

ارزیابی مقاومت مکانیکی بتن خودتراکم حاوی الیاف تحت حرارت‌های بالا

علی صدر ممتازی* (دانشیار)

بهزاد طهمورسی (کارشناس ارشد)

محمد صادق طهمورسی (کارشناس)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (دوره ۲ - شماره ۴/۲، ص. ۱۵-۲۳)

استفاده از انواع الیاف علاوه بر افزایش شکل‌پذیری، چقرمگی و کرنش نهایی، نقش عمده در کاهش ترک‌های انقباضی و حرارتی دارد. از طرفی افزایش پسماند حاصل از مواد بر پایه‌ی نفتی و پلیمری موجب ایجاد نگرانی‌ها در مجامع جهانی به دلیل سوء آثار زیست‌محیطی مواد مذکور شده است. لذا در پژوهش حاضر، الیاف فولادی به میزان ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ درصد، الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد و الیاف بازیافتی پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) به میزان ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد حجم مخلوط بتن استفاده شد. نتایج خواص بتن تازه و مقاومت مکانیکی بتن خودتراکم حاوی الیاف در دمای معمولی و حرارت‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نشان داد که مقادیر بالای الیاف موجب عدم ارضاء برخی معیارهای خودتراکمی بتن می‌شود. حضور الیاف موجب افزایش مقاومت مکانیکی، چقرمگی و شکل‌پذیری بتن می‌شود و در دماهای بالا از افت شدید مقاومت و پدیده‌ی پوسته‌شدگی جلوگیری می‌کند. همچنین در کاهش ریزترک‌های حرارتی و حفظ ساختار بتن، نقشی اساسی دارد.

واژگان کلیدی: الیاف، چقرمگی، حرارت، پوسته‌شدگی، بتن خودتراکم.

sadrumontazi@yahoo.com
behzad.tahmouresi@gmail.com
m.s.tahmouresi@gmail.com

۱. مقدمه

توجه در برابر دماهای بالا دارند. اما در میان انواع مختلف بتن، مخلوط‌های بتنی با تراکم بالا، مانند بتن خودتراکم و بتن با مقاومت بالا در برابر آثار افزایش دما، آسیب‌پذیرتر است. به علت کاهش تخلخل و کاهش ارتباط حفره‌ها در بتن خودتراکم و با مقاومت بالا، رطوبت و بخار آب به سختی می‌تواند از سازه خارج شود که منجر به افزایش فشار داخلی می‌شود و می‌تواند موجب آسیب‌پذیری سازه شود. ارزیابی مقاومت سازه‌های بتنی در برابر آتش، نیازمند شناخت خصوصیات رفتاری مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن در دماهای بالاست.^[۵]

از اولین مطالعات انجام‌شده بر روی بتن در معرض حرارت بالا، پژوهشی در سال ۱۹۵۶ است،^[۶] در همین راستا با توجه به اهمیت موضوع مطالعات برای تجزیه و تحلیل برخی از خواص بتن خودتراکم در معرض آتش، از جمله: خواص حرارتی، مکانیکی، تغییرشکل و به دنبال آن بروز پدیده‌هایی همچون پوسته‌پوسته شدن و پکیدگی انفجاری، در حال افزایش است. خواص حرارتی شامل انتقال حرارت، انتشار (گسترش) حرارت، کاهش جرم بتن تحت حرارت و ضریب هدایت حرارتی است. خواص مکانیکی نیز شامل: مقاومت، تغییرشکل رفتار در ناحیه‌ی پسا اوج و مدول کشسانی است.^[۷-۹]

با توجه به مقاومت کششی کم بتن و به دنبال آن تردی و شکننده بودن، به‌کارگیری آن به صورت غیرمسلح به جز در سازه‌های وزنی و غیرسازه‌یی، عملاً کاربرد چندانی ندارد. این عیب عمده‌ی بتن در عمل با مسلح کردن آن به وسیله‌ی میلگردهای

صنعت بتن طی سی سال اخیر، توسعه و پیشرفت چشمگیری را تجربه کرده و منجر به تولید و توسعه‌ی بتن‌هایی با کیفیت و کاربری بالا در زمینه‌ی دوام و مقاومت شده است. از جمله‌ی این موارد می‌توان به بتن با عملکرد بالا (HPC)^۱ و بتن خودتراکم (SCC)^۲ اشاره کرد. بتن خودتراکم اولین بار برای دست‌یابی به ساختار بتن پایدار در سال ۱۹۸۸ مطرح و مطالعات اولیه پیرامون کارایی آن، بین سال‌های ۱۹۸۹-۱۹۹۳ در دانشگاه توکیو انجام شد.^[۳-۱] بتن خودتراکم، بتنی با کارایی زیاد و عدم جداشدگی است که می‌تواند در محل موردنظر ریخته شود، فضای قالب را پرکند و اطراف آرماتورها را بدون نیاز به تراکم مکانیکی فراگیرد.^[۴]

بتن خودتراکم علاوه بر داشتن سه ویژگی بارز: قابلیت پرکردن، قابلیت عبور، و مقاومت در برابر جداشدگی (پایداری)، موجب افزایش بهره‌وری به‌عنوان عامل مهم اقتصادی می‌شود. با توجه به گستردگی روزافزون به‌کارگیری بتن خودتراکم در ساخت: پل‌ها، ساختمان‌ها و سد‌ها، نیاز به بررسی هر چه بیشتر عوامل مؤثر در کاهش کیفیت و مدت زمان سرویس‌دهی آن را به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به قرارگرفتن عناصر بتنی در محیط‌ها و شرایط دمایی مختلف اشاره کرد. سازه‌های بتنی به علت طبیعت غیرقابل اشتعال خود، یک امتیاز قابل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۷/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۶/۲/۲۴

DOI:10.24200/J30.2019.1443

رسانش حرارتی (کاهش اختلاف دما و تنش‌های ناشی از آن) می‌شود. همچنین مطالعه‌ی خواص مکانیکی - حرارتی بتن حاوی الیاف PET (۲۰۱۱)، [۲۱] منجر به کاهش ۱۸٪ ضریب هدایت حرارتی، افزایش ۳۵٪ مقاومت فشاری، افزایش کمینه‌ی ۲٪ و بیشینه‌ی ۴۱٪ نقطه‌ی اولین ترک و افزایش کمینه‌ی ۸٪ و بیشینه‌ی ۶۵۶٪ چقرمگی شد و نیز اظهار شد که استفاده از الیاف PET، می‌تواند روشی مناسب جهت تقویت بتن باشد و یک کاندید خوب با پتانسیل بالا برای تجزیه و تحلیل نظری و تجربی در مقیاس واقعی است. در بررسی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن در بتن خودتراکم با مقاومت بالا در معرض آتش (۲۰۰۶)، [۲۵] نیز نتایج نشان داد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن، ضمن افزایش استقامت حرارتی بتن، موجب بهبود گرا دیان حرارتی (در نتیجه‌ی تنش‌های حرارتی) در نمونه‌های بتنی تحت آزمایش چرخه‌ی گرمایش - سرمایش^۵ می‌شود. همچنین در پژوهشی با موضوع تأثیر الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در خواص مقاومتی و حرارتی بتن، [۲۶] افزایش ۲٫۶ تا ۳٫۵ برابری کرنش نقطه‌ی اوج و نیز حفظ ۲۶٪ سختی پسا اوج مشاهده شد.

هدف اصلی در پژوهش حاضر، بررسی امکان استفاده از الیاف باز یافتی PET در بتن خودتراکم و نیز عملکرد آن در حرارت‌های بالا (۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) است. به همین منظور خواص تازه و مقاومت مکانیکی آن با الیاف مرسوم و پرکاربرد فولادی و پلی‌پروپیلن مقایسه شد.

