسلح به علت تردی آن به غیر از سازه های وزنی عملاً کاربرد چندانی ندارد. در عمل، این عیب عمده بتن با مسلح کردن آن به وسیله آرماتورهای فولادی برطرف می گردد. اما از آنجایی که آرماتور منحصراً بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می دهد، تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع ایزوتوپ و همگن است، چندان صحیح نیست [۶].

امروزه راهکارهای جدیدی همچون افزودن الیاف فولادی به بتن برای ایجاد ایزوتروپی، کاهش ضعف، شکنندگی و تردی بتن معمولی و بهبود شکل پذیری آن پیشنهاد شده است [۷ و ۸]. تحقیقات گسترده قبلی [۹-۱۲] نشان می دهد که افزودن الیاف فولادی به بتن به طور قابل توجهی منجر به افزایش مقاومت های خمشی و فشاری آن می گردد. همین تحقیقات مبنای شکل گیری و ساخت بتن های پرمقاومت گردیده است [۱۰]. نخستین بار در سال ۱۹۹۴ یک شرکت ساختمانی فرانسوی، ایده حذف سنگدانه های درشت و جایگزینی آن با ماسه های سیلیسی ریزدانه را مطرح نمود. این ایده به کارگیری مقدار زیادی میکروسیلیس و نسبت کم آب به سیمان و الیاف فولادی ریز به عنوان مصالح تشکیل دهنده بتن را به عنوان راهی برای دستیابی به بتنی با خواص فوق العاده از جمله مقاومت فشاری بسیار بالا، مقاومت کششی و خمشی زیاد، نفوذ پذیری کم و دوام بسیار بالا مطرح نمود [۱۰ و ۱۱]. امروزه از این محصول پرمقاومت که از لحاظ فشاری، کششی، خمشی، برشی، مقاومت در برابر بارهای دینامیکی، شکل پذیری و جذب انرژی، انقباض، خزش و سایش سطحی زیاد در رده ی بهترین بتن های حال حاضر جهان است، با نام بتن پودری واکنشی^۱ (RPC) یاد می شود. از RPC برای ساخت پناهگاه ها، باند فرودگاه ها، تونل ها، آسمان خراش ها، کف سازی های صنعتی و غیره استفاده می گردد [۵ و ۱۳].

نقش اصلی الیاف فولادی در RPC در حقیقت نوعی کامپوزیت است که منجر به یکپارچگی و پیوستگی مناسب بین اجزای تشکیل دهنده بتن شده و استفاده از آن را به عنوان یک ماده شکل پذیر ممکن می سازد [۱۴]. با استفاده از الیاف فولادی مناسب، RPC به خواص مقاومتی قابل توجهی دست می یابد. به طور مثال، در این نوع بتن می توان از رشته های الیاف به طور فعال برای محدود کردن عرض ترک ها در راستای افزایش قابلیت بهره برداری بتن استفاده نمود. همچنین دوام بالای آن موجب افزایش عمر بهره برداری و کاهش هزینه های مراقبت از سازه های بتنی می شود [۱۳-۱۵]. امروزه از الیاف مختلفی همچون الیاف فولادی، پروپیلن، شیشه ای، کربنیک و نانویی (نانوتیوپ های کربنی) برای ساخت RPC استفاده می شود. اما به دلیل بالا بودن هزینه های مواد مذکور، استفاده از الیاف فولادی تولید شده در کارخانه یکی از مرسوم ترین راه های تولید RPC به شمار می رود [۵، ۱۶ و ۱۷].

در سال های اخیر مطالعات آزمایشگاهی زیادی در خصوص ارزیابی رفتار مقاومتی و شکل پذیری RPC و همچنین کاربرد الیاف فولادی برای تولید بتن های پرمقاومت به انجام رسیده که در جدول ۱ به مروری بر این مطالعات به صورت خلاصه پرداخته شده است.

جدول ۱: مرور مختصری بر تحقیقات گذشته در خصوص RPC

پژوهشگران (سال)	عنوان پژوهش	یافته ها
زنگ و همکاران [۱۸]	بررسی تأثیر دمای بالاتر بر روی مقاومت کششی - خمشی و فشار RPC	در دمای بالا، وضعیت شکست RPC با افزایش الیاف فولادی بهبود می یابد. افزودن ۲٪ الیاف فولادی به طور موثر از هجوم انفجار جلوگیری می کند و به کاهش یا تأخیر گسترش ترک و انتشار ترک پرداخته و به طور شاخصی قدرت کششی و فشاری RPC را افزایش می دهند. مقاومت فشاری این نوع بتن با الیاف فولادی در ۱۰۰ درجه سانتیگراد کاهش و از ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد افزایش و در بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد مجدداً کاهش می یابد.

¹ Reactive Powder Concrete

اگرچه اضافه شدن الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش حداکثر مقاومت ۱۴۰ مگاپاسکال در بتن می‌شود، اما استحکام ۱۶۵ مگاپاسکال در زمان استفاده از نسبت الیاف ۱٪ قابل دستیابی بود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که تغییر نسبت الیاف باعث کاهش مقاومت فشاری RPC می‌گردد.	بررسی روش عمل‌آوری RPC	کانباز ^۲ ، [۱۹]، ۲۰۱۴
اثر بافت الیاف با افزایش طول الیاف افزایش می‌یابد. این رفتار برای الیاف صاف آشکارتر است. لذا با نسبت کم آب به سیمان و ارتقاء استحکام پیوند در تیر بتنی، از اهمیت طول برای الیاف انتهایی قلاب کاسته می‌شود.	بررسی رفتار کشش خارجی فولاد FRP محصور در RPC	بگلاریگاله و یازجی ^۳ [۲۰]، ۲۰۱۵
روش هشت مرحله‌ای مورد استفاده در مطالعه آزمایشگاهی در این تحقیق، مقاومت فشاری نمونه‌ها را حدود ۱۷۴٪ افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده افزایش از ۸۵ مگاپاسکال (۲۸ روز) به ۲۳۳ مگاپاسکال (۱۳ روز) است.	اصلاح میکرواستراتژیک و استفاده از پودرهای سیلیسی (SF) بر مقاومت RPC	مستوفی نژاد و همکاران [۲۱]، ۲۰۱۶
افزودن سیلیسیوم تا مقدار مشخص (حدود ۲٪ وزنی سیمان)، موجب چند برابر شدن مقاومت فشاری RPC در دمای بالا شده و با ایجاد قابلیت فشرده‌گی بین اجزای بتن، خرابی اجزا در اثر افزایش دما را کاهش می‌دهد.	عملکرد نمونه‌های RPC حاوی افزودنی‌های مختلف سیلیسیم (SF) در دمای بالا	جو و همکاران ^۴ [۲۲]، ۲۰۱۷
کمبود داده‌های تجربی در خصوص تغییر شکل و خواص حرارتی RPC در معرض دمای بالا، مانع از کاربرد آن در مقابله با حرارت و دمای بالا بوده و بهبود عملکرد RPC در درجه حرارت بالا مورد سنجش قرار گرفته است.	بررسی خصوصیات مقاومتی RPC	عبید و همکاران ^۵ [۲۳]، ۲۰۱۷
اثرات آتش بر بتن حاوی الیاف فولادی آسیب بیشتری دارد. همچنین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقادیر را دارند. مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی الیاف فولادی ۴۰ و ۵۰٪ به طور کلی بیشتر از بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن می‌باشد. با این حال، مقاومت خمشی آنها تقریباً یکسان است.	بررسی تأثیر دماهای مختلف بر خواص مکانیکی بتن‌های با محتوای سیمان متفاوت حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن	قلهکی و همکاران [۲۴] و [۲۵]، ۲۰۱۷
الیاف فولادی تأثیر قابل توجهی بر رابطه تنش-کرنش و جذب انرژی RPC داشته و تنش و کرنش اوج با افزایش محتوای الیاف فولادی با نرخ کرنش یکسان افزایش می‌یابد.	اثرات الیاف فولادی و نرخ کرنش بر رابطه دینامیکی تنش-کرنش فشاری در RPC	هو و همکاران ^۶ [۲۶]، ۲۰۱۸
افزودن ۲٪ فیبر فولادی به ترکیبات بتن موجب افزایش ۱۸۴٪ گشتاور اولیه و ۶۶٪ گشتاور نهایی ستون T-شکل توخالی می‌گردد.	بررسی رفتار ستون‌های T-شکل ساخته شده با RPC تحت آزمایش تنش خالص	آشور و همکاران ^۷ [۲۷]، ۲۰۱۹
محصور کردن نمونه‌های RPC با فولاد، ظرفیت باربری آنها را از ۳٪ تا ۳۸٪ افزایش می‌دهد، افزایش ظرفیت باربری زمانی که ضریب محصور شدن (به عنوان نسبت ظرفیت بار محوری تعریف می‌شود) مشهودتر است. معادلاتی برای منحنی‌های تنش-کرنش جهت توصیف رفتار RPC استخراج شد.	بررسی رفتار فشاری محوری ستون‌های لوله‌ای فولادی دایره‌ای پرشده با RPC	وانگ و همکاران ^۸ [۲۸]، ۲۰۱۹
مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی با افزودن فنرهای بازیافتی بهبود می‌یابد، اما این مقاومت با افزایش کسر حجمی فنرها کاهش یافته است. مقاومت فشاری بتن حاوی فنرهای فولادی ۲ تا ۳ برابر بیشتر از بتن حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن در دماهای مختلف است، اما تفاوت معنی‌داری بین مقاومت کششی این بتن‌ها وجود ندارد.	ارزیابی عملکرد بتن حاوی فنرهای بازیافتی، الیاف فولادی و پلی پروپیلن با درصد‌های حجمی مختلف در دماهای مختلف	پاچیده و توفیق ^۹ [۲۹]، ۲۰۲۰
عمل‌آوری با بخار دمای بالا، مقاومت بالاتر و ریزساختار متراکم‌تری را برای RPC در مقایسه با عمل‌آوری در دمای محیط همراه دارد، اما عمل‌آوری در هوای داغ می‌تواند محصولات هیدراتاسیون، تبلور و افزایش تخلخل را ظاهر کند.	تأثیر دمای عمل‌آوری بر خواص RPC حاوی الیاف فولادی ضایعاتی	ژون و همکاران ^{۱۰} [۳۰]، ۲۰۲۰
مقاومت فشاری نمونه‌های RPC عمل‌آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت در مقایسه با نمونه‌هایی که در شرایط عمل‌آوری معمولی نگهداری می‌شوند، افزایش می‌یابد. همچنین خواص مکانیکی RPC تهیه شده با سنگدانه‌های بازیافتی تا ۵۰٪ جایگزینی افزایش یافت، در حالی که عملکرد دوام به تدریج با افزایش محتوای بازیافتی در یک محدوده معقول کاهش یافت.	بررسی تأثیر سنگدانه‌های ریز بازیافتی بر عملکرد RPC	صلاح‌الدین و همکاران ^{۱۱} [۳۱]، ۲۰۲۰
مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های RPC تقویت‌شده با الیاف فولادی حاوی نانوسیلیس به ترتیب برابر ۱۵۵،۳، ۸،۳ و ۵۳،۹ مگاپاسکال به دست آمد. نتایج نشان داد که مواد سیمانی از جمله سیمان و میکرو سیلیس، تأثیرگذارترین عوامل بر خواص مکانیکی این نوع بتن هستند.	بررسی خواص مکانیکی RPC تقویت‌شده با الیاف فولادی حاوی نانوسیلیس	کشاورزبان و همکاران [۳۲]، ۲۰۲۱
مقاومت باقیمانده از دمای معمولی به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. RPC با ۲٪ الیاف فولادی و ۰،۱۵٪ الیاف پلی پروپیلن بهترین عملکرد را از نظر مقاومت در برابر پوسته شدن و ویژگی‌های مکانیکی از خود نشان داد.	ارزیابی رفتار RPC هیبریدی تقویت شده با الیاف در دماهای بالا	مانو و همکاران ^{۱۲} [۳۳]، ۲۰۲۱
ترکیب متاکائولین و خاکستر بادی ضمن بهبود خصوصیات نمونه‌های RPC تازه، منجر به کاهش خصوصیات سختی نمونه‌ها می‌گردد.	بررسی خصوصیات RPC حاوی ترکیبات مختلف خاکستر بادی و متاکائولین	حسن و همکاران [۳۵]، ۲۰۲۱

² Canbaz

³ Beglarigale and Yazici

⁴ Ju et al.

⁵ Abid et al.

⁶ Hou et al.

⁷ Ashour et al.

⁸ Wang et al.

⁹ Pachideh and Toufigh

¹⁰ Xun et al.

¹¹ Salahuddin et al.

¹² Mao et al.

