

توسعه بتن ژئوپلیمری عملکرد بالا با خواص عایق حرارتی برتر از طریق استفاده از پودر PET، لاستیک و مصالح فعال شده با اکسید کلسیم

هادی بهمنی حیدرآبادی^{۱*} و داود مستوفی نژاد^۲

۱ فارغ التحصیل دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲ استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

h.bahmani@cv.iut.ac.ir*

تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

چکیده

تحقیقات پیشین به ندرت به بررسی توسعه بتن عایق حرارتی با عملکرد بالا با استفاده از مواد فعال سازی شده با اکسید کلسیم پرداخته اند. هم چنین، تأثیر جایگزینی نسبت های بالایی از سنگ دانه ها با پودر لاستیک فرسوده و پلی اتیلن ترفتالات (PET) بر ویژگی های مکانیکی و حرارتی بتن های ژئوپلیمری با عملکرد بالا کم تر مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه به بررسی توسعه بتن ژئوپلیمری عایق حرارتی با عملکرد بالا با استفاده از مواد فعال سازی شده با اکسید کلسیم می پردازد و یک روش اختلاط نوین را برای بهبود تراکم بتن عایق حرارتی با عملکرد بالا که شامل سرباره فعال سازی شده با اکسید کلسیم است، ارائه می دهد. در این تحقیق، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ از سنگ دانه ها با پودر لاستیک فرسوده و پودر PET جایگزین شده اند. آزمایش های مقاومت فشاری، خمش چهار نقطه ای و مقاومت کششی به منظور تعیین ویژگی های مکانیکی بتن انجام شده اند. علاوه بر این، آزمایش ضریب هدایت حرارتی برای ارزیابی ویژگی های حرارتی بتن توسعه یافته انجام گرفته است. نتایج نشان می دهند که جایگزینی سنگدانه ها با ۱۰٪ پودر لاستیک فرسوده یا پودر PET، ظرفیت جذب انرژی بتن را به ترتیب تا ۱۴۳٪ و ۱۰۷٪ افزایش داده است، در حالی که ویژگی های مکانیکی به ترتیب تا ۱۰٪ و ۷٪ کاهش یافته اند. استفاده از ۵۰٪ پودر لاستیک فرسوده و PET به عنوان جایگزینی برای سنگدانه ها، ضریب هدایت حرارتی نمونه ها را به ترتیب تا ۷۰٪ و ۶۰٪ کاهش داده است.

کلیدواژه ها: اکسید کلسیم، عایق حرارت، پودر لاستیک فرسوده، بتن ژئوپلیمری، ضریب هدایت حرارتی.

۱- مقدمه

جهان به دلیل چگالی کم، عمر طولانی، انعطاف پذیری، سهولت تولید و مقرون به صرفه بودن آن در حال افزایش است. علاوه بر این، سالانه میلیون ها لاستیک فرسوده تولید می شود. پژوهشگران پیش بینی کرده اند که تا سال ۲۰۳۰، تعداد لاستیک های ضایعاتی تنها در ایالات متحده به ۵۰۰۰ میلیون نفر خواهد رسید [5-9].

زباله های جامد شهری در چند دهه گذشته به یک مسئله مهم زیست محیطی در سراسر دنیا تبدیل شده اند. مصرف سالانه محصولات پلیمری در حال افزایش است و ضایعات پلیمری مانند PET و لاستیک فرسوده بخش قابل توجهی از زباله های شهری را تشکیل می دهند [1-4]. استفاده از PET در سراسر

با افزایش میزان ضایعات پلیمری، مدیریت پسماند بسیار مهم است. تخریب مواد پلیمری مانند PET و لاستیک‌های زباله در محل‌های دفن زباله صدها سال طول می‌کشد، به این معنی که این مواد مضر در محیط زیست باقی می‌مانند

[10-11]. علاوه بر این، محصولات مبتنی بر پلیمر، هیدروکربن‌های آلی با ارزش حرارتی بالا هستند که باعث سوختن آن‌ها می‌شوند [12-16].

یکی از راه‌حل‌های اساسی برای مشکل ضایعات تایر و PET، تولید مصالح ساختمانی مانند آجر و بتن با استفاده از این پلیمرها است [18-22]. اسلام و همکاران نشان دادند که جایگزینی ۲۰ درصد سنگ دانه با پودر PET تنها ۹ درصد کاهش در مقاومت فشاری داده است. پژوهشگران مختلف بیان کرده‌اند که ماهیت آب گریز زباله‌های PET با محدود کردن حرکت آب، واکنش‌های هیدراتاسیون را محدود می‌کند و این موضوع باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. پژوهشگران دیگر سنگ‌دانه‌ها را با ذرات لاستیک جایگزین کرده‌اند و خواص مکانیکی بتن را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند که ضعیف شدن ناحیه انتقال بین سنگ دانه و ماتریس سیمان باعث کاهش خواص مکانیکی بتن شده است [10].