۳. برنامه‌ی آزمایشگاهی

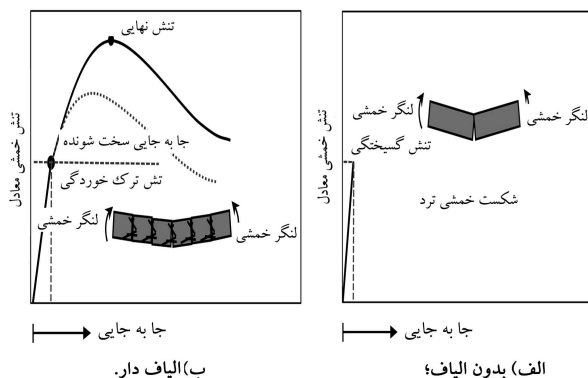
۱.۳. مصالح

سیمان استفاده‌شده در این پژوهش از نوع تیپ ۴۲۵-۱ مطابق ضوابط ASTM C ۳۳ است. دوده‌ی سیلیسی مصرفی نیز به‌عنوان ماده‌ی پوزولانی معدنی به مقدار ۱۰٪ وزن مواد سیمانی استفاده شد. ترکیب‌های شیمیایی سیمان و دوده‌ی سیلیسی در جدول ۱ ارائه شده است. درشت‌دانه‌ی مصرفی از نوع رودخانه‌یی با بیشینه‌ی اندازه‌ی ۱۲٫۵ میلی‌متر انتخاب شد و ریزدانه (ماسه) نیز از نوع طبیعی شسته و با اندازه‌ی بیشینه‌ی ۴٫۷۵ میلی‌متر بود. درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب با چگالی ۲٫۶۷ و ۲٫۶۱ و درصد جذب آب ۰٫۷۶ و ۲٫۱ بودند. از پودر سنگ نیز به‌عنوان پرکننده در مخلوط بتنی با توجه به تأثیر مثبت آن در افزایش جریان‌پذیری و لزجت و نیز کاهش آب‌انداختگی به‌صورت ۲۵٪ وزن ماسه استفاده شد. نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه و پودر سنگ در شکل ۲ مشاهده می‌شود. جهت رسیدن به کارایی مطلوب و پخش مناسب الیاف در مخلوط‌های بتنی از افزودنی فوق روان‌کننده (بر حسب درصد وزن مواد سیمانی) بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات با نام تجاری P۱۰-۳R استفاده شد.

در پژوهش حاضر، از سه نوع الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و PET استفاده شده است. با توجه به محدودیت‌های توصیه‌شده در شیوه‌نامه‌ی EFNARC، [۲۷] مقدار مصرفی هر یک از الیاف مذکور با توجه به نوع آن‌ها، به میزان متفاوتی انتخاب شد. مقادیر مصرفی الیاف فولادی ۰٫۴٪، ۰٫۵٪، ۰٫۶٪، الیاف پلی‌پروپیلن ۰٫۳٪، ۰٫۵٪ و ۰٫۱٪ و الیاف PET ۰٫۲٪، ۰٫۳٪ و ۰٫۴٪ در حجم مخلوط بتن

جدول ۱. ترکیب‌های سیمان و دوده‌ی سیلیسی (درصد وزنی).

	SO _۳	MgO	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	SiO _۲	CaO	
سیمان	۱٫۳۲	۲	۳٫۶۴	۵٫۳۶	۲۱٫۰۸	۶۴٫۳۷	
دوده‌ی سیلیسی	-	۲	۲٫۵	۱٫۵	۹۲	۱٫۵	



شکل ۱. تصویر رفتار پسا اوج و مکانیزم عملکرد الیاف در المان‌های خمشی. [۲۴]

فولادی برطرف می‌شود. به منظور ایجاد شرایط همگنی بیشتر و نیز کاهش ضعیف شکنندگی در چند دهه‌ی اخیر از الیاف با نسبت طول به قطر بالا که در تمام حجم بتن توزیع و پراکنده شده است، استفاده می‌شود. به‌کارگیری الیاف در بتن و کامپوزیت‌های با پایه‌ی سیمان به منظور افزایش چقرمگی و شکل‌پذیری در ناحیه‌ی پسا ترک به طور قابل توجهی افزایش یافته است. انهدام و خرابی بتن به شدت به تشکیل ماکروتراک‌ها و میکروتراک‌ها تحت اثر بارگذاری و یا آثار محیطی وابسته است. [۱۱، ۱۰، ۸] تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریزترک‌ها می‌شوند، به طوری که آن‌ها در سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریزترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شوند. استفاده از الیاف مختلف، عاملی مؤثر در جلوگیری از انتشار ترک‌ها محسوب می‌شود. همچنین موجب بهبود خاصیت جذب انرژی و طاقت بتن می‌شود که می‌تواند به نحو مطلوبی خطر شکست سازه‌های بتنی به خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه‌یی قرار می‌گیرند، را کاهش دهد. استفاده از الیاف، نقش عمده در جلوگیری از ورقه‌شدگی انفجاری^۳، ترک‌های انقباضی و ترک‌های حرارتی به‌عنوان جایگزین با آرما تور حرارتی دارد. از عمده الیاف متداول مصرفی می‌توان به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن (PP) اشاره کرد. [۱۸-۱۲۸] از طرفی افزایش جمعیت و به دنبال آن افزایش پسماند حاصل از مواد بر پایه‌ی نفتی و پلیمری موجب ایجاد نگرانی‌ها در مجامع جهانی به دلیل سوء آثار زیست‌محیطی مواد مذکور شده است، به‌عنوان این امر استفاده از مواد باز یافتی جدید همانند پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)^۴ به‌عنوان الیاف یا ریزدانه در بتن و فرآورده‌های سیمانی امری اجتناب‌ناپذیر شده است. [۱۸-۲۲] مقاومت ضربه‌یی و جذب انرژی بتن حاوی الیاف پلیاستیک باز یافتی و PET در سال ۲۰۰۳ بررسی شد، [۲۳] که نتایج آن‌ها بهبود مقاومت را نشان داد. شکل ۱، مکانیزم پیشنهادی عملکرد الیاف در المان‌های تحت خمش را نشان می‌دهد که نتایج آزمایشگاهی پژوهشگران مختلف است.

۲. مرور ادبیات

در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۳، بر روی بتن خودتراکم تحت حرارت بالا نشان داده شد که حضور الیاف به طور قابل توجهی مقاومت خمشی را بهبود می‌بخشد و در حرارت بالا به حفظ و پایداری آن کمک می‌کند، همچنین به طور مثبتی بر پدیده‌ی پوسته‌پوسته شدن تأثیر داشت. در پژوهش دیگری (۲۰۰۹)، [۲۱] بر روی تأثیر مواد باز یافتی PET در خواص حرارتی بتن نشان داده شد که حضور مواد باز یافتی به طور قابل توجهی از اتلاف حرارت جلوگیری می‌کند و موجب بهبود عملکرد آن در



شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت خمشی.

از اختلاط در مخلوط‌کن، در داخل قالب‌های موردنظر جهت سنجش مقاومت مکانیکی ریخته شد. روی قالب‌ها با یک پلاستیک برای جلوگیری از تبخیر رطوبت بتن تازه، پوشش داده شد. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و در مخزن آب‌آهک اشباع‌شده تحت دمای 20 ± 3 درجه‌ی سانتی‌گراد تا روز آزمون عمل‌آوری شدند. طرح‌های اختلاط‌های فاز دوم در جدول ۳ ارائه شده است.

۴.۳. روش‌های آزمون

۱.۴.۳. خواص رئولوژیکی

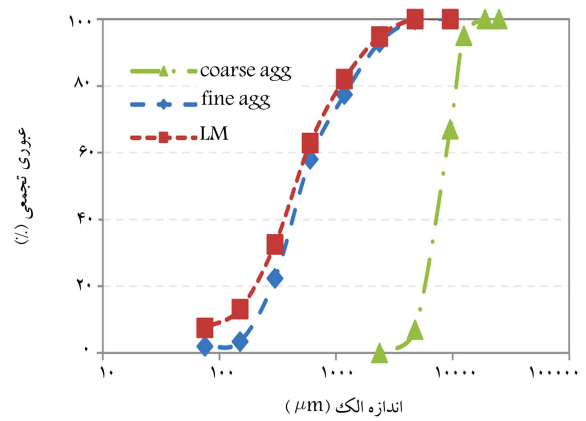
آزمایش‌های مربوط به بتن تازه شامل: جریان اسلامپ، T_5 ، قیف V و L-BOX بود. در آزمایش جریان اسلامپ، قطر دایره‌ی پهن‌شده به منظور قابلیت پرکنندگی (روانی) و مدت زمان رسیدن قطر دایره به 500 میلی‌متر به‌عنوان شاخصی برای لزجت خمیری اندازه‌گیری شد. در آزمایش قیف V، مدت زمان و نحوه‌ی بتن خارج‌شده مهم است. همچنین این آزمایش می‌تواند شاخص خوبی در خصوص میزان همگنی بتن به‌صورت شهودی باشد. آزمایش جعبه‌ی L نیز می‌تواند شاخصی برای پرکنندگی و ارزیابی جریان بتن در محل‌هایی با حضور میلگرد باشد.