افزایش نسبت تنش محوری باعث کاهش حداکثر کرنش فشاری ایجاد شده در ناحیه کناری دیوار می‌شود، در حالی که نسبت پیش‌تنیدگی تاندون‌ها اثرات قابل توجهی بر آن ندارد. برای دیوارهایی با نسبت تنش محوری پایین‌تر رویکردهای مقاوم‌سازی پیشنهادی نتایج مشابهی داشتند.	بررسی تجربی امکان تقویت دیوارهای خود محور توسط بتن با کارایی بالا با روش اجزای محدود	جعفری و همکاران [۳۵]، ۲۰۲۱
بررسی مروری ادبیات RPC و مقایسه‌ای بین RPC و HPC، برخی از کاربردهای بالقوه RPC همچون پل‌های عابر پیاده و کاربردهای تعمیرات سازه‌ای را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نفوذپذیری هوا، تخلخل، جذب آب، نرخ کربناته شدن، نرخ خوردگی و مقاومت شواهدی از عملکرد بهتر RPC نسبت به HPC هستند.	RPC: دوام و کاربردها	سن‌خوان و آندراده ^{۱۳} [۱۳]، ۲۰۲۱
مقاومت چسبندگی الیاف فولادی قلاب‌شده انتهای بسیار قوی‌تر از الیاف فولادی مستقیم در نمونه‌های RPC است. با افزایش زاویه جاسازی، بار خروجی نهایی و انرژی خروجی الیاف فولادی مستقیم افزایش می‌یابد و مقاومت چسبندگی سطحی افزایش می‌یابد. همچنین RPC حاوی ۲۰٪ تا ۳۰٪ دوده سیلیسی بهبود قابل توجهی را در رفتار نمونه‌ها نشان داد. سن عمل‌آوری مناسب کمک زیادی به هیدراتاسیون و مقاومت ماتریس RPC می‌کند.	بررسی آزمایشگاهی رفتار چسبندگی سطحی RPC حاوی الیاف فولادی	هوانگ و همکاران ^{۱۴} [۳۶]، ۲۰۲۲
جایگزینی ۱۰٪ خرده لاستیک ضایعاتی به‌جای ماسه و پودر آجر ضایعاتی به‌جای سیمان، مقاومت فشاری اولیه RPC سبز هیبریدی اصلاح‌شده با زباله را بیش از ۲۳،۴٪ در ۳ روز افزایش داد. همچنین، ادغام پودر لاستیک و پودر آجر ضایعاتی، هدایت حرارتی و دوام این نوع بتن در برابر ذوب و یخ‌زدگی و حملات سولفاته را بهبود می‌بخشد.	ارزیابی رفتار مکانیکی، حرارتی، دوام و ریزساختار RPC سبز هیبریدی اصلاح شده با ضایعات صنعتی	خیتاب و همکاران ^{۱۵} [۳۷]، ۲۰۲۲
افزودن ۳٪ الیاف فولادی باز یافت شده به ترتیب مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی RPC را به میزان ۹٪، ۲۳٪ و ۵۸٪ افزایش می‌دهد. همچنین مقدار بهینه الیاف فولادی باز یافتی با در نظر گرفتن حداکثر مقاومت مکانیکی، ۲٪ تعیین شده است.	توسعه RPC با الیاف فولادی تایر باز یافتی	رضا و همکاران [۳۸]، ۲۰۲۲
ادغام الیاف و فنرهای فولادی مقاومت فشاری بتن را تا ۲۰٪ افزایش می‌دهد. الیاف پلی پروپیلن در معرض دماهای بالا، مقاومت کششی را تا ۷۰٪ افزایش می‌دهد. مقاومت خمشی بتن در تمام نمونه‌ها در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. استفاده از فنرهای فولادی ضمن کاهش هزینه، خواص مکانیکی بتن سبک خودتراکم را نسبتاً افزایش می‌دهد.	ارزیابی خواص مکانیکی بتن‌های سبک خودتراکم با الیاف مختلف (الیاف فولادی (SF)، الیاف پلی پروپیلن (PPF) و فنرهای فولادی) در معرض دماهای بالا	پاچیده و توفیق [۳۹]، ۲۰۲۲
استفاده ترکیبی از SRHA و QP در RPC با وزن کم سیمان قادر به تولید مقاومت فشاری بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال بوده و نسبت بهینه ۳۰٪ SRHA و ۶۱٪ QP خواص RPC را در مقایسه با سایر آزمایشات بهبود می‌بخشد.	ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات RPC حاوی خاکستر پوسته برنج سنتز شده (SRHA) و پودر کوارتزیت (QP)	آلخالی و حسن ^{۱۶} [۴۰]، ۲۰۲۲
مقاومت خمشی تیرهای RPC ساخته شده با انواع مختلف آرماتور (لوله‌های PVC، لوله‌های فولاد ضد زنگ و آرماتورهای تقویت‌شده طبیعی) به ترتیب در حدود ۸،۷۸٪، ۷،۵۸٪ و ۵،۶٪ بیشتر از مقاومت خمشی تیر بتن معمولی کامپوزیت می‌باشد.	ارزیابی آزمایشگاهی رفتار مقاومت خمشی یک تیر معمولی کامپوزیت و یک تیر بتنی RPC با انواع مختلف آرماتور	سلواپریا و همکاران ^{۱۷} [۴۱]، ۲۰۲۳
افزایش نسبت S/C تا ۱،۲ می‌تواند با کاهش میزان سیمان مورد استفاده، خواص RPC را بهبود بخشد. تعویض ۴۰ تا ۵۰٪ ماسه سیلیس با کربنات کلسیم ریزساختار RPC را بهبود می‌بخشد. همچنین رفتار کششی RPC باید با استفاده از ماده دیگری به دلیل محدودیت بیشترین اندازه دانه در آن بهبود یابد. اضافه کردن الیاف شیشه‌ای معادل ۸ تا ۱۰٪ از وزن سیمان، رفتار مکانیکی و دوام RPC را بهبود می‌بخشد.	بررسی تأثیر نسبت شن و ماسه به سیمان، اضافه کردن الیاف شیشه‌ای و کربنات کلسیم بر خصوصیات مکانیکی بتن با عملکرد فوق العاده بالا مبتنی بر RPC	حیدری و شورابی [۴۲]، ۲۰۲۳
ظرفیت باربری ستون SRRPC با افزایش مقاومت بتن، مقاومت نوار تقویت‌کننده و نسبت الیاف افزایش یافته و با افزایش طول محاسبه شده کاهش می‌یابد. بار ورود به مرحله الاستیک-پلاستیک با افزایش خصوصیات مذکور افزایش یافته و با افزایش طول محاسبه شده کاهش می‌یابد.	بررسی خواص مکانیکی ستون‌های ساخته شده با RPC فولادی (SRRPC) تحت فشار محوری با روش اجزای محدود	گونگ و همکاران ^{۱۸} [۴۳]، ۲۰۲۳

مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که علیرغم توسعه روزافزون استفاده از RPC در صنعت ساخت و ساز دنیا در سال‌های اخیر، این موضوع در داخل کشور ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از همین رو محققین در پژوهش حاضر تلاش نمودند تا ضمن تولید یک محصول RPC بومی با استفاده از مصالح رایج موجود در داخل کشور (سنگدانه‌های مصرفی موجود و الیاف فولادی تولیدشده در کارخانجات صنعتی)، خصوصیات مقاومتی این بتن را از طریق مطالعات آزمایشگاهی ارزیابی نمایند. اگرچه در گذشته تحقیقاتی با این مضمون (تولید RPC) به انجام رسیده، اما در هیچ یک از این تحقیقات، به اثر استفاده از انواع مختلف و همچنین درصدهای متفاوت الیاف فولادی صنعتی تولیدشده در داخل کشور بر بهبود خواص RPC توجهی نشده است. علاوه بر این، معادلات تجربی توسعه‌یافته در این تحقیق برای

¹³ Sanjuán and Andrade

¹⁴ Huang et al.

¹⁵ Khitab et al.

¹⁶ Alkhalay and Hasan

¹⁷ Selvapriya et al.

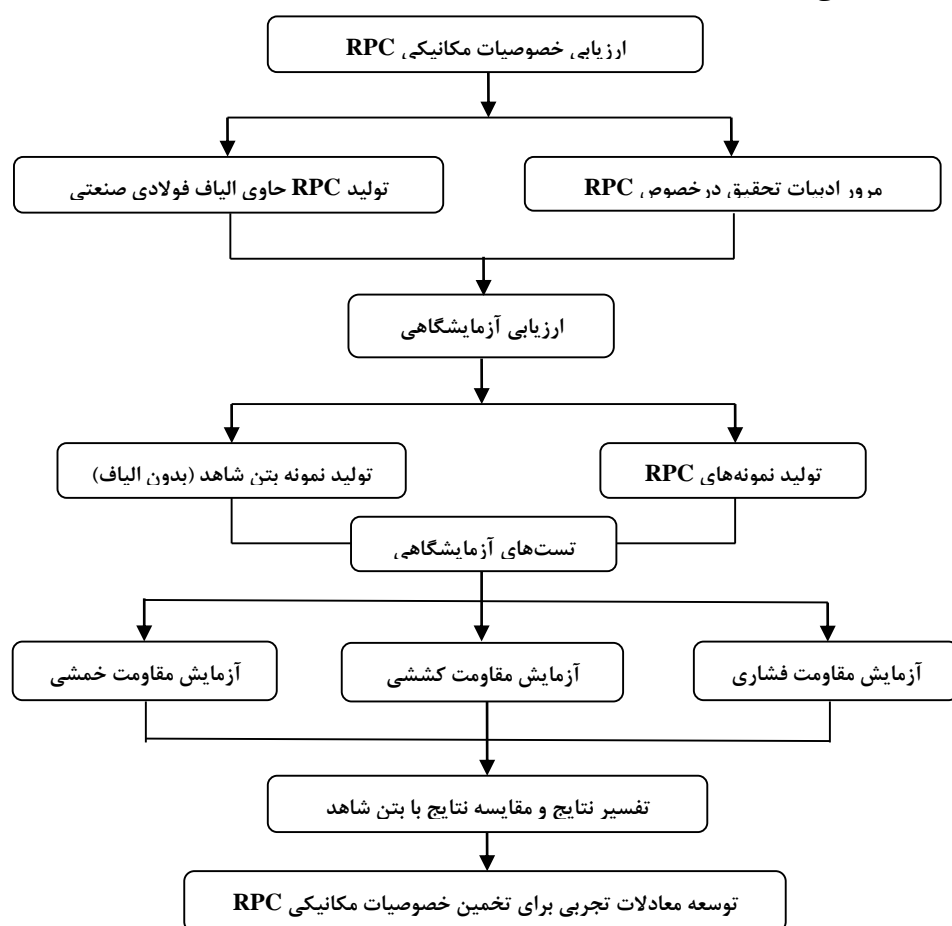
¹⁸ Gong et al.

پیش بینی خصوصیات مقاومتی RPC تولید شده، در کمتر تحقیقاتی در گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ فلوجارت روندنمای انجام تحقیق در مقاله حاضر را به صورت خلاصه نشان می دهد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مصالح مصرفی

در این تحقیق جهت تولید نمونه های مختلف RPC تمامی مصالح مورد استفاده از داخل کشور ایران تهیه گردیده تا بدین طریق، محصولی با کیفیت و بومی به جامعه ساخت و سازه های بتنی کشور معرفی گردد. مصالح اصلی مصرفی جهت ساخت نمونه ها شامل ماسه، پودر سیلیس و میکروسیلیس می باشد. ماسه مورد نیاز از شرکت تأمین ماسه اخترکاو با مشخصات فنی و کد D1 تهیه شده است که شامل ماسه سیلیس کوارتزی و دانسیته ۲/۶۲ با دانه بندی ۱-۲/۵ میلی متر و اندازه قطر ۱۰۰-۲۵۰۰ میکرون (منطبق بر الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ [۴۴]) می باشد. تولید و ساخت نمونه ها و آزمایشات مقاومتی نمونه های بتنی در شرکت آزمایشگاهی بتن آزمای ایرانیان (مورد تأیید اداره کل استاندارد و تحقیقات صنعتی به شماره پروانه T/38418) به انجام رسیده است. برای دانه بندی ماسه، ابتدا از مصالح ریزدانه ماسه ای ۱۰۰۰ گرم نمونه گیری شده و طبق استاندارد ASTM-C136 [۴۵] دانه بندی مطابق با جدول ۲ صورت گرفته است. همچنین خواص فیزیکی و شیمیایی ماسه سیلیس کوارتزی مورد استفاده در ساخت نمونه ها در جدول ۳ آمده است. سیمان مصرفی از نوع تیپ ۱ با نام تجاری سیمان پرتلند تیپ ۳۲۵-۱ با عیار ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ساخت کارخانه نیزار قم با مشخصات فیزیکی و شیمیایی مطابق جدول ۴ می باشد.



شکل ۱- فلوجارت روند انجام تحقیق

عمل آوری و انجام آزمایشات بر روی نمونه‌ها در دمای معمولی اتاق آزمایشگاه (۱۷-۲۰ درجه سانتیگراد) انجام شده است. لازم به ذکر است در صورت عمل آوری به روش اتوکلاو در بخار با دمای بالا در شرایط آزمایشگاهی به مقاومت بیشتری خواهیم رسید، اما در این تحقیق به لحاظ شرایط کاربردی در محیط کارگاه از عمل آوری به روش اتوکلاو صرف نظر شده است.

جدول ۲: دانه بندی ماسه سیلیس کوارتزی

شماره الک	# 200	# 100	# 50	# 30	# 16	# 8	# 4	3/4"	1/2"	3/8"	1"	2	2	3"	3
سایز الک (میلیمتر)	۰/۰۷۵	۰/۱۵	۰/۳	۰/۶	۱/۱۸	۲/۳۶	۴/۷۵	۹/۵			۱/۲"	۱/۲"	"		۱/۲"
درصد وزنی تجمعی مانده روی الک (گرم)	۰														

جدول ۳: مشخصات شیمیایی و فیزیکی ماسه سیلیس کوارتزی

ترکیب شیمیایی	ماسه (%)	خاصیت فیزیکی	ماسه
SiO ₂	۹۷/۵	ضریب گوشه داری	< ۱/۳
Al ₂ O ₃	۰/۹۵	دانسیته	۲/۶۲
Fe ₂ O ₃	۰/۸۵	رنگ	سفید متمایل به زرد
CaO	۰/۲۷	نقطه زینتر	> ۱۴۰۰
Na ₂ O	۰/۲۴		
K ₂ O	۰/۰۲		

جدول ۴: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ ۱ استفاده شده براساس استاندارد DIN 1164 [۴۶]، ISIR 389 [۴۷]

مشخصات رسمی ISIR	مشخصات شیمیایی	نتیجه (درصد)	مشخصات رسمی ISIR	مشخصات فیزیکی
Max= 3 %	L.O.I	۰/۵۵	Min= 2800	نرمی
Max= 0.75 %	IR	۰/۴۱	۳۰۰۶	بلین (سطح) (cm ² /gr)
Max= 2 %	Si ₂ O	۲/۹۱	Min= 45	دقیقه، ابتدا
Max= 6 %	Al ₂ O ₃	۵/۰۵	Min= 6	دقیقه، انتها
Max= 6 %	Fe ₂ O ₃	۴/۴۵	-	آب مصرفی
-	CaO	۶۲/۱۵	Max= 0.8	درصد انبساط اتوکلاو
Max= 5 %	MgO	۲/۲۷	Min= 10	مقاومت فشاری
Max= 3 %	So ₃	۲/۱۹	Min= 17.5	۳ روزه (MPa)
-	Na ₂ O	۰/۳۱	Min= 31.5	۷ روزه
-	K ₂ O	۰/۶۳	-	۲۸ روزه
-	C ₃ S	۳۹/۳	-	۳ روزه
-	C ₂ S	۳۴/۳۹	-	۷ روزه (MPa)
Max= 8 %	C ₃ A	۵/۸۵	Max= 7	۲۸ روزه
-	C ₄ AF	۱۳/۵۴	-	حرارت هیدراسیون ۷ روزه بر حسب Cal/gr
-	Free CaO	۰/۶۷		
-	Cl ⁻	۰/۰۰۷		

جهت دستیابی به مقاومت‌های بالای نمونه‌های بتنی تولیدشده، از مواد افزودنی معدنی شامل پودر سیلیس و میکروسیلیس تهیه شده از شرکت تامین ماسه اخترکاو با مشخصات فنی و کد ۱۵۱ در طرح اختلاطها استفاده شد. پودر سیلیس کوارتزی با دانسیته ۲/۶۸ و دانه بندی ۰/۲-۰/۵ میلیمتر و اندازه قطر بین ۲۰۰ الی ۵۰۰ میکرون به مقدار ۸۰ کیلوگرم تهیه شد. همچنین میکروسیلیس مورد استفاده از نوع کوارتز و میکرونیزه دارای دانسیته ۲/۶۸ گرم بر سانتیمتر مکعب با دانه بندی ۰-۵۳ میکرون و سفیدرنگ مایل به زرد می‌باشد. اندازه میانگین قطر ذرات آن حدود ۲۰۰ الی ۵۰۰ میکرون، وزن مخصوص ظاهری ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نرمی ۲۰۰۰۰ کیلوگرم بر متر مربع است که حدود ۵۰ تا ۶۰ برابر نرمی سیمان می‌باشد. نتایج دانه بندی، فعالیت پوزولانی میکروسیلیس و خصوصیات فیزیکی و

شیمیایی آن در جداول ۵ و ۶ آمده است. علاوه بر این، شکل ۲ منحنی‌های استاندارد دانه‌بندی مصالح مختلف مصرفی برای ساخت نمونه‌های RPC در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

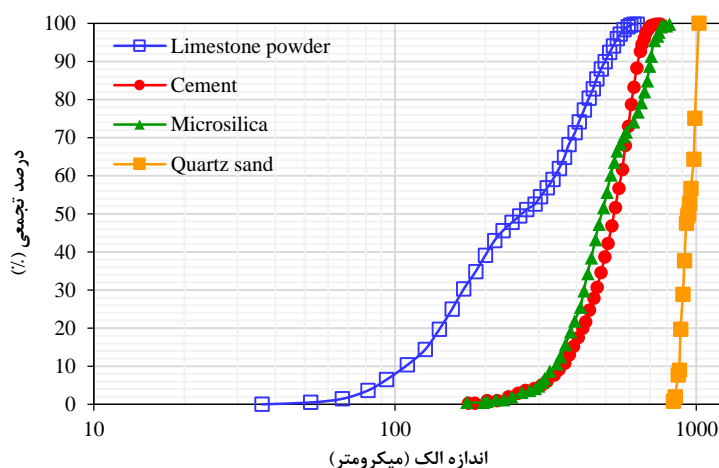
جدول ۵: خصوصیات دانه‌بندی و فعالیت پوزولانی میکروسیلیس در برابر آهک

دانه‌بندی میکروسیلیس							
۲۸۰۰	۲۰۰۰	۱۴۱۰	۱۰۰۰	۷۱۰	۵۰۰	۳۵۵	۲۵۰
							سینی
							شماره الک (میکرون)
-	-	-	-	-	-	-	۲-۵
							درصد وزنی تجمعی مانده روی الک
							>۹۵

درصد فعالیت پوزولانی			
سن	۲ ساعت	۱ روز	۳ روز
درصد فعالیت پوزولانی	۳/۱۶	۵/۸۵	۱۰۰

جدول ۶: مشخصات شیمیایی و فیزیکی میکروسیلیس

ترکیب شیمیایی	ماسه (%)	مشخصه فیزیکی	ماسه
SiO ₂	۹۷/۵	ضریب گوشه داری	<۱/۳
Al ₂ O ₃	۰/۹۵	دانسیته	۲/۸۴
Fe ₂ O ₃	۰/۸۵	رنگ	سفید متمایل به زرد
CaO	۰/۲۷	نقطه زینتر	>۱۴۰۰
MgO	۰/۲۴		
K ₂ O	۰/۱۹		



شکل ۲: منحنی‌های استاندارد دانه‌بندی مصالح مختلف مصرفی برای ساخت نمونه‌های RPC

بازدهی واکنش میکروسیلیس در بتن به درصد استفاده از این ماده بستگی دارد. مطالعات در خصوص تاثیر درصد میکروسیلیس بر مقاومت بتن نشان داده که تفاوت عمده میکروسیلیس با دیگر مواد پوزولانی، مقاومت‌زایی مواد پوزولانی معادل مقاومت جرم سیمان است [۵، ۲۲ و ۲۸]. اما میکروسیلیس به علت ریزی و خلوص بالا، مقاومت‌زایی بین ۲ تا حدود ۶ برابر جرم سیمان معادل را ایجاد کرده که این امر به نوبه خود حرارت‌زایی بتن را کاهش می‌دهد [۱۹]. حرارت‌زایی میکروسیلیس در بتن بستگی به عواملی مانند درصد میکروسیلیس، نسبت آب به مواد سیمانی و دما در حین واکنش دارد [۱۲].

مواد افزودنی شیمیایی (فوق روان کننده) مورد استفاده در این تحقیق، از شرکت سیکا پارسیان با مشخصات تجاری سیکا ویسکوکریت^{۱۷} بر پایه پلی کربکسیلات اتر و با کد تجاری 5110B تهیه گردیده است که با وزن مخصوص ۱۵/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب و به صورت یک مایع غلیظ زرد رنگ در بازار قابل تهیه است. استفاده از این فوق روان کننده باعث کاهش نسبت آب به سیمان به اندازه ۴۰٪ می‌گردد و همچنین افزایش مقاومت‌های اولیه و نهایی بتن را به همراه دارد. علاوه بر این، استفاده از این فوق روان کننده، بار منفی ذرات

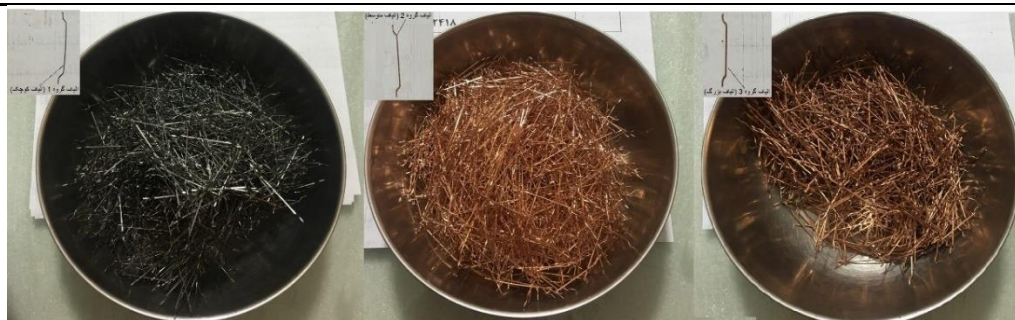
سیمان را افزایش داده و باعث پخش شدن بهتر سیمان در مخلوط بتن می‌گردد. بنا به توصیه شرکت تولیدکننده فوق روان کننده مصرفی، حداکثر مقدار مجاز استفاده از این افزودنی برابر با $0/3$ الی $1/4$ لیتر به ازای هر 100 کیلوگرم سیمان مورد استفاده در بتن می‌باشد. همچنین برای بهبود کارایی نمونه‌های بتنی ساخته شده در این تحقیق، فوق روان کننده مذکور براساس توصیه کارخانه سازنده آن، پس از اضافه شدن حدود 50 تا 75% آب مصرفی، به مخلوط افزوده شده است.

۲-۳- الیاف فولادی

الیاف فولادی مصرفی از شرکت تولیدی فولاد الوند دارای قلاب انتهایی (ساخت کشور ایران و منطبق بر استاندارد ASTM-A820 [۴۸]) تهیه شد. عمده ترین مزیت الیاف با قلاب انتهایی، نسبت زیاد طول به قطر (L/d) زیاد آنهاست که با استفاده از الیاف قلابدار به ازای یک مقدار مقاومت خمشی مشخص، باعث صرفه جویی 60 درصدی در مصرف الیاف در مقایسه با الیاف بدون قلاب انتهایی می‌شود. جهت تولید نمونه‌های RPC، به لحاظ مقاومت کششی بالا و رعایت اصول فنی و همچنین بررسی تاثیر قطر الیاف بر خواص مکانیکی بتن، طول الیافها برابر با مقدار ثابت 35 میلیمتر بوده و قطر آنها شامل سه دسته با قطرهای $0/4$ ، $0/6$ و $0/8$ میلیمتر می‌باشند. از این پس در این مقاله هر جا صحبت از الیاف گروه ۱، گروه ۲ و گروه ۳ شد، منظور از آن الیاف کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب با قطرهای $0/4$ ، $0/6$ و $0/8$ میلیمتر می‌باشد. در جدول ۷ و شکل ۳، مشخصات فیزیکی و ظاهری انواع الیاف مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها آمده است.

جدول ۷: مشخصات فیزیکی الیاف فولادی مختلف مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی

گروه الیاف	نام تجاری	نوع الیاف	طول (میلیمتر)	قطر (میلیمتر)	نسبت طول به قطر	ازدیاد طول نسبی (%)	پوشش سطحی	مقاومت کششی نهایی (مگاپاسکال)	وزن (عدد در کیلو)
۱	SFRC-ECR2338	الیاف گروه ۱ (الیاف کوچک)	۳۵	۰/۴	۸۷/۵	$2 >$	بدون پوشش	۲۴۷۰	۲۱۷۰۰
۲	SFRC-ECR2336	الیاف گروه ۲ (الیاف متوسط)	۳۵	۰/۶	۵۸/۳۳	$3 >$	مس	۱۷۰۰	۹۶۷۰
۳	SFRC-ECR2338	الیاف گروه ۳ (الیاف بزرگ)	۳۵	۰/۸	۴۳/۷۵	$3 >$	مس	۱۲۰۰	۵۴۳۹



شکل ۳: انواع مختلف الیاف فولادی (گروه‌های ۱ و ۲ و ۳) با مشخصات مختلف جهت ساخت نمونه‌های RPC

۳- طرح اختلاط بتن و آماده‌سازی نمونه‌ها

در آئین‌نامه‌های معتبر بتن [۴۷ و ۴۹] برای تنظیم طرح اختلاط بتن‌های پرمقاومت همچون RPC، بیشتر به کیفیت مصالح مصرفی اشاره شده و محدوده خاصی برای مقادیر آب و سیمان و سنگدانه‌ها پیشنهاد نگردیده است. در بیشتر این آئین‌نامه‌ها تأکید بر این است که با توجه به نکات پیشنهادی و در دسترس بودن مصالح (به‌ویژه مصالح بومی) برای تولید RPC، بایستی با اختلاط مصالح با

نسبت‌های متفاوت، به طرح اختلاط بهینه دست یافت. علاوه بر این، برخی محققین همچون مائو و همکاران^{۱۹} [۵۰] نمودارها و جداولی را برای طرح اختلاط بهینه مصالح جهت تولید RPC پیشنهاد کرده‌اند.

با توصیفات مذکور، در تحقیق حاضر برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه جهت تولید نمونه‌های RPC، با توجه به پیشنهادات آئین‌نامه‌ای [۴۷ و ۴۹] از یک سو و مروری بر مطالعات گذشته [۵۱ و ۵۲] از سوی دیگر، چندین طرح اختلاط متفاوت ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. بدین منظور با پیروی از تحقیقات گذشته [۳۰، ۵۱ و ۵۲] که مقداری بین ۳۲۵ تا ۵۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان را برای تولید RPC مناسب دانسته‌اند، مقدار سیمان مصرفی در این تحقیق به اندازه ۴۹۶/۴ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. ماسه سیلیس کوارتزی نیز به اندازه ۱/۱ تا ۱/۴ کسر حجمی سیمان و ۱۵٪ تا ۳۰٪ حجم کل سنگدانه‌ها یعنی به مقدار ۵۴۶/۰۴ تا ۶۹۵/۹۶ کیلوگرم تا بر مترمکعب در طرح اختلاط‌های مختلف مورد بررسی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که به منظور امکان مقایسه منطقی نتایج در تحقیق حاضر، در تمامی طرح اختلاط‌های ساخته شده با پیروی از [۵۲] که نسبت آب به سیمان (W/C) را برای رسیدن به اسلامپ مناسب RPC (۶۰ میلیمتر) تعیین نموده، مقدار W/C ثابت و برابر با ۰/۲۲۵ منظور شد. علاوه بر این، پودر سیلیس طبق توصیه [۳۰] به اندازه ۳۵/۶٪ کسر حجمی سیمان و برابر ۱۷۶/۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده گردید. مقدار میکروسیلیس مصرفی نیز به اندازه ۱۲/۵٪ کسر حجمی سیمان و برابر ۳۹/۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب لحاظ شد. ماده افزودنی فوق‌روان‌کننده طبق توصیه کارخانه سازنده به اندازه ۰/۹۸٪ از کسر حجمی سیمان مصرفی (۴/۹ کیلوگرم بر مترمکعب) در نظر گرفته شد. پس از ساخت طرح اختلاط بهینه به‌عنوان بتن شاهد، مقدار ۱ تا ۵٪ کسر حجمی RPC (بسته به اهداف مورد انتظار از آزمایش) از الیاف فولادی با اندازه‌ها (قطرها)ی مختلف در طرح اختلاط‌ها استفاده شد. جدول ۸ وزن و درصد مصالح مصرفی برای ساخت نمونه‌های RPC با بهترین طرح اختلاط بر مبنای واحد سیمان را به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد.

جهت اختلاط مصالح ابتدا ماسه، پودر سیلیس، میکروسیلیس، سیمان و الیاف فولادی به‌صورت خشک و به مدت ۵ دقیقه در بتونیر مخلوط شدند. پس از پراکندگی خوب الیاف در سطح خشک مصالح، محلول فعال‌کننده شامل یک محلول هیدروکسید سدیم (با غلظت ۱۲ مولار)، یک محلول سیلیکات سدیم و یک فوق‌روان‌کننده به همراه آب، به آرامی به داخل بتونیر اضافه شد و عمل اختلاط تا حدود ۵ دقیقه ادامه یافت. پس از ریختن ملات بتن در داخل قالب، جهت حفظ رطوبت نمونه‌ها در ۲۴ الی ۴۸ ساعت اول، سطح نمونه‌ها با یک لایه پلاستیک پوشانده شد. پس از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌ها تا سن مورد نظر (۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه) در حوضچه آب نگهداری شدند. نمونه‌ها بعد از بیرون آوردن از حوضچه آب، مدت کوتاهی در هوای آزاد قرار گرفتند تا سطح آنها خشک گردد و در ادامه آزمون‌های مختلف مقاومتی بر روی آنها اجرا شد که در ادامه به تشریح هر یک از این آزمایش‌ها پرداخته شده است.

جدول ۸: درصد و وزن مصالح مصرفی برای تولید نمونه‌های RPC

ماده مصرفی	واحد نسبت به سیمان مصرفی	وزن	
		کیلوگرم بر مترمکعب	درصد
سیمان پرتلند تیپ یک شرکت نيزار قم	۱	۴۹۶/۴	۱۰۰
ماسه سیلیس کوارتزی با کد DI	۱/۴-۱/۱	۶۸۱/۲	۱۴۰-۱۱۰
پودر سیلیس با کد ۱۵۱	۰/۳۵۶	۱۷۶/۷۱	۳۵/۶
میکروسیلیس (میکرونیزه شده)	۰/۱۲۵	۳۹/۷۱	۱۲/۵
آب شرب با نسبت W/C	۰/۲۲۵	۲۲/۵ لیتر	-
فوق‌روان‌کننده سیکا بر پایه پلی‌کربسیلات	۰/۰۶۵	۳۲/۲۶	۶/۵
الیاف فولادی با قطرهای مختلف	جایگزینی ۱ تا ۵ درصد کل مصالح مصرفی بتن شاهد در طرح اختلاط‌های مختلف		

به‌طور کلی، این تحقیق بر چهار هدف اصلی تمرکز داشته که در ادامه به شرح اهداف و آزمون‌های آزمایشگاهی مورد نیاز برای دستیابی به هر یک از این اهداف پرداخته شده است.

¹⁹ Mao et al.

۳-۱- آزمون مقاومت فشاری جهت تعیین اثر مدت زمان عمل‌آوری، قطر و درصد الیاف فولادی بر مقاومت فشاری RPC

برای انجام آزمون مقاومت فشاری، ابتدا نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM C192 [۴۹] ساخته و عمل‌آوری شدند. طبق این استاندارد، بتن در سه لایه مساوی در قالب ریخته شده و هر لایه با ۲۵ ضربه کوبیده شد. بعد از کوبیدن لایه آخر سطح نمونه صاف گردید. از آنجایی که تکان خوردن قالب، تغییرات دما و قرارگیری در شرایط خشک به خصوص در ۲۴ ساعت اول پس از قالب‌ریزی، می‌تواند تاثیر زیادی بر مقاومت نمونه داشته باشد، از اینرو نمونه‌ها در محل‌هایی ساخته شدند که جابجایی بعدی برای آنها لازم نباشد (شکل ۴-الف). پس از گذشت ۳۶ ساعت از قالب‌ریزی نمونه‌ها، نمونه‌ها از قالب درآمده و در حوضچه آب قرار گرفتند (شکل ۴-ب). پس از عمل‌آوری نمونه‌های RPC، مقاومت فشاری آنها با دستگاه جک بتن شکن ۲۰۰ تنی به شماره SET43-5 در شرایط مختلف اندازه‌گیری گردید. شکل ۵ چگونگی انجام تست مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های RPC را نشان می‌دهد.

جهت بررسی تاثیر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها بر مقاومت فشاری RPC، تعداد ۸ نمونه مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتیمتر مکعبی و تمامی نمونه‌ها حاوی ۲٪ الیاف فولادی متوسط با قطر $0/6$ میلیمتر ساخته شده و مقاومت فشاری آنها در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه تعیین گردید. علاوه بر این، جهت بررسی تاثیر قطر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری RPC، تعداد ۹ نمونه مکعبی با همان ابعاد ساخته شد. به طوری که هر سه نمونه از آنها حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۳ (الیاف بزرگ)، گروه ۲ (الیاف متوسط) و گروه ۱ (الیاف کوچک) بوده و پس از نگهداری ۲ روزه نمونه‌های مختلف در قالب‌های فلزی غیرقابل نفوذ و سپس باز کردن قالب‌ها، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها برحسب اندازه قطر الیاف تعیین شد. در نهایت جهت بررسی تاثیر درصد الیاف فولادی بر مقاومت فشاری RPC، تعداد ۱۵ نمونه مکعبی حاوی درصد‌های مختلف الیاف فولادی گروه ۲ با ابعاد مذکور ساخته شد. به طوری که هر ۳ نمونه از آنها به ترتیب حاوی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵٪ الیاف فولادی بوده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها برحسب درصد الیاف تعیین شد.



شکل ۴: (الف) نمونه‌های مختلف RPC تهیه شده جهت انجام آزمایشات، (ب) جدا کردن نمونه‌های RPC از قالب جهت عمل‌آوری مرطوب در حوضچه اشباع



شکل ۵: چگونگی انجام آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های RPC

۳-۲- آزمون مقاومت خمشی جهت تعیین اثر قطر و درصدهای مختلف الیاف فولادی بر مقاومت خمشی RPC

جهت تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های RPC از آزمایش استاندارد مطابق با استاندارد ASTM C293-79 [۵۳] استفاده شد. در این آزمون با بارگذاری در وسط یک تیر منشوری، مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی قابل تعیین است. جهت انجام این آزمایش تعداد ۱۰ نمونه تیر RPC با ابعاد استاندارد $10 \times 10 \times 40$ سانتیمتر مکعبی ساخته شد. یکی از نمونه‌های مذکور بدون الیاف (بتن شاهد) و ۹ نمونه بعدی حاوی درصدهای مختلفی الیاف فولادی بوده‌اند. به طوری که هر ۳ نمونه از آنها به ترتیب حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک)، ۲ (الیاف متوسط) و ۳ (الیاف بزرگ) می‌باشند. تیرهای بتنی ساخته شده به مدت ۲ روز در قالب نفوذناپذیر به حال خود رها شده و پس از باز کردن قالب و عمل‌آوری تیرها به مدت ۲۸ روز در حوضچه اشباع و قرارگیری آنها در هوای آزاد، آزمایش خمش بر روی آنها انجام شد. جهت انجام این آزمایش، نمونه‌ها نسبت به وضعیتی که در قالب قرار داشتند، به پهلو چرخانده شده و به طور متقارن روی دو بلوک تکیه‌گاهی قرار گرفتند. سپس بارگذاری متمرکز به طور یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی بر روی نمونه‌ها اعمال گردید (شکل ۶). جهت اندازه‌گیری مقاومت خمشی نمونه، هر بعد مقطع شکسته شده نمونه سه بار (در لبه‌ها و مرکز) با دقت 0.05 اینچ ($1/3$ میلیمتر) اندازه‌گیری و عرض متوسط و عمق متوسط نمونه در نقطه شکست تعیین گردید. برای برداشت نتایج، مقدار نیروی لازم برای ایجاد ترک در وسط یک سوم دهانه تیر (P) اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از معادله $f'_m = PL/bd^2$ (مطابق با استاندارد ASTM C293-79 [۵۳])، مقاومت خمشی (f'_m) آنها برحسب L طول، b عرض و d ارتفاع تیر بتنی تعیین گردیده است.



شکل ۶: نحوه انجام آزمایش خمشی بر روی تیر بتنی RPC و چگونگی شکست نمونه

۳-۳- آزمون مقاومت کششی جهت تعیین اثر قطر و درصدهای مختلف الیاف فولادی بر مقاومت کششی RPC

جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌های RPC از آزمایش برزیلی براساس استاندارد ASTM D3967-16 [۵۴] استفاده شد. این آزمایش بطور غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر به کار می‌رود. در این آزمایش با اعمال فشار قطری به نمونه استوانه‌ای، تنش کششی در امتداد عمود بر محور بارگذاری گسترش یافته و زمانی که بر مقاومت کششی نمونه بتنی غلبه کند، باعث گسیختگی آن می‌شود. جهت انجام این آزمایش، تعداد ۱۰ نمونه استاندارد استوانه‌ای RPC با قطر ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۱۵ سانتیمتر ساخته شدند. همچون نمونه‌های ساخته شده در آزمون خمش، یکی از نمونه‌های مذکور بدون الیاف (بتن شاهد) و ۹ نمونه بعدی حاوی درصدهای مختلفی الیاف فولادی بوده‌اند. به طوری که هر ۳ نمونه از آنها به ترتیب حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی کوچک، متوسط و بزرگ می‌باشند. پس از ساخت نمونه‌ها و درآوردن آنها از قالب و عمل‌آوری ۲۸ روزه در محیط مرطوب، اقدام به بارگذاری آنها با استفاده از دستگاه فک‌های قوسی شکل گردید (شکل ۷). دور نمونه‌ها یک لایه نوارچسب کاغذی چسبانده و جهت بارگذاری مشخص شد. نمونه‌ها به گونه‌ای داخل فک‌ها قرار گرفت که بار به صورت قطری به آن وارد شود و هیچ منفذی بین فک‌ها و سطح نمونه وجود نداشته باشد. سرعت بارگذاری دستگاه به صورت یکنواخت با نرخ 0.2 کیلونیوتن بر ثانیه در نظر گرفته شد و مقاومت کششی آنها تعیین شد.



شکل ۷: نمونه استوانه‌ای RPC جهت انجام آزمایش کششی و شکست نمونه

۳-۴- تخمین روابط تجربی با استفاده از تحلیل رگرسیون برای تخمین خصوصیات مقاومتی RPC حاوی الیاف فولادی

برای دستیابی به این هدف، پس از تهیه نمونه‌ها با طرح اختلاط‌های مختلف و مقایسه نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی، اقدام به تحلیل رگرسیون جهت ارائه روابط تجربی برای تخمین خصوصیات مقاومتی RPC با درصد‌های مختلف الیاف گردید.

۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش به تحلیل نتایج در خصوص تاثیر الیاف فولادی بر خصوصیات رفتاری نمونه‌های RPC تولید شده با مصالح بومی و رایج در کشور تحت اثر تست‌های آزمایشگاهی مختلف همچون آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی و کششی پرداخته شده است.

۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

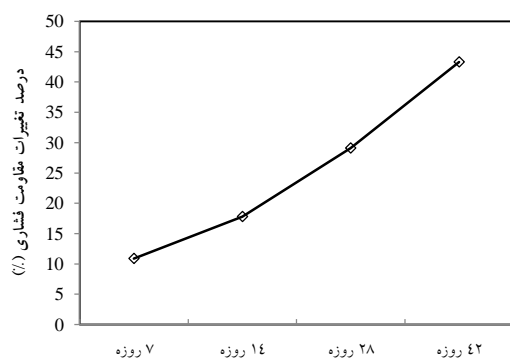
همانگونه که پیش از این نیز بیان شد، در این تحقیق جهت بررسی تأثیر مدت زمان عمل‌آوری، تأثیر اندازه قطر الیاف و تأثیر درصد الیاف، سه سری آزمون‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد. در ادامه نتایج آزمایشات به تفکیک هر بخش مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که برای هر طرح اختلاط، سه نمونه مکعب بتنی مورد آزمایش قرار گرفته و مقدار میانگین مقاومت بدست آمده از آن به عنوان مقاومت فشاری نهایی طرح اختلاط انتخاب شده است.

در جدول ۹ و شکل ۸، نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های RPC حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف با قطر متوسط) جهت بررسی تأثیر مدت زمان آزمایش بر مقاومت فشاری در مقایسه با بتن شاهد (بدون الیاف) ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ روزه (نمونه‌های A3 و A4) برابر با ۲۵۴/۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، با رشد ۱۰/۸۹٪ به اندازه ۲۵ مگاپاسکال همراه بوده است. میانگین مقاومت فشاری ۱۴ روزه (نمونه‌های A5 و A6) برابر با ۳۵۰/۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، رشد ۱۷/۸۱٪ به اندازه ۵۳ مگاپاسکال را تجربه نموده است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (نمونه‌های A7 و A8) برابر با ۴۲۳/۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، با رشد ۲۹/۱۱ درصدی به اندازه ۹۵/۵ مگاپاسکال همراه است. بیشترین میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در سن ۴۲ روزه (نمونه‌های A9 و A10) و برابر با ۵۱۱/۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، به اندازه ۱۵۴/۵ مگاپاسکال (۴/۲۷٪) رشد داشته است. براساس نتایج، تاثیر الیاف فولادی بر افزایش مقاومت فشاری RPC به وضوح قابل مشاهده است. به گونه‌ای که با افزودن الیاف، افزایش مقاومت فشاری RPC در سنین مختلف در مقایسه با بتن شاهد با رشد زیادی همراه بوده است. همچنین به عنوان یک نتیجه کلی، میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با گذشت زمان و افزایش سن عمل‌آوری (از ۷ الی ۴۲ روز) افزایش می‌یابد تا اینکه در زمان مشخصی این تغییرات ثابت می‌گردد. با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه بتن شاهد (بدون الیاف)، مقاومت فشاری به تدریج افزوده می‌شود. با افزایش سن عمل‌آوری، میزان تغییرات این افزایش کمتر می‌شود. اما نتایج نشان می‌دهد که برای نمونه‌های RPC، قضایه متفاوت بوده و با افزایش سن عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها از ۷ تا ۴۲ روز همچنان با تغییرات زیادی

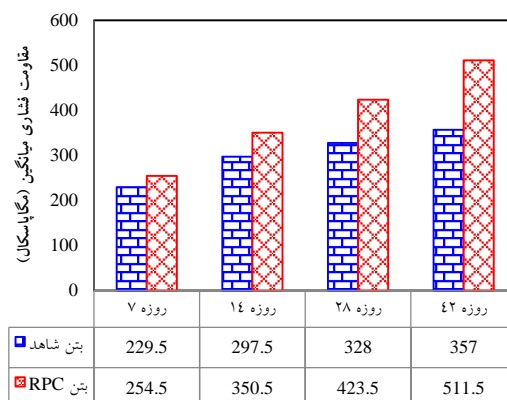
در حال افزایش می‌باشد. مواد سیمان‌شده با ذرات ریز (سیمان، ماسه سیلیس کوارتزی، پودر سیلیس و میکروسیلیس) زیادی در RPC وجود دارد، این موضوع عمل‌آوری RPC را تسریع نموده و باعث می‌شود RPC در فازهای اولیه گیرش، انقباض حجمی آشکارتری داشته باشد. این موضوع باعث ایجاد ترک‌های ریز و در نتیجه کاهش قدرت RPC می‌گردد. اما واکنش پوزولانیک ماسه سیلیس کوارتزی، پودر سیلیس و پرکننده‌های میکروسیلیس به‌طور مداوم ادامه می‌یابد و مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی نمونه‌های RPC را تا سن بالاتر (۴۲ روزه) افزایش می‌دهد. در نتیجه شاید بتوان دلیل اصلی این موضوع را به واکنش‌های بین خمیر سیمان و قفل‌وبست بیشتر سنگدانه‌های ماسه سیلیس کوارتزی و پودر میکروسیلیس موجود در نمونه‌های RPC با الیاف فولادی نسبت داد. اگرچه ممکن است این ویژگی (افزایش مقاومت با سرعت زیاد پس از ۴۲ روز) برای بتن RPC یک مزیت محسوب شود، اما در عمل و به‌خصوص برای مقاصد طراحی لرزه‌ای با چنین بتنی، دست طراح برای یک تخمین بهینه از مقاومت نهایی بتن باز نبوده و ممکن است نتایج طراحی را با اشکال مواجه نماید.

جدول ۹: تاثیر زمان عمل‌آوری و سن بتن حاوی الیاف فولادی متوسط بر مقاومت فشاری RPC در مقایسه با بتن شاهد

تغییرات مقاومت فشاری (%)	تغییرات مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری در سنین مختلف (مگاپاسکال)				شماره بتن	گروه الیاف
		۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	۴۲ روزه		
-	-	۲۲۸	۲۹۵	۳۱۸	۳۵۶	A1	بتن شاهد (بدون الیاف)
-	-	۲۳۱	۳۰۰	۳۳۸	۳۵۸	A2	بتن شاهد (بدون الیاف)
-	-	۲۲۹/۵	۲۹۷/۵	۳۲۸	۳۵۷	میانگین	بتن شاهد (بدون الیاف)
-	-	۲۴۱	-	-	-	A3	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
-	-	۲۶۸	-	-	-	A4	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
۱۰/۸۹	+۲۵	۲۵۴/۵	-	-	-	میانگین	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
-	-	-	۳۳۱	-	-	A5	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
-	-	-	۳۷۰	-	-	A6	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
۱۷/۸۱	+۵۳	۳۵۰/۵	-	-	-	میانگین	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
-	-	-	-	۴۳۴	-	A7	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
-	-	-	-	۴۱۳	-	A8	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
۲۹/۱۱	+۹۵/۵	-	-	۴۲۳/۵	-	میانگین	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
-	-	-	-	-	۵۱۴	A9	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
-	-	-	-	-	۵۰۹	A10	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)
۴۳/۲۷	+۱۵۴/۵	-	-	-	۵۱۱/۵	میانگین	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (متوسط)



(ب)



(الف)

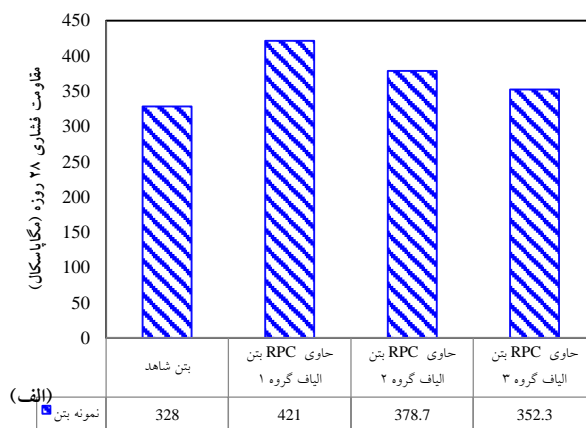
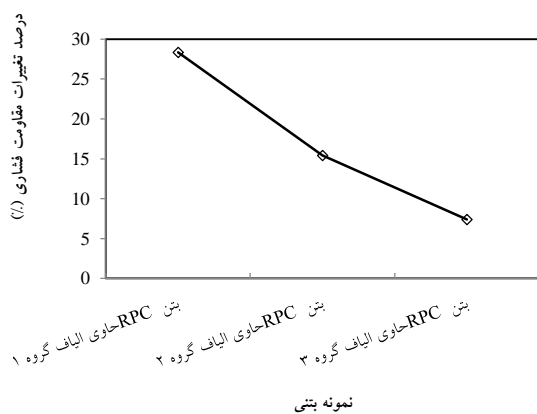
شکل ۸: تاثیر مدت زمان عمل‌آوری و سن بتن بر (الف) مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت فشاری

نتایج بررسی تأثیر قطر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد در جدول ۱۲ و شکل ۹ ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های B1 و B2 حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک با قطر ۰/۴ میلی‌متر) برابر

با ۴۲۱ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، با رشد ۲۸/۳۵ درصدی به اندازه ۹۳ مگاپاسکال همراه بوده است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های B3 و B4 حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف متوسط با قطر ۰/۶ میلی‌متر) برابر با ۳۷۸/۷ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، به اندازه ۵۰/۷ مگاپاسکال (۱۵/۴۴٪) افزایش یافته است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های B5 و B6 حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۳ (الیاف متوسط با قطر ۰/۸ میلی‌متر) برابر با ۳۵۲/۳ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، رشد ۲۹/۱۱ درصدی به اندازه ۹۵/۵ مگاپاسکال را تجربه نموده است. به‌عنوان یک نتیجه کلی، پارامتر قطر الیاف فولادی مورد استفاده در ساخت RPC، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری آن داشته است. به‌طوری‌که با کمتر شدن قطر الیاف مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد، بیشتر گردیده است. دلیل اصلی این مشاهده، افزایش تعداد الیاف فولادی در نمونه و متعاقباً قفل و بست بیشتر بین سنگدانه‌ها و الیاف است که توزیع جایگزینی سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد. بین الیاف را نتایج کلی بیانگر آن است که بیشترین مقاومت فشاری نمونه‌های RPC مربوط به نمونه حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف با قطر ۰/۴ میلی‌متر) و برابر با ۴۲۱ مگاپاسکال تعیین گردیده است.

جدول ۱۲: تاثیر قطر و گروه الیاف فولادی بر متوسط مقاومت فشاری RPC در مقایسه با بتن شاهد

تغییرات مقاومت فشاری (%)	تغییرات مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (مگاپاسکال)	شماره بتن	گروه الیاف
-	-	۳۲۸	۳۲۸	B	بتن شاهد (بدون الیاف)
۲۸/۳۵	+۹۳	۴۲۱	۴۱۰	B1 B2 B3	بتن حاوی الیاف گروه ۱ (الیاف کوچک)
۱۵/۴۴	+۵۰/۷	۳۷۸/۷	۳۹۱	B4 B5 B6	بتن حاوی الیاف گروه ۲ (الیاف متوسط)
۷/۴۰	۲۴/۳	۳۵۲/۳	۳۷۷	B7 B8 B9	بتن حاوی الیاف گروه ۳ (الیاف بزرگ)



شکل ۹: تاثیر قطر و گروه الیاف فولادی بر (الف) میانگین مقاومت فشاری RPC در مقایسه با بتن شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت فشاری

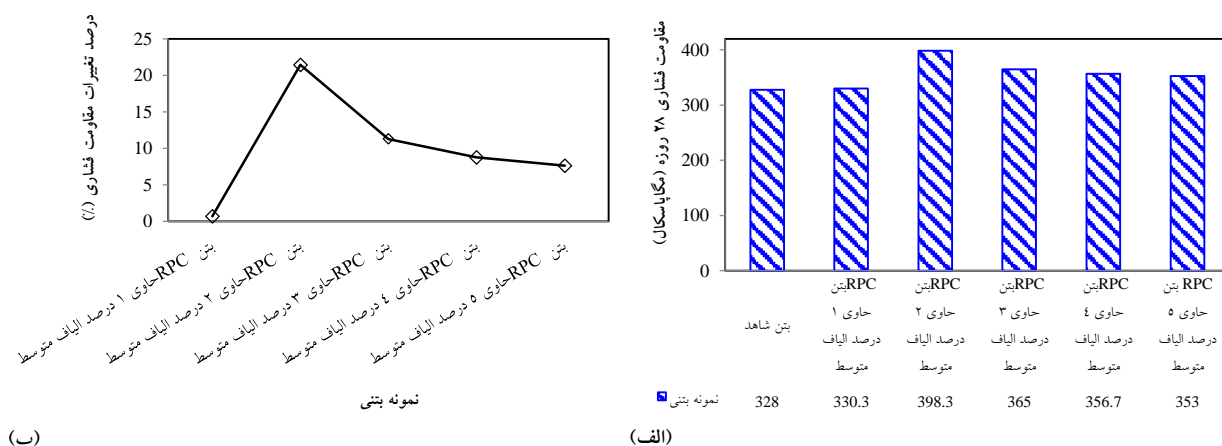
نتایج بررسی تاثیر درصد الیاف فولادی بر مقاومت فشاری نمونه‌های RPC حاوی درصد‌های مختلف الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف متوسط با قطر ۰/۶ میلی‌متر) در مقایسه با بتن شاهد در جدول ۱۳ و شکل ۱۰ ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های C1، C2 و C3 حاوی ۱٪ الیاف فولادی برابر با ۳۳۰/۳ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، با رشد ناچیز ۰/۷۱ درصدی (به اندازه ۲/۳ مگاپاسکال) همراه است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های C4، C5 و C6 حاوی ۲٪ الیاف فولادی برابر با ۳۹۸/۳ مگاپاسکال

بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد به اندازه ۷۰/۳ مگاپاسکال (۲۱/۴۳٪) رشد داشته است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های C7، C8 و C9 حاوی ۳٪ الیاف فولادی برابر با ۳۶۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، رشد ۲۸/۱۱ درصدی (۳۷ مگاپاسکال) را نشان می‌دهد. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های C10، C11 و C12 حاوی ۴٪ الیاف فولادی برابر با ۳۵۶/۷ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد به اندازه ۱۱/۲۸٪) رشد داشته است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های C13، C14 و C15 حاوی ۵٪ الیاف فولادی برابر با ۳۵۳ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد به اندازه ۷/۶۲٪) (۲۵ مگاپاسکال) رشد داشته است. دلیل افزایش مقاومت نمونه‌های RPC با افزایش الیاف فولادی این است که الیاف تشکیل و توسعه ترک‌ها در ماتریس بتن را به تاخیر انداخته، بنابراین می‌توانند مقاومت فشاری را بهبود بخشند.

نتایج کلی حاکی از تاثیر قابل ملاحظه حجم الیاف فولادی بر مقاومت فشاری RPC می‌باشد. به طوری که استفاده از الیاف فولادی متوسط تا ۲٪ نسبت حجمی سیمان منجر به افزایش مقاومت فشاری RPC در مقایسه با بتن شاهد گردید. این در حالی است که افزودن ۱٪ الیاف فولادی، تاثیر چندانی بر افزایش مقاومت فشاری RPC در مقایسه با بتن شاهد نداشته است. همچنین با افزایش الیاف فولادی بیش از ۲٪، سیر صعودی افزایش مقاومت فشاری RPC کاهش می‌یابد که این موضوع به منزله کاهش مقاومت نمونه‌های بتنی است. بر این اساس می‌توان گفت که مقدار بهینه الیاف فولادی متوسط مورد استفاده جهت ساخت RPC با بیشترین مقاومت، ۲٪ است. شاید بتوان دلیل اصلی افت بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های بتن RPC در مقادیر بالای حجم الیاف فولادی را افزایش تخلخل بتن و منقطع شدن چسب خمیر سیمان از مصالح سنگی با زیاد شدن الیاف دانست.

جدول ۱۳: تاثیر درصد الیاف فولادی مورد استفاده در طرح اختلاط بتن بر متوسط مقاومت فشاری RPC در مقایسه با بتن شاهد

گروه الیاف	شماره بتن	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (مگاپاسکال)	متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (مگاپاسکال)	میزان تغییرات مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	تغییرات مقاومت فشاری (%)
بتن شاهد (بدون الیاف)	C	۳۲۸	۳۲۸	-	-
بتن حاوی ۱٪ الیاف	C1	۳۴۸	۳۴۸	-	-
گروه ۲ (متوسط)	C2	۳۲۴	۳۳۰/۳	۲/۳	۰/۷۱
	C3	۳۱۹			
بتن حاوی ۲٪ الیاف	C4	۳۶۰	۳۶۰	-	-
گروه ۲ (متوسط)	C5	۴۱۶	۳۹۸/۳	۷۰/۳	۲۱/۴۳
	C6	۴۱۹			
بتن حاوی ۳٪ الیاف	C7	۳۵۷	۳۵۷	-	-
گروه ۲ (متوسط)	C8	۳۷۰	۳۶۵	۳۷	۱۱/۲۸
	C9	۳۶۸			
بتن حاوی ۴٪ الیاف	C10	۳۶۷	۳۶۷	-	-
گروه ۲ (متوسط)	C11	۳۶۲	۳۵۶/۷	۲۸/۷	۸/۷۵
	C12	۳۴۱			
بتن حاوی ۵٪ الیاف	C13	۳۶۱	۳۶۱	-	-
گروه ۲ (متوسط)	C14	۳۲۷	۳۵۳	۲۵	۷/۶۲
	C15	۳۷۱			



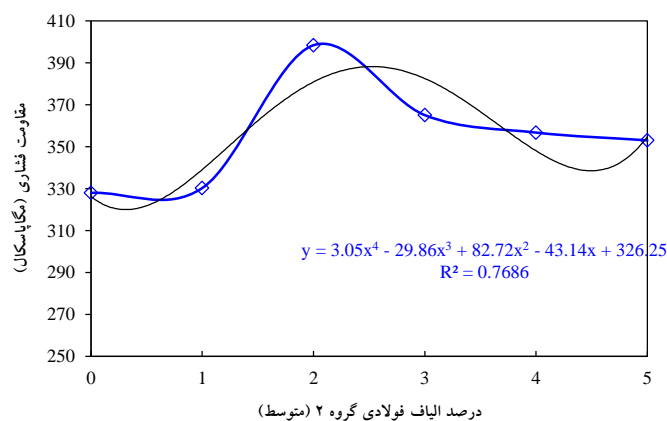
شکل ۱۰: تاثیر درصد الیاف فولادی بر (الف) میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت فشاری

در ادامه با انجام تحلیل رگرسیون (شکل ۱۱)، یک رابطه تجربی برای تخمین مقاومت فشاری RPC بر حسب درصد الیاف فولادی ارائه شده است. بدین منظور می‌توان مقاومت فشاری RPC دارای الیاف فولادی (f'_{cf}) را بر حسب مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالا یا بتن شاهد (f'_c) و درصد الیاف فولادی (V_f) با یک تابع چند جمله‌ای درجه ۴ و مطابق رابطه ۱ تعیین نمود:

$$f'_{cf} (MPa) = f'_c + AV_f^4 + AV_f^3 + BV_f^2 + CV_f \quad (1)$$

با جایگذاری ۳۲۸ مگاپاسکال به جای f'_c و انجام تحلیل رگرسیون برای نمونه‌های RPC با طرح اختلاط‌های مختلف داریم:

$$f'_{cf} (MPa) = 328 - 3.05V_f^4 - 29.86V_f^3 + 82.72V_f^2 - 43.14V_f \quad (2)$$



شکل ۱۱: پیش‌بینی تقریبی تاثیر درصد الیاف فولادی بر میزان مقاومت فشاری RPC

۲-۴- نتایج آزمون مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک)، گروه ۲ (الیاف متوسط) و گروه ۳ (الیاف بزرگ) با درصد‌های مختلف ۱، ۲ و ۳٪ در مقایسه با نمونه بتن شاهد (بدون الیاف) در جدول ۱۴ و شکل ۱۲ ارائه شده است. مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۱ به ترتیب برابر با ۳۹/۹، ۴۰/۹ و ۳۶/۸ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، با رشد ۱۶/۸۵ درصدی برای نمونه بتنی D2 و به اندازه ۵/۹ مگاپاسکال بدست آمده است. مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۲ به ترتیب برابر با ۴۱/۳، ۴۴/۶ و ۴۰ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین

مقاومت خمشی نمونه‌های RPC حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۲ در مقایسه با بتن شاهد با رشد ۲۷/۴۲ درصدی برای نمونه بتنی D5 و به اندازه ۹/۶ مگاپاسکال حاصل گردیده است. مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۳ به ترتیب برابر با ۳۵/۷، ۳۸/۶ و ۳۹/۱ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین مقاومت خمشی نمونه‌های RPC حاوی ۳٪ الیاف فولادی گروه ۳، در مقایسه با بتن شاهد، با رشد ۱۱/۷۱ درصدی برای نمونه بتنی D9 و به اندازه ۴/۱ مگاپاسکال بدست آمده است.

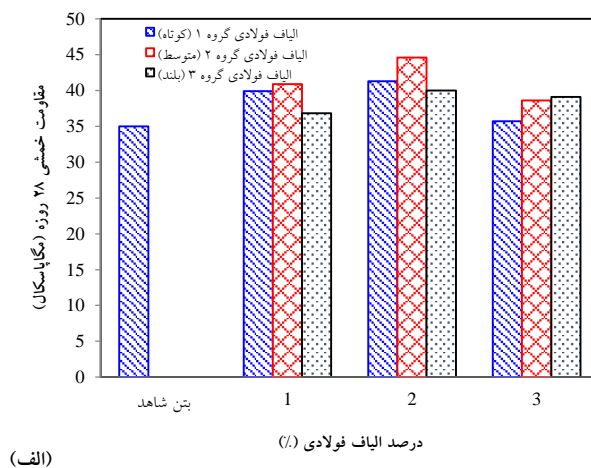
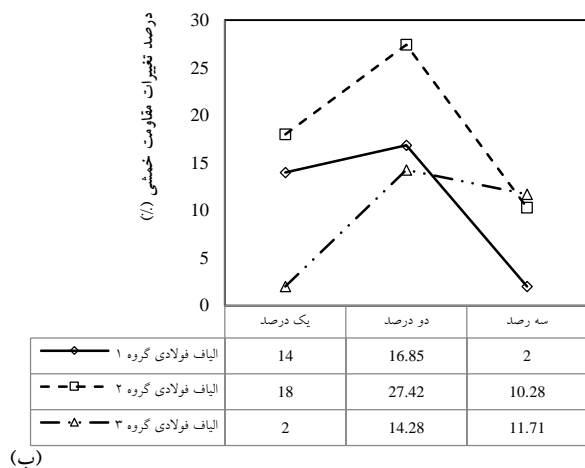
براساس نتایج کلی، نحوه تاثیر انواع الیاف فولادی با قطرهای مختلف بر روی مقاومت خمشی بتن تا حدودی متفاوت است و برای دو نوع الیاف فولادی گروه ۱ و ۲، نمودار مربوطه ابتدا روند صعودی داشته و بعد از رسیدن به اوج، سیری نزولی پیدا کرده است. قابل ذکر است که در همه حالات مقاومت خمشی بتن دارای الیاف فولادی از بتن بدون الیاف بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک) و گروه ۲ (الیاف متوسط)، بیشترین مقاومت خمشی نمونه بتن در ۲٪ حجمی الیاف فولادی حاصل شده است. با افزودن الیاف گروه ۳ نیز بیشترین مقاومت خمشی بتن نمونه در ۳٪ حجمی الیاف فولادی ایجاد گردیده است. بنابراین می‌توان مقدار ۲٪ الیاف فولادی گروه‌های ۱ و ۲ و مقدار ۳٪ الیاف فولادی گروه ۳ را به عنوان درصد بهینه الیاف فولادی جهت رسیدن به حداکثر مقاومت خمشی در RPC پیشنهاد نمود. افزایش قابل توجه مقاومت خمشی نمونه‌های RPC را می‌توان به طور مستقیم به اثر پل زدن^{۲۰} الیاف فولادی در ماتریس بتن نسبت داد. این اثر گسترش ترک در بتن را به تأخیر انداخته و منجر به بهبود مقاومت خمشی می‌گردد. نتایج مشابهی توسط سو و همکاران^{۲۱} [۵۵] نیز در گذشته ارائه شده است. لازم به ذکر است که اثر پل زدن مذکور با کوچکتر شدن قطر الیاف فولادی و به دلیل جای‌گیری بهتر سنگدانه‌ها در بین مواد سیمانی RPC بیشتر شده و همین موضوع افزایش مقاومت خمشی را به دنبال داشته است. اما در سمت مقابل با افزایش بیش از حد درصد الیاف فولادی در ماتریس بتن، نقش مواد سیمانی کاهش یافته و با کم شدن قفل و بست بین دانه‌ها از یک سو و عدم پیوستگی کامل الیاف فولادی با ماتریس بتن، نقش معکوس در افزایش مقاومت خمشی مشاهده می‌گردد.