یکی از انواع بتن‌های نسل جدید، بتن با عملکرد بالا/بتن با عملکرد فوق العاده بالا است. میزان مواد سیمانی در بتن با عملکرد بالا بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به مواد سیمانی آن کمتر از ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود. مقدار مواد سیمانی در بتن با عملکرد فوق العاده بالا بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. به دلیل محتوای سیمان بالای این بتن‌ها، پژوهشگران به دنبال به حداقل رساندن سیمان مورد استفاده در آن‌ها هستند [23-27].

بهمنی و مستوفی نژاد تحقیقاتی را برای توسعه بتن با عملکرد بالا با استفاده از سرباره فعال شده با فعال کننده‌های قلیایی خاکی انجام دادند. آن‌ها از اکسید کلسیم، دولومیت کلسینه شده و هیدروکسید کلسیم به عنوان فعال کننده استفاده کردند و مقاومت فشاری و خمشی بتن را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها دریافتند که بتن با عملکرد بالای فعال شده با ۱۰٪ اکسید کلسیم دارای بالاترین مقاومت خمشی (۹/۲ مگا پاسکال) و

مقاومت فشاری (۱۱۴ مگا پاسکال) در بین نمونه‌های آزمایش شده است. آن‌ها همچنین بیان کردند که این بتن دارای متراکم‌ترین ریزساختار است [27].

در تحقیقات پیشین، تمرکز بر فعال‌سازی مواد آلومینوسیلیکاتی با استفاده از فعال‌کننده‌های بر پایه سدیم بوده که هم از لحاظ اقتصادی و هم از نظر ایمنی چالش‌برانگیز است. با این حال، آثار استفاده از پودرهای PET و لاستیک فرسوده به عنوان جایگزین سنگ‌دانه در بتن‌های با عملکرد بالا (HPC/UHPC) توسعه یافته با فناوری ژئوپلیمر، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. این در حالی است که توسعه عایق‌های حرارتی مبتنی بر HPC/UHPC با استفاده از این مواد نیز به ندرت مورد توجه قرار گرفته است.

بنابراین، توسعه HPC/UHPC سازگار با محیط زیست و دارای خواص عایق‌بندی حرارتی با استفاده از پودرهای PET و لاستیک فرسوده، می‌تواند یک رویکرد نوآورانه در تحقیقات آینده باشد. استفاده از چنین بتن‌هایی می‌تواند به کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از ضایعات پلیمری و همچنین کاهش آثار مخرب تولید سیمان بر محیط زیست کمک کند. در این مطالعه، برای اولین بار، توسعه بتن با عملکرد بالای عایق حرارتی شامل پودر لاستیک و PET، با استفاده از مصالح فعال‌شده با اکسید کلسیم (TIHPGC-CAM)، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش می‌تواند نقطه عطفی در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن‌های با عملکرد بالا باشد، ضمن این‌که به حفظ محیط زیست نیز کمک می‌کند.

۲- شرح مصالح، تجهیزات و طرح مخلوط

۲-۱ مصالح

برای ساخت نمونه‌ها، سرباره با سطح مخصوص ۴۸۰ متر مربع بر کیلوگرم انتخاب شد و سطح مخصوص فعال کننده اکسید کلسیم نزدیک سرباره بود. مطابق با مطالعات قبلی، پودر سنگ آهک به عنوان سنگ دانه استفاده شد. پودر تایر و PET به گونه‌ای انتخاب شدند که دانه‌بندی مشابه پودر سنگ آهک داشته باشند تا ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها تحت تأثیر این موضوع قرار نگیرد. پودر تایر و PET به ترتیب دارای وزن

مشخصات گرمایی مواد است؛ که هر کدام برای مواد خاصی در حالت مایع یا جامد مناسب می‌باشد.

با توجه به این که ماده مورد نظر ما در این پژوهش بتن است، طبق دستور العمل دستگاه، سنسور TR-1 بهترین سنسور با بالاترین دقت مورد استفاده قرار گرفت. این سنسور طولی برابر ۱۰۰ میلی متر و قطری برابر ۲/۴ میلی متر داشته و ضریب هدایت گرمایی مواد از ۰/۱ W/mK تا ۴ W/mK را می‌تواند اندازه‌گیری کند.

طبق شرایط آزمایش، نمونه‌های بتنی باید دارای ضخامتی باشند که در صورت قرارگیری سنسور درون ماده، اطراف سنسور حداقل تا فاصله ۱۵ میلی متر، ماده وجود داشته باشد. از این رو، برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی بتن از قالب‌های ۲۰۰×۱۰۰ میلی متری استفاده شد. به منظور سهولت در ایجاد حفره برای قرارگیری سنسور دستگاه درون نمونه بتنی، قبل از گیرش بتن، میله‌ای به قطر ۲/۴ میلی‌متر درون بتن قرار داده شد و قبل از گیرش نهایی، این میله از درون بتن خارج شد تا سوراخی دقیقاً به قطر سنسور دستگاه درون نمونه بتنی ایجاد شده و نیازی به سوراخ‌کاری نمونه نباشد.

