

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات مقاومتی بتن پودری واکنش‌زا (RPC) تولید شده با مصالح بومی حاوی الیاف فولادی صنعتی

میثم محبوبی نیازمندی^{۱*}، مرتضی قلی‌زاده^۲

۱- مدرس دانشگاه، دکترای ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز
۲- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

*m.mahboubi@sutech.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۱۵

چکیده

بتن پودری واکنش‌زا (RPC) یکی از بتن‌های فوق‌توانمند با ویژگی‌های مکانیکی برتر است که با استفاده از سیمان و مصالح پودری بسیار ریزدانه همچون ماسه کوارتزی، میکروسیلیس، مقادیر کم نسبت آب به سیمان، فوق روان‌کننده و الیاف فولادی ساخته می‌شود. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از انواع مختلف الیاف فولادی صنعتی با اندازه‌ها (قطرها) مختلف و درصدهای مختلف بر خواص مقاومتی RPC و تعیین یک سری روابط تجربی برای تخمین آنهاست. به همین منظور با تهیه سه نوع الیاف فولادی با قطرهای کوچک (گروه ۱)، متوسط (گروه ۲) و بزرگ (گروه ۳) و ساخت تعدادی نمونه RPC با استفاده از مصالح معدنی بومی، ویژگی‌های مقاومتی این نوع بتن شامل مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی در سنین مختلف تعیین شد. نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری نشان داد که با کاهش قطر الیاف فولادی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC افزایش چشمگیری داشته و برابر با ۴۲۳،۵ مگاپاسکال تعیین شد. به شکلی که در مقایسه با نمونه شاهد (بدون الیاف)، مقاومت فشاری با رشد ۲۹،۱۱ درصدی همراه است. همچنین مقدار بهینه الیاف فولادی متوسط برای دستیابی به RPC با بیشترین مقاومت، ۲ درصد تعیین شد. نتایج آزمون‌های مقاومت خمشی نشان داد که مقدار ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۱ (با قطر کوچک) و گروه ۲ (با قطر متوسط) و مقدار ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۳ (با قطر بزرگ) به‌عنوان مقادیر بهینه درصد الیاف فولادی برای رسیدن به بیشترین مقاومت خمشی در RPC می‌باشند. به شکلی که مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC به ترتیب حاوی ۲، ۳ و ۲ درصد الیاف فولادی گروه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۴۰،۹، ۴۴،۶ و ۳۹،۱ مگاپاسکال بدست آمد. بیشترین مقاومت کششی نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی گروه‌های ۱، ۲ و ۳ در مقایسه با نمونه شاهد، به ترتیب با رشد ۶۱،۲۵، ۶۶،۴۲ و ۶۸،۲۱ درصدی همراه بوده است. همچنین نتایج آزمون‌های مقاومت کششی نشان داد که افزودن الیاف فولادی گروه ۲ (متوسط) در مقایسه با دو گروه دیگر (کوچک و بزرگ)، تأثیر بیشتری بر درصد رشد مقاومت کششی نمونه‌های RPC داشته است.

واژگان کلیدی: بتن پودری واکنش‌زا (RPC)، الیاف فولادی صنعتی، مشخصات مقاومتی، آزمون‌های آزمایشگاهی.

۱- مقدمه

بتن غیرمسلح به علت عدم تحمل کشش و تردی زیاد، عملاً به غیر از سازه‌های وزنی، کاربرد چندانی در صنعت ساختمان ندارد [1]. در عمل، این عیب عمده بتن با مسلح کردن آن به‌وسیله آرماتورهای فولادی برطرف می‌شود. اما از آنجایی که آرماتور منحصراً بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن ایزوتوپ و همگن است، چندان صحیح نیست [2]. امروزه راهکارهای جدیدی برای ایجاد همگنی، کاهش ضعف و شکنندگی و تردی بتن و بهبود شکل‌پذیری آن معرفی شده است [3]. یکی از این راهکارها، افزودن الیاف فولادی به بتن است [4]. تحقیقات گسترده قبلی [5-10] نشان داده که افزودن الیاف فولادی به بتن به‌طور قابل توجهی منجر به افزایش مقاومت‌های خمشی و فشاری آن می‌شود. همین تحقیقات مبنای شکل‌گیری و ساخت بتن‌های پرمقاومت شده است [9]. نخستین بار در سال ۱۹۹۴ یک شرکت ساختمانی فرانسوی، ایده حذف سنگدانه‌های درشت و جایگزینی آن با ماسه‌های سیلیسی ریزدانه را مطرح نمود [7-9]. این ایده به کارگیری مقدار زیادی میکروسیلیس و نسبت کم آب به سیمان و الیاف فولادی ریز به‌عنوان مصالح تشکیل‌دهنده بتن را به عنوان راهی برای دستیابی به بتنی با خواص فوق‌العاده از جمله مقاومت فشاری بسیار بالا، مقاومت کششی و خمشی زیاد، نفوذپذیری کم و دوام بسیار بالای بتن مطرح نمود [11 و 12]. امروزه از این محصول پرمقاومت که از لحاظ فشاری، کششی، خمشی، برشی، مقاومت در برابر بارهای دینامیکی، شکل‌پذیری و جذب انرژی، انقباض، خزش و سایش سطحی زیاد در رده بهترین‌های محصولات بتنی حال حاضر جهان بوده و با نام بتن پودری واکنش‌زا^۱ (RPC) شناخته می‌شود، برای ساخت پناهگاه‌ها، باند فرودگاه‌ها، تونل‌ها، آسمان‌خراش‌ها، کف‌سازی‌های صنعتی و غیره استفاده می‌شود [5 و 13]. نقش اصلی الیاف فولادی در چنین بتنی درحقیقت نوعی کامپوزیت است که یکپارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و امکان استفاده از بتن را به عنوان یک ماده شکل‌پذیر با شکنندگی کمتر فراهم می‌سازد [14]. با استفاده از الیاف فولادی مناسب، RPC به

خواص مقاومتی قابل توجهی دست می‌یابد. برای نمونه، در این نوع بتن، می‌توان از رشته‌های الیاف به‌طور فعال برای محدود کردن عرض ترک‌ها در راستای افزایش قابلیت بهره‌برداری بتن استفاده نمود. همچنین دوام بالای آن موجب افزایش عمر بهره‌برداری و کاهش هزینه‌های مراقبت از سازه‌های بتنی می‌شود [8-11,5]. برای ساخت RPC می‌توان از الیاف فولادی پروپیلن، شیشه‌ای، کربنیک و سایر الیاف همچون الیاف نانویی با نام نانوتیوپ‌های کربن استفاده کرد. اما از سوی دیگر به دلیل بالا بودن هزینه‌های این مواد، استفاده از الیاف فولادی تولید شده در کارخانه‌ها، امروزه به‌عنوان مرسوم‌ترین ماده برای ساخت این نوع بتن به شمار می‌رود [5 و 13].

در سال‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی زیادی در خصوص کاربرد الیاف فولادی بر رفتار مقاومتی و شکل‌پذیری RPC انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به تحقیق ایپک و همکاران^۲ [14] درخصوص بررسی تأثیر عمل‌آوری تحت فشار روی مقاومت خمشی و سختی RPC و مطالعه هو و همکاران^۳ [15] در رابطه با بررسی آثار الیاف فولادی بر نرخ کرنش دینامیکی تنش-کرنش فشاری در RPC اشاره نمود. عیید و همکاران^۴ [16] با بررسی رفتار خزشی RPC تقویت‌شده با الیاف فولادی در دمای بالا دریافتند که استفاده از الیاف، خزش کوتاه‌مدت RPC را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. ژون و همکاران^۵ [17] با بررسی تأثیر دمای عمل‌آوری بر خواص RPC حاوی الیاف فولادی ضایعاتی دریافتند که عمل‌آوری با بخار دمای بالا در مقایسه با عمل‌آوری در دمای محیط، منجر به مقاومت بالاتر و تشکیل ریزساختار متراکم‌تری برای RPC می‌شود. هوانگ و همکاران^۶ [18] با بررسی آزمایشگاهی رفتار چسبندگی سطحی RPC حاوی الیاف فولادی دریافتند که مقاومت چسبندگی الیاف فولادی قلاب‌شده انتهایی بسیار قوی‌تر از الیاف فولادی مستقیم در نمونه‌های RPC است. رضا و همکاران [19] توسعه RPC جدید حاوی الیاف فولادی تایلر بازایافتی را مورد بررسی قرار داده و نتایج

2 Ipek et al.

3 Hou et al.

4 Abid et al.

5 Xun et al.

6 Huang et al.

1 Reactive Powder Concrete

شماره پروانه (T/38418) به انجام رسید. مصالح اصلی مصرفی برای ساخت نمونه‌ها شامل ماسه، پودر سیلیس و میکروسیلیس می‌باشد. ماسه مورد نیاز از شرکت تامین ماسه اخترکاو با مشخصات فنی و کد DI مشتمل بر ماسه سیلیس کوارتزی با دانسیته ۲/۶۲ و دانه‌بندی ۱-۲/۵ میلی‌متر و اندازه قطر بین ۱۰۰-۲۵۰۰ میکرون و همچنین مطابق با دستور استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ تهیه شد. برای دانه‌بندی ماسه، ابتدا از مصالح ریزدانه ماسه‌ای ۱۰۰۰ گرم نمونه‌گیری شده و طبق استانداردهای ASTM-C33 و ASTM-C136 [22] دانه‌بندی مطابق با جدول (۱) صورت گرفت. جدول (۲) خواص فیزیکی و شیمیایی ماسه سیلیس کوارتزی را نشان می‌دهد. سیمان مصرفی از نوع ۱ با نام تجاری سیمان پرتلند تیپ ۱-۳۲۵ با عیار ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ساخت کارخانه نیزار قم با مشخصات فیزیکی و شیمیایی ارائه شده در جداول (۳ و ۴) می‌باشد. در تمام طرح اختلاطها برای ساخت نمونه‌ها، نسبت آب به سیمان (W/C) ثابت و برابر ۰/۲۵ منظور شد.

جدول ۱. توزیع دانه‌بندی ماسه

Sieve number (micron)	Cumulative weight percentage of the residue on the sieve
Tray	-
250	-
355	-
500	<2
710	10-25
1000	55-75
1410	5-15
2800	<1

Table 1. Sand grading

جدول ۲. مشخصات شیمیایی و فیزیکی ماسه سیلیس کوارتزی

Chemical properties	Amount (percentage)
SiO ₂	97.5
Al ₂ O ₃	0.95
Fe ₂ O ₃	0.85
CaO	0.27
Na ₂ O	0.24
K ₂ O	0.02
Physical properties	Amount (percentage)
Corner coefficient	<1.3
Density	2.62
Colour	Yellowish white color
Zinter point	>1400

Table 2. Chemical and physical characteristics of quartz silica sand

عمل‌آوری و انجام آزمایش‌ها روی نمونه‌ها در دمای معمولی اتاق آزمایشگاه (۱۷-۲۰ درجه سانتیگراد) انجام شد. لازم به ذکر است در صورت عمل‌آوری به روش اتوکلاو در بخار با

مطالعات آزمایشگاهی آنها نشان داد که افزودن ۳٪ الیاف فولادی بازیافت‌شده، به ترتیب مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی RPC را به میزان ۹٪، ۲۳٪ و ۵۸٪ افزایش می‌دهد. همچنین مقدار بهینه الیاف فولادی بازیافتی با در نظر گرفتن بیشترین مقاومت مکانیکی، ۲٪ تعیین شد. معراجی و همکاران [20] امکان تولید RPC حاوی الیاف مختلف را مورد بررسی قرار داده و دریافتند که با افزودن ۲/۵٪ الیاف فولادی، مقاومت فشاری حدود ۱۰٪ نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش می‌یابد. دشتی رحمت آبادی و همکاران [21] با بررسی ویژگیهای مقاومتی RPC حاوی الیاف فولادی دریافتند که مقاومت‌های فشاری و کششی این نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف فولادی، تا حد مشخصی افزایش می‌یابد. مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که با وجود 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. تحقیقات مشابه انجام شده در این زمینه تنها بخشی از ویژگی‌های مقاومتی (مقاومت فشاری و مقاومت خمشی) RPC حاوی درصد مشخصی از یک الیاف فولادی با یک قطر مشخص را مد نظر قرار داده‌اند. حال آنکه مقاله حاضر تلاش دارد تا اثر انواع مختلف الیاف فولادی کارخانه‌ای با قطرهای و درصدهای مختلف را بر خصوصیات مقاومتی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی) RPC در راستای توسعه یک بتن بومی تولیدشده در داخل کشور ایران با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ارزیابی نماید. لازم به ذکر است که تخمین روابط تجربی برای تعیین خصوصیات مقاومتی مختلف نمونه‌های RPC از دیگر اهداف پژوهش حاضر می‌باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در تحقیق حاضر تمامی مصالح مورد استفاده برای تولید نمونه‌های RPC، از داخل کشور تهیه شده تا بدین طریق، محصولی با کیفیت و بومی به جامعه ساخت و سازهای بتنی کشور معرفی شود. تولید و ساخت نمونه‌های بتنی و آزمایش‌های مقاومتی روی آنها در شرکت آزمایشگاهی بتن‌آزمای ایرانیان (مورد تأیید اداره کل استاندارد و تحقیقات صنعتی به

دمای بالا در شرایط آزمایشگاهی به مقاومت بیشتری خواهیم رسید، اما در این تحقیق به لحاظ شرایط کاربردی در محیط کارگاه از عمل‌آوری به روش اتوکلاو صرف‌نظر شد.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سیمان (استاندارد DIN 1164 [23])

Physical properties			DIN official profile
Softness	Blaine (surface) (cm ² /gr)	3006	Min= 2800
	Minutes, first	155	Min= 45
	minute, end	210	Min= 6
	consuming water	27	-
	Autoclave expansion (%)	0.085	Max= 0.8
Compressive strength (MPa)	3-days	19	Min= 10
	7-days	29.5	Min= 17.5
	28-days	46.1	Min= 31.5
Flexural strength (MPa)	3-days	4.7	-
	7-days	6.6	-
	28-days	8.5	-
	7-day hydration heat (Cal/gr)	6	Max= 7

Table 3. Physical properties of cement (DIN 1164 [23])

جدول ۴. مشخصات شیمیایی سیمان (استاندارد ISIR 389 [24])

Chemical properties	Results (%)	ISIR official profile
L.O.I	0.55	Max= 3 %
IR	0.41	Max= 0.75 %
Si2O	2.91	Max= 2 %
Al2O3	5.05	Max= 6 %
Fe2O3	4.45	Max= 6 %
CaO	62.15	-
MgO	2.27	Max= 5 %
So3	2.19	Max= 3 %
Na2O	0.31	-
K2O	0.63	-
C3S	39.3	-
C2S	34.39	-
C3A	5.85	Max= 8 %
C4AF	13.54	-
Free CaO	0.67	-
Cl-	0.007	-

Table 4. Chemical properties of cement (ISIR 389 [24])

برای دستیابی به مقاومت‌های بالای نمونه‌های بتنی تولیدشده در این تحقیق، از مواد افزودنی معدنی شامل پودر سنگ آهک و میکروسیلیس تهیه‌شده از شرکت تأمین ماسه اخترکاو با مشخصات فنی و کد ۱۵۱ در طرح اختلاطها استفاده شد. پودر سنگ آهک با دانسیته ۲/۶۸ و دانه‌بندی ۰/۲-۰/۵ میلی‌متر و اندازه قطر بین ۲۰۰ الی ۵۰۰ میکرون به مقدار ۸۰ کیلوگرم با استاندارد AFS:42-51 تهیه شد. همچنین میکروسیلیس مورد استفاده از نوع کوارتز دارای دانسیته ۲/۶۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب با دانه‌بندی ۰-۵۳ میکرون و سفیدرنگ مایل به زرد به صورت میکرونیزه می‌باشد. اندازه میانگین قطر ذرات این ماده حدود ۲۰۰ الی ۵۰۰ میکرون، وزن مخصوص ظاهری آن ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نرمی آن ۲۰۰۰۰ کیلوگرم بر

متر مربع و در حدود ۵۰ تا ۶۰ برابر نرمی سیمان می‌باشد. نتایج دانه‌بندی، فعالیت پوزولانی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس در جدول (۵) آمده است. شاخص فعالیت پوزولانی میکروسیلیس با آهک در سنین مختلف طبق آزمایش استاندارد ASTM C311M [25] تعیین می‌شود. برای این آزمایش برای دستیابی به حدود روانی ثابت (۱۰۰ تا ۱۱۵٪) برای مخلوط، نسبت آب به مواد سیمانی (آهک) ثابت نگه‌داشته می‌شود. برای این کار مواد افزودنی فوق کاهنده آب به اندازه‌ای به مخلوط اضافه می‌شود که روانی مذکور ثابت بماند. بازدهی واکنش میکروسیلیس 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 [5، 13 و 16]. 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 [16]. حرارت‌زایی میکروسیلیس در بتن بستگی به عواملی مانند درصد میکروسیلیس، نسبت آب به مواد سیمانی و دما در حین واکنش دارد [7]. توزیع اندازه ذرات ماسه کوارتزی، سیمان، میکروسیلیس و پودر سنگ آهک در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۵. توزیع دانه‌بندی میکروسیلیس و فعالیت پوزولانی آن در برابر آهک

Sieve number (micron)	Sieve number (micron)		
Tray	>95		
250	2-5		
355	-		
500	-		
710	-		
1000	-		
1410	-		
2800	-		
Age	2 hours	1 day	3 day
Percentage of pozzolanic activity	3.16	5.85	100

Table 5. Grading and pozzolanic activity of microsilica against lime

مواد افزودنی شیمیایی (فوق روان کننده) مورد استفاده در این تحقیق، از شرکت سیکا پارسیان با مشخصات تجاری سیکا ویسکوکریت بر پایه پلی کربکسیلات اتر و با کد تجاری 5110B تهیه شده است که با وزن مخصوص ۱۵/۱ گرم بر

استاندارد ASTM-A820 [26] است، تهیه شد. در این مطالعه تأثیر این الیاف به‌عنوان الیاف فولادی تسلیح‌کننده بر خواص مکانیکی RPC مورد مطالعه قرار گرفته است. برای تولید نمونه‌های RPC، به لحاظ مقاومت کششی بالا و رعایت اصول فنی و همچنین بررسی تأثیر قطر الیاف بر خواص مکانیکی بتن، طول الیاف‌ها برابر با مقدار ثابت ۳۵ میلی‌متر و قطر آنها شامل سه دسته با قطرهای ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ میلی‌متر می‌باشند. از این پس در این مقاله هر جا صحبت از الیاف قطر بزرگ، متوسط و کوچک‌شده، منظور از آن به ترتیب الیاف با قطر ۰/۸، ۰/۶ و ۰/۴ میلی‌متر است. در جدول (۶) و شکل (۱)، مشخصات فیزیکی و ظاهری انواع الیاف مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها آمده است.

۲-۲- طرح اختلاط بتن و آزمون‌های آزمایشگاهی

برای تنظیم طرح اختلاط بهینه برای تولید نمونه‌های RPC، با توجه به پیشنهادات آئین‌نامه‌ای [22]، چندین طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت. وزن و درصد مصالح مصرفی برای تولید نمونه‌های RPC با بهترین طرح اختلاط بر مبنای واحد سیمان در جدول (۷) آمده است. برای اختلاط مصالح ابتدا ماسه، پودر سیلیس، میکروسیلیس، سیمان و الیاف فولادی به مدت ۵ دقیقه در بتونیر مخلوط شدند تا الیاف در سطح خشک مصالح به خوبی پراکنده شود.

سانتیمتر مکعب و به صورت یک مایع غلیظ زرد رنگ در بازار قابل تهیه است. استفاده از این فوق روان‌کننده باعث کاهش نسبت آب به سیمان به اندازه ۴۰٪ می‌شود و همچنین افزایش مقاومت‌های اولیه و نهایی بتن را به همراه دارد. علاوه بر این، استفاده از این فوق روان‌کننده، بار منفی ذرات سیمان را افزایش داده و باعث پخش شدن بهتر سیمان در مخلوط بتن می‌شود. بنا به توصیه شرکت تولیدکننده فوق روان‌کننده مصرفی، بیشترین مقدار مجاز استفاده از این افزودنی برابر با ۰/۳ الی ۱/۴ لیتر به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم سیمان مورد استفاده در بتن می‌باشد. همچنین برای بهبود کارایی نمونه‌های بتنی ساخته شده در این تحقیق، فوق روان‌کننده مذکور بر اساس توصیه کارخانه سازنده، پس از اضافه شدن حدود ۵۰ تا ۷۵ درصد آب مصرفی، به مخلوط افزوده شده است.

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



Fig. 1. Different types of steel fibers (groups 1, 2, and 3) with different specifications for making RPC samples
الیاف فولادی مصرفی در این مطالعه، از شرکت تولیدی فولاد الوند که همگی ساخت کشور ایران و هماهنگ با

جدول ۶. مشخصات فیزیکی الیاف فولادی مختلف مورد استفاده در نمونه‌های RPC

Fiber group (Type)	Brand	Length (mm)	Diameter (mm)	Length to diameter ratio	Relative elongation (%)	Surface coating	Ultimate tensile strength (MPa)	Weight (numbers in kilos)
Small diameter group 1 fibers (Type 1)	SFRC-ECR2338	35	0.4	87.5	< 2	Without covers	2470	21700
Medium diameter group 2 fibers (Type 2)	SFRC-ECR2336	35	0.6	58.33	< 3	Copper	1700	9670
Large diameter group 3 fibers (Type 3)	SFRC-ECR2338	35	0.8	43.75	< 3	Copper	1200	5439

Table 6. Physical characteristics of different steel fibers used in RPC samples

فشاری، خمشی و کششی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

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

۱-۲-۲- آزمون مقاومت فشاری

برای انجام آزمون مقاومت فشاری، ابتدا نمونه‌های RPC براساس استاندارد ASTM C192 [27] 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 شد. 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 جابه‌جایی بعدی برای آنها لازم نباشد (شکل ۲-الف). پس از گذشت ۳۶ ساعت از قالب‌ریزی نمونه‌ها، نمونه‌ها از قالب درآمده و در حوضچه آب قرار گرفتند (شکل ۲-ب). پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری آنها با دستگاه جک بتن شکن ۲۰۰ تنی به شماره SET43-5 در شرایط مختلف اندازه‌گیری شد. شکل (۳) چگونگی انجام آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

برای بررسی تاثیر مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری RPC، تعداد ۱۶ نمونه با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتیمتر مکعبی حاوی ۲ درصد الیاف فولادی متوسط با قطر $0/6$ میلی‌متر ساخته شده و مقاومت فشاری آنها در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روزه تعیین شد. علاوه بر این، برای بررسی تاثیر قطر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری RPC، تعداد ۹ نمونه مکعبی با همان ابعاد ساخته شد. به شکلی که هر سه نمونه از آنها حاوی ۲ درصد الیاف فولادی بزرگ (با قطر $0/8$ میلی‌متر)، متوسط (با قطر $0/6$ میلی‌متر) و کوچک (با قطر $0/4$ میلی‌متر) 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

در ادامه، پس از افزودن فوق روان‌کننده به آب طرح اختلاط، محلول به آرامی به مخلوط داخل بتونیر اضافه شد و اختلاط تا حدود ۵ دقیقه ادامه یافت. پس از آماده شدن ملات بتن ییافی، بتن مخلوط‌شده به داخل قالب ریخته شد. برای حفظ رطوبت نمونه‌ها در ۲۴ الی ۴۸ ساعت اول، روی سطح نمونه‌ها یک لایه پلاستیک قرار داده شد. پس از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌های بتنی 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 شود و در ادامه آزمون‌های مختلف مقاومتی بر روی آنها اجرا شد که در ادامه به تشریح این آزمایش‌ها پرداخته شده است.

جدول ۷. درصد و وزن مصالح مصرفی برای تولید نمونه‌های RPC

Consumables	Unit compared to cement consumption	Weight (kg)
Type 1 portland cement of Nizar Qom company	1	100
Quartz silica sand with code D1	1.44	144
Silas powder with code 151	0.356	26
microsilica (micronized)	0.25	26
Steel fibers from Irfan company	-	2
Sika super lubricant based on polycarboxylate	0.065	2 Liter
Drinking water with W/C ratio	0.225	22.5 Liter

Table 7. Percentage and weight of materials used to produce RPC samples

برای بررسی تاثیر الیاف فولادی مختلف بر ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌های RPC با مقاومت بالا، گذشته از اینکه نمونه بتن شاهد (بدون الیاف) باید مقاومت فشاری ۷ روزه بالاتر از ۲۰۰ مگاپاسکال داشته باید از روانی کافی نیز برخوردار باشد تا بتن متخلخل نشود. به این خاطر ابتدا طرح اختلاطی برای بتن با مقاومت بالا و اسلامپ پایین طراحی شد. سپس با افزودن اندکی آب و افزودن نسبت سنگدانه ریز و کاهش قابل توجه نسبت سنگدانه درشت، طرح اختلاط جدیدی حاصل شد که با دارا بودن مقاومت بالا (۳۵۶ مگاپاسکال و اسلامپ ۵ سانتی متر)، به عنوان نمونه شاهد برای بررسی تاثیر استفاده از الیاف فولادی مختلف بر رفتار نمونه‌های RPC انتخاب شد. نمونه بتن شاهد با مقاومت بالا برای تمامی آزمایش‌های مقاومت‌های

هر ۳ نمونه از آنها به ترتیب حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی مختلف با قطرهای کوچک، متوسط و 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 روی آنها انجام شد. برای انجام این آزمایش، نمونه‌ها نسبت به وضعیتی که در قالب قرار داشتند، به پهلو چرخانده شده و به طور متقارن روی دو بلوک تکه‌گاهی قرار گرفتند. سپس بارگذاری متمرکز به‌طور یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی روی نمونه‌ها اعمال شد (شکل ۴). برای 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 شد. برای برداشت نتایج، مقدار نیروی لازم برای ایجاد ترک در وسط یک‌سوم دهانه تیر (P) اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از رابطه $f'_m = PL/bd^2$ (مطابق با استاندارد ASTM C293-79 [22])، مقاومت خمشی (f'_m) آنها برحسب L طول، b عرض و d ارتفاع تیر بتنی تعیین شده است.

شکل ۴. آزمون مقاومت خمشی روی تیر بتنی RPC



Fig. 4. Bending strength test on RPC concrete beam

۲-۲-۳- آزمون مقاومت کششی

برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های RPC از آزمایش برزیلی براساس استاندارد ASTM C293-79 [22] استفاده شد. این آزمایش بطور غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر به‌کار می‌رود. در این آزمایش با اعمال فشار قطری به نمونه استوانه‌ای، تنش کششی در امتداد عمود

برای بررسی تأثیر درصد الیاف فولادی بر مقاومت فشاری RPC، تعداد ۱۵ نمونه مکعبی حاوی درصدهای مختلف الیاف فولادی با قطر متوسط با ابعاد مذکور ساخته شد. به طوری که هر ۳ نمونه از آنها به ترتیب حاوی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد الیاف فولادی بوده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها برحسب درصد الیاف تعیین شد.

شکل ۲. الف) نمونه‌های RPC تهیه شده، ب) عمل‌آوری مرطوب در حوضچه اشباع



Fig. 2. (a) Prepared RPC samples, (with) wet curing in a saturated basin

شکل ۳. آزمون مقاومت فشاری روی نمونه‌های RPC



Fig. 3. Compressive strength test on RPC samples

۲-۲-۲- آزمون مقاومت خمشی

برای تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های RPC از آزمایش استاندارد مطابق با آئین‌نامه ASTM C293-79 [22] استفاده شد. در این آزمون با بارگذاری در وسط یک تیر منشوری، مقاومت خمشی نمونه‌ها تعیین شد. بدین منظور تعداد ۱۰ نمونه تیر RPC با ابعاد استاندارد $10 \times 10 \times 40$ سانتی‌متر مکعبی مطابق با استانداردهای ASTM C31، C192 [22] ساخته شد. یکی از نمونه‌های مذکور بدون الیاف (نمونه شاهد) و ۹ نمونه بعدی حاوی درصدهای مختلفی الیاف فولادی هستند. به شکلی که

۳- بحث و بررسی نتایج

در این بخش به تحلیل نتایج در خصوص تاثیر الیاف فولادی بر ویژگی‌های 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.

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

شکل (۶) نتایج تأثیر زمان عمل‌آوری یا سن بتن بر مقاومت فشاری نمونه‌های RPC حاوی ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف با قطر متوسط) را در مقایسه با نمونه شاهد (بدون الیاف) نشان می‌دهد. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در سن ۷ روزه برابر با ۲۵۴,۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با بتن شاهد، با رشد ۱۰,۸۹ درصدی به اندازه ۲۵ مگاپاسکال همراه بوده است. میانگین مقاومت فشاری ۱۴ روزه نمونه‌های RPC برابر با ۳۵۰,۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد، رشد ۱۷,۸۱ درصدی به اندازه ۵۳ مگاپاسکال را تجربه نموده است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC برابر با ۴۲۳,۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد، با رشد ۲۹,۱۱ درصدی به اندازه ۹۵,۵ مگاپاسکال همراه است. بیشترین میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در سن ۴۲ روزه و برابر با ۵۱۱,۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد، به اندازه ۱۵۴,۵ مگاپاسکال (۴۳,۲۷ درصد) رشد داشته است. براساس نتایج، تاثیر الیاف فولادی بر افزایش مقاومت فشاری RPC به‌وضوح قابل مشاهده است. به گونه‌ای که با افزودن الیاف، افزایش مقاومت فشاری RPC در سنین مختلف در مقایسه با نمونه شاهد با رشد زیادی همراه بوده است. همچنین به‌عنوان یک نتیجه کلی، میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با گذشت زمان و افزایش سن عمل‌آوری افزایش می‌یابد تا اینکه در زمان مشخصی این تغییرات ثابت می‌شود. در نمونه شاهد (بدون الیاف) با افزایش سن بتن از ۷ الی ۴۲ روز، مقاومت فشاری به تدریج افزوده می‌شود، اما با بیشتر شدن سن عمل‌آوری، این تغییرات کمتر می‌شود. اما نتایج نشان می‌دهد که در مورد

بر محور بارگذاری گسترش یافته و زمانی که بر مقاومت کششی نمونه بتنی غلبه کند، باعث گسیختگی آن می‌شود. برای انجام این آزمایش، تعداد ۱۰ نمونه استاندارد استوانه‌ای RPC با قطر و ارتفاع ۳۰ و ۱۵ سانتی‌متر ساخته شدند. همچون نمونه‌های ساخته شده در آزمون خمش، یکی از نمونه‌های مذکور بدون الیاف (نمونه شاهد) و ۹ نمونه بعدی حاوی درصدهای مختلفی الیاف فولادی هستند. به شکلی که هر ۳ نمونه از آنها به‌ترتیب حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی مختلف با قطرهای 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 شد (شکل ۵). دور نمونه‌ها یک لایه نوارچسب کاغذی چسبانده و برای 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 ۰/۲ کیلونیوتن بر ثانیه در نظر گرفته شد و مقاومت کششی آنها تعیین شد.

شکل ۵. آزمایش کششی روی نمونه استوانه‌ای RPC



Fig. 5. Tensile test on cylindrical RPC sample

۴-۲-۲- تخمین روابط تجربی

برای تعیین روابط تجربی پیشنهادی برای تخمین ویژگی‌های مقاومت نمونه‌های RPC حاوی درصدهای مختلف الیاف فولادی، پس از تهیه نمونه‌ها با طرح اختلاط‌های مختلف و مقایسه نتایج مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی، از تحلیل رگرسیون استفاده شد.

متر) برابر با ۳۷۸,۷ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد، به اندازه ۵۰,۷ مگاپاسکال (۱۵,۴۴ درصد) افزایش یافته است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۳ (الیاف متوسط با قطر ۰/۸ میلی‌متر) برابر با ۳۵۲,۳ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد، رشد ۲۹,۱۱ درصدی به اندازه ۹۵,۵ مگاپاسکال را تجربه نموده است.

به عنوان یک نتیجه کلی، پارامتر طول (قطر) الیاف فولادی مورد استفاده در ساخت RPC، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری آن داشته است. به شکلی که با کمتر شدن قطر الیاف، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC در مقایسه با نمونه شاهد بیشتر شد. نتایج کلی بیانگر آن است که بیشترین مقاومت فشاری نمونه‌های RPC مربوط به نمونه حاوی ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف با قطر ۰/۴ میلی‌متر) و برابر با ۴۲۱ مگاپاسکال تعیین شده است.

شکل ۷. تاثیر گروه الیاف فولادی (قطر) بر (الف) میانگین مقاومت فشاری RPC در مقایسه با نمونه شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت فشاری

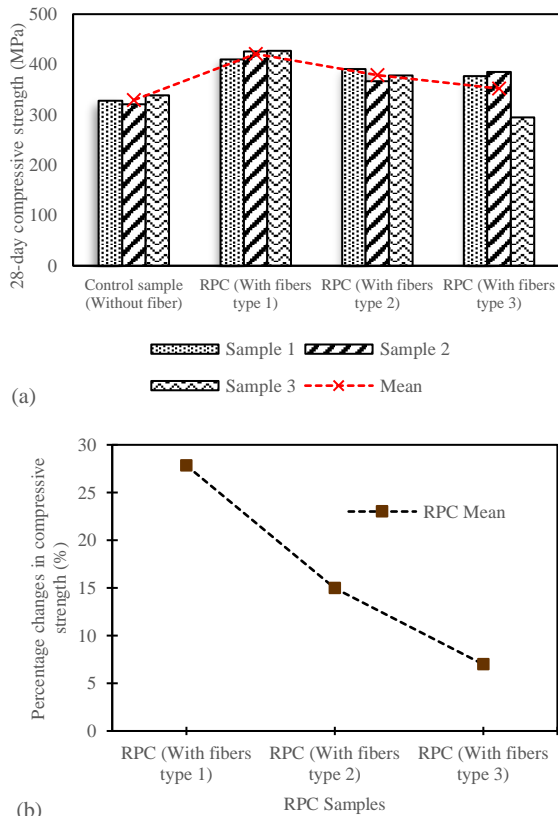


Fig. 8. The effect of steel fiber group (diameter) on (a) average compressive strength of RPC samples compared to control concrete, (b) percentage of changes in compressive strength

RPC، قضیه متفاوت بوده و با افزایش سن عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها همچنان با تغییرات زیادی در حال افزایش می‌باشد.

شکل (۷) نتایج بررسی تأثیر طول (قطر) الیاف فولادی بر مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در مقایسه با نمونه شاهد را نشان می‌دهد. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک با قطر ۰/۴ میلی‌متر) برابر با ۴۲۱ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد، با رشد ۲۸,۳۵ درصدی به اندازه ۹۳ مگاپاسکال همراه بوده است.

شکل ۶. تاثیر زمان عمل‌آوری و سن بتن بر (الف) مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در مقایسه با نمونه شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت

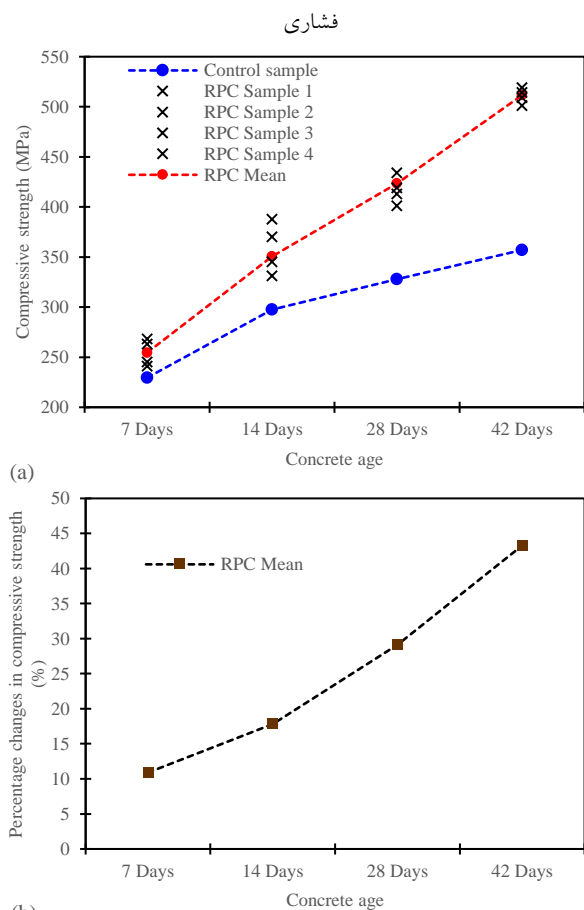


Fig. 6. Effect of curing time and age of concrete on (a) compressive strength of RPC samples compared to control sample, (b) percentage changes in compressive strength

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۲ (الیاف متوسط با قطر ۰/۶ میلی

الیاف فولادی ارائه شده است. بدین منظور می‌توان مقاومت فشاری RPC دارای الیاف فولادی (f'_{cf}) را برحسب مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالا یا نمونه شاهد (f'_c) و درصد الیاف فولادی (V_f) با یک تابع چندجمله‌ای 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 مقدار ۳۲۸ مگاپاسکال به جای f'_c و انجام تحلیل رگرسیون برای هر یک از نمونه‌های RPC تهیه شده با طرح اختلاط‌های مختلف، داریم:

$$f'_{cf} (MPa) = 328 - 3.054V_f^4 - 29.862V_f^3 + 82.724V_f^2 - 43.14V_f \quad (2)$$

شکل ۸. تاثیر درصد الیاف فولادی بر (الف) میانگین مقاومت فشاری

نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت

فشاری

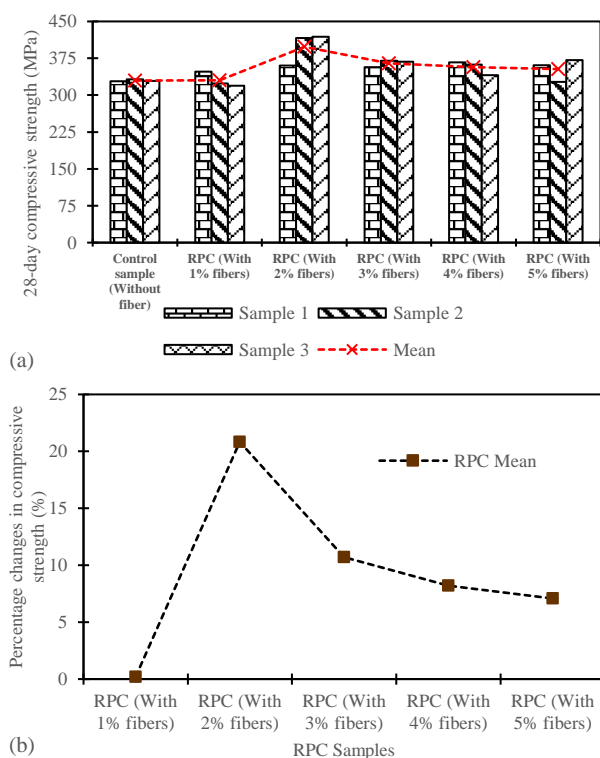


Fig. 8. Effect of percentage of steel fibers on (a) average compressive strength of RPC samples compared to control concrete, (b) percentage of changes in compressive strength

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 نمونه شاهد در شکل (۸) ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱ درصد الیاف فولادی برابر با ۳۳۰,۳ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد، با رشد ناچیز ۰,۷۱ درصدی به اندازه ۲,۳ مگاپاسکال همراه است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ نمونه‌های RPC حاوی ۲ درصد الیاف فولادی برابر با ۳۹۸,۳ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد به اندازه ۷۰,۳ مگاپاسکال (۲۱,۴۳ درصد) رشد داشته است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۳ درصد الیاف فولادی برابر با ۳۶۵ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد، رشد ۱۱,۲۸ درصدی (۳۷ مگاپاسکال) را نشان می‌دهد. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۴ درصد الیاف فولادی برابر با ۳۵۶,۷ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد به اندازه ۳۷ مگاپاسکال (۱۱,۲۸ درصد) رشد داشته است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۵ درصد الیاف فولادی برابر با ۳۵۳ مگاپاسکال بدست آمده که در مقایسه با نمونه شاهد ۷,۶۲ درصد (۲۵ مگاپاسکال) رشد داشته است.

نتایج کلی حاکی از تاثیر قابل ملاحظه درصد الیاف فولادی بر مقاومت فشاری RPC می‌باشد. به طوری که استفاده از الیاف متوسط تا ۲ درصد نسبت حجمی سیمان منجر به افزایش مقاومت فشاری RPC در مقایسه با نمونه شاهد شد. این در حالی است که کاربرد ۱ درصد الیاف، تاثیر چندانی بر افزایش مقاومت فشاری RPC در مقایسه با نمونه شاهد نداشته است. همچنین با افزایش الیاف فولادی بیش از ۲ درصد، سیر صعودی افزایش مقاومت فشاری RPC کاهش یافته است. بر این اساس می‌توان دریافت که مقدار بهینه الیاف فولادی متوسط مورد استفاده برای ساخت RPC با بیشترین مقاومت، ۲ درصد می‌باشد.

در ادامه با انجام تحلیل رگرسیون (شکل ۹)، یک رابطه تجربی برای تخمین مقاومت فشاری RPC برحسب درصد

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 کوتاه) و گروه ۲ (الیاف متوسط)، بیشترین مقاومت خمشی نمونه بتن در ۲ درصد حجمی الیاف فولادی حاصل شده است. با افزودن الیاف گروه ۳ نیز بیشترین مقاومت خمشی بتن نمونه در ۳ درصد حجمی الیاف فولادی ایجاد شده است. بنابراین می‌توان مقدار ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۱ و ۲ و مقدار ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۳ را به‌عنوان درصد بهینه الیاف فولادی برای رسیدن به بیشترین مقاومت خمشی در RPC پیشنهاد نمود.

شکل ۱۰. تاثیر قطر و درصد الیاف فولادی بر (الف) مقاومت خمشی نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت خمشی

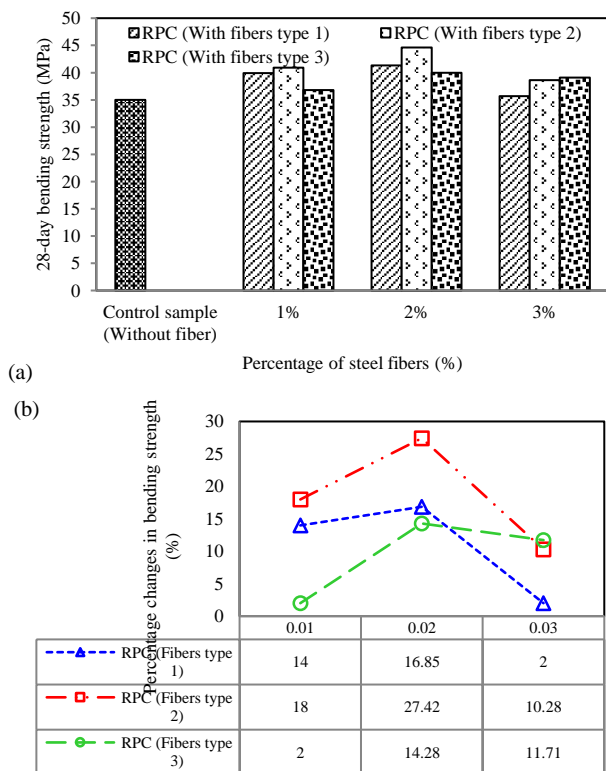


Fig. 10. Effect of diameter and percentage of steel fibers on (a) flexural strength of RPC samples compared to control concrete, (b) percentage of flexural strength changes

در ادامه با انجام تحلیل رگرسیون (شکل ۱۱)، یک رابطه تجربی برای تخمین مقاومت خمشی RPC برحسب درصد الیاف

شکل ۹. پیش‌بینی تقریبی تاثیر درصد الیاف فولادی بر مقاومت فشاری

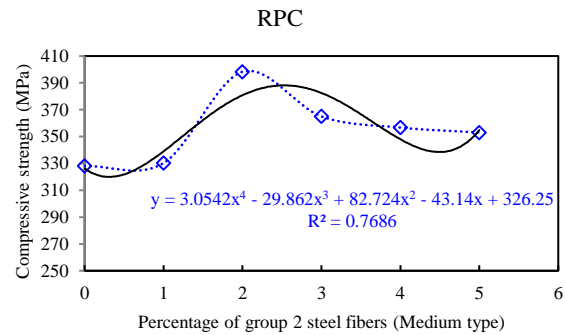


Fig. 9. Approximate prediction of the influence of the percentage of steel fibers on the compressive strength of RPC

۳-۲- نتایج آزمون مقاومت خمشی

شکل (۱۰) نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی الیاف‌های فولادی گروه ۱ (با قطر کوتاه)، گروه ۲ (با قطر متوسط) و گروه ۳ (با قطر بزرگ) با درصد‌های مختلف ۱، ۲ و ۳ درصد در مقایسه با نمونه نمونه شاهد (بدون الیاف) را نشان می‌دهد. مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۱ به‌ترتیب برابر با ۳۹،۹ و ۴۰،۹ و ۳۶،۸ مگاپاسکال بدست آمده و در مقایسه با نمونه شاهد، با رشد ۱۶،۸۵ درصدی و به اندازه ۵،۹ مگاپاسکال حاصل شده است. مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۲ به‌ترتیب برابر با ۴۱،۳ و ۴۴،۶ و ۴۰ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین مقاومت خمشی نمونه‌های RPC حاوی ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۲ در مقایسه با نمونه شاهد، با رشد ۲۷،۴۲ درصدی و به اندازه ۹،۶ مگاپاسکال حاصل گردیده است. مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۳ به‌ترتیب برابر با ۳۵،۷ و ۳۸،۶ و ۳۹،۱ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین مقاومت خمشی نمونه‌های RPC حاوی ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۳، در مقایسه با نمونه شاهد، با رشد ۱۱،۷۱ درصدی و به اندازه ۴،۱ مگاپاسکال بدست آمده است.

براساس نتایج کلی، چگونگی تاثیر انواع الیاف فولادی با قطرها و درصد‌های مختلف 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

میلی‌متر) و گروه ۳ (الیاف بزرگ با قطر ۰/۸ میلی‌متر) در مقایسه با نمونه شاهد را نشان می‌دهد. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۱ به ترتیب برابر با ۷۹،۹ و ۸۴،۴ و ۹۰،۳ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین مقاومت کششی نمونه‌های RPC حاوی ۱ درصد الیاف فولادی گروه ۱ در مقایسه با نمونه شاهد، با رشد ۶۱،۲۵ درصدی و به اندازه ۳۴،۳ مگاپاسکال بدست آمده است. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۲ به ترتیب برابر با ۸۴،۷ و ۸۸،۹ و ۹۳،۲ مگاپاسکال بدست آمده است.

شکل ۱۲. تاثیر قطر و درصد الیاف فولادی بر (الف) مقاومت کششی

نمونه‌های RPC در مقایسه با بتن شاهد، (ب) درصد تغییرات مقاومت

کششی

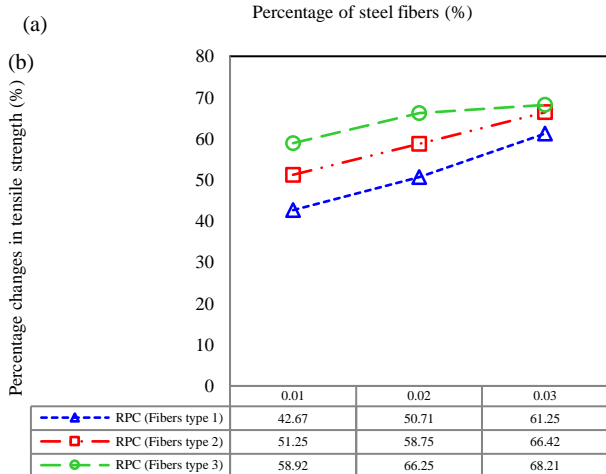
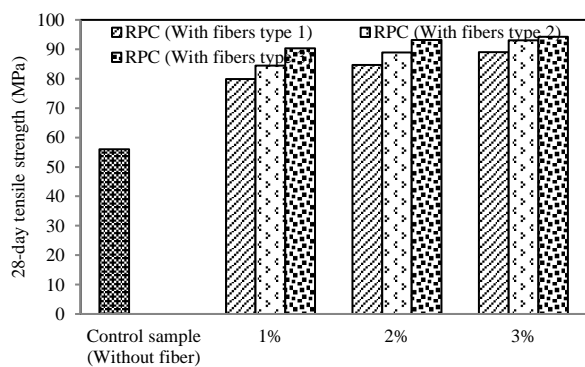


Fig. 12. Effect of diameter and percentage of steel fibers on (a) tensile strength of RPC samples compared to control concrete, (b) percentage of changes in tensile strength

بیشترین مقاومت کششی نمونه‌های RPC حاوی ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۲ در مقایسه با نمونه شاهد

فولادی ارائه شده است. بدین منظور می‌توان مقاومت خمشی RPC دارای الیاف فولادی (f'_{rf}) را برحسب مقاومت خمشی بتن با مقاومت بالا یا نمونه شاهد (f'_{rf}) و درصد الیاف فولادی (V_f) با یک تابع چندجمله‌ای درجه ۳ و مطابق رابطه ۳ تعیین نمود:

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

با جای‌گذاری مقدار ۳۵ مگاپاسکال به جای f_r و انجام تحلیل رگرسیون برای هر یک از نمونه‌های RPC تهیه شده با طرح اختلاط‌های مختلف، داریم:

✓ برای RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۱ (کوتاه و قطر ۰/۴ میلی‌متر)

$$f'_{rf} (MPa) = 35 - 0.2V_f^3 - 1.35V_f^2 + 6.45V_f \quad (4)$$

✓ برای RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۲ (متوسط و قطر ۰/۶ میلی‌متر)

$$f'_{rf} (MPa) = 35 - 0.8167V_f^3 + 0.95V_f^2 + 6.1667V_f \quad (5)$$

✓ برای RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۳ (بزرگ و قطر ۰/۸ میلی‌متر)

$$f'_{rf} (MPa) = 35 - 0.7667V_f^3 - 3.4V_f^2 - 1.9333V_f \quad (6)$$

شکل ۱۱. پیش‌بینی تقریبی تاثیر درصد الیاف فولادی بر مقاومت خمشی

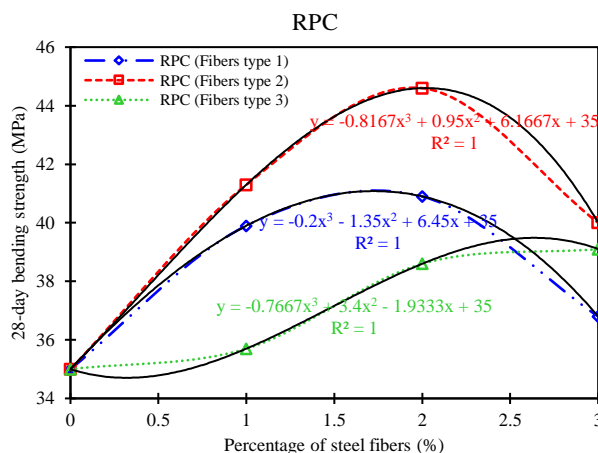


Fig. 11. Approximate prediction of the influence of the percentage of steel fibers on the flexural strength of RPC

۳-۳- نتایج آزمون مقاومت کششی

شکل (۱۲) نتایج آزمایش مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوچک با قطر ۰/۴ میلی‌متر)، گروه ۲ (الیاف متوسط با قطر ۰/۶

✓ برای RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۱ (کوتاه و قطر ۰/۴ میلیمتر)

$$f'_{ff} (MPa) = 56 + 3.4667V_f^3 - 20.1V_f^2 + 40.533V_f \quad (7)$$

✓ برای RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۲ (متوسط و قطر ۰/۶ میلیمتر)

$$f'_{ff} (MPa) = 56 + 4.1V_f^3 - 24.55V_f^2 + 49.15V_f \quad (8)$$

✓ برای RPC حاوی الیاف فولادی گروه ۳ (بزرگ و قطر ۰/۸ میلیمتر)

$$f'_{ff} (MPa) = 56 + 4.9667V_f^3 - 30.65V_f^2 + 59.983V_f \quad (9)$$

شکل ۱۳. پیش‌بینی تقریبی اثر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت کششی

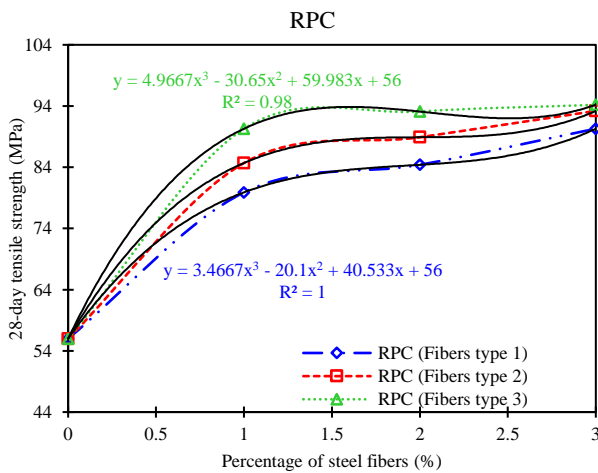


Fig. 13. Approximate prediction of the effect of different steel additions on RPC tensile strength

۴-۳- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

شکل‌های (۱۴ و ۱۵) تغییرات مورفولوژیک حاصل از نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) روی نمونه‌های RPC را نشان می‌دهد. نتایج مطالعه SEM، امکان مشاهده تغییرات مورفولوژیکی قابل توجه در نمونه‌های RPC را فراهم می‌کند. نتایج SEM ریزساختار نمونه‌های RPC هماهنگی خوبی با نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در گذشته دارد. برای نمونه، پیش از این پژوهشگرانی همچون دونگ و همکاران^[31] و لیو و همکاران^[32] نتایج نسبتاً مشابهی را گزارش کرده‌اند.

(بدون الیاف)، با رشد ۶۶،۴۲ درصدی و به اندازه ۳۷،۲ مگاپاسکال بدست آمده است. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های RPC حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۳ به ترتیب برابر با ۸۹ و ۹۳،۱ و ۹۴،۲ مگاپاسکال بدست آمده است. بیشترین مقاومت کششی نمونه‌های RPC حاوی ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۳ در مقایسه با مقاومت کششی نمونه شاهد، با رشد ۶۸،۲۱ درصدی و به اندازه ۳۸،۲ مگاپاسکال بدست آمده است.

نتایج نشان می‌دهد که رشد مقاومت کششی RPC در اثر افزودن ۱ تا ۳ درصد از هر سه گروه الیاف فولادی، کاملاً صعودی و به‌طور پیوسته در حال افزایش می‌باشد. به طوری که بیشترین درصد رشد مقاومت کششی برای نمونه دارای ۳ درصد حجمی الیاف فولادی گروه ۳ و به مقدار ۹۴،۲ مگاپاسکال (رشد مقاومت ۶۸،۲۱ درصدی نسبت به نمونه شاهد) تعیین شده 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 نمونه 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 به‌عنوان الیاف تسلیح‌کننده بتن قابل قبول خواهد بود.

در ادامه با انجام تحلیل رگرسیون (شکل ۱۳)، یک رابطه تجربی برای تخمین مقاومت کششی RPC برحسب درصد الیاف فولادی ارائه شده است. بدین منظور می‌توان مقاومت کششی RPC دارای الیاف فولادی (f'_{ff}) را برحسب مقاومت کششی نمونه شاهد (f_i) و درصد الیاف فولادی (V_f) با یک تابع چندجمله‌ای درجه ۳ و مطابق رابطه ۷ تعیین نمود:

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

با جای‌گذاری ۵۶ مگاپاسکال به‌جای f_i و انجام تحلیل رگرسیون برای هر یک از نمونه‌های RPC تهیه شده با طرح اختلاط‌های مختلف، داریم:

CSH نسبت داده می‌شود. بنابراین، افت استحکام مشاهده شده در دماهای بالا ممکن است به اتلاف آب، افزایش تخلخل و در نتیجه افزایش نفوذپذیری نسبت داده شود.

شکل ۱۵. میکروگراف‌های SEM: (الف) ساختار ماتریس بتن RPC، (ب) رابط پیوند بین الیاف فولادی و ماتریس RPC

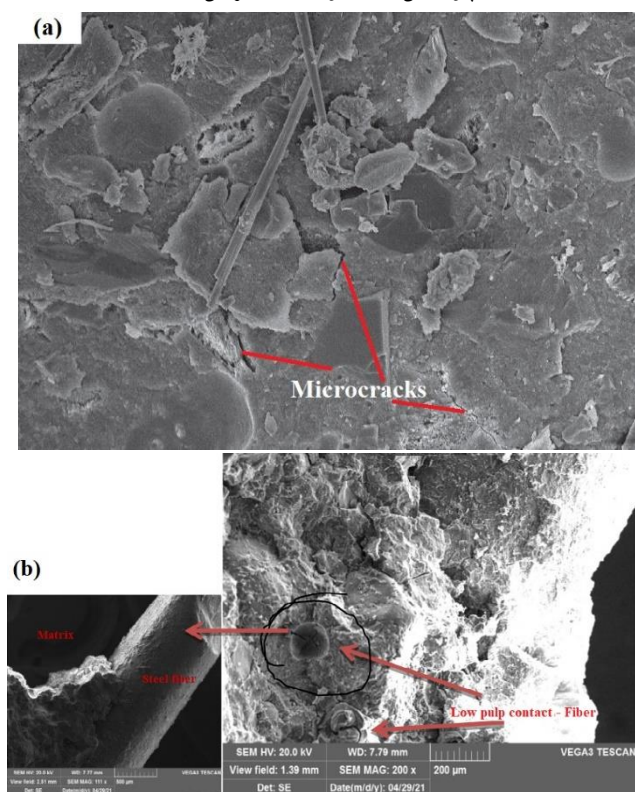


Fig. 15. SEM micrographs: (a) RPC concrete matrix structure, (b) bond interface between steel fibers and RPC matrix

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از الیاف فولادی بر مشخصات مقاومتی RPC ساخته شده از مصالح معدنی بومی و رایج در کارخانه‌های تهیه شن و ماسه و میکروسیلیس کشور در مقایسه با بتن معمولی پرمقاومت (نمونه شاهد) پرداخته شد. نتایج حاصل از تحقیق به‌طور خلاصه به شرح زیر قابل بیان است:

نمونه‌های RPC تولید شده دارای مقادیر متفاوتی از پودر سیلیس واکنش نداده و پودر میکروسیلیس و پودر ماسه سیلیس کوارتزی هستند که در داخل ذرات سیمان به صورت پیوسته جاسازی شده‌اند. بر اساس نتایج SEM مشاهده شد که مخلوطی با ۲۵ درصد میکروسیلیس دارای ریزساختار همگن و متراکم تری نسبت به سایر نمونه‌هاست. این می‌تواند به دلیل توانایی انبساط ذرات میکروسیلیس در پر کردن فضای بین سنگدانه‌ها باشد که منجر به ریزساختار متراکم‌تر می‌شود [28]. با این حال، در محتوای میکروسیلیسی ۲۵ درصد، افزایش تقاضا برای آب باعث می‌شود که بخش‌های خاصی از پودر سیلیس بدون واکنش باقی بمانند، در نتیجه ناهمگنی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. این موضوع سطح رشد مقاومت فشاری را کاهش داده و منجر به ریزساختار تا حدی شکننده می‌شود [29].

میکروگراف‌های ماتریس RPC و همچنین رابط اتصال ماتریس الیاف فولادی-سیمانی در شکل (الف) نشان داده شده است. این میکروگراف‌ها به وضوح نشان می‌دهند که ریزساختار نمونه‌های RPC حاوی الیاف فولادی، بسیار متراکم بوده و الیاف فولادی در این نمونه‌ها با قدرت زیادی به ماتریس سیمانی متصل شده است (شکل ۱۵ ب). همچنین مشاهده شد که ریزساختار نمونه‌های RPC دارای تعدادی ریزترک و منافذ ریز است. مخلوط‌های دارای الیاف فولادی با قطر بزرگتر دارای ریزترک‌های بیشتری نسبت به سایرین هستند که نتیجه‌ای منطقی است [30]. ماتریس RPC با وجود برخی از ریزترک‌ها، به راحتی و به‌طور مساوی توسط محصولات هیدراتاسیون پوشانده می‌شود. در واقع، واکنش هیدراتاسیون بین پودر میکروسیلیس و سیمان منجر به تولید CSH می‌شود. علاوه بر این، ماسه سیلیس کوارتزی و دی‌اکسید گوگرد موجود در پودر سیلیس به عنوان کاتالیزور عمل می‌کنند و این واکنش، روند هیدراتاسیون را سرعت می‌بخشد.

همان‌گونه که در شکل (الف) مشاهده می‌شود، تجزیه کلسیم‌هیدروکسید به CH و CSHs منجر به ساختار ضعیف‌تر و متخلخل‌تر نمونه‌های RPC می‌شود. این موضوع به احتمال زیاد به غلبه ریزترک‌ها، تخلخل زیاد بتن به دلیل وجود حفره‌ها، تغییر شکل کریستال Ca(OH)_2 و گسیختگی پیوندهای فاز

شکل ۱۴. تغییرات مورفولوژیک ساختار ماتریس بتن RPC در SEM

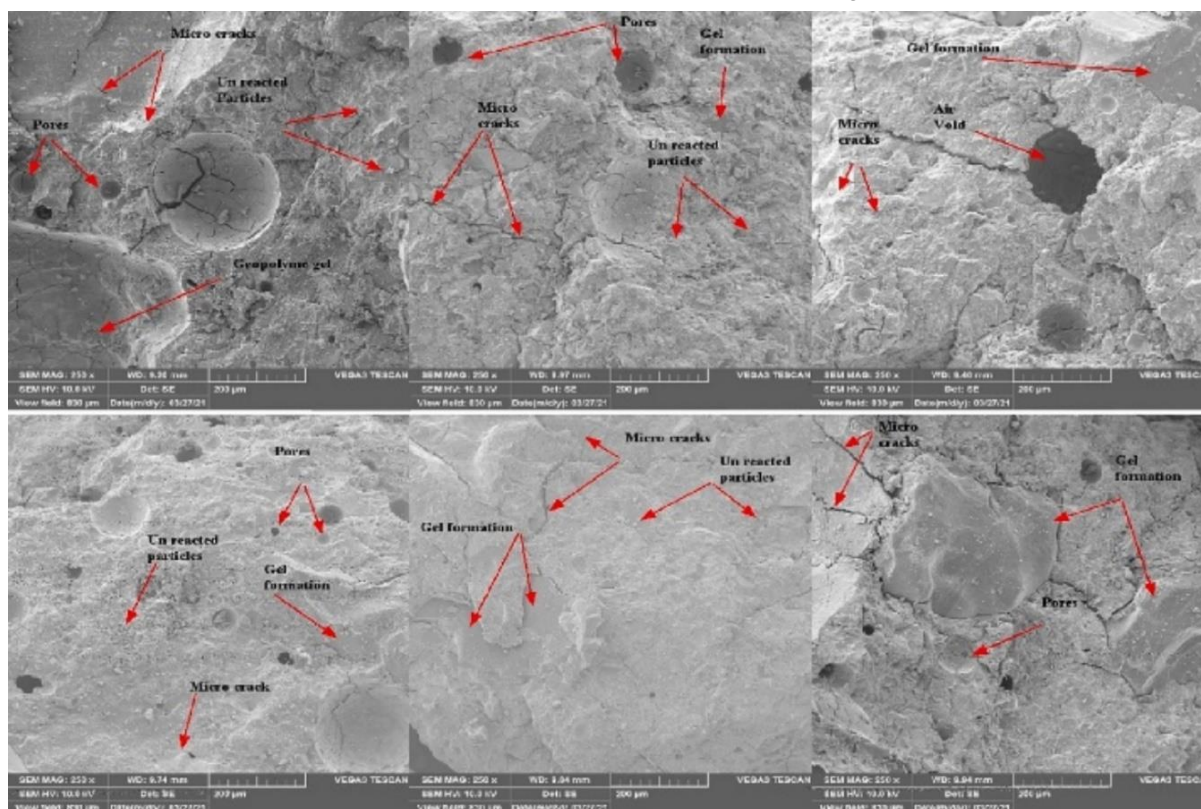


Fig. 14. Morphological changes of RPC concrete matrix structure in SEM

بهبود درصد الیاف فولادی متوسط مورد استفاده برای ساخت RPC با بیشترین مقاومت، ۲ درصد است.

✓ برای دو نوع الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف کوتاه) و گروه ۲ (الیاف متوسط)، ابتدا مقاومت خمشی روند صعودی داشته و بعد از رسیدن به اوج، دارای سیری نزولی است. همچنین نتایج نشان داد که با افزودن الیاف گروه ۳ بیشترین مقاومت خمشی بتن نمونه در ۳ درصد حجمی الیاف فولادی ایجاد شده است. بنابراین می‌توان مقدار ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۱ و ۲ و مقدار ۳ درصد الیاف فولادی گروه ۳ را به‌عنوان مقدار بهینه درصد الیاف فولادی برای رسیدن به بیشترین مقاومت خمشی در RPC پیشنهاد نمود.

✓ با افزودن هر سه گروه از الیاف‌های فولادی با قطرهای مختلف از ۱ تا ۳ درصد، رشد مقاومت کششی RPC کاملاً صعودی است. بنابراین، در مواردی که نیاز به افزایش مقاومت کششی بتن باشد، استفاده از الیاف فولادی با قطرهای مختلف به‌عنوان تسلیح‌کننده بتن مطلوب است.

✓ با افزودن الیاف و افزایش سن عمل‌آوری، مقاومت فشاری RPC در مقایسه با نمونه شاهد افزایش می‌یابد. در نمونه‌های بتن معمولی بدون الیاف با افزایش سن بتن از ۷ الی ۴۲ روز، مقاومت فشاری بتن به‌تدریج افزوده می‌شود، اما با بیشتر شدن سن عمل‌آوری، میزان تغییرات این افزایش کمتر می‌شود. این در حالی است که برای RPC، قضایه متفاوت بوده و با افزایش سن عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری همچنان روند رو به رشد زیادی دارد.

✓ با کاهش قطر الیاف، مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC در مقایسه با نمونه شاهد، بیشتر بوده و بیشترین مقاومت فشاری نمونه‌های RPC مربوط به نمونه حاوی ۲ درصد الیاف فولادی گروه ۱ (الیاف با قطر ۰/۴ میلی‌متر) است.

✓ استفاده از الیاف فولادی متوسط تا ۲ درصد نسبت حجمی بتن، منجر به افزایش مقاومت فشاری RPC در مقایسه با نمونه شاهد می‌شود. با افزودن الیاف بیش از ۲ درصد، سیر صعودی افزایش مقاومت فشاری RPC کاهش یافته و مقدار

منابع

- Materials*, 232, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117129>.
- [18] 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>.
- [19] 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>.
- [20] Meraji, L., Afshin, H., and Abedi, K. (2013). Investigating the possibility of producing reactive powder concrete with existing materials in Iran. *Concrete Research*, 5(2), 7-18 (in Persian).
- [21] Dashti Ramatabadi, M.A., Shahabian, F., and Haji Kazemi, H. (2021). Experimental investigation of compressive and tensile strength of steel fiber reactive powder concrete, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), 188-200 (in Persian).
- [22] ASTM Standard. (1993). 1st edition, PCN: 03-549093-63, ASTM, Philadelphia.
- [23] DIN 1164-85 Standard. (2000). Complete Document. Special cement compositions, Requirements and conformity evaluation, 1st Edition, Publisher: Deutsches Institut für Normung.
- [24] ISIR, National Standard No. 389. (2018). Properties of Portland cement, 3rd Revision- 8th Edition, Publisher: National Standard Organization of Iran.
- [25] ASTM C311/C311M-17. (2013). American Society for Testing and Materials. Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates. Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete. ASTM International.
- [26] ASTM Standard A820/A820M-16. (2015). Standard specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete, ASTM (American Society for Testing and Materials), West Conshohocken.
- [27] 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
- [28] Gutteridge, W.A., and Dalziel, J.A. (1990). Filler cement: the effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: part I. A fine non-hydraulic filler. *Cement and Concrete Research*, 20(5), 778-782.
- [29] Zhang, Z., Zhang, B., and Yan, P. (2016). Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures. *Construction and Building Materials*, 121, 483-490.
- [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, 117129.
- [31] Dong, S., Han, B., Yu, X., and Ou, J. (2019). Constitutive model and reinforcing mechanisms of uniaxial compressive property for reactive powder concrete with super-fine stainless wire. *Composites Part B: Engineering*, 166, 298-309.
- [32] Liu, K., Yu, R., Shui, Z., Li, X., Ling, X., He, W., Yi, S., Wu, S. (2018). Effects of pumice-based porous material on hydration characteristics and persistent shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC). *Materials*, 12(1), 11.
- [1] Erntroy, D., and Shacklock, B. (1965). *Design and Control concrete mixtures*. Taylor & Francis: New York.
- [2] Caldarone A. (2009). *High Strength Concrete*. Taylor & Francis: New York.
- [3] Voo, Y.L., and Foster, S.J. (2009). *Reactive Powder Concrete: Analysis and Design of RPC Girders* Paperback, LAP Lambert Academic Publishing: United Kingdom.
- [4] 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>.
- [5] 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.
- [6] Yu, R., Spiesz, P., and Brouwers, H.J.H. (2014). Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC). *Cement and Concrete Composites*, 56, 29-39.
- [7] Yu, R., Spiesz, P., and Brouwers, H.J.H. (2015). Development of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC): Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, 79, 273-282.
- [8] 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.
- [9] Mahboubi Niazmandi, M., and Gholizadeh, M. (2023). Experimental study of the effect of different types of industrial steel fibers on the mechanical properties of reactive powder concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*. <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.385041.3032>.
- [10] Wasan, K. (2014). *Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete*. LAP Lambert Academic Publishing, Uxbridge, United Kingdom.
- [11] Sanjuán, M.Á., and Andrade, C. (2021). Reactive powder concrete: Durability and applications. *Applied Science*, 11, 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>.
- [12] Ashour Al. Khuzaie, 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.
- [13] Zeng, W., Li, H., and Wang, Y. (2012). Compressive behavior of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperatures. *Materials and design*, 41, 403-409.
- [14] Ipek, M., Yilmaz, K., and Uysal, M. (2012). The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase. *Construction and Building Materials*, 26, 459-465.
- [15] 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.
- [16] Abid, M., Hou, X., Zheng, W., Rizwan Hussain, R., Cao, S., and Lv, Z. (2019). Creep behavior of steel fiber reinforced reactive powder concrete at high temperature. *Construction and Building Materials*, 205, 321-331.
- [17] 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*

Experimental Evaluation of the Strength Properties of Reactive Powder Concrete (RPC) Produced with Indigenous Materials Containing Industrial Steel Fibers

M. Mahboubi Niazmandi^{1*}, M. Gholizadeh²

1- University Lecturer, Ph.D. in Geotechnical Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

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

Received: 2023/02/04

Accepted: 2023/06/21

*m.mahboubi@sutech.ac.ir

Abstract

Reactive powder concrete (RPC) is one of the ultra-high strength concretes with superior mechanical properties, which is made using cement and very fine powder materials such as quartz sand, microsilica, low amounts of water-cement ratio, super-lubricant and steel fibers. The main role of steel fibers in such concrete is actually a type of composite that has proper integrity and continuity and enables the use of concrete as a flexible material. The present study aimed to evaluate the effect of using different types of industrial steel fibers with different length (diameter) and percentages on the strength properties of RPC and to determine a series of experimental relationships for their estimation. To this end, by preparing three types of steel fibers with small diameters (group 1), medium (group 2) and large (group 3) and making a number of RPC samples using indigenous and common mineral materials, the strength characteristics of this type of concrete include compressive, bending and tensile strengths were determined at different ages. To investigate the effect of curing time as well as the diameter and percentage of steel fibers on the compressive strength of RPC, a total of 39 samples + 1 sample without fibers (control concrete) containing 1 to 5% of large steel fibers (with diameter of 0.8 mm), medium (with diameter of 0.6 mm) and small (with diameter of 0.4 mm) were made and their compressive strength was determined at different ages. In addition, to determine the bending and tensile strengths of RPC samples, a total of 18 standard RPC beam and cylindrical samples containing different percentages of medium diameter steel fibers were made. After these samples were cured, their 28-day strength was evaluated in comparison with the control samples. The results of compressive strength tests showed that by increase in the curing age, the strength of RPC increases in compared with the control sample (without fibers). The results of compressive strength tests showed that by reduce in the diameter of steel fibers, the 28-day compressive strength of RPC samples increased significantly and was determined to 423.5 MPa. In compared with the control sample (without fibers), the compressive strength is associated with a growth of 29.11%. Also, the optimal amount of medium steel fibers to achieve RPC with the highest strength was determined to be 2%. The results of flexural strength tests showed that 2% of group 1 steel fibers (with small diameter) and group 2 (with medium diameter) and 3% of group 3 steel fibers (with large diameter) as the optimal percentage of steel fibers to reach the maximum flexural strength in RPC. Therefore, the 28-day flexural strength of RPC samples containing 2%, 2%, and 3% of steel fibers of groups 1, 2, and 3, respectively, was equal to 40.9, 44.6, and 39.1 MPa. The highest tensile strength of RPC samples containing 1%, 2%, and 3% of steel fibers of groups 1, 2, and 3 compared to the control sample, was associated with a growth of 61.25%, 66.42%, and 68.21%, respectively. Also, the results of the tensile strength tests showed that the addition of group 2 steel fibers (medium) compared to the other two groups (small and large), had a greater impact on the growth percentage of tensile strength of RPC samples.

Keywords: Reactive powder concrete (RPC), Industrial steel fibers, Strength characteristics, Experimental tests.