۲.۴.۳. خواص مکانیکی

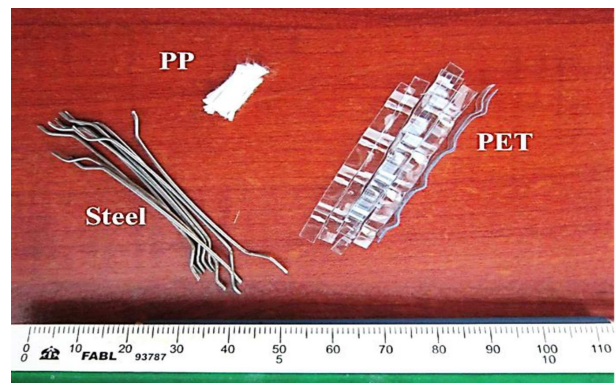
مقاومت فشاری بتن خودتراکم با استفاده از نمونه‌های مکعبی با بعد 150 میلی‌متر ارزیابی شد. سرعت به‌کارگرفته‌شده در آزمایش مذکور، 0.3 مگا پاسکال بر ثانیه بود. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم مطابق استاندارد ASTM C496 بر روی استوانه‌های بتنی با قطر 150 میلی‌متر و ارتفاع 300 میلی‌متر انجام شد. آزمایش مقاومت خمشی با بارگذاری در وسط دهانه‌ی تیر به‌صورت سه نقطه‌یی توسط دستگاه یونیورسال با سرعت بارگذاری 0.5 میلی‌متر بر ثانیه مطابق ASTM C1609 بر روی نمونه‌های منشوری $500 \times 100 \times 100$ میلی‌متر انجام شد. فاصله‌ی بین دو تکیه‌گاه مطابق شکل ۴، 400 میلی‌متر در نظر گرفته شد. چقرمگی خاصیتی از یک ماده است که مقاومت آن را در برابر گسیختگی تحت تنش‌های وارده بیان می‌کند. براساس تعریف، چقرمگی خمشی عبارت از نسبت انرژی جذب‌شده (مساحت زیر منحنی نیرو - جابه‌جایی) در فرایند آزمون خمشی بر سطح مقطع نمونه است، که مطابق رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است: [۲۸]

$$b \times h / \text{انرژی جذب‌شده} = \text{چقرمگی} \quad (1)$$

که در آن، b عرض سطح مقطع نمونه‌ی منشوری (mm) و h عمق سطح مقطع نمونه‌ی منشوری (mm) است. از روش‌های متداول در زمینه‌ی ارزیابی کمی و کیفی بتن در محل، استفاده از روش غیرمخرب امواج مافوق صوت موسوم به تراسونیک



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی.



شکل ۳. الیاف مصرفی.

جدول ۲. مشخصات الیاف.

الیاف	مقاومت کششی (MPa)	چگالی	قطر (mm)	طول (mm)
فولادی	۱۰۰۰	۷,۸۵	۱	۵۲
پلی‌پروپیلن	۴۵۰	۰,۹۱	۰,۰۲	۱۲
* PET	۴۶۰	۱,۳۳	۰,۲ × ۳	۴۰

* الیاف نوارشکل

استفاده شد (شکل ۳). مشخصات الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تهیه‌شده از شرکت میسون و نیز الیاف PET، در جدول ۲ ارائه شده است. [۱۵]

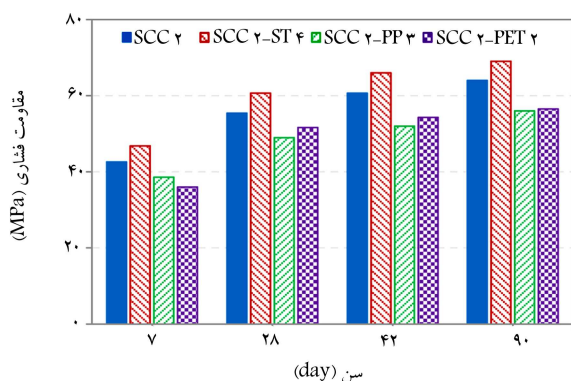
۲.۳. طرح‌های اختلاط

معیار اصلی بتن خودتراکم و وجه تمایز آن با بتن معمولی، خاصیت کارایی، پرکنندگی، و مقاومت در برابر جدایش است. در پژوهش حاضر، طرح‌های اختلاط در دو فاز ساخته شد که فاز اول خواص بتن تازه و فاز دوم بتن سخت‌شده بود. در فاز اول از هر نوع الیاف، سه درصد مختلف وزنی در طرح اختلاط استفاده شد و پس از ساخت، آزمایش‌های بتن تازه بر روی آن‌ها انجام شد. در فاز دوم، یکی از بهترین طرح اختلاط‌های ساخته‌شده هر یک از مخلوط‌های حاوی الیاف به لحاظ ارضاء معیارهای خودتراکمی در فاز اول، به‌عنوان طرح اختلاط‌های اصلی برگزیده شدند. در فاز اول از تمامی طرح اختلاط‌ها، آزمایش اسلامپ به عمل آمد و از مخلوط‌هایی که مقدار اسلامپ آن‌ها در محدوده‌ی موردنظر بود و آثار جدایش و آب‌انداختگی نداشتند، آزمایش قیف V و جعبه‌ی L انجام شد. مخلوط بتنی برای فاز دوم پس

جدول ۳. طرح‌های اختلاط برای ۱ مترمکعب.

کد طرح	آب (liter)	سیمان (kg)	دوده سیلیسی ^۱		پودرسنگ ^۲		ماسه (kg)	شن (kg)	فوق روان‌کننده ^۳		الیاف		
			(%)	(kg)	(%)	(kg)			(%)	(kg)	ST (%)	PP (kg)	PET (%)
SCC۲	۱۷۱	۴۰۵	۴۵	۲۳۰	۲۵	۹۲۲	۶۵۱	۳٫۶	۰٫۸	۰	۰	۰	۰
SCC۲-ST۴	۱۷۱	۴۰۵	۴۵	۲۳۰	۲۵	۹۲۲	۶۵۱	۶٫۳	۱٫۴	۰	۰	۰	۰
SCC۲-PP۰۳	۱۷۱	۴۰۵	۴۵	۲۳۰	۲۵	۹۲۲	۶۵۱	۶٫۳	۱٫۴	۰٫۲۷۳	۰٫۰۳	۰	۰
SCC۲-PET۲	۱۷۱	۴۰۵	۴۵	۲۳۰	۲۵	۹۲۲	۶۵۱	۶٫۳	۱٫۴	۰	۰	۲٫۶۸	۰٫۲

^۱ ۱۰٪ جرم مواد سیمانی
^۲ ۲۵٪ جرم ماسه
^۳ نسبت به جرم مواد سیمانی



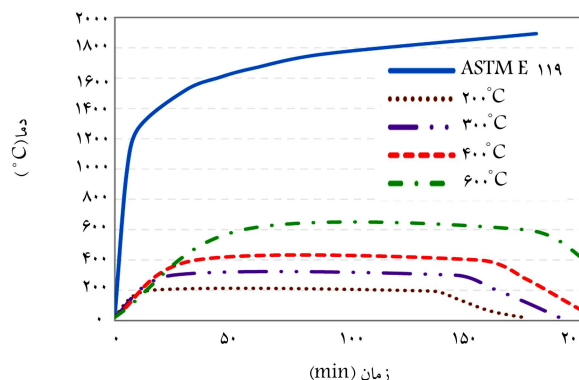
شکل ۶. مقاومت فشاری تحت شرایط دمایی معمولی در سن‌های مختلف نمونه‌ها.

پهن شده با کاهش در مقدار الیاف کمتر شده است، که این موضوع منجر به انتخاب طرح‌های SCC۲-ST۴، SCC۲-PP۰۳، و SCC۲-PET۲ برای فاز دوم شد.

۲.۴. خواص مکانیکی

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تحت شرایط دمایی معمولی در سن‌های مختلف نمونه‌ها در شکل ۶ مشاهده می‌شود که مطابق آن با افزایش سن، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. حضور الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت فشاری بین ۸٪ تا ۱۰٪ شده است. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و PET به ترتیب به میزان کمیته‌ی ۹٪ و ۷٪ و بیشینه‌ی ۱۵٪ و ۱۵٫۵٪ موجب کاهش در مقاومت شد. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در مقایسه با نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و PET، افزایش مقاومت بین ۲۳٪ تا ۳۰٪ داشتند.

شکل ۷، نتایج مقاومت فشاری تحت حرارت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، حضور مؤثر الیاف فولادی کاملاً واضح است. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی تحت رژیم حرارتی مختلف، مقاومت بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها دارند. با افزایش دما تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقاومت فشاری نمونه‌های الیاف فولادی در مقایسه با مقاومت فشاری نمونه‌های SCC۲-ST۴ و SCC۲ حرارت‌نندیده، ۳۰٪ و ۳۵٪ کاهش یافت. با افزایش دما، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه‌های حرارت‌نندیده SCC۲ و SCC۲-PP۰۳ به ترتیب به میزان بیشینه‌ی ۳۷٫۵٪ و ۳۳٫۵٪ کاهش یافت. همچنین مقادیر ذکر شده برای نمونه‌های حاوی الیاف PET به ترتیب ۲۴٫۵٪ و ۳۲٫۵٪ بود.



شکل ۵. منحنی زمان - دما.

است. این آزمایش مطابق آیین‌نامه‌ی ASTM C5۹۷ بر روی نمونه‌های فشاری (قبل از شکست) انجام شد. در آزمایش ذکر شده، سرعت امواج طولی (نمونه‌ی فشاری) و مدت زمان لازم جهت طی کردن یک پالس اندازه‌گیری شد. در پژوهش حاضر از دستگاه PUNDIT با بسامد ۵۴ کیلوهرتز استفاده شد.

جهت بررسی تأثیر حرارت در رفتار مقاومت مکانیکی بتن‌های خودتراکم حاوی الیاف، نمونه‌ها تحت چهار رژیم حرارتی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، و ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با نرخ حرارت‌دهی ۸ دقیقه بر سانتی‌گراد در داخل کوره‌ی الکتریکی قرار گرفتند. پس از رسیدن حرارت داخل کوره به دمای موردنظر، نمونه‌های بتنی به مدت ۲ ساعت تحت دمای ثابت کوره قرار گرفتند. سپس کوره‌ی خاموش شده و نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت و رسیدن به دمای محیط از کوره خارج و تحت آزمایش قرار گرفتند. میزان و نرخ حرارت‌دهی در پژوهش حاضر مطابق برخی پژوهش انجام شده، بود. [۲۹، ۳۰] شکل ۵، منحنی زمان - دما در استاندارد ASTM E۱۱۹ و حرارت اعمال شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

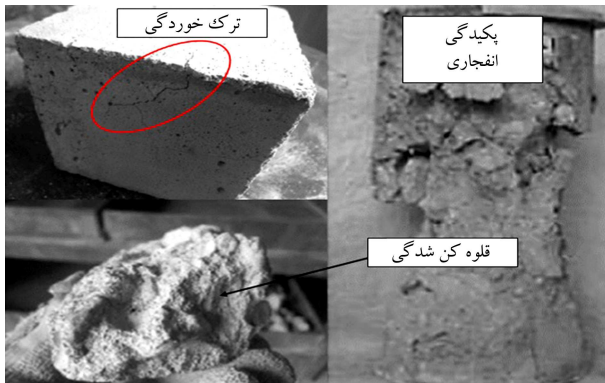
۴. بحث و بررسی نتایج

۱.۴. خواص رئولوژیکی

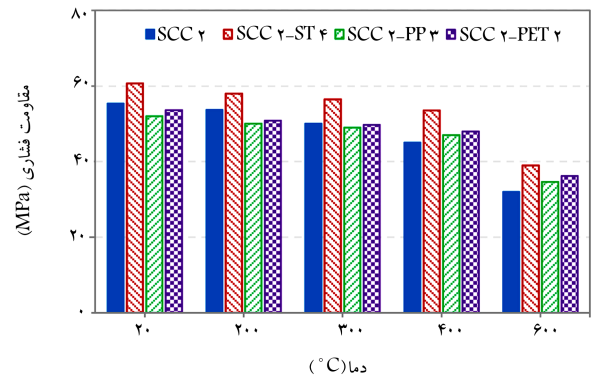
نتایج آزمایش بر روی طرح اختلاط‌های فاز دوم در جدول ۴ ارائه شده است. طرح SCC۲ به‌عنوان طرح کنترل جهت مقایسه با مخلوط‌های حاوی الیاف انتخاب شد. بدیهی است که با افزایش در میزان الیاف، شاخصه‌ی جریان اسلامپ کاهش می‌یابد. در خلال انجام آزمایش اسلامپ، جمع‌شدگی سنگ‌دانه و توده‌ی خمیر در مرکز دایره‌ی

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج بتن تازه.

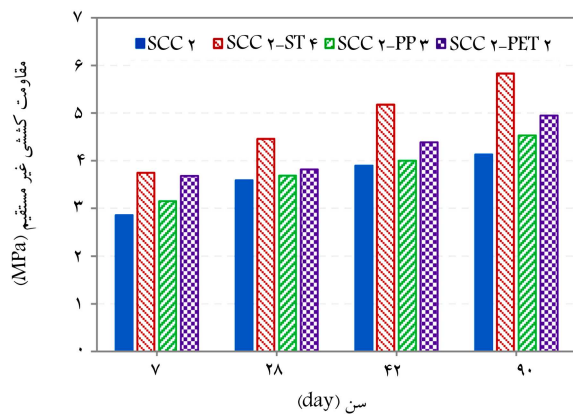
V-Funnel (ثانیه)	L - BOX (H _۲ /H _۱)	T _{۵۰} (ثانیه)	قطر اسلامپ (mm)	کد طرح
۳	۰٫۹۲	۱٫۸	۶۷۰	SCC۲
۱۰	۰٫۸۲	۴	۵۳۰	SCC۲-ST۴
۵	۰٫۹۴	۳٫۵	۶۱۰	SCC۲-PP۰۳
۶	۰٫۹	۳	۶۸۰	SCC۲-PET۲
۶-۱۲	۰٫۸-۱	۲-۵	۶۵۰-۶۸۰	EFNARC



شکل ۸. نمونه‌ها بعد از قرارگیری در معرض حرارت.



شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه تحت رژیم حرارتی مختلف.



شکل ۹. مقاومت کششی غیرمستقیم در سن‌های مختلف نمونه‌ها.

را در مقایسه با نمونه‌ی SCC۲ به ترتیب به میزان کمینه‌ی ۰٫۲۴٪، ۰٫۳٪ و ۰٫۶۱۵٪ و بیشینه‌ی ۰٫۴۱٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ افزایش داده است. شکل ۱۰، رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تمامی مقادیر بین محدوده‌ی تعیین‌شده توسط آیین‌نامه‌ی CEB، قرار دارد.^[۳۵]

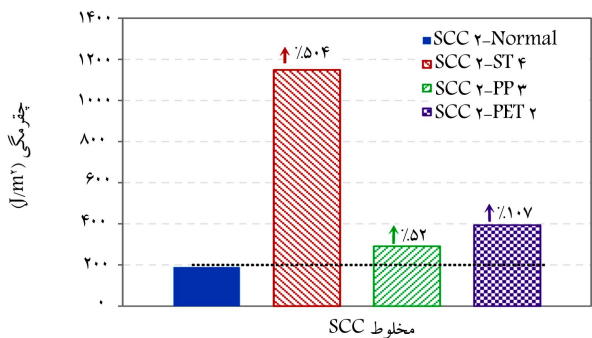
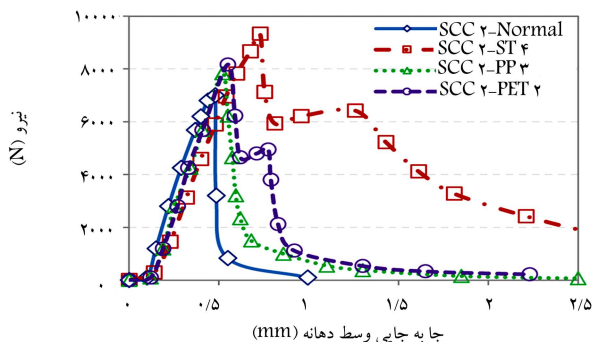
شکل ۱۱، مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های حرارت‌ندیده را نشان می‌دهد. نتایج حاصل در بخش ذکرشده، موازی و هم‌ارز با نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم در شکل ۹ است. مقاومت خمشی با حضور الیاف فولادی به میزان کمینه‌ی ۰٫۳٪ افزایش یافته است. همچنین افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و PET موجب بهبود مقاومت خمشی ۹ تا ۲۰ درصد شده است. الیاف بازافتی PET در مقایسه با الیاف پلی‌پروپیلن، عملکرد نسبتاً مطلوب‌تری را از خود نشان داده است.

شکل ۱۲، مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه تحت رژیم حرارتی مختلف مشاهده می‌شود. با توجه به شکل مذکور، حضور مؤثر و مثبت الیاف در تمام رژیم

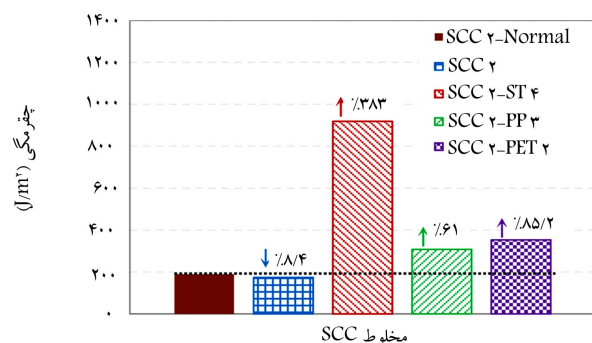
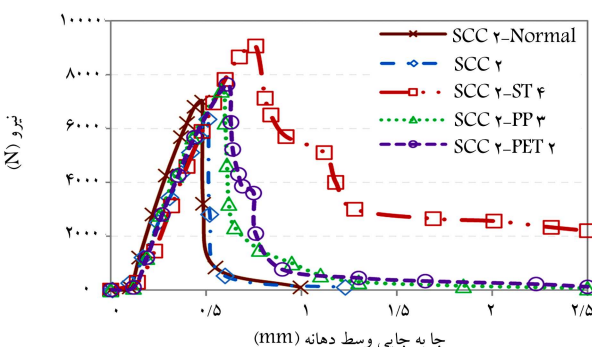
با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و PET تا دمای ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد کمتر از مقاومت نمونه‌ی SCC۲ است؛ اما با افزایش دما، نرخ کاهش مقاومت نمونه‌ی SCC۲ بیشتر می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت الیاف در حرارت‌های بالاتر است.^{[۳۱]، [۳۰]} میزان حفظ مقاومت نمونه‌های الیافی در دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌ی SCC۲، بین ۸٪ تا ۲۱٪ بود. شکل ۷، کاهش محسوس مقاومت فشاری در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد، که تغییرات فیزیکی و شیمیایی به وجود آمده می‌تواند دلیلی بر این موضوع باشد.^[۳] مطابق گزارشی در سال ۲۰۰۸،^[۳۰] در نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با افزایش حرارت علی‌رغم تمایل به ذوب الیاف، افزایش تخلخل محسوس نیست، اما به نظر می‌رسد که منجر به اتصال منافذ و به دنبال آن افزایش نفوذ گاز شده است و حضور الیاف موجب کاهش آسیب‌پذیری ماتریس سیمان با افزایش رژیم حرارتی شده است. با افزایش حرارت، تبخیر آب داخلی ماتریس سیمانی رخ می‌دهد. بخار آب موجب افزایش فشار حفره‌یی بتن شده است، که در نهایت موجب ایجاد پدیده‌ی پکدگی انفجاری می‌شود. استفاده از الیاف، تأثیر مثبتی در این نوع خرابی دارد.^[۳۲-۳۴]

عامل نرخ حرارت‌هی به طور قابل توجهی در پدیده‌ی پوسته‌شدن اثرگذار است. مشاهده‌ی تجربی نشان داد که نمونه‌ی فاقد الیاف، دچار پدیده‌ی قلوه‌کن یا پوسته‌شدن شد، در صورتی که در نمونه‌های الیافی پدیده‌ی مذکور مشاهده نشد؛ در مقابل، ماکروتک‌هایی در سطح خارجی آن‌ها به روشنی مشاهده شد (شکل ۸). این موضوع اثر مثبت الیاف در مواجهه با پدیده‌ی پوسته‌شدگی را بیان می‌کند، که توسط دیگر پژوهشگران، و نیز به آن اشاره شده است.^{[۲۴]، [۲۵]}

شکل ۹، مقاومت کششی غیرمستقیم در سن‌های مختلف نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، حضور الیاف، مقاومت کششی غیرمستقیم را به طور مثبتی بهبود بخشیده است. حضور الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و PET مقاومت کششی



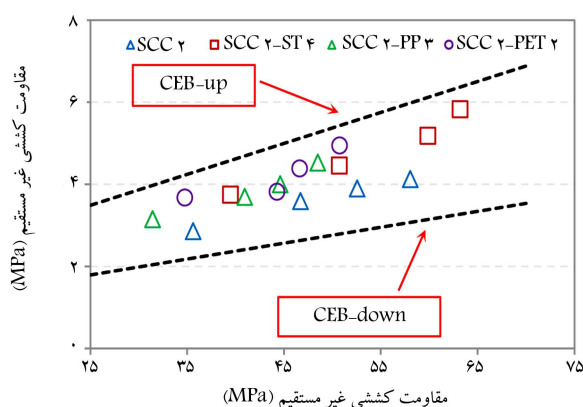
شکل ۱۳. منحنی نیرو-جابجایی و چقرمگی نمونه‌های خمشی حرارت‌نندیده ۲۰°C.



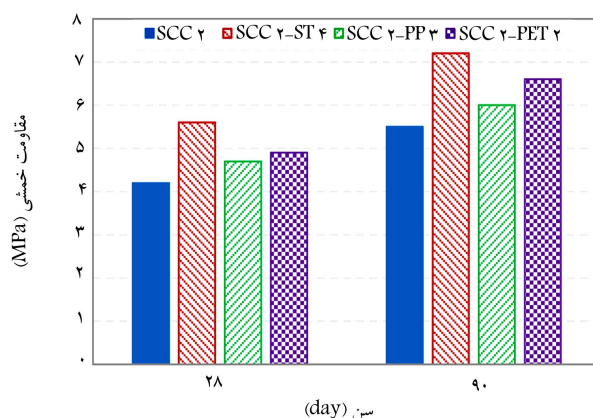
شکل ۱۴. منحنی نیرو-جابجایی و چقرمگی نمونه‌های خمشی تحت حرارت ۲۰°C.

مذکور در مقایسه با نمونه SCC 2 حرارت‌نندیده، به ترتیب ۳۳٪ و ۲۶٪ بود. میزان حفظ مقاومت برای نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن بین ۱۳/۵٪ تا ۴۰٪ و برای PET بین ۱۴٪ تا ۱۷٪ بود. در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در مقایسه با الیاف پلی‌پروپیلن و PET، مقاومت خمشی در دماهای مختلف به ترتیب به میزان کمیته‌ی ۲۰/۵٪ و ۲۳/۵٪ و بیشینه‌ی ۴۳٪ و ۳۴/۵٪ بالاتر بود.

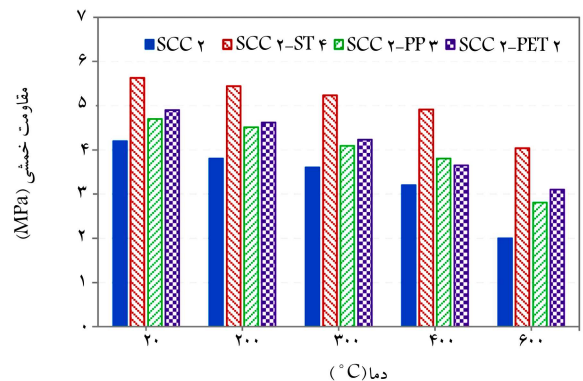
شکل‌های ۱۳ الی ۱۷، منحنی نیرو-جابجایی و مقدار چقرمگی نمونه‌های



شکل ۱۰. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم.



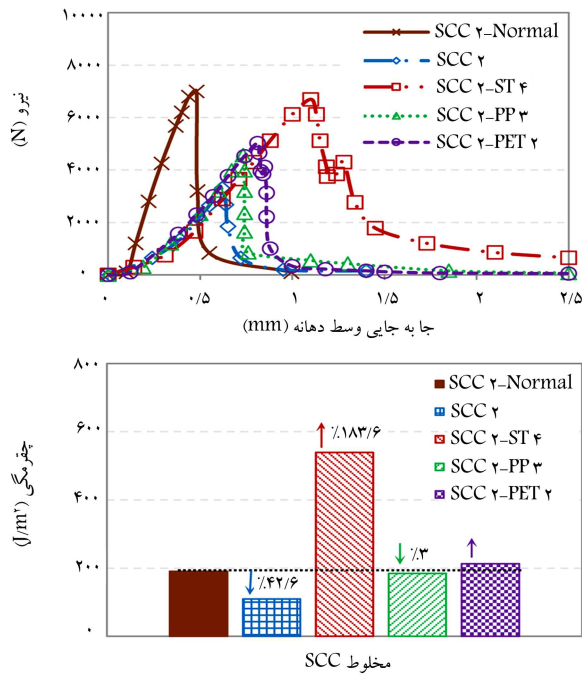
شکل ۱۱. مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی حرارت‌نندیده.



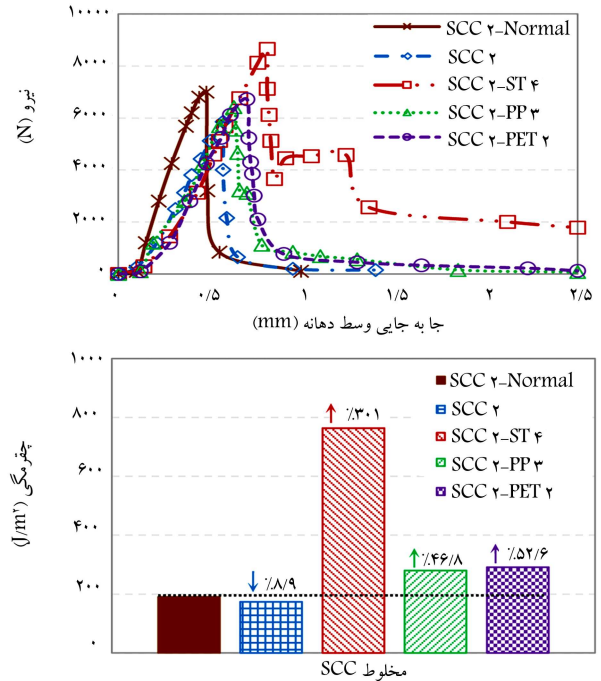
شکل ۱۲. مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه تحت رژیم حرارتی مختلف.

حرارتی مشهود است. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی تحت حرارت‌های مختلف، مقاومت بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها دارند. با افزایش دما، مقاومت خمشی کاهش یافته است، که در حرارت‌های بالای ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد محسوس‌تر می‌شود. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در مقایسه با نمونه‌های SCC 2-SF 4 و SCC 2 حرارت‌نندیده، به ترتیب کاهش مقاومت ۴ و ۲۸ درصد را نشان می‌دهند.

نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و PET حفظ مقاومت بالاتری را نسبت به نمونه‌ی SCC 2 در حرارت‌های مختلف از خود نشان داده‌اند. مشاهده می‌شود الیاف PET در مقایسه با مخلوط‌های حاوی الیاف PP پایداری حرارتی مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند. نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و PET نسبت به نمونه‌ی حرارت‌نندیده‌ی خود، به ترتیب ۴۰٪ و ۳۷٪ کاهش مقاومت خمشی داشتند. مقادیر



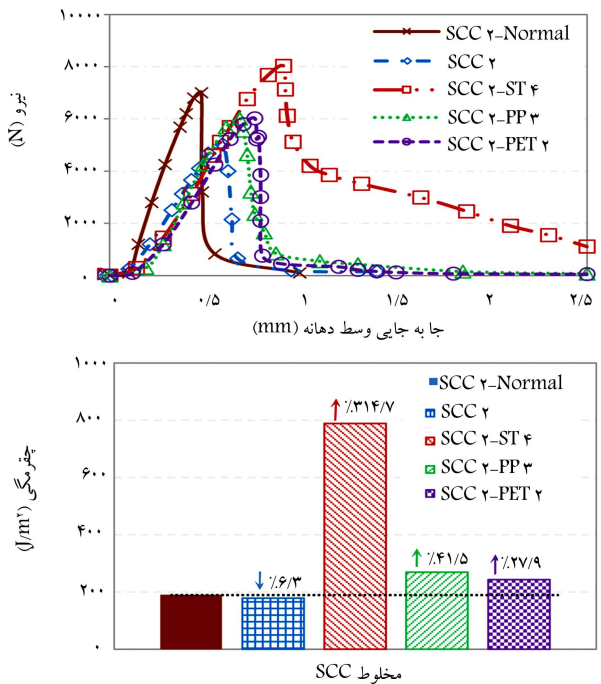
شکل ۱۷. منحنی نیرو- جابه‌جایی و چقرمگی نمونه‌های خمشی تحت حرارت ۶۰۰°.



شکل ۱۵. منحنی نیرو- جابه‌جایی و چقرمگی نمونه‌های خمشی تحت حرارت ۳۰۰°.

الیاف PET نیز مشاهده شد. در مقابل، نمونه‌های حاوی الیاف رفتار شکل‌پذیرتری را از خود نشان می‌دهند. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزودن الیاف، میزان مساحت نمودار نیرو- جابه‌جایی افزایش یافته است، که بیانگر بهبود چقرمگی خمشی یا افزایش جذب انرژی است؛ که برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، و PET نسبت به نمونه‌ی SCC ۲ به ترتیب ۶، ۱/۵ و ۲ برابر است. توزیع نسبتاً مطلوب الیاف در حجم خمیر سیمانی موجب حفظ و نگهداری میکروترک‌ها در کنار هم می‌شود و از رشد آن‌ها جلوگیری می‌کند.^[۲]

در مقایسه بین نمونه‌های خمشی تحت حرارت (شکل‌های ۱۴ الی ۱۷) ملاحظه می‌شود که با افزایش حرارت، مقدار بیشینه نیروی خمشی کاهش یافته و در حرارت‌های بالاتر از ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، محسوس‌تر است. همچنین رفتار ناحیه‌ی پسا اوج نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در مقایسه با الیاف PET و پلی‌پروپیلن، شکل‌پذیری بیشتری دارند. در شکل ۱۵ الف و نیز به صورت جزئی در شکل ۱۶ الف، نمونه‌ی حاوی الیاف فولادی رفتار کرنش سخت‌شوندگی را از خود نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمودار نیرو- جابه‌جایی در بیشتر موارد در ناحیه‌ی قبل از نقطه‌ی اوج، تقریباً خطی است. شیب این خط می‌تواند متناسب با مدول گسیختگی یا مدول کشسانی استاتیکی باشد.^[۳۶] با افزایش رژیم حرارتی، مقدار شیب خط مذکور کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده‌ی افت طاقت خمشی است؛ به طوری که میزان افت شیب آن برای نمونه‌ی فاقد الیاف (SCC ۲) حرارت‌دیده نسبت به نمونه‌ی حرارت‌ندیده، به میزان بیشینه‌ی ۵۵٪ بود. مقدار مذکور برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و PET نسبت به نمونه‌ی SCC ۲ حرارت‌ندیده به ترتیب ۵۲٪، ۵۳٪، ۵۲٪/۵ بود. میزان افت شیب نمونه‌های الیافی حرارت‌دیده نسبت به نمونه‌ی حرارت‌ندیده‌ی خود برای الیاف فولادی ۵۰٪، الیاف پلی‌پروپیلن ۵۲٪ و الیاف PET ۵۱٪ بود. مقدار چقرمگی خمشی با افزایش حرارت برای نمونه‌های بدون الیاف تا ۴۲/۵٪ کاهش داشت، اما نمونه‌های الیافی تا دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، چقرمگی بیشتری را نسبت به نمونه‌ی SCC ۲ حرارت‌ندیده داشتند (به جز کاهش ۳٪ نمونه‌ی SCC ۲-PP ۳ در دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد). تغییرات دما



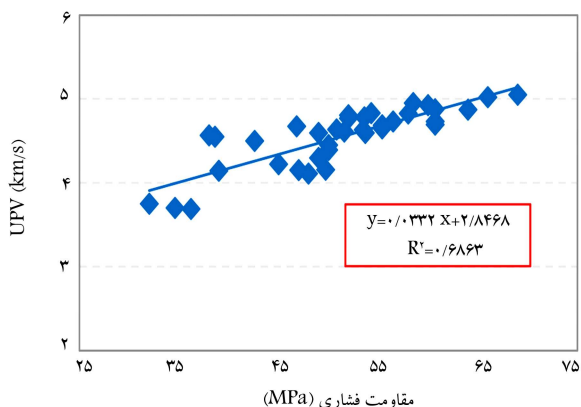
شکل ۱۶. منحنی نیرو- جابه‌جایی و چقرمگی نمونه‌های خمشی تحت حرارت ۴۰۰°.

خمشی تحت حرارت‌های مختلف را نشان می‌دهند. در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که نمونه‌های فاقد الیاف پس از رسیدن به بیشترین بار خمشی نهایی (Peak-Point) دچار افت ناگهانی شده‌اند؛ اما در نمونه‌های الیافی، پس از اولین ترک، الیاف وارد عمل می‌شوند و موجب شکل‌پذیری و شکست نسبتاً نرم می‌شوند که این موضوع در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی محسوس‌تر است. رفتار کرنش سخت‌شوندگی^۶ و بعد از آن کرنش نرم‌شوندگی^۷ در نمونه‌ی حاوی الیاف فولادی مشاهده می‌شود، که می‌تواند دلیلی بر پدیده‌ی پل‌زدگی^۸ باشد. این رفتار به صورت جزئی در نمونه‌ی حاوی

جدول ۵. خیز متناظر با بیشترین نیروی خمشی.

Δ_1/Δ_0^*					Δ_1					کد طرح
۶۰۰°	۴۰۰°	۳۰۰°	۲۰۰°	۲۰°	۶۰۰°	۴۰۰°	۳۰۰°	۲۰۰°	۲۰°	
۱٫۱۲۷	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۰٫۹۱	۱	۰٫۶۲	۰٫۵۹	۰٫۵۷	۰٫۵۱	۰٫۵۵	SCC۲
۱٫۵	۱٫۲۴	۱٫۰۷	۱٫۰۴	۱	۱٫۱	۰٫۹۱	۰٫۷۸	۰٫۷۶	۰٫۷۳	SCC۲-ST۴
۱٫۴	۱٫۲۱	۱٫۱۱	۱٫۰۳	۱	۰٫۷۳	۰٫۶۸	۰٫۶۳	۰٫۵۸	۰٫۵۲	SCC-PP۳
۱٫۴۴	۱٫۳۵	۱٫۲۵	۱٫۰۹	۱	۰٫۸۱	۰٫۷۶	۰٫۷	۰٫۶۱	۰٫۵۶	SCC-PET۲

* Δ_0 خیز متناظر با بیشینه نیروی خمشی نمونه‌های حرارت ندیده (۲۰°) است.



شکل ۲۰. رابطه‌ی سرعت امواج التراسونیک با مقاومت فشاری.

افزایش مقاومت فشاری، سرعت امواج التراسونیک نیز افزایش داشته و نشان‌دهنده‌ی هم‌سویی و رفتار موازی آن‌هاست.

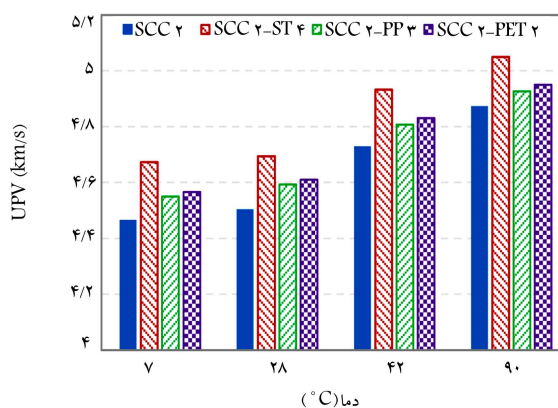
۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و PET در خواص بتن تازه و مقاومت مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی غیرمستقیم، خمشی، چقرمگی، و التراسونیک) بتن خودتراکم تحت حرارت‌های بالا بررسی و این نتایج استخراج شد:

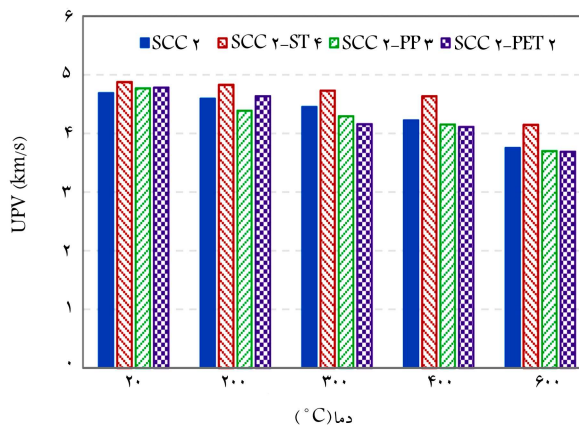
-- استفاده از انواع الیاف، آثار منفی در خواص تازه‌ی بتن خودتراکم دارد و با افزایش حجم به‌کارگیری، اثر آن محسوس‌تر می‌شود.

-- حضور الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت فشاری بیشینه‌ی ۱۰٪ و همچنین افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و PET به ترتیب موجب کاهش مقاومت بیشینه‌ی ۱۵٪ و ۱۵٫۵٪ در نمونه‌های حرارت‌ندیده شد. با افزایش دما تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقاومت فشاری نمونه‌های الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، و PET در مقایسه با مقاومت فشاری نمونه‌ی SCC۲ حرارت‌ندیده، ۳۰٪، ۳۷٫۵٪، و ۳۴٫۵٪ کاهش یافت و نیز نسبت به نمونه‌های الیافی حرارت‌ندیده‌ی خود به ترتیب ۳۵٪، ۳۳٫۵٪ و ۳۲٫۵٪ افت مقاومت فشاری داشتند. همچنین میزان حفظ مقاومت فشاری (پایداری در مقابل حرارت) نمونه‌های الیافی در دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بین ۸٪ تا ۲۱٪ بود.

-- افزودن الیاف به‌طور مثبتی در مقاومت کششی غیرمستقیم تأثیر داشت. الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، و PET مقاومت کششی را به ترتیب به میزان کمینه‌ی ۲۴٪، ۳٪، و ۶٫۵٪ و بیشینه‌ی ۴۱٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ افزایش داد. مقاومت خمشی



شکل ۱۸. سرعت امواج التراسونیک در سن‌های مختلف نمونه‌ها.



شکل ۱۹. سرعت امواج التراسونیک نمونه‌های ۲۸ روزه تحت رژیم‌های حرارتی مختلف.

در مقدار خیز متناظر با بیشینه نیروی خمشی تأثیر می‌گذارد. افزایش دما، خیز نقطه‌ی اوج را به سمت راست نمودار نیرو-جابجایی سوق داده است. میزان تغییرات خیز نقطه‌ی اوج در جدول ۵ ارائه شده است.

شکل ۱۸، نتایج سرعت امواج التراسونیک در سن‌های مختلف نمونه‌ها را نشان می‌دهد. حضور الیاف در نتایج به‌طور مثبتی تأثیر داشته و موجب افزایش میزان کمینه‌ی ۱٪ و بیشینه‌ی ۵٫۵٪ شده است. سرعت امواج التراسونیک نمونه‌های ۲۸ روزه تحت رژیم دمایی مختلف در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. نتایج حاصل همانند نتایج مقاومت فشاری، کششی غیرمستقیم، و خمشی با افزایش حرارت، روندی نزولی دارد. افزایش حرارت تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت امواج التراسونیک را به میزان کمینه‌ی ۵٫۵٪ و بیشینه‌ی ۲۱٪ کاهش داده است. شکل ۲۰، رابطه‌ی بین سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری (تمامی حرارت‌ها) را نشان می‌دهد که با

نمونه‌ی فاقد الیاف حرارت‌دیده‌ی SCC۲ نسبت به نمونه‌ی حرارت‌ندیده، به میزان بیشینه‌ی ۵۵٪ بود. مقدار فوق برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و PET نسبت به نمونه‌ی حرارت‌ندیده‌ی SCC۲ به ترتیب ۵۲٪، ۵۳٪ و ۵۲٫۵٪ بود. میزان افت شیب نمونه‌های الیافی حرارت‌دیده نسبت به نمونه‌ی حرارت‌ندیده‌ی خود برای الیاف فولادی ۵۰٪، الیاف پلی‌پروپیلن ۵۲٪ و الیاف PET ۵۱٪ بود.

-- مقدار چقرمگی خمشی با افزایش حرارت برای نمونه‌های بدون الیاف تا ۴۲٫۵٪ کاهش داشت، اما نمونه‌های الیافی تا دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، چقرمگی بیشتری را نسبت به نمونه‌ی SCC۲ حرارت‌ندیده داشتند (به جز کاهش ۳٪ نمونه‌ی SCC۲-PP۳ در دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد).

-- حضور الیاف موجب افزایش به میزان کمیته‌ی ۱٪ و بیشینه‌ی ۵٫۵٪ نتایج سرعت امواج التراسونیک شده است. افزایش حرارت تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت امواج التراسونیک را به میزان کمیته‌ی ۵٫۵٪ و بیشینه‌ی ۲۱٪ کاهش داد.

با حضور الیاف فولادی به میزان کمیته‌ی ۳۰٪ افزایش یافت. همچنین الیاف پلی‌پروپیلن و PET موجب بهبود مقاومت خمشی ۹٪ تا ۲۰٪ شدند.

-- نمونه‌های حاوی الیاف فولادی حرارت‌دیده در مقایسه با نمونه‌های حرارت‌ندیده‌ی SCC۲ و SCC۲-SF۴، به ترتیب کاهش مقاومت خمشی ۴٪ و ۲۸٪ را نشان دادند. نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و PET نسبت به نمونه‌ی حرارت‌ندیده‌ی خود، به ترتیب ۴۰٪ و ۳۷٪ کاهش مقاومت خمشی داشتند. مقدار ذکرشده در مقایسه با نمونه‌ی SCC۲ حرارت‌ندیده، به ترتیب ۳۳٪ و ۲۶٪ بود. همچنین میزان حفظ مقاومت در حرارت‌های بالا برای نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن بین ۱۳٫۵٪ تا ۴۰٪ و برای PET بین ۱۴٪ تا ۱۷٪ بود.

-- نمودار نیرو - جابه‌جایی در بیشتر موارد در ناحیه‌ی قبل از نقطه‌ی اوج، تقریباً خطی است. با افزایش رژیم دمایی، مقدار شیب خط ذکرشده کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی افت طاق خمشی است. میزان افت شیب خط مذکور برای

پانویس‌ها

1. high performance concrete
2. self-compacting concrete
3. explosive spalling
4. poly-ethylene terephthalate
5. heating-cooling
6. strain- hardening
7. strain-softening
8. bridging

منابع (References)

1. Ozawa, K., Maekawa, K. and Okamura, H. "Self-compacting high performance concrete", Collected Papers (University of Tokyo: Department of Civil Engineering), 34, pp. 135-149 (1996).
2. Okamura, H. and Ozawa, K. "Self-compactable high-performance concrete in Japan", *ACI Special Publications*, 159, pp. 31-44 (1996).
3. Khaliq, W. and Kodur, V. "Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures", *Cement and Concrete Research*, 41(11), pp. 1112-1122 (2011).
4. ACI, Self-Consolidating Concrete, "237R-07 american concrete institute farmington hills", MI, USA (2007).
5. Bangi, M.R. and Horiguchi, T. "Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures", *Cement and Concrete Research*, 42(2), pp. 459-466 (2012).
6. Malhotra, H. "The effect of temperature on the compressive strength of concrete", *Magazine of Concrete Research*, 8(23), pp. 85-94 (1956).
7. Sideris, K.K. "Mechanical characteristics of self-consolidating concretes exposed to elevated temperatures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(8), pp. 648-654 (2007).
8. Husem, M. "The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete", *Fire Safety Journal*, 41(2), pp. 155-163 (2006).
9. Kodur, V.K., Cheng, F.P., Wang, T.C. and et al. "Effect of strength and fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns", *Journal of Structural Engineering*, 129(2), pp. 253-259 (2003).
10. Bayasi, Z. and Zeng, J. "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, 90, pp. 605-605 (1993).
11. Sharma, R. and Bansal, P.P. "Use of different forms of waste plastic in concrete-a review", *Journal of Cleaner Production*, 112(1), pp. 473-482 (2016).
12. Beygi, M.H., Berenjian, J., Lotfi Omran, O. and et al. "Evaluation of energy absorption capability in fiber reinforced self-compacting concrete containing nano-silica particles", *Journal of Concrete Research*, 1(5), pp. 19-36 (2012).
13. Martinelli, E., Caggiano, A. and Xargay, H. "An experimental study on the post-cracking behaviour of hybrid industrial/recycled steel fibre-reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, 94, pp. 290-298 (2015).
14. Caggiano, A., Xargay, H., Folino, P. and et al. "Experimental and numerical characterization of the bond behavior of steel fibers recovered from waste tires embedded in cementitious matrices", *Cement and Concrete Composites*, 62, pp. 146-155 (2015).
15. Foti, D. "Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete", *Composite Structures*, 96, pp. 396-404 (2013).

16. Fraternali, F., Spadea, S. and Berardi, V.P. "Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of portland cement-based concretes", *Construction and Building Materials*, **61**, pp. 293-302 (2014).
17. Ye, G., Liu, X., De Schutter, G. and et al. "Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature", *Cement and Concrete Research*, **37**(6), pp. 978-987 (2007).
18. Borg, R.P., Balzacchino, O. and Ferrara, L. "Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, **108**, pp. 29-47 (2016).
19. Foti, D. "Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers", *Construction and Building Materials*, **25**(4), pp. 1906-1915 (2011).
20. Siddique, R., Khatib, J. and Kaur, I. "Use of recycled plastic in concrete: A review", *Waste Management*, **28**(10), pp. 1835-1852 (2008).
21. Yesilata, B., Isiker, Y. and Turgut, P. "Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces", *Construction and Building Materials*, **23**(5), pp. 1878-1882 (2009).
22. Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R. and et al. "Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete", *Composite Structures*, **93**(9), pp. 2368-2374 (2011).
23. Soroushian, P., Plasencia, J. and Ravanbakhsh, S. "Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete", *Materials Journal*, **100**(3), pp. 203-207 (2003).
24. Wille, K., El-Tawil, S. and Naaman, A. "Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading", *Cement and Concrete Composites*, **48**, pp. 53-66 (2014).
25. Noumowe, A., Carre, H., Daoud, A. and et al. "High-strength self-compacting concrete exposed to fire test", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **18**(6), pp. 754-758 (2006).
26. Poon, C., Shui, Z. and Lam, L. "Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures", *Cement and Concrete Research*, **34**(12), pp. 2215-2222 (2004).
27. EFNARC., "Specification and guidelines for self-compacting concrete", www.efnarc.org (2005).
28. Tonoli, G.H., Savastano, Jr.H., Santos, S.F. and et al. "Hybrid reinforcement of sisal and polypropylene fibers in cement-based composites", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(2), 177-187 (2010).
29. Peng, G.F., Yang, W.W., Zhao, J. and et al. "Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures", *Cement and Concrete Research*, **36**(4), pp. 723-727 (2006).
30. Liu, X., Ye, G., De Schutter, G. and et al. "On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste", *Cement and Concrete Research*, **38**(4), 487-499 (2008).
31. Hertz, K.D. and Sorensen, L.S. "Test method for spalling of fire exposed concrete", *Fire Safety Journal*, **40**(5), pp. 466-476 (2005).
32. Khoury, G. and Willoughby, B. "Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behaviour", *Magazine of Concrete Research*, **60**(2), pp. 125-136 (2008).
33. Khoury, G. "Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria", *Magazine of Concrete Research*, **60**(3), pp. 189-204 (2008).
34. Han, C.G., Hwang, Y.S., Yang, S.H. and et al. "Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement", *Cement and Concrete Research*, **35**(9), 1747-1753 (2005).
35. "Comit euro-international du beton CEB-FIB medol code 1990: Design code", Telford (1993).
36. Horner, S. "Activity 20-bendy wafer", Advanced Physics for Edexcel AS Physics Essex, United Kingdom: Pearson Education (2008).