شکل ۱۰. دستگاه KD2 Pro



Fig. 1. Test device

دستگاه KD2 برای سنجش ضریب هدایت گرمایی بتن ۱۰ دقیقه آنالیز گرمایی انجام داده و نتایج را ارائه می‌کند. برای به تعادل رسیدن دمای سنسور و محیط، بهتر است بین آزمایش هر نمونه با نمونه بعدی، ۱۵ دقیقه فاصله زمانی وجود داشته باشد.

۲-۳ روش اختلاط و طرح مخلوط ها

مخصوص ۵۰۰ و ۱۴۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب بودند. برای تامین روانی لازم در نمونه‌ها از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات استفاده شد.

۲-۲ آزمایش‌ها

مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن، نزد طراحان و مهندسان کنترل کیفیت بتن می‌باشد. در جامدات، رابطه معکوس بین تخلخل و مقاومت یک اصل است. در نتیجه در بتن و مواد ترکیبی نظیر آن، تخلخل هر جزء تشکیل دهنده می‌تواند بر مقاومت تأثیر بگذارد. اگرچه پارامتر نسبت آب به سیمان در تعیین و میزان تخلخل خمیر و ناحیه انتقال و در نتیجه مقاومت بتن بسیار اهمیت دارد؛ ولی عواملی مانند تراکم و عمل‌آوری بتن، اندازه و کانی‌های سنگ دانه‌ها، مواد افزودنی، ابعاد و شکل نمونه، شرایط رطوبت و سرعت بارگذاری نیز در مقاومت بتن اهمیت دارند. آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های استوانه‌ای شد. در این پژوهش از دستگاه اعمال فشار با ظرفیت نهایی ۲۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شد. آزمایش مقاومت کششی برزلی برای تعیین مقاومت کششی طبق ASTM C469 [28] انجام شد.

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای برای تعیین ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های حاوی تیر و پودر PET انجام شد. این آزمون بر اساس ASTM C1018 [29] بود. نمونه‌ها بین دو تکیه‌گاه استوانه‌ای قرار گرفتند که فاصله انتهای نمونه تا تکیه‌گاه ۲۵ میلی‌متر بود. سرعت اعمال بار به گونه‌ای انتخاب شد که ترک اولیه بین ۳۰ تا ۶۰ ثانیه پس از شروع بار ظاهر شود.

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های گرمایی مواد، ضریب هدایت گرمایی است. بتن با ضریب هدایت گرمایی کم و متوسط، مصرف انرژی در ساختمان را کاهش می‌دهد. ضریب هدایت گرمایی با K نمایش داده شده و بیان‌گر مقدار گرمایی است که ماده می‌تواند در واحد ضخامت و در واحد زمان و در دمایی مشخص، از خود عبور دهد. برای تعیین ضریب هدایت گرمایی بتن از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که در این پژوهش از دستگاهی به نام KD2 Pro استفاده شد (شکل ۱). این دستگاه دارای سنسورهای مختلف برای اندازه‌گیری

روش جدیدی برای مخلوط کردن نمونه‌های TIHPGC-CAM

حاوی پودر لاستیک فرسوده و پودر PET

استفاده شد. ابتدا تمام مواد پودری به جز پودر لاستیک فرسوده یا PET با سرعت کم به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند. پس از افزودن آب و فوق روان کننده به همزن، اختلاط مواد برای ۳ دقیقه دیگر ادامه داده شد. سپس سرعت همزن را زیاد کرده و ۲ دقیقه دیگر مواد مخلوط شدند تا کاملاً روان شوند. در این حالت با سرعت بالای همزن، پودر لاستیک فرسوده یا PET به آرامی به مخلوط کن اضافه شد و اجازه داده شد تا ۳ دقیقه دیگر هم زدن ادامه یابد.

طرح مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق را جدول (۱) نشان می‌دهد. پودرهای PET و لاستیک فرسوده جایگزین پودر سنگ آهک (LP) در حجم‌های ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ شدند. درصد حجم در پراتر نشان داده شده است و نمادهای R و P به ترتیب برای نشان دادن مخلوط‌هایی که شامل پودر لاستیک فرسوده یا PET هستند، استفاده شده است.

۳- نتایج

۳-۱ نتایج مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های قبل از آزمایش را شکل (۲) نشان می‌دهد.

و شکل (۳)، تأثیر جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی با پودر لاستیک فرسوده و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) در مقاومت فشاری نمونه‌های بتن TIHPGC-CAM را نمایش می‌دهد. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ حجم سنگ‌دانه‌ها با پودر لاستیک، به ترتیب، مقاومت فشاری را ۱۰، ۲۱، ۳۹، ۵۵ و ۸۱٪ کاهش داده است. این کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل اتصال ضعیف بین پودر لاستیک و ماتریس ژئوپلیمری باشد.

علاوه بر این، شکل (۳) همچنین تأثیر جایگزینی سنگ‌دانه‌ها با پودر PET را نشان می‌دهد که منجر به کاهش مقاومت فشاری به میزان ۸، ۱۷، ۳۷، ۵۲ و ۷۷٪ برای جایگزینی‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ حجم سنگ‌دانه‌ها شده است. پودر PET به دلیل داشتن چگالی و مدول الاستیسیته

پایین‌تر نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی، تأثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن دارد، که شامل کاهش جرم واحد حجم و مقاومت در برابر تغییر شکل است. این تغییرات، توانایی بتن در تحمل بارهای فشاری را کاهش می‌دهد. همچنین، پودر PET اتصال ضعیف‌تری با خمیر سیمان دارد که منجر به ایجاد مناطق ضعیف و ترک‌های ریز در ماتریس بتن می‌شود، و با افزایش میزان استفاده از آن، این آثار نامطلوب تشدید می‌شوند.

نمونه‌های بتنی حاوی ۵۰٪ پودر PET، کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری نشان دادند، که این امر ناشی از چگالی ظاهری بسیار پایین‌تر نسبت به بتن مرجع است. علاوه بر این، مقدار زیاد پودر PET در مخلوط، توزیع نامناسب و ایجاد منافذ بیش‌تر را به دنبال داشته و اتصال ضعیف‌تری بین خمیر سیمان و پودر PET ایجاد کرده است، که این عوامل به طور مشترک بر مقاومت فشاری بتن تأثیر منفی گذاشته‌اند.

در نهایت، در حالی که استفاده از پودر لاستیک و PET مزایایی مانند کاهش وزن و افزایش انعطاف‌پذیری بتن را به همراه دارد، اما تأثیر منفی آن‌ها بر خواص مکانیکی، به ویژه مقاومت فشاری، نیز باید مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، لازم است تعادل مناسبی بین وزن، انعطاف‌پذیری و مقاومت فشاری در نظر گرفته شود تا از این مواد در کاربردهای ساختمانی که به مقاومت بالا نیاز دارند، استفاده شود. این یافته‌ها می‌توانند به توسعه روش‌های نوآورانه برای بازیافت و استفاده مجدد از مواد زائد در صنعت ساخت‌وساز کمک کرده و به پیشبرد اهداف پایداری در این حوزه منجر شوند.

شکل ۲. نمونه‌ها قبل از آزمایش مقاومت فشاری



Fig. 2. Samples before conducting compressive strength test

جدول ۱. طرح مخلوطها (کیلوگرم بر متر مکعب)

Designation	Slag	CaO	Rubber	PET	LP	W/B	SP
TIHPGC-CAM	990	110	-	-	1100	0.2	16
TIHPGC-CAM (10%R)	990	110	29	-	990	0.2	22
TIHPGC-CAM (20%R)	990	110	59	-	880	0.2	22
TIHPGC-CAM (30%R)	990	110	89	-	770	0.2	26
TIHPGC-CAM (40%R)	990	110	117	-	660	0.2	28
TIHPGC-CAM (50% R)	990	110	147	-	550	0.2	30
TIHPGC-CAM (10% P)	990	110	-	82	990	0.2	22
TIHPGC-CAM (20% P)	990	110	-	167	880	0.2	22
TIHPGC-CAM (30% P)	990	110	-	251	770	0.2	24
TIHPGC-CAM (40% P)	990	110	-	335	660	0.2	26
TIHPGC-CAM (50% P)	990	110	-	418	550	0.2	28

Table 1. Mix design components (kg/m³)

۲-۳ نتایج مقاومت کششی

تأثیر جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با پودر لاستیک فرسوده و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) بر مقاومت کششی نمونه‌های بتن TIHPGC-CAM در شکل (۴) مشخص است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی پودر لاستیک، مقاومت کششی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، به طوری که جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ حجم سنگدانه‌ها با پودر لاستیک، مقاومت کششی را به ترتیب ۱۶، ۲۱، ۳۶، ۴۷ و ۷۷٪ کاهش داده است. این کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل اتصال ضعیف‌تر پودر لاستیک با خمیر سیمان و تأثیر منفی آن بر ساختار میکروسکوپی بتن باشد.

همچنین، شکل (۴) نشان می‌دهد که جایگزینی سنگدانه‌ها با پودر PET نیز مقاومت کششی را کاهش می‌دهد، که در نمونه‌های حاوی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ پودر PET، مقاومت کششی به میزان ۱۱، ۱۷، ۳۳، ۳۹ و ۶۵٪ کاهش یافته است. پودر PET به دلیل داشتن مدول الاستیسیته پایین‌تر و چگالی کمتر نسبت به ماسه طبیعی، تأثیر منفی بر توزیع نیرو در واحد سطح و چسبندگی بتن دارد، که منجر به کاهش مقاومت کششی می‌شود.

علاوه بر این، پودرهای PET و لاستیک فرسوده ترک‌های ریزی را در ماتریس بتن ایجاد می‌کنند که مقاومت بتن در برابر تنش‌های کششی را کاهش می‌دهد. با افزایش میزان استفاده از این مواد، اثرات نامطلوب آن‌ها بر مقاومت کششی تشدید می‌شود.

شکل ۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های TIHPGC-CAM

شامل: الف) پودر لاستیک فرسوده، ب) پودر PET

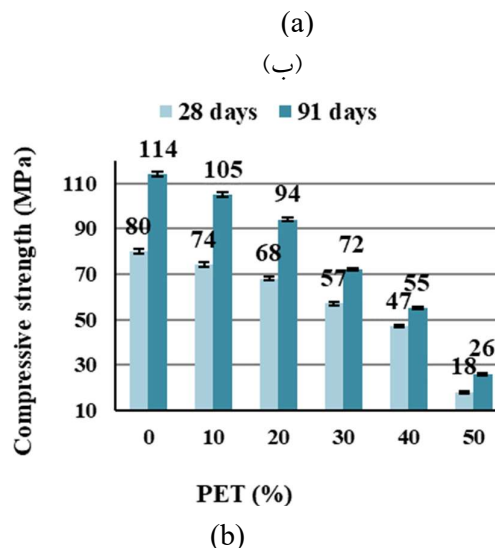
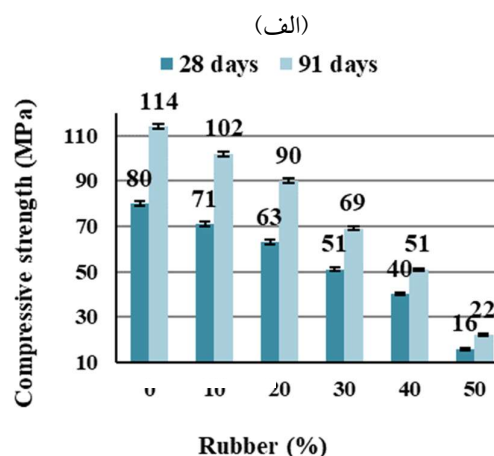


Fig. 3. Compressive strength results of TIHPGC-CAM specimens containing: (a) scrap tire powder; (b) PET powder

شناسایی سه ناحیه قبل از بار ترک خوردگی، ناحیه سخت شدگی و ناحیه نرم شوندگی را ممکن می‌سازد. بیشترین بار با افزایش درصد پودر لاستیک فرسوده یا PET مورد استفاده در TIHPGC-CAM کاهش یافت. این موضوع نشان دهنده این است که متراکم‌ترین ماتریس ژئوپلیمر در نمونه‌های TIHPGC-CAM بدون پودر لاستیک فرسوده یا PET بود.

شکل (۵) نشان می‌دهد که تغییر مکان لحظه گسیختگی نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی پودر لاستیک فرسوده به طور متوسط حدود ۶۰ درصد بیشتر از نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی پودر PET بود. پودر لاستیک دارای انعطاف پذیری بالاتری نسبت به پودر PET است، به این معنی که می‌تواند تغییر شکل بیشتری را متحمل شود و انرژی بیشتری را تحت بار جذب کند. پودر لاستیک همچنین پیوند قویتری با خمیر سیمان نسبت به پودر PET دارد که باعث کاهش میزان تنش و رشد ترک در ماتریس بتن می‌شود. بنابراین نمونه‌های TIHPGC-CAM با پودر لاستیک فرسوده در لحظه گسیختگی دارای تغییر مکان بالاتری نسبت به نمونه‌های با پودر PET هستند که نشان دهنده شکل پذیری بالاتر آن‌هاست. این موضوع نشان می‌دهد که نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی پودر ضایعات لاستیک، نسبت به نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی پودر PET، ناحیه نرم شوندگی بزرگ‌تری را ایجاد کردند.

این شکل نشان می‌دهد که افزایش درصد لاستیک یا پودر PET از ۱۰٪ به ۵۰٪ در نمونه‌های TIHPGC-CAM باعث کاهش سطح زیر نمودار تنش-تغییر مکان شد. در واقع، اگر چه مقادیر جابه‌جایی تقریباً یکسان در تمام درصد‌های جایگزینی اتفاق افتاد، بیشترین بار با افزایش درصد جایگزینی کاهش یافت که باعث کاهش سطح زیر نمودار تنش-تغییر مکان شد.

۳-۴ انرژی گسیختگی

شکل (۶) نمودار انرژی گسیختگی، (که معادل سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان تا ۰.۸۵ بار حداکثر است) را برای نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی درصد‌های مختلف پودر لاستیک فرسوده یا PET را نشان می‌دهد. از این نمودار

شکل (۴) هم‌چنین نشان می‌دهد که بالاترین مقاومت کششی، معادل ۶.۰۵ مگا پاسکال، در نمونه‌های TIHPGC-CAM بدون پودر لاستیک فرسوده یا PET مشاهده شده است. در مقابل، کم‌ترین مقاومت کششی، معادل ۱/۴ مگا پاسکال، در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر لاستیک فرسوده ثبت گردیده است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم میزان جایگزینی مواد بازیافتی بر ساختار میکروسکوپی و در نتیجه خواص مکانیکی بتن هستند.

شکل ۴ نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های TIHPGC-CAM

شامل: الف) پودر PET؛ ب) پودر لاستیک فرسوده

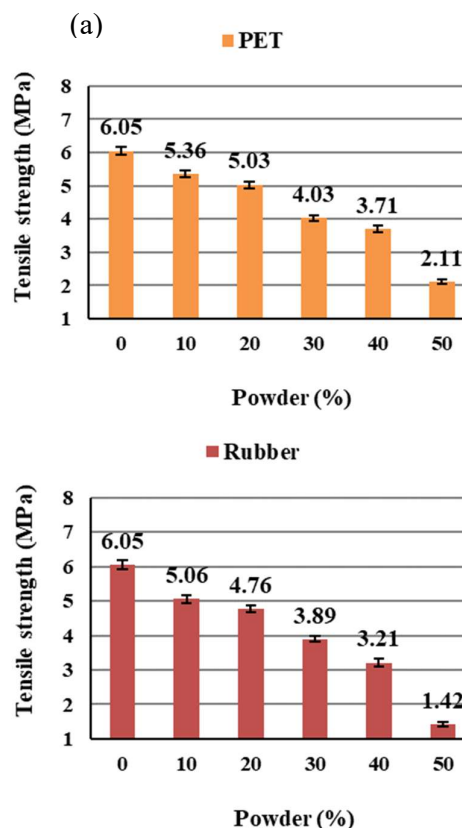


Fig. 4. Tensile strength results of TIHPGC-CAM specimens containing: (a) PET powder; (b) scrap tire powder

۳-۳ منحنی تنش - تغییر مکان

شکل (۵) نمودار تنش-تغییر مکان نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی درصد‌های مختلف پودر لاستیک فرسوده یا پودر PET را نشان می‌دهد. در نمودار تنش-تغییر مکان می‌توان مشاهده کرد که استفاده از پودر لاستیک فرسوده یا PET

این دلیل است که پودر لاستیک باعث ایجاد چسبندگی ضعیف و پیوند ناقص بین خمیر ژئوپلیمر و سنگ‌دانه‌ها می‌شود. شکل (۶) همچنین نشان می‌دهد که بالاترین انرژی گسیختگی در نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی ۱۰ درصد پودر PET به میزان ۷۴۳.۹ ژول بر متر مربع است. در مقابل، کم‌ترین انرژی گسیختگی برای نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد پودر PET به میزان ۱۷۴ ژول بر متر مربع است. ماتریس ژئوپلیمر متراکم‌تری در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر PET ایجاد شده است. پودر PET تا حد معینی بر انرژی گسیختگی نمونه‌های TIHPGC-CAM تأثیر مثبت دارد. پودر PET می‌تواند انرژی گسیختگی را با افزایش طاقت و شکل پذیری بتن افزایش دهد، به این معنی که می‌تواند تغییر شکل بیشتری را تحمل کند.

مشخص است که استفاده از پودر لاستیک به میزان ۱۰ درصد در نمونه‌ها باعث ایجاد بیشترین انرژی گسیختگی به میزان ۶۳۵.۸ ژول بر متر مربع می‌شود. با افزایش درصد پودر لاستیک از ۱۰ به ۵۰ درصد، انرژی گسیختگی حدود ۷۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها است. علاوه بر این، در نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی ۵۰ درصد پودر لاستیک فرسوده، پیوند ضعیفی بین سنگ دانه و ماتریس ژئوپلیمر در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک فرسوده ایجاد شده است که باعث کاهش انرژی گسیختگی می‌شود.

با افزایش درصد پودر لاستیک فرسوده در نمونه‌های TIHPGC-CAM، انرژی گسیختگی کاهش می‌یابد. این امر به

شکل ۵ نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌های TIHPGC-CAM شامل: (الف) پودر PET؛ (ب) پودر لاستیک فرسوده

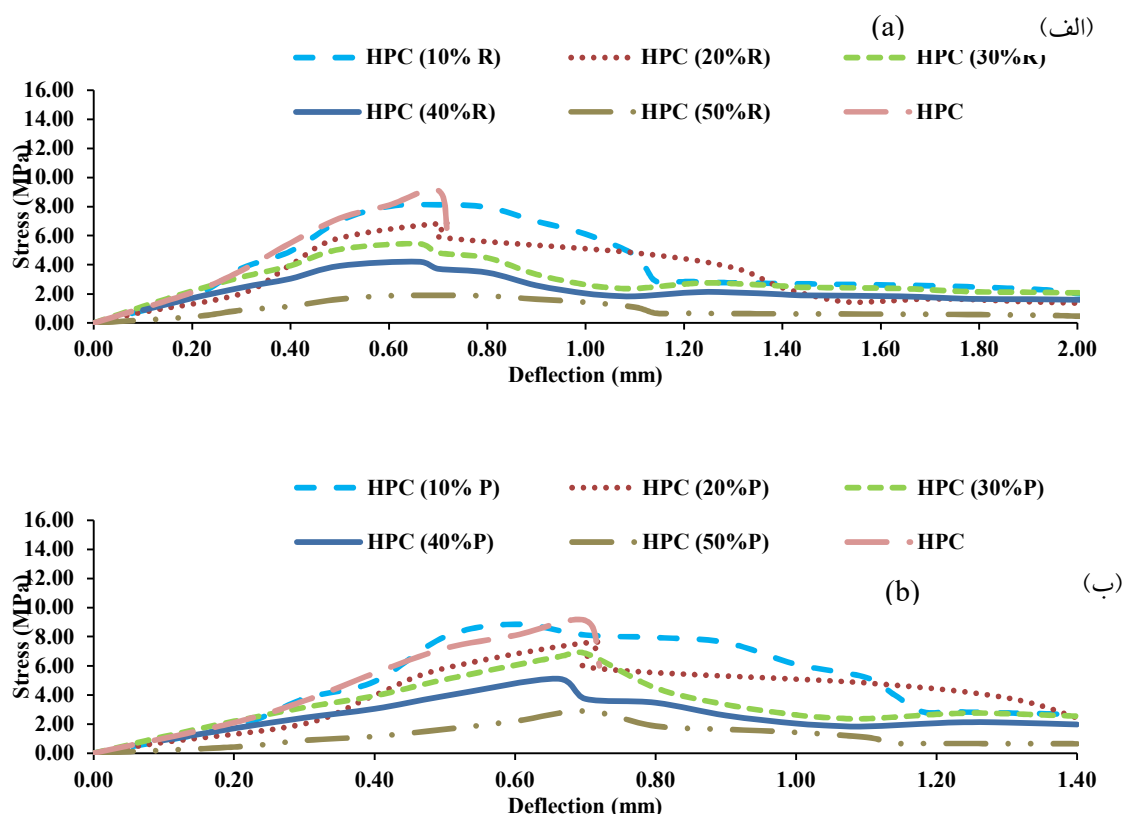
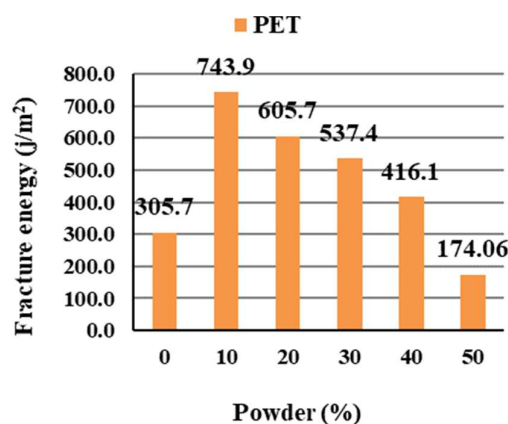


Fig. 5. Stress-deflection curves of TIHPGC-CAM specimens containing: (a) scrap tire powder; (b) PET powder

شکل ۶ انرژی گسیختگی نمونه‌های TIHPGC-CAM شامل؛ الف)

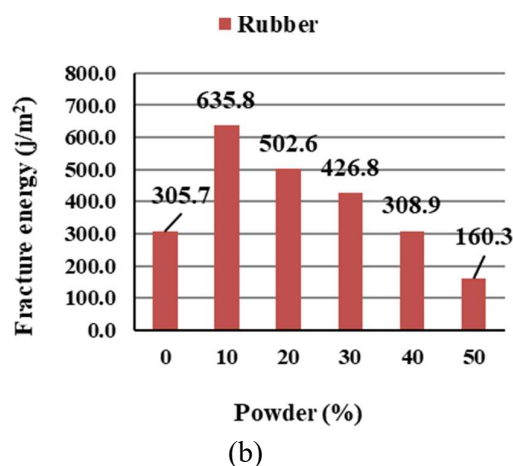
پودر PET؛ ب) پودر لاستیک فرسوده

(الف)



(a)

(ب)



(b)

Fig. 6. Fracture energy of TIHPGC-CAM specimens containing: (a) PET powder; (b) scrap tire powder

۳-۵ ضریب هدایت حرارتی

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های گرمایی مواد، ضریب هدایت گرمایی است. بتن با ضریب هدایت گرمایی کم و متوسط، مصرف انرژی در ساختمان را کاهش می‌دهد. ضریب هدایت گرمایی با حرف K نمایش داده شده و بیان‌گر مقدار گرمایی است که ماده می‌تواند در واحد ضخامت و در واحد زمان و در دمایی مشخص، از خود عبور دهد. برای تعیین ضریب هدایت گرمایی بتن از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که در

این پژوهش از دستگاهی به نام KD2 Pro استفاده شده است. شکل (۷) نمودار ضریب هدایت حرارتی اندازه‌گیری‌شده برای نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی درصد‌های مختلف پودر لاستیک فرسوده یا PET را نمایش می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش درصد پودر لاستیک یا PET، ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد، که این کاهش به افزایش تخلخل نمونه‌ها نسبت داده می‌شود.

با استفاده از درصد بالایی از پودر PET یا لاستیک به عنوان جایگزین برای سنگ‌دانه‌های TIHPGC-CAM، بتن با خاصیت عایق حرارتی بالا تولید می‌شود. بالاترین ضریب هدایت حرارتی برای نمونه‌های TIHPGC-CAM بدون پودر لاستیک فرسوده و PET به میزان $1/24$ W/mK بود. در مقابل، کمترین ضریب هدایت حرارتی برای نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی ۵۰ درصد پودر لاستیک فرسوده به میزان $0/34$ W/mK بود. این نشان می‌دهد که نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی ۵۰ درصد پودر لاستیک فرسوده می‌توانند بتن با خاصیت عایق حرارتی بالا تولید کنند.

پودرهای لاستیک فرسوده و PET هدایت حرارتی کمتری نسبت به ماسه در نمونه‌های TIHPGC-CAM دارند. این به این معنی است که این مواد سرعت انتقال حرارت را کاهش می‌دهند و خاصیت عایق حرارتی بتن را در هنگام جای‌گزینی مقداری از ماسه افزایش می‌دهند.

به علاوه، پودرهای لاستیک و PET تخلخل بیشتری نسبت به سیمان و ماسه دارند، به این معنی که فضای هوای بیشتری در ماتریس بتن دارند. هوا یک رسانای ضعیف برای گرما است، بنابراین می‌تواند رسانایی حرارتی بتن را کاهش دهد. هر چه پودر لاستیک فرسوده و PET بیش‌تر استفاده شود، این آثار بیشتر می‌شوند و در نتیجه رسانایی حرارتی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ پودر PET، ضریب هدایت حرارتی به ترتیب ۱۲٪، ۲۰٪، ۳۲٪، ۴۸٪ و ۶۲٪ کاهش یافت. در مقایسه با نمونه‌ی شاهد، در نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ پودر لاستیک فرسوده، ضریب هدایت حرارتی

طور متوسط حدود ۶۰ درصد بیشتر از نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی پودر PET بود.

شکل ۷. ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های TIHPGC-CAM شامل؛ الف) پودر لاستیک فرسوده، ب) پودر PET

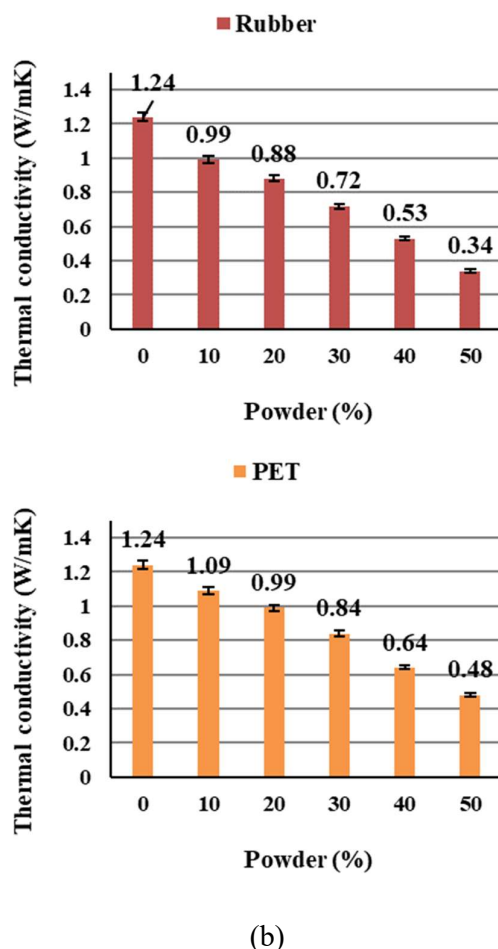


Fig. 7. Thermal conductivity of TