

ارزیابی رفتار تنش- کرنش فشاری بتن پودری واکنشی تقویت شده با الیاف فولادی و پلی‌وینیل الکل

مهدی نعمت زاده^{۱*}، رضا پورحسین^۲

۱- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه مازندران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه مازندران

*m.nematzadeh@umz.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۰/۰۹]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۳/۱۸]

چکیده

بتن پودری واکنشی نسل جدید مصالح بر پایه سیمان می‌باشد که به دلیل خصوصیات ریز ساختار آن دارای مقاومت بالا می‌باشد. از آنجا که این بتن نوظهور می‌باشد آیین نامه طراحی واحدی که دارای نتایج تجربی با کیفیت بالا به همراه مدل‌های تنش-کرنش قابل اعتماد برای تحلیل غیر خطی سازه‌ها باشد وجود ندارد. اگرچه تعدادی معادلات تجربی برای پیش‌بینی مقاومت اعضای ساخته شده از طریق این نوع بتن در ادبیات فنی موجود می‌باشد، اما باید در نظر داشت که این اطلاعات به خصوص در زمینه بتن پودری واکنشی حاوی الیاف سنتتیک و نیز ترکیب الیاف ها دارای نقص می‌باشد. از این رو، در این مقاله ۱۰ طرح اختلاط از مخلوط بتن پودری واکنشی حاوی الیاف‌های فولادی، پلی وینیل الکل و ترکیب آنها در درصدهای حجمی متفاوت و با فرآیندهای مختلف عمل آوری ساخته شد و خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کرنش در تنش حداکثر، مدول الاستیسیته، چقرمگی و انرژی جذب شده نسبی و نیز شکل منحنی تنش-کرنش مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، با توجه به نتایج آزمایشگاهی، روابط تجربی برای تخمین پارامترهای موثر در منحنی تنش-کرنش بتن پودری واکنشی ارائه شد. در نهایت، مدلی به منظور پیش‌بینی دقیق رابطه تنش-کرنش فشاری بتن پودری واکنشی پیشنهاد شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل - پیشنهادی با دقت بسیار خوبی می‌تواند نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند.

واژگان کلیدی: بتن پودری واکنشی، منحنی تنش - کرنش، الیاف‌ها، عمل‌آوری گرمایی.

۱- مقدمه

بهبودیافته که متعاقباً منجر می‌شود خصوصیات واحدی نظیر مقاومت فشاری بسیار بالا در حدود ۸۰۰-۱۵۰ مگا پاسکال، مقاومت خمشی بالای ۳۰ مگا پاسکال و دوام بسیار عالی به دست آورد [2]. از آنجاکه آیین‌نامه طراحی برای اعضای ساخته‌شده با این بتن وجود ندارد. این جایگاه مانعی برای کاربردهای عملی این مصالح می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به اینکه اخیراً طراحی بر اساس عملکرد به‌صورت گسترده‌ای در میان تنوع بسیار زیاد انواع بتن‌ها در حال استفاده می‌باشد،

بتن پودری واکنشی نوعی مصالح کامپوزیت بر پایه سیمان می‌باشد که از مصالحی همچون سیمان، پودرهای بسیار ریز فعال، سنگ‌دانه‌های سیلیسی ریز به همراه فوق روان کننده و الیاف تشکیل شده است [1]. با حذف درشت‌دانه‌ها از ترکیب آن و انتخاب بهینه مخلوط دانه‌ها و بهینه کردن چگالی تراکمی و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، همگنی و ریزساختار مخلوط

الباف فولادی را بررسی کردند. نتایج بدست آمده آنها بیانگر آن می باشد که الباف فولادی مقاومت بتن را افزایش داده است و الباف پلی پروپیلن باعث بهبود چقرمگی بتن شده است [12].

بر این اساس هدف این مقاله فهمیدن رابطه تنش-کرنش فشاری بتن پودری واکنشی حاوی الباف فولادی در درصد های حجمی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به همراه الباف پلی وینیل الکل در درصد های حجمی ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۰/۷۵٪ و نیز ترکیب هایی شامل هر دو الباف با درصد حجمی ۱٪ از کل الباف می باشد. از این رو ۴۹ عدد نمونه بتنی در ۱۰ طرح اختلاط مختلف در ۱۳ گروه آزمایشی ساخته شده است. اثر نوع و مقدار الباف به همراه اثر نوع عمل آوری بر روی خصوصیات مکانیکی همچون مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، کرنش در تنش حداکثر و منحنی تنش-کرنش بررسی شده است. همچنین به واسطه تحلیل رگرسیون، روابطی برای بیان خصوصیات مکانیکی در الباف مختلف به دست آمده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل: سیمان پرتلند تیپ یک (CEM-I 42.5 N) مطابق با استاندارد ASTM C150 [13]؛ میکروسلیس آمورف تهیه شده از شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران با سطح مخصوص $20000 \text{ m}^2/\text{kg}$ و کسر جرمی SiO_2 ۹۰٪ مطابق با استاندارد ASTM C1240 [14]؛ ماسه کوارتزی تهیه شده از شرکت بینالود مشهد و پودر کوارتز تهیه شده از شرکت طوما اصفهان به ترتیب با محدوده قطر ۶۰۰-۲۰۰ میکرون و حداکثر قطر اسمی ۲۰ میکرون که دارای کسر جرمی SiO_2 بیشتر از ۹۹/۰۳٪ می باشند. فوق روان کننده نسل سوم بر پایه پلی کربوکسیلات با ۴۰٪ مقدار مواد جامد و چگالی $1/1 \text{ gr/cm}^3$ که مطابق با استاندارد ASTM C494 [15] از نوع F می باشد، به صورت درصد وزنی سیمان در تمام مخلوط ها استفاده شده است. همچنین در این تحقیق از دو نوع الباف فولادی موجدار دو سر قلاب حاوی روکش مس به همراه الباف سنتتیک پلی وینیل الکل در

برخی از بتن ها قادر به ارضا کردن ملزومات طراحی در بخشی از سازه همچون المان های بسیار لاغر، سیستم های دال و ستون، کف هایی با دهانه زیاد نمی باشند [3]. در میان این تنوع بتنی موجود، این بتن با توجه به عملکرد های فیزیکی و مکانیکی ویژه، جایگاه ویژه ای را به خود اختصاص داده است. از این رو می توان آن را به عنوان یک ماده امیدوارکننده برای تغییر در طراحی اعضای ویژه بتنی پیش ساخته و پیش تنیده در صنایع مختلف بخصوص سازه های مقاوم در برابر نفوذ، و مخازن زباله هسته ای در نظر گرفت [4].

افزودن الباف نقش بسیار مفیدی در منحنی تنش-کرنش فشاری انواع بتن ها دارد، به این صورت که مقاومت و کرنش در تنش حداکثر بتن را افزایش می دهد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش مقاومت فشاری شیب شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش تندتر می گردد و افزودن الباف در ترکیب آن ها منجر به کاهش شیب شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش می گردد [5,6]. با توجه به نمودار تنش-کرنش بتن پودری واکنشی شاهد آن هستیم که مقاومت آن در شاخه نزولی سریع تر از بتن های معمولی افت می کند که این منجر به رفتار شکننده می گردد. بکار بردن الباف فولادی در این بتن راهی مؤثر برای بهبود خصوصیات مکانیکی و تغییر شکست انفجاری به رفتاری شکل پذیر می باشد [7].

ترکیب کردن الباف ها در مخلوط بتنی نقش کلیدی در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن دارد. همانطور که در ادبیات فنی گزارش شده است، ترکیب دو نوع الباف مختلف اثرات مختلفی بر روی خصوصیات بتن دارد [8-10]. سوا^۱ و همکاران، اثر ترکیب دونوع الباف فولادی و پلی وینیل الکل را بررسی کردند. نتایج آزمایشات آنها نشان می دهد که الباف فولادی به طور مؤثری مقاومت بتن را افزایش می دهد در حالیکه الباف پلی وینیل الکل چقرمگی و رفتار پس از نقطه اوج را بهبود می بخشد. آنها همچنین بیان می کنند که ترکیب دونوع الباف به طور چشمگیری مقاومت و سختی خمشی را بهبود می بخشد [11]. بانتیا^۲ و گوپتا^۳ اثر ترکیب الباف های مختلف پلی پروپیلن و

¹ Soe

² Banthia

³ Gupta

جدول ۲. اطلاعات نمونه‌های بتنی پودری واکنشی

Specimen ID	Series	Type of curing regime	Steel Fiber (%)	PVA fiber (%)
RPC/P/H	Plain	Hot water curing	-	-
RPC/P/S		STD curing	-	-
RPC/ST1/H	ST 1%	Hot water curing	1	-
RPC/ST2/H	ST 2%	Hot water curing	2	-
RPC/ST3/H	ST 3%	Hot water curing	3	-
RPC/ST3/S		STD curing	3	-
RPC/HYO.75/H	HY 0.75%	Hot water curing	0.75	0.25
RPC/HYO.5/H	HY 0.5%	Hot water curing	0.5	0.5
RPC/HYO.25/H	HY 0.25%	Hot water curing	0.25	0.75
RPC/PVAO.25/H	PVA 0.25%	Hot water curing	-	0.25
RPC/PVAO.5/H	PVA 0.5%	Hot water curing	-	0.5
RPC/PVAO.75/H	PVA 0.75%	Hot water curing	-	0.75
RPC/PVAO.75/S		STD curing	-	0.75

*Mix design (kg/m^3): Cement=925, Silica fume=222, Quartz sand= 879, Quartz powder= 77.7, Super Plasticizer=29.6, water=204.

Table 2. Information of RPC specimens

حرف انتهایی نیز نشان‌دهنده نوع عمل‌آوری می‌باشد (S و H به ترتیب بیانگر عمل‌آوری در شرایط استاندارد و عمل‌آوری با آب گرم می‌باشد). تمام نتایج گزارش شده اعم از منحنی تنش- کرنش حاصل میانگین، اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. نمونه‌های آزمایش ۴۹ عدد استوانه (از هر دسته با عمل‌آوری گرمایی ۴ نمونه و از دسته با عمل‌آوری استاندارد ۳ نمونه) با طول ۲۰۰ و قطر ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند.

۲-۳- اختلاط و عمل‌آوری نمونه

برای اختلاط بتن پودری واکنشی از دستگاه پن میکسر استفاده شده است. ترتیب اختلاط در جدول ۳ نشان داده شده است. بعد از اتمام اختلاط، مخلوط بتن تازه در ۲ لایه به داخل قالب‌ها ریخته شده و به منظور متراکم سازی نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی از میله کوبنده دستی و این عملیات دستی به همراه میز لرزه برای متراکم سازی و خارج کردن حباب‌های هوای محبوس شده در نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل و الیاف ترکیبی، استفاده شده است. قالب‌های پر شده توسط

مخلوط‌های مختلف استفاده شده است که خصوصیات و شکل ظاهری این الیاف‌ها به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات مکانیکی الیاف‌ها

Density	Tesile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Aspect ratio	Length (mm)	Type of fibers
7.8	1140	200	35	25	Steel
1.3	966	25.5	526	6	PVA

Table 1. Properties of fibers

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



Fig. 1. The shape of fibers

۲-۲- طرح اختلاط و نمونه‌های آزمایش

نسبت‌های اختلاط در جدول (۲) ارائه شده است. نام‌گذاری نمونه‌ها به این صورت می‌باشد که: مخلوط-RPC-Pبیانگر بتن پودری واکنشی بدون الیاف و مخلوط‌های RPC-ST (کسر حجمی الیاف ۱، ۲ و ۳٪) و RPC-PVA (کسر حجمی الیاف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵٪) به ترتیب فقط حاوی الیاف فولادی و پلی‌وینیل الکل می‌باشند. مخلوط‌های RPC-ST75 و RPC-ST50 بیانگر ترکیب الیاف‌ها می‌باشد، به این صورت که عدد نشان داده شده در آن‌ها به ترتیب معرف کسر حجمی الیاف فولادی اشغال شده ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۲۵ از حجم کل الیاف می‌باشد و مابقی حجم شامل الیاف پلی‌وینیل الکل می‌باشد. در تمامی مخلوط‌های حاوی دو الیاف در نظر داشته باشید که حجم کل الیاف ۱٪ حجم کل می‌باشد.

شکل ۳: رژیم گرمایی استفاده شده برای عمل آوری حرارتی

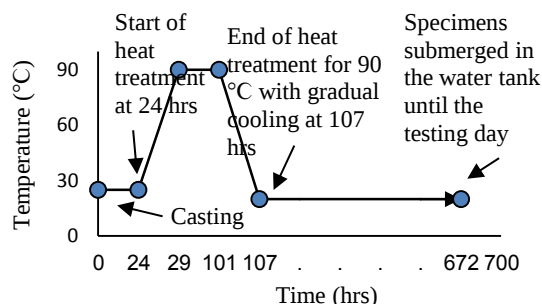


Fig. 3. Heat regime employed for curing of RPC specimens

شکل ۴: نمایی از دستگاه و نمونه در حال آزمایش فشاری



Fig. 4. View of device and specimen under test

جدول ۳: ترتیب اختلاط اجزاء و مدت زمان آن‌ها

Time (min)	Action	Duration of each step (min)
00:00-02:00	Homogenize all dry powders	2
02:00-03:00	Adding of water and superplasticizer	1
03:00-07:00	Time required for mixture acquiring a plastic consistency	4
07:00-09:00	Adding fiber(s)	2-3
09:00-11:00	Time required for distribution of fibers throughout the mixture	2-3

Table 3. Mixing procedure of reactive powder concrete

جدول ۴: نتایج آزمایشگاهی آزمایش فشاری

Specimen ID	RI	Compressive strength (MPa)	Strain at peak stress	Tangent modulus (GPa)	Secant modulus (GPa)
RPC/P/H	0	121.74	0.00288	46.48	43.78
RPC/P/S	0	115.32	0.00277	50.10	46.21
RPC/ST1/H	0.357	133.93	0.0034	49.78	46.44
RPC/ST2/H	0.714	130.49	0.0031	50.63	49.23
RPC/ST3/H	1.071	124.25	0.003	52.08	50.81
RPC/ST3/S	1.071	109.86	0.00271	52.01	50.03
RPC/HYO.75/H	1.584	120.75	0.0032	47.83	44.99
RPC/HYO.5/H	2.810	118.01	0.00305	46.43	43.18
RPC/HYO.25/H	4.037	117.25	0.0029	44.69	42.00
RPC/PVAO.25/H	1.316	113.00	0.00291	49.05	45.07
RPC/PVAO.5/H	2.632	107.41	0.00276	48.81	43.87
RPC/PVAO.75/H	3.947	105.59	0.00269	45.32	42.28
RPC/PVAO.75/S	3.947	104.02	0.00265	47.57	43.41

Table 4. Experimental results of compressive test

درپوش‌های فولادی همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است به منظور جلوگیری از خروج رطوبت بتن به محیط اطراف و همچنین فراهم کردن سطحی صاف به جهت جلوگیری از به وجود آمدن تمرکز تنش در سطح نمونه در حین آزمایش فشاری استفاده شده است. پس از قالب برداری مشاهده شد که سطح تمامی نمونه‌ها صاف بوده که این نشان‌دهنده مؤثر بودن روش درپوش گذاری می‌باشد.

در این مطالعه اگرچه سطح نمونه‌ها تا حد زیادی توسط درپوش‌های فلزی قرارداد شده بر روی بتن تازه مسطح شده است، اما به منظور اطمینان حاصل کردن از حذف نیروهای اصطکاکی و نیز تمرکز تنش در سطوح انتهایی نمونه، از صفحات ۳ میلی‌متر تخته فیبر که یک سمت آن با ملامین پوشش داده شده، در بالا و پایین نمونه‌ها استفاده شده است.

شکل ۲: قالب گذاری نمونه‌ها



Fig 2. Placement of RPC specimens

شکل ۵. نمودارهای تنش-کرنش بتن پودری واکنشی حاوی الیاف‌های (a) فولادی (b) PVA (c) ترکیب الیاف‌ها

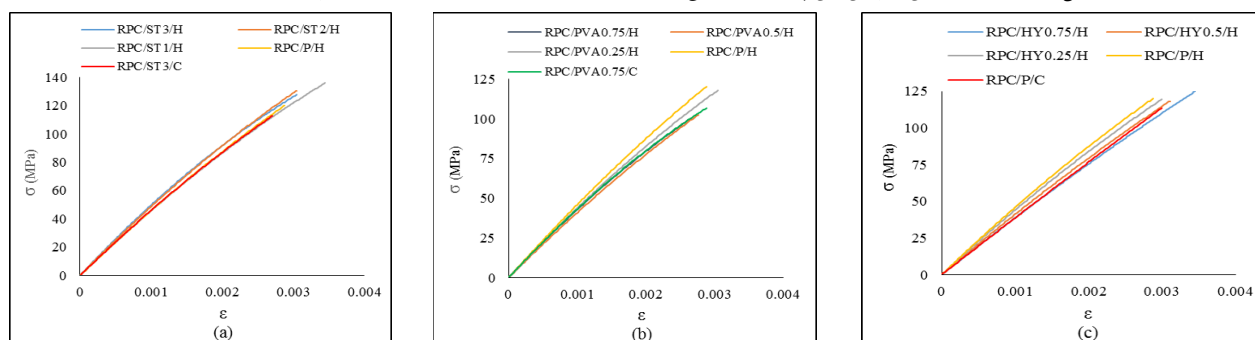


Fig. 5. Stress-strain curves for RPC specimens containing a) steel fiber b) PVA fiber c) hybridization of fibers

۳- نتایج و بحث

۳-۱- منحنی‌های تنش-کرنش

رفتار تنش-کرنش بتن از مسائل مهم در طراحی اعضای بتنی و پیش‌بینی صحیح از رفتار سازه‌ای آن می‌باشد. شکل ۵ منحنی تنش-کرنش بتن پودری واکنشی حاوی الیاف‌های متفاوت در درصدهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی منحنی‌ها تا تنش حداکثر آن‌ها ارائه شده‌اند. این بدان دلیل می‌باشد که با افزایش مقاومت فشاری بتن انرژی شکست آن نیز افزایش می‌یابد و در لحظه شکست انرژی زیادی از خود خارج می‌سازد [19]، در نتیجه، پس از رسیدن تنش نمونه به تنش حداکثر، سریعاً تنش تقریباً تا صفر افت می‌کند. اگرچه این نوع شکست بیانگر رفتاری ترد و شکننده می‌باشد ولی تکه‌تکه شدن به دلیل اثر محبوس کنندگی الیاف‌ها به خصوص الیاف فولادی بسیار کم و قابل صرف نظر کردن می‌باشد [20].

در تمامی شکل‌ها مشاهده می‌شود که افزودن درصد حجمی الیاف (به خصوص الیاف فولادی در ترکیب حجمی الیاف‌ها) منجر به افزایش کرنش حداکثر می‌شود. با مقایسه شکل‌های (a-5) و (c-5) می‌توان دریافت که افزودن الیاف فولادی تا کسر حجمی ۱٪ نقش بسزایی در افزایش کرنش و به خصوص افزایش مقاومت فشاری بتن پودری واکنشی داشته است. همچنین با مشاهده به شکل‌های (a-5) و (b-5) می‌توان دریافت که با افزایش کسر حجمی الیاف فولادی شیب ابتدایی نمودار تنش-کرنش نسبت به بتن ساده افزایش یافته است، درحالی‌که عکس این روند برای الیاف

پلی‌وینیل الکل رخ می‌دهد و در نمودار (c-5) این روند کاهش با افزایش کسر حجمی الیاف فولادی در ترکیب بتن به وضوح قابل رؤیت می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود عمل‌آوری گرمایی تأثیر مثبتی بر هردوی مقاومت فشاری و کرنش حداکثر نمونه‌های بتن پودری واکنشی دارد.

۳-۲- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن پودری واکنشی حاوی الیاف‌های مختلف در جدول ۴ و شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، الیاف فولادی توانسته است مقاومت فشاری بتن را بهبود ببخشد درحالی‌که الیاف پلی‌وینیل الکل منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است. بتن پودری واکنشی حاوی الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به ترتیب ۱۰٪، ۷٪ و ۲۱٪ مقاومت فشاری را بهبود می‌بخشد که بیشترین بازدهی در درصد حجمی ۱٪ (RPC/ST1/H) حاصل می‌شود. علت کاهش بهبود در مقاومت فشاری در مقادیر بالای حجم الیاف، افزایش تخلخل بتن و منقطع شدن چسب سیمان از مصالح سنگی می‌باشد. در بتن حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل، بیشترین افت مقاومت فشاری در ۷۵٪ رخ می‌دهد که به میزان ۱۳/۳٪ می‌باشد. علت کاهش مقاومت فشاری در بتن حاوی PVA، طول کوتاه الیاف، عدم اختلاط مناسب آن در مخلوط و در نتیجه تخلخل بالای نمونه و گیرداری ضعیف چسب سیمان با الیاف می‌باشد.

شکل ۶. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن پودری واکنشی با عمل‌آوری حرارتی حاوی الیاف‌های (a) فولادی (b) PVA (c) ترکیب الیاف‌ها

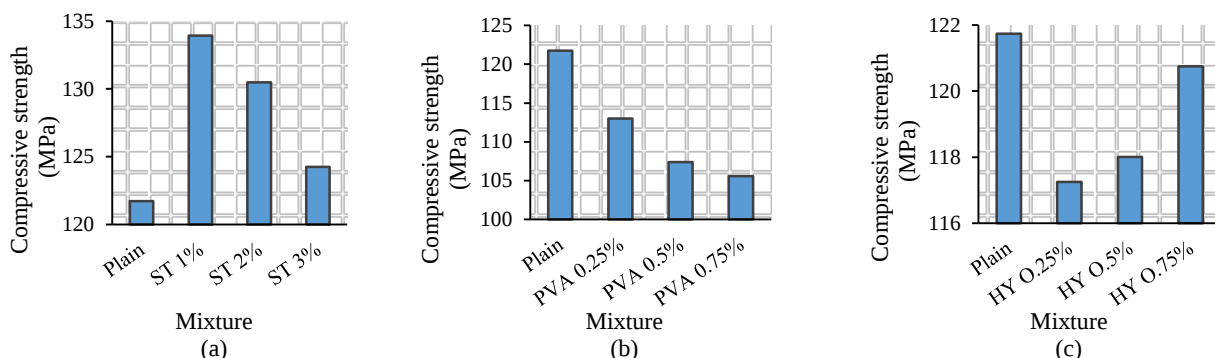


Fig. 6. Compressive strength of heat-treated RPC specimens containing a) steel fiber b) PVA fiber c) hybridization of fibers

شکل ۷ روابط تجربی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن پودری واکنشی حاوی الیاف (a) فولادی (b) PVA (c) ترکیب الیاف‌ها

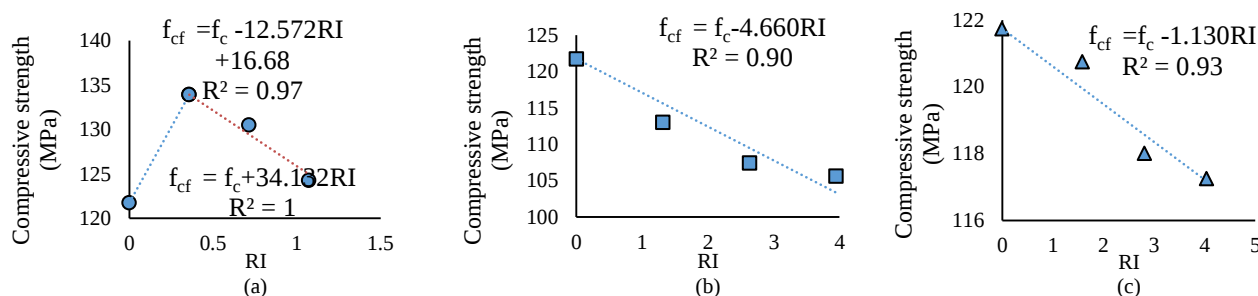


Fig 7. Compressive strength vs. tensile strength for heat-treated RPC specimens

شکل ۸. کرنش در تنش حداکثر نمونه‌های بتن پودری واکنشی با عمل‌آوری حرارتی حاوی الیاف (a) فولادی (b) PVA (c) ترکیب الیاف‌ها

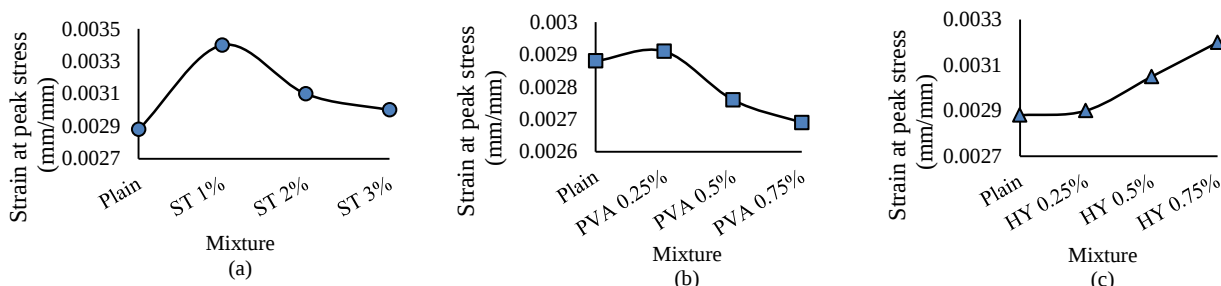


Fig 8. Strain at peak stress of heat-treated RPC specimens containing a) steel fiber b) PVA fiber c) hybridization of fibers

حاوی الیاف ترکیبی دارای مقاومت فشاری کمتر در مقایسه با بتن مرجع (بدون الیاف) می‌باشند به‌طوری‌که با کاهش درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت فشاری بتن پایین می‌آید. بیشترین افت در مقاومت فشاری در بتن حاوی ۰/۲۵ الیاف فولادی و ۰/۷۵ الیاف پلی‌وینیل الکل (RPC/HY0.25/H) رخ می‌دهد که به میزان ۳/۶٪ می‌باشد.

از نتایج جدول ۴ استنتاج می‌شود، عمل‌آوری حرارتی باعث بهبود مقاومت فشاری شده است. علت این افزایش، تسریع در فرآیند هیدراتاسیون مواد سیمانی در دمای بالا و تشکیل ساختار چسب متراکم می‌باشد. بیشترین درصد افزایش

شکل ۹. اثر نوع عمل‌آوری بر روی کرنش در تنش حداکثر نمونه‌های

بتن پودری واکنشی

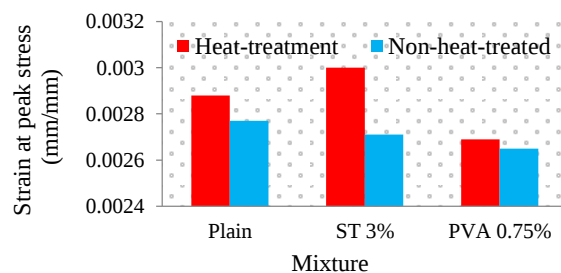


Fig. 9. Effect of curing type on strain at stress of RPC specimens

از شکل ۶ همچنین می‌توان مشاهده کرد که نمونه‌های

۱۰/۷٪ می‌باشد. کمترین مقدار افزایش همان‌طور که در شکل مشهود است مربوط به بتن پودری حاوی ۰/۷۵٪ الیاف پلی‌وینیل الکل می‌باشد.

۳-۳- کرنش در تنش حداکثر

در جدول ۴ و شکل (۸) میانگین نتایج کرنش در تنش حداکثر برای نمونه‌های بتن پودری واکنشی ارائه شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که محدوده کرنش در تنش حداکثر ۰/۰۰۲۶۵ تا ۰/۰۰۳۴ می‌باشد که این عدد برای بتن ساده با و بدون عمل‌آوری حرارتی به ترتیب ۰/۰۰۲۸۸ و ۰/۰۰۲۷۷ به دست آمده است. با مقایسه شکل (۵) و شکل (۷) مشاهده می‌گردد، کرنش در تنش حداکثر با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و روندی بسیار نزدیک به هم دارند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت، این پارامتر همانند مقاومت فشاری به نوع و کسر حجمی الیاف وابسته می‌باشد.

روابطی تجربی برای کرنش در تنش حداکثر نمونه‌های بتن پودری واکنشی حاوی الیاف فولادی، پلی‌وینیل الکل و ترکیب الیاف‌ها به صورت معادلات ۴-۶ ارائه شده است.

$$\begin{cases} \varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} + 0.001456(RI); & 0 \leq RI \leq 0.357 \\ \varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} - 0.000618(RI) + 0.00072; & 0.357 \leq RI \leq 1.071 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} + 0.0000228(RI); & 0 \leq RI \leq 1.316 \\ \varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} - 0.0000912(RI) + 0.000515; & 1.316 \leq RI \leq 3.947 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} + 0.0002021(RI); & 0 \leq RI \leq 1.584 \\ \varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} - 0.0012271(RI) + 0.000515; & 1.584 \leq RI \leq 4.037 \end{cases} \quad (6)$$

که در این معادلات ε_{co} و ε_{pf} به ترتیب کرنش در تنش حداکثر بتن حاوی الیاف و بتن مرجع پودری واکنشی می‌باشد. روابط فوق به همراه داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۳-۴- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته بتن از پارامترهای مهم در ارزیابی خواص بتن می‌باشد که توسط عوامل یکسانی که مقاومت فشاری بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

مقاومت ناشی از عمل‌آوری حرارتی مربوط به نمونه‌های حاوی ۳٪ الیاف فولادی و کمترین آن مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۷۵٪ الیاف پلی‌وینیل الکل است که به ترتیب ۱/۱۳٪ و ۱/۵٪ می‌باشد. با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی نتایج آزمایشگاهی، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن پودری واکنشی حاوی الیاف فولادی، پلی‌وینیل الکل و ترکیب الیاف‌ها به ترتیب به صورت معادلات ۱-۳ ارائه شده است.

$$\begin{cases} f_{cf} = f_c + 34.132(RI); & 0 \leq RI \leq 0.357 \\ f_{cf} = f_c - 12.572(RI); & 0.357 \leq RI \leq 1.071 \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{cf} = f_c - 4.660(RI); \quad 0 \leq RI \leq 3.947 \quad (2)$$

$$f_{cf} = f_c - 1.130(RI); \quad 0 \leq RI \leq 4.037 \quad (3)$$

که f_c و f_{cf} به ترتیب مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف و بتن مرجع پودری واکنشی برحسب مگا پاسکال و RI شاخص تقویت الیاف می‌باشد که از حاصل ضرب کسر حجمی الیاف در نسبت ظاهری آن به دست می‌آید. همچنین RI مربوط به ترکیب الیاف‌ها در معادله ۳، از مجموع شاخص تقویت دو الیاف به دست می‌آید. روابط فوق همراه با داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۷) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۸) مشهود است، مقادیر کمتر کسر حجمی الیاف فولادی و پلی‌وینیل الکل (به ترتیب ۱٪ و ۲۵٪) بیشترین تأثیر افزایشی (به ترتیب افزایش ۱۸٪ و ۴٪ نسبت به بتن ساده) را بر روی کرنش در تنش حداکثر نمونه‌های بتن پودری واکنشی داشته است. در ارتباط با ترکیب الیاف‌ها (شکل ۸-C) مشاهده می‌گردد که با افزایش کسر حجمی الیاف فولادی در ترکیب بتن پودری واکنشی روند افزایشی در کرنش در تنش حداکثر نمونه‌ها رخ می‌دهد، در نتیجه بتن حاوی ۰/۷۵٪ الیاف فولادی و ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌وینیل الکل بیشترین افزایش در کرنش به میزان ۱۱٪ را به دست آورده‌اند.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌گردد، عمل‌آوری گرمایی با تشکیل ساختاری چسبی متراکم به همراه درگیری بیشتر الیاف در مخلوط بتن توانسته است مقدار کرنش در تنش حداکثر بتن پودری واکنشی را افزایش دهد که حداکثر افزایش آن مربوط به بتن پودری حاوی ۳٪ الیاف فولادی به میزان

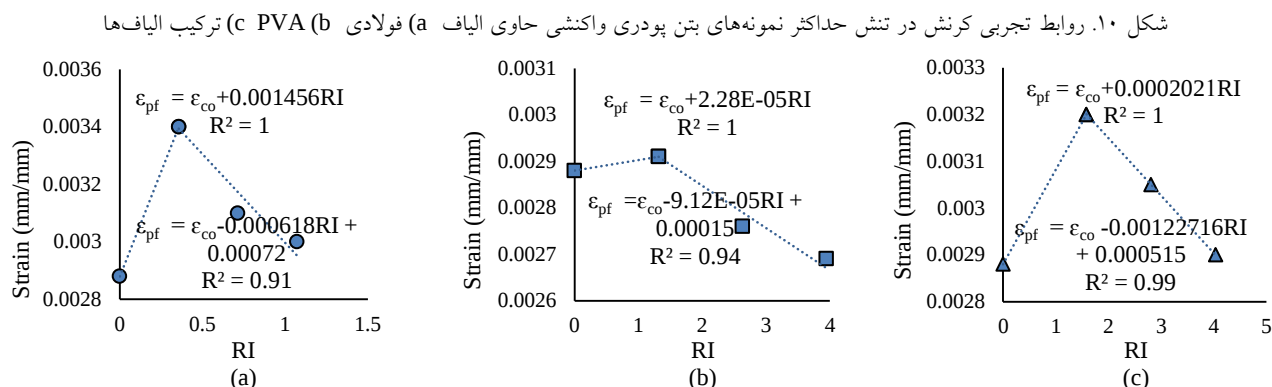


Fig. 10. The empirical equations of the strain at peak stress of heat-treated RPC specimens containing a) steel fiber b) PVA fiber c) hybridization of fibers

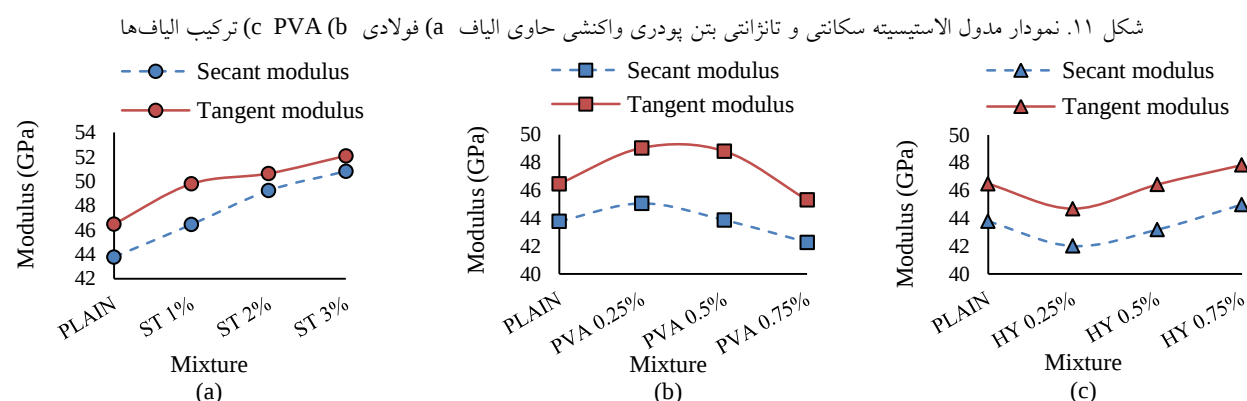


Fig. 11. Secant and tangent modulus of elasticity of heat-treated RPC specimens containing a) steel fiber b) PVA fiber c) hybridization of fibers

ترکیب الیاف‌ها نیز مشاهده می‌شود.

به‌طوری‌که حداکثر افزایش مدول سکانتی و تانژانتی، در ترکیب ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌وینیل الکل و ۰/۷۵٪ الیاف فولادی به‌دست‌آمده است که مقدار آن به ترتیب ۰/۴۸٪ و ۰/۲۹٪ می‌باشد. علت کاهش مدول الاستیسیته در بتن‌های حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل، کاهش مقاومت فشاری بتن با افزایش درصد حجمی الیاف می‌باشد.

شکل (۱۲) اثر عمل‌آوری حرارتی بر روی مدول الاستیسیته سکانتی و تانژانتی بتن پودری واکنشی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که عملیات حرارتی منجر به افزایش مدول الاستیسیته نشده است به‌طوری‌که رفتار کاهشی هر دو مدول در بتن ساده مشهودتر است؛ هرچند، در بتن حاوی الیاف فولادی افزایش ناچیزی در مدول سکانتی و تانژانتی مشاهده می‌شود. مقدار افت مدول سکانتی و تانژانتی در بتن ساده و حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل به ترتیب (۰/۵٪ و ۰/۷/۸٪) و (۰/۲/۷٪ و ۰/۵٪) به‌دست‌آمده است.

نتایج مدول الاستیسیته سکانتی و مماسی نمونه‌های بتن پودری واکنشی در جدول ۴ و شکل (۱۱) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد روند هر دو مدول مشابه به هم بوده و مدول الاستیسیته تانژانتی در تمامی نمونه‌ها دارای مقادیر بیشتری از مدول الاستیسیته سکانتی هم نوع خود می‌باشد.

مطابق جدول ۴، مدول الاستیسیته بتن پودری واکنشی حاوی الیاف فولادی به دلیل شکل موجدار الیاف و گیرداری محکمی که در بتن ایجاد می‌کند، با افزایش درصد الیاف فولادی افزایش‌یافته است به‌طوری‌که حداکثر افزایش مدول سکانتی و تانژانتی آن به ترتیب ۱/۱۶٪ و ۱/۱۲٪ در کسر حجمی ۳٪ الیاف به‌دست‌آمده است. در نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل، بیشترین افزایش در کسر حجمی ۰/۲۵٪ رخ داده است که مقدار این افزایش در مقادیر سکانتی و تانژانتی آن به ترتیب ۰/۲/۹٪ و ۰/۵/۵٪ می‌باشد و سپس روند کاهشی بوده به‌طوری‌که در کسر حجمی ۰/۷۵٪ یک کاهش ۳/۴٪ در مدول سکانتی آن حاصل شده است. این روند در مخلوط حاوی

پودری واکنشی با استفاده از روش سعی و خطا و تطبیق مدل پیشنهادی بر نتایج آزمایشگاهی، تعیین می‌شود. با بکار بردن تحلیل رگرسیون غیرخطی، سه تابع توانی مناسب برای تعیین پارامتر β در نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی، پلی‌وینیل الکل و ترکیب الیاف‌ها به ترتیب به صورت روابط ۸-۱۰، به دست آورده شده‌اند.

$$\beta = \beta_0 + 1.7598(RI)^{-1.234} \quad (۸)$$

$$\beta = \beta_0 + 20.308(RI)^{-0.209} \quad (۹)$$

$$\beta = \beta_0 + 2.8822(RI)^{-0.719} \quad (۱۰)$$

که β_0 مقدار پارامتر β در بتن مرجع است و برابر با ۱۲ به دست آمده است. روابط تجربی پارامتر β در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که برای تمامی گروه‌ها، با افزایش RI مقدار β کاهش می‌یابد.

۳-۵-۱- صحت سنجی مدل پیشنهادی

به منظور تأیید مدل پیشنهادی، نتایج به دست آمده از آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی منحنی تنش-کرنش بتن پودری واکنشی حاوی الیاف‌های مختلف مقایسه شدند. در مدل پیشنهادی، مقاومت فشاری و کرنش در تنش حداکثر به ترتیب از روابط (۱-۳) و (۴-۶) گرفته شده است. در شکل (۱۴)، منحنی‌های تنش-کرنش آزمایشگاهی و مدل‌های پیشنهادی به دست آمده برای بتن پودری واکنشی حاوی درصد‌های بالا از الیاف‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مدل پیشنهادی با دقت بسیار خوبی می‌تواند نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند.

شکل ۱۲. اثر نوع عمل‌آوری بر مدول الاستیسیته بتن پودری واکنشی

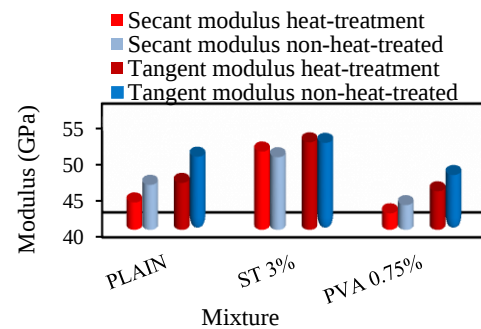


Fig. 12. Effect of curing type on modulus of elasticity of RPC specimens

۳-۵-۲- مدل پیشنهادی

رابطه تنش-کرنش بتن به منظور تحلیل‌های غیرخطی اعضای سازه‌ای لازم می‌باشد. از بررسی روابط پیشنهاد شده تنش-کرنش برای تحلیل غیرخطی رفتار عضو توسط سایر محققین مشخص شده است که بعضی این روابط برای بتن با مقاومت معمولی و مقاومت بالا اعتبار سنجی شده‌اند و منعکس‌کننده رفتار واقعی بتن پودری واکنشی نمی‌باشد. در این مطالعه، مدلی بر اساس معادله Chu و Carreira [21] برای بتن پودری واکنشی ارائه شده است. در ادامه نیز برای بررسی مدل پیشنهادی، نتایج آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی مطالعه حاضر مقایسه می‌شوند. فرم کلی رابطه استفاده شده به صورت زیر می‌باشد:

$$y = \left[\frac{\beta x}{\beta - 1 + \beta x} \right] \quad (۷)$$

که β شیب نقطه عطف منحنی تنش-کرنش و منعکس‌کننده اثر الیاف بر رفتار فشاری پس از نقطه اوج می‌باشد که بر اساس خصوصیات بتن و شاخص تقویت الیاف تعیین می‌شود. پارامتر β برای هر یک از نمونه‌های بتن

شکل ۱۳. رابطه پارامتر β با RI برای مدل پیشنهادی بتن پودری واکنشی حاوی الیاف (a) فولادی (b) PVA (c) ترکیب الیاف‌ها

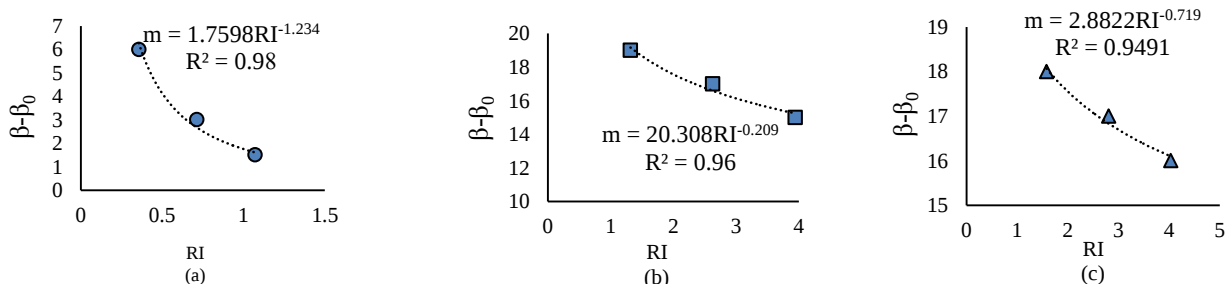


Fig. 13. The relationship between β and RI for proposed model of RPC specimens containing a) steel fiber b) PVA fiber c) hybridization of fibers.

شکل ۱۴: منحنی‌های تنش-کرنش آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی برای نمونه‌های بتن پودری واکنشی حاوی الیاف مختلف.

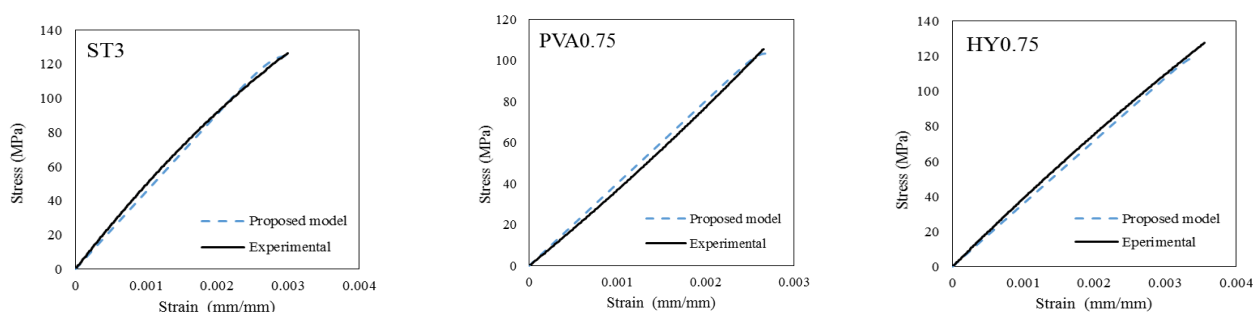


Fig. 14. The stress-strain curves derived from the experiments and the proposed model for RPC specimens containing a) steel fiber b) PVA fiber c) hybridization of fibers

۵- نتیجه گیری

۳- محدوده کرنش در تنش حداکثر ۰/۰۰۲۶۵ تا ۰/۰۰۳۴

می‌باشد. مشاهده شده، کرنش در تنش حداکثر با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و روندی بسیار نزدیک به هم دارند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که این پارامتر همانند مقاومت فشاری به نوع و کسر حجمی الیاف وابسته می‌باشد. از طرف دیگر، همانند مقاومت فشاری، مقادیر کمتر کسر حجمی الیاف فولادی و پلی‌وینیل الکل بیشترین تأثیر افزایشی را بر روی کرنش در تنش حداکثر نمونه‌های بتن پودری واکنشی داشته‌اند. در ارتباط با ترکیب الیاف‌ها مشاهده گردید، با افزایش کسر حجمی الیاف فولادی در ترکیب بتن پودری واکنشی روند افزایشی در کرنش در تنش حداکثر نمونه‌ها رخ می‌دهد در نتیجه بتن حاوی ۰/۰۷۵٪ الیاف فولادی و ۰/۰۲۵٪ الیاف پلی‌وینیل الکل بیشترین افزایش در کرنش به میزان ۱۱٪ را به دست آورده است.

۴- مطابق نتایج، مدول الاستیسیته سکانتی و مماسی نمونه‌های بتن پودری واکنشی دارای روندی مشابه به هم بوده و مدول تانژانتی در تمامی نمونه‌ها دارای مقادیر بیشتری از مدول سکانتی هم نوع خود می‌باشد. مدول الاستیسیته بتن پودری واکنشی حاوی الیاف فولادی به دلیل شکل موجدار الیاف و گیرداری محکمی که در بتن ایجاد می‌کند، با افزایش درصد الیاف فولادی افزایش یافته است به طوری که حداکثر افزایش مدول سکانتی و تانژانتی آن به ترتیب ۱۶/۱٪ و ۱۲٪ در کسر حجمی ۳٪ به دست آمده است.

۵- همان طور که مشاهده می‌گردد، مدل پیشنهادی با دقت بسیار خوبی می‌تواند نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند.

۶- عمل‌آوری گرمایی به دلیل تسریع در فرآیند هیدراتاسیون

در این تحقیق یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی رفتار تنش-کرنش بتن پودری واکنشی حاوی الیاف‌های فولادی، پلی‌وینیل الکل و ترکیب الیاف‌ها تحت فشار محوری انجام شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از روی ۴۹ نمونه آزمایشگاهی، مدلی برای پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش بتن پودری واکنشی پیشنهاد شده است. همچنین، اثر نوع و کسر حجمی الیاف و نیز اثر عمل‌آوری حرارتی بر روی پارامترهای تنش-کرنش فشاری شامل مقاومت فشاری، کرنش در تنش حداکثر و مدول الاستیسیته ارزیابی شد. بر اساس کار آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق، نتایج زیر حاصل شد:

۱- افزایش دادن درصد حجمی الیاف (به خصوص الیاف فولادی در ترکیب حجمی الیاف‌ها) منجر به افزایش کرنش حداکثر شده است. در نمونه‌های بتن پودری واکنشی حاوی ۱٪ الیاف فولادی بیشترین افزایش کرنش و به خصوص افزایش مقاومت فشاری مشاهده شده است. همچنین مشاهده شد که با افزایش کسر حجمی الیاف فولادی شیب ابتدایی نمودار تنش-کرنش نسبت به بتن ساده افزایش یافته است، این در حالی است که عکس این روند برای نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل و به وضوح بیشتر برای نمونه‌های ترکیبی به دست آمده است.

۲- استفاده از درصد حجمی بالای الیاف‌های فولادی و پلی‌وینیل الکل در بتن پودری واکنشی باعث کاهش مقاومت فشاری آن می‌گردد. این روند با افزایش حجم الیاف پلی‌وینیل الکل در مخلوط بتن حاوی ترکیب الیاف‌ها نیز مشاهده شده است.

engineered cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 43, 399-407.

12. Banthia, N., & Gupta, R. (2004). Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. *Materials and Structures*, 37(10), 707-716.

13. ASTM C150. Standard specification for portland cement. United States: American Society for Testing and Materials International; 2016.

14. ASTM C1240. Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures. United States: American Society for Testing Materials International; 2015.

15. ASTM C494. Standard specification for chemical admixtures for concrete. United States: American Society for Testing and Materials International; 2016.

16. ASTM C192. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. United States: American Society for Testing Materials International; 2016.

17. Cwirzen A. The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete. *Advances in Cement Research*. 2007 Jan;19(1):25-33.

18. ASTM C39. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. United States: American Society for Testing Materials International; 2016.

19. Neville AM. Properties of concrete. 4th ed. Longman Scientific & Technical; 1995. p. 581-94. (or / Neville AM. Properties of concrete. 1995.)

20. Yoo, D. Y., Banthia, N., & Yoon, Y. S. (2016). Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. *Engineering Structures*, 111, 246-262.

21. Carreira, D. J., & Chu, K. H. (1985, November). Stress-strain relationship for plain concrete in compression. In *Journal Proceedings* (Vol. 82, No. 6, pp. 797-804).

مواد سیمانی در دمای بالا و تشکیل ساختار چسب متراکم،
تأثیر مثبتی بر روی مقاومت فشاری، کرنش حداکثر
نمونه‌های بتن پودری واکنشی داشته است.

References

۵- مراجع

1. Ahmad, S., Zubair, A., & Maslehuddin, M. (2015). Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 99, 73-81.
2. Wille, K., Naaman, A. E., & Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI Materials Journal*, 108(1).
3. Zheng, W., Li, H., & Wang, Y. (2012). Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 35, 931-940.
4. Matte, V., & 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), 1-9.
5. Mansur, M. A., Chin, M. S., & Wee, T. H. (1999). Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression. *Journal of materials in civil engineering*, 11(1), 21-29.
6. Ezeldin, A. S., & Balaguru, P. N. (1992). Normal- and high-strength fiber-reinforced concrete under compression. *Journal of materials in civil engineering*, 4(4), 415-429.
7. Chan, Y. W., & Chu, S. H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1167-1172.
8. Al-Tikrite, A., & Hadi, M. N. (2017). Mechanical properties of reactive powder concrete containing industrial and waste steel fibres at different ratios under compression. *Construction and Building Materials*, 154, 1024-1034.
9. Kang, S. T., Choi, J. I., Koh, K. T., Lee, K. S., & Lee, B. Y. (2016). Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. *Composite Structures*, 145, 37-42.
10. Pakravan, H. R., Latifi, M., & Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 142, 280-294.
11. Soe, K. T., Zhang, Y. X., & Zhang, L. C. (2013). Material properties of a new hybrid fibre-reinforced

Evaluation of compressive stress-strain behavior of RPC reinforced with steel and PVA fibers

M. Nematzadeh^{1*}, R. Pourhossein²

1- Associate Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering., University of Mazandaran

2- M.Sc.Student., Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering., University of Mazandaran

*m.nematzadeh@umz.ac.ir

Abstract:

Reactive powder concrete (RPC) represents a new generation of cement-based materials composed of cement, reactive ultrafine powders, siliceous fine aggregates, super plasticizers and fibers. Due to its microstructural properties, this concrete demonstrates specific properties including high compressive and flexural strength, superb durability. Since this is a novel type of concrete, a single design code containing multiple experimental results of high quality, together with reliable stress-strain models for the nonlinear analysis of the structural members made of this concrete type is lacking. Although some experimental equations to predict the strength of the RPC members can be found in the literature, note that there are shortcomings in the information provided specifically regarding the RPC containing synthetic and hybrid fibers. Hence, in this study, ten different mix designs of RPC, containing steel fibers at the volume fractions of 1, 2, and 3%, polyvinyl alcohol fibers at the volume fractions of 0.25, 0.5, and 0.75%, together with hybridizations of the two fiber types at the total fiber volume fraction of 1% were prepared, and then tested to obtain accurate and applicable equations as well as the compressive stress-strain curve with the purpose of estimating the mechanical properties and better predicting the behavior of this type of concrete. Then, the effect of the type and volume fraction of fibers, together with curing regime on the properties of RPC including the compressive strength, strain at peak stress, modulus of elasticity, and the shape of stress-strain curve was investigated. The obtained results indicate that as the volume fraction of steel and polyvinyl alcohol fibers increases, the compressive strength and strain at peak stress of the RPC specimens decreases; a trend which is also observed as the volume fraction of synthetic fibers in the concrete mix containing hybrid fibers increases.. The trend which is observed for the strain at peak stress in the RPC is very close to that for its compressive strength. The secant and tangential modulus of elasticity values of the RPC also demonstrate trends similar to each other, and the tangential modulus of elasticity in all the specimens has values higher than the corresponding secant modulus of elasticity. The RPC containing high volume fractions of steel fibers shows high modulus of elasticity values, due to the crimped shape of fibers as well as the strong cohesion they provide in the concrete. Heat treatment has a positive effect on the compressive strength and strain at peak stress of the RPC specimens, due to the acceleration of the hydration process of cementitious materials at high temperatures as well as the formation of a dense matrix. By using the nonlinear regression analysis of the data, experimental equations were developed for the parameters affecting the stress-strain curve of RPC. Finally, based on the experimental parameters obtained for all the RPC specimens, a model was proposed to predict the compressive stress-strain curve. By comparing the proposed model with the experimental results of the stress-strain curve of RPC, it can be said that the proposed model is capable of predicting the experimental results with a very good accuracy.

Keywords: Reactive Powder Concrete, Stress-strain relationship, Fibers, Heat Treatment.