جدول ۱۴: تاثیر قطر و درصد الیاف فولادی بر مقاومت خمشی ۲۸ روزه RPC در مقایسه با بتن شاهد

گروه الیاف	شماره بتن	درصد الیاف	مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن (مگاپاسکال)	تغییرات مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	تغییرات مقاومت خمشی (%)
بدون الیاف	D	۰	۳۵	-	-
الیاف گروه ۱	D1	۱	۳۹/۹	+۴/۹	۱۴
(الیاف کوچک)	D2	۲	۴۰/۹	+۵/۹	۱۶/۸۵
	D3	۳	۳۶/۸	+۱/۸	۵/۱۴
الیاف گروه ۲	D4	۱	۴۱/۳	+۶/۳	۱۸
(الیاف متوسط)	D5	۲	۴۴/۶	+۹/۶	۲۷/۴۲
	D6	۳	۴۰	+۵	۱۴/۲۸
الیاف گروه ۳	D7	۱	۳۵/۷	+۰/۷	۲
(الیاف بزرگ)	D8	۲	۳۸/۶	+۳/۶	۱۰/۲۸
	D9	۳	۳۹/۱	+۴/۱	۱۱/۷۱

^{۲۰} bridging effect

^{۲۱} Su et al.



شکل ۱۲: تاثیر قطر و درصد الیاف فولادی بر (الف) مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت خمشی در ادامه با انجام تحلیل رگرسیون (شکل ۱۳)، یک رابطه تجربی برای تخمین مقاومت خمشی RPC بر حسب درصد الیاف فولادی ارائه شده است. بدین منظور می‌توان مقاومت خمشی RPC دارای الیاف فولادی (f_{rf}') را بر حسب مقاومت خمشی بتن با مقاومت بالا یا بتن شاهد (f_r) و درصد الیاف فولادی (V_f) با یک تابع چندجمله‌ای درجه ۳ و مطابق رابطه ۳ تعیین نمود:

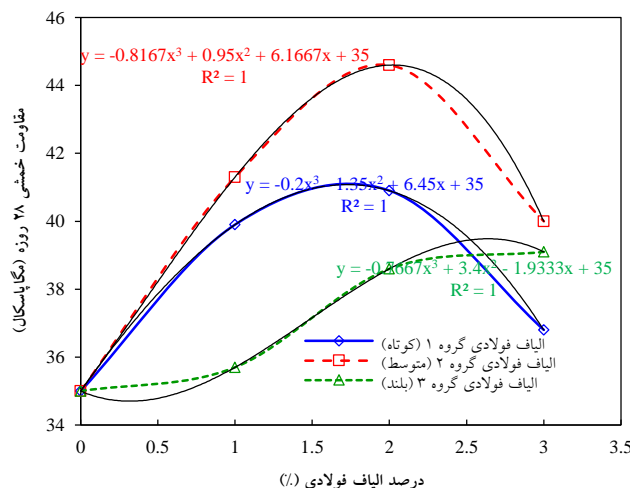
$$f_{rf}' (MPa) = f_r + AV_f^3 + BV_f^2 + CV_f \quad (۳)$$

با جایگذاری ۳۵ مگاپاسکال به جای f_r و انجام تحلیل رگرسیون برای نمونه‌های RPC با طرح اختلاط‌های مختلف داریم:

$$f_{rf}' (MPa) = 35 - 0.2V_f^3 - 1.35V_f^2 + 6.45V_f \quad (۴) \text{ RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۱ (کوچک، قطر ۰/۴ میلیمتر)}$$

$$f_{rf}' (MPa) = 35 - 0.82V_f^3 + 0.95V_f^2 + 6.17V_f \quad (۵) \text{ RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۲ (متوسط، قطر ۰/۶ میلیمتر)}$$

$$f_{rf}' (MPa) = 35 - 0.77V_f^3 - 3.4V_f^2 - 1.94V_f \quad (۶) \text{ RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۳ (بزرگ، قطر ۰/۸ میلیمتر)}$$



شکل ۱۳: پیش‌بینی تقریبی تاثیر درصد الیاف فولادی بر مقاومت خمشی RPC

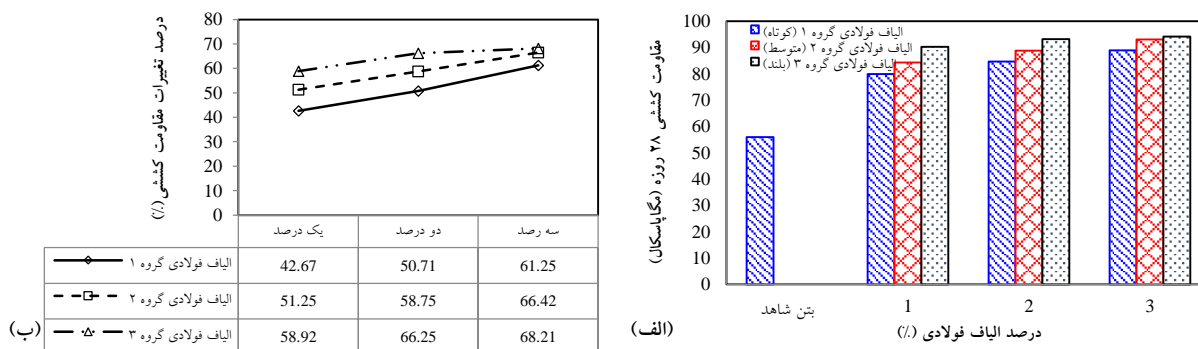
۴-۳- نتایج آزمون مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک)، گروه ۲ (الیاف متوسط) و گروه ۳ (الیاف بزرگ) در مقایسه با بتن شاهد در جدول ۱۵ و شکل ۱۴ ارائه شده است. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۱ به ترتیب برابر با ۷۹/۹، ۸۴/۴ و ۹۰/۳ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین مقاومت کششی نمونه‌های RPC حاوی ۱٪ الیاف فولادی گروه ۱ در مقایسه با بتن شاهد، با رشد ۶۱/۲۵ درصدی برای نمونه بتنی E3 و به اندازه ۳۴/۳ مگاپاسکال بدست آمده است. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۲ به ترتیب برابر با ۸۴/۷، ۸۸/۹ و ۹۳/۲ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین مقاومت کششی نمونه‌های RPC حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۲ در مقایسه با مقاومت کششی بتن شاهد (بدون الیاف)، با رشد ۶۶/۴۲ درصدی برای نمونه بتنی E6 و به اندازه ۳۷/۲ مگاپاسکال بدست آمده است. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳٪ الیاف فولادی گروه ۳ به ترتیب برابر با ۸۹، ۹۳/۱ و ۹۴/۲ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین مقاومت کششی نمونه‌های RPC حاوی ۳٪ الیاف فولادی گروه ۳ در مقایسه با مقاومت کششی بتن شاهد، با رشد ۶۸/۲۱ درصدی برای نمونه بتنی E9 و به اندازه ۳۸/۲ مگاپاسکال بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که رشد مقاومت کششی RPC در اثر افزودن ۱ تا ۳٪ از هر سه گروه الیاف فولادی، کاملاً صعودی بوده و بتن به طور پیوسته در حال افزایش می‌باشد. به طوری که بیشترین درصد رشد مقاومت کششی بتن مربوط به نمونه A9 دارای ۳٪ حجمی الیاف فولادی گروه ۳ به مقدار ۹۴/۲ مگاپاسکال (رشد مقاومت ۶۸/۲۱ درصدی) نسبت به بتن شاهد بوده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی گروه ۳ در مقایسه با دو گروه دیگر، تاثیر بیشتری بر درصد رشد مقاومت کششی نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد داشته است. با توجه به افزایش قابل توجه مقاومت کششی نمونه‌های RPC با افزودن درصدهای متفاوتی از گروه‌های مختلف الیاف فولادی می‌توان دریافت در مواردی که نیاز به افزایش مقاومت کششی بتن باشد، استفاده از الیاف فولادی با قطرهای مختلف به عنوان الیاف تسلیح کننده بتن قابل قبول خواهد بود.

صرف نظر از تغییرات جزئی، می‌توان گفت که روند کلی تغییرات مقاومت کششی RPC مشابه روند مقاومت فشاری می‌باشد. با این حال به دلیل نقش واسطه (اثر پل زدن) الیاف فولادی در RPC، این الیاف نقش بیشتری را در افزایش مقاومت کششی ماتریس بتن ایفا می‌کنند. نتیجه مشابهی توسط کانگ و همکاران^{۲۲} [۵۶] گزارش شده است. علاوه بر این، در مقایسه با نتایج مقاومت فشاری، الیاف فولادی تاثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت کششی دارند که این رفتار را می‌توان به توسعه باندهای سیمانه شده C-S-H سخت تر و مترکم تر ماتریس RPC نسبت داد که منطقه انتقال سطحی را بهبود بخشیده و منجر به افزایش مقاومت کششی می‌گردد [۵۷].

جدول ۱۵: تاثیر قطر و درصد الیاف فولادی بر مقاومت کششی ۲۸ روزه RPC در مقایسه با بتن شاهد

گروه الیاف	شماره بتن	درصد الیاف	مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن (مگاپاسکال)	تغییرات مقاومت کششی (مگاپاسکال)	تغییرات مقاومت کششی (%)
بدون الیاف	E	۰	۵۶	-	-
الیاف گروه ۱ (الیاف کوچک)	E1	۱	۷۹/۹	+۲۳/۹	۴۲/۶۷
	E2	۲	۸۴/۴	+۲۸/۴	۵۰/۷۱
	E3	۳	۹۰/۳	+۳۴/۳	۶۱/۲۵
الیاف گروه ۲ (الیاف متوسط)	E4	۱	۸۴/۷	+۲۸/۷	۵۱/۲۵
	E5	۲	۸۸/۹	+۳۲/۹	۵۸/۷۵
	E6	۳	۹۳/۲	+۳۷/۲	۶۶/۴۲
الیاف گروه ۳ (الیاف بزرگ)	E7	۱	۸۹	+۳۳	۵۸/۹۲
	E8	۲	۹۳/۱	+۳۷/۱	۶۶/۲۵
	E9	۳	۹۴/۲	+۳۸/۲	۶۸/۲۱



شکل ۱۴: تاثیر قطر و درصد الیاف فولادی بر (الف) مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت کششی

در ادامه با انجام تحلیل رگرسیون (شکل ۱۵)، یک رابطه تجربی برای تخمین مقاومت کششی RPC بر حسب درصد الیاف فولادی ارائه شده است. بدین منظور می‌توان مقاومت کششی RPC دارای الیاف فولادی (f'_{ff}) را بر حسب مقاومت کششی بتن شاهد (f'_r) و درصد الیاف فولادی (V_f) با یک تابع چندجمله‌ای درجه ۳ و مطابق رابطه ۷ تعیین نمود:

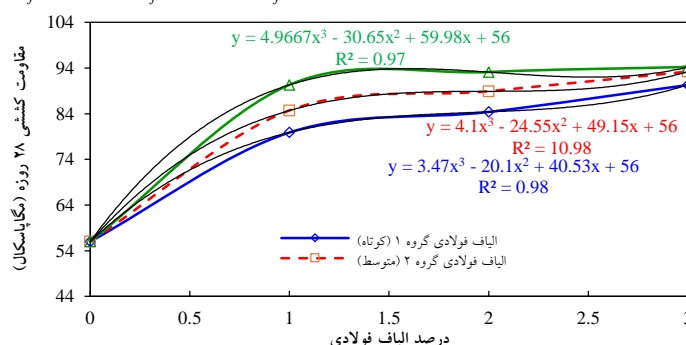
$$f'_{ff} (MPa) = f'_r + AV_f^3 + BV_f^2 + CV_f \quad (7)$$

با جایگذاری ۵۶ مگاپاسکال به جای f'_r و انجام تحلیل رگرسیون برای نمونه‌های RPC با طرح اختلاط‌های مختلف داریم:

$$f'_{ff} (MPa) = 56 + 3.47V_f^3 - 20.1V_f^2 + 40.53V_f \quad (8) \quad \text{RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۱ (کوچک و قطر ۰/۴ میلیمتر)}$$

$$f'_{ff} (MPa) = 56 + 4.1V_f^3 - 24.55V_f^2 + 49.15V_f \quad (9) \quad \text{RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۲ (متوسط و قطر ۰/۶ میلیمتر)}$$

$$f'_{ff} (MPa) = 56 + 4.97V_f^3 - 30.65V_f^2 + 59.98V_f \quad (10) \quad \text{RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۳ (بزرگ و قطر ۰/۸ میلیمتر)}$$



شکل ۱۵: پیش‌بینی تقریبی تاثیر افزودن فولادی مختلف بر مقاومت کششی RPC

۵- نتیجه گیری

در پژوهش آزمایشگاهی حاضر تأثیر استفاده از الیاف فولادی صنعتی بر مشخصات مقاومتی RPC ساخته شده از مصالح معدنی بومی و رایج در کارخانه‌های تهیه شن و ماسه کشور در مقایسه با بتن معمولی پرمقاومت (بتن شاهد) مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های حاصل از تحقیق به‌طور خلاصه به شرح ذیل قابل بیان است:

- با افزایش سن عمل‌آوری (از ۷ تا ۴۲ روز)، مقاومت فشاری RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف متوسط: قطر ۰/۶ میلیمتر) در مقایسه با بتن شاهد، روند رو به رشد قابل توجهی از ۲۵ مگاپاسکال (به اندازه ۱۰/۸۹٪) تا ۱۵۴/۵ مگاپاسکال (به اندازه ۴/۲۷٪) را به دنبال دارد. این موضوع به ادامه واکنش‌های بین خمیر سیمان و قفل‌وبست بیشتر سنگدانه‌های ماسه سلیس کوارتزی و پودر میکروسیلیس موجود در نمونه‌های RPC با الیاف فولادی نسبت داده می‌شود.

- (۲) با کاهش قطر الیاف، مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC در مقایسه با بتن شاهد بیشتر بوده و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه RPC حاوی ۲٪ الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک: قطر ۰/۴ میلیمتر) برابر با ۴۲۱ مگاپاسکال (رشد ۲۹/۱۱ درصدی نسبت به بتن شاهد) می‌باشد. دلیل اصلی این مشاهده، افزایش تعداد الیاف فولادی در نمونه و متعاقباً قفل و بست بیشتر بین سنگدانه‌ها و الیاف است که توزیع جایگزینی سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد.
- (۳) استفاده از الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف متوسط: قطر ۰/۶ میلیمتر) تا ۲٪ نسبت حجمی بتن، منجر به بیشترین افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC (۷۰/۳ مگاپاسکال با رشد ۲/۴۳٪) در مقایسه با بتن شاهد می‌گردد. این مقدار الیاف متوسط را می‌توان به‌عنوان مقدار بهینه الیاف جهت ساخت RPC با بیشترین مقاومت فشاری در نظر گرفت.
- (۴) با افزودن ۱ تا ۳٪ الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک) و گروه ۲ (الیاف متوسط)، مقاومت خمشی ابتدا روند صعودی داشته و پس از رسیدن به اوج (در مقدار ۲٪ الیاف)، سیری نزولی به خود می‌گیرد. اما با افزودن ۳٪ الیاف فولادی گروه ۳ (الیاف بزرگ: قطر ۰/۸ میلیمتر)، مقاومت خمشی همچنان افزایش یافته و برابر با ۴/۱ مگاپاسکال به دست آمده که رشد ۱۱/۷۱ درصدی نسبت به بتن شاهد را نشان می‌دهد. بر این اساس، مقدار ۲٪ الیاف فولادی گروه‌های ۱ و ۲ و مقدار ۳٪ الیاف فولادی گروه ۳ به‌عنوان مقادیر بهینه الیاف جهت رسیدن به حداکثر مقاومت خمشی RPC پیشنهاد شد. دلیل مشاهده چنین رفتاری به اثر پل زدن الیاف فولادی در ماتریس بتن نسبت داده می‌شود.
- (۵) با افزودن ۱ تا ۳٪ از الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک)، گروه ۲ (الیاف متوسط) و گروه ۳ (الیاف بزرگ)، رشد مقاومت کششی RPC کاملاً صعودی می‌باشد. بیشترین رشد مقاومت کششی برای نمونه دارای ۳٪ الیاف گروه ۳ به مقدار ۹۴/۲ مگاپاسکال (رشد ۶۸/۲۱ درصدی نسبت به بتن شاهد) به دست آمده است. بر این اساس، در مواردی که نیاز به افزایش مقاومت کششی بتن باشد، استفاده از الیاف فولادی با قطرهای مختلف به‌عنوان الیاف تسلیح‌کننده بتن مطلوب است.
- (۶) معادلات تجربی توسعه‌یافته از قابلیت بالایی برای پیش‌بینی و تخمین اولیه‌ای از خصوصیات مقاومتی بتن RPC تولیدشده در تحقیق حاضر برخوردارند. به‌طوری‌که این معادلات با دقت نسبتاً بالایی قادر به پیش‌بینی مقاومت فشاری، کششی و خمشی و همچنین مدول گسیختگی نمونه‌های RPC حاوی درصد‌های مختلف الیاف فولادی می‌باشند.

مراجع

- [1] Fang, Y., Yao, Z., Huang, X., Li, X., Diao, N., Hu, K., and Li, H. (2022). Permeability evolution characteristics and microanalysis of reactive powder concrete of drilling shaft lining under stress-seepage coupling. *Construction and Building Materials*, 331, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127336>.
- [2] Caldarone A. (2009). *High Strength Concrete*. Taylor & Francis: New York.
- [3] Cheyrezy, M., Maret, V., and Frouin, L. (1995). Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete). *Cement and concrete research*, 25(7), 1491-1500.
- [4] Richard, P., and Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 25(7), 1501-1511.
- [5] Voo, Y.L., and Foster, S.J. (2009). *Reactive Powder Concrete: Analysis and design of RPC girders* paperback, LAP: Lambert Academic Publishing, United Kingdom.
- [6] Mahboubi Niazmandi, M., Mirassi, S., Momeni, M., Bakhshandeh, M., and Lotfi, H. (2022). The effects of pulse-like motions of near-fault earthquakes with forward-directivity characteristic on the response of concrete structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 10.22065/JSCE.2022.356658.2906.
- [7] Mehta, P.K. (1986). *Concrete: structure, properties and materials*. prentice-hall inc., Englewood cliffs, New Jersey
- [8] Aiello, M., Leuzzi, F., Centonze, G., and Maffezzoli, A. (2009). Use of steel fibers recovered from waste tires as reinforcement in concrete: Pull-out behavior, compressive and flexural strength. *Waste Management*, 29, 1960-1970.
- [9] Yu, R., Spiesz, P., and Brouwers, H.J.H. (2015). Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, 79, 273-282.
- [10] Yu, R., Spiesz, P., and Brouwers, H.J.H. (2014). Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRC). *Cement and Concrete Composites*, 56, 29-39.
- [11] Ismail, Z.Z., and Al-Hashmi, E.A. (2008). Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete. *Waste Management*, 28(11), 2048-2053.

- [12] Edward Nawy, G. (2001). *Fundamentals of high-performance concrete*, John Wiley & Sons: New York.
- [13] Sanjuán, M.Á., and Andrade, C. (2021). Reactive Powder Concrete: Durability and Applications. *Applied Science*, 11, 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>.
- [14] Ashour Al.Khuzaiie, H.M., and Atea. R.S. (2019). Investigation of torsional behavior and capacity of reactive powder concrete (RPC) of hollow T-beam. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 199-207.
- [15] Matte, V., and Moranville, M. (1999). Durability of reactive powder composites: Influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. *Cement and Concrete Composites*, 21, 1-9.
- [16] Wasan, K. (2014). *Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete*. LAP Lambert Academic Publishing, Uxbridge, United Kingdom.
- [17] Desai, K. (2016). *New Era of concrete: Reactive Powder Concrete: The ultra high performance concrete*. LAP LAMBERT Academic Publishing, Einbeck, Germany.
- [18] Zeng, W., Luo, B., and Wang, Y. (2013). Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 41, 844-851.
- [19] Canbaz, M. (2014). The effect of high temperature on reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 70, 508-513.
- [20] Beglarigale, A., and Yazici, H. (2015). Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. *Construction and Building Materials*, 75, 255-265.
- [21] Mostofinejad, D., Rostami, M., and Hosseini, S.A. (2016). Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*, 123, 754-767.
- [22] Ju, Y., Tianc, K., Liu, H., Hans-Wolf, R., and Wang, L. (2017). Experimental investigation of the effect of silica fume on the thermal spalling of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 571-583.
- [23] Abid, M., Houab, X., Zhenga, W., and Rizwan, H. (2017). High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 147, 339-351.
- [24] Gholhaki, M., Pachideh, G., and Rezayfar, O. (2017). An experimental study on the effects of adding steel and polypropylene fibers to concrete on its resistance after different temperatures. *Journal of Testing and Evaluation*, 47 (2), 1606-1620.
- [25] Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezayfar, O. (2017). An experimental study on mechanical properties of concrete containing steel and polypropylene fibers at high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(3), 167-179. doi: 10.22065/jsce.2017.77392.1072.
- [26] Hou, X., Cao, S., Rong, Q., Zheng, W., and Li, G. (2018). Effects of steel fiber and strain rate on the dynamic compressive stress-strain relationship in reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 170, 570-581.
- [27] Ashour, H.M., Al.Khuzaiie, R., and Atea, S. (2019). Investigation of torsional behavior and capacity of reactive powder concrete (RPC) of hollow T-beam. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 199-207.
- [28] Wang, Q., Shi, Q., Lui, E.M., and Xu, Z. (2019). Axial compressive behavior of reactive powder concrete-filled circular steel tube stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 153, 42-54.
- [29] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2020). Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 173(1), 3-16. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00042>.
- [30] Xun, X., Ronghua, Z., and Yinghu, L. (2020). Influence of curing regime on properties of reactive powder concrete containing waste steel fibers. *Construction and Building Materials*, 232, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117129>.
- [31] Salahuddin, H., Qureshi, L.A., Nawaz, A., and Raza, S.S. (2020). Effect of recycled fine aggregates on performance of Reactive Powder Concrete. *Construction and Building Materials*, 243, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118223>.
- [32] Keshavarzian, F., Saberian, M., and Li, J. (2021). Investigation on mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete containing nano-SiO₂: An experimental and analytical study, *Journal of Building Engineering*, 44, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102601>.
- [33] Mao, Z., Zhang, J., Luo, Z., Ma, Q., Duan, Y., Li, S., and Miao, Y. (2021). Behavior evaluation of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete after elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 306, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124917>.
- [34] Hasan, Z.A., Nasr, M.S., and Abed, M.K. (2021). Properties of reactive powder concrete containing different combinations of fly ash and metakaolin. *Materials Today: Proceedings*, 42(5), 2436-2440.
- [35] Jafari, A., Preti, M., Beheshti, M., and Dugnani, R. (2021). Self-centering walls strengthening by high-performance concrete: a feasibility study. *Materials and Structures*, 54(3), 117. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01710-0>
- [36] Huang, L., Yuan, M., Wei, B., Yan, D., and Liu, Y. (2022). Experimental investigation on sing fiber pullout behaviour on steel fiber-matrix of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*, 318, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125899>.

- [37] Khitab, A., Serkan Kirgiz, M., Nehdi, M.L., Mirza, J., Gustavo de Sousa Galdino, A., Karimi Pour, A. (2022). Mechanical, thermal, durability and microstructural behavior of hybrid waste-modified green reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 344, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128184>.
- [38] Raza, S.S., Ali, B., Noman, M., and Hussain, I. (2022). Development of reactive powder concrete with recycled tyre steel fiber. *Materialia*, 22, <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101386>.
- [39] Pachideh, G., and Toufigh, V. (2022). Strength of SCLC recycled springs and fibers concrete subject to high temperatures. *Structural Concrete*, 23(1), 285-299.
- [40] Alkhaly, Y.R., and Hasan, M. (2022). Characteristics of reactive powder concrete comprising synthesized rice husk ash and quartzite powder. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134154.
- [41] Selvapriya, R., Tamilchelvan, P., Gopinath, M., and Supriya, S. (2023). Experimental investigation on flexural strength behaviour of reactive powder concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.394>
- [42] Heidari, A., and Shourabi, F.N. (2023). Mechanical properties of ultra-high performance concrete based on reactive powder concrete: Effect of sand-to-cement ratio, adding glass fiber and calcium carbonate. *Construction and Building Materials*, 368, 130108.
- [43] Gong, J., Wang, Y., Qu, S., Zhang, B., and Feng, J. (2023). Mechanical properties of steel reinforced reactive powder concrete columns under axial compression. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01930.
- [44] ISIR, National Standard No. 302. (2016). Characteristics of concrete aggregates. 2nd Revision, Publisher: National Standard Organization of Iran.
- [45] ASTM Standard. (1993). 1st edition, C136/C136M Test method for sieve analysis of Fine and coarse aggregates, ASTM (American Society for Testing and Materials), West Conshohocken.
- [46] DIN 1164-85 Standard. (2000). Complete Document. Special cement compositions, Requirements and conformity evaluation, 1st Edition, Publisher: Deutsches Institut für Normung.
- [47] ISIR, National Standard No. 389. (2018). Properties of Portland cement, 3rd Revision- 8th Edition, Publisher: National Standard Organization of Iran.
- [48] ASTM Standard A820/A820M-16. (2015). Standard specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete, ASTM (American Society for Testing and Materials), West Conshohocken.
- [49] ASTM Standard C192-15. (2015). Standard practice for making and curing concrete Test specimens in the laboratory. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [50] Mao, X., Qu, W., and Zhu, P. (2019). Mixture optimization of green reactive powder concrete with recycled powder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(5), 04019033.
- [51] Zhang, R.H., Xu, X., Liu, Y.H., and Yang, X.G. (2017). Mix proportion design of reactive powder concrete based on mechanical properties. *China Concrete and Cement Products*, 8, 15-19.
- [52] Ahmad, S., Zubair, A., and Maslehuddin, M. (2015). Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 99, 73-81.
- [53] ASTM Standard C192-15. (2015) Designation: C 293 – 02 Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with center-point loading), ASTM (American Society for Testing and Materials), West Conshohocken.
- [54] ASTM Standard D3967-16. (2016). Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, ASTM (American Society for Testing and Materials), West Conshohocken.
- [55] Su, Y., Li, J., Wu, C., Wu, P., and Li, Z.X. (2016). Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high-performance concrete. *Composites Part B: Engineering*, 91, 595-609.
- [56] Kang, M.C., Yoo, D. Y., and Gupta, R. (2021). Machine learning-based prediction for compressive and flexural strengths of steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 121117.
- [57] Atewi, Y.R., Hasan, M.F., and Güneyisi, E. (2019). Fracture and permeability properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with and without nanosilica, *Construction and Building Materials*, 226, 993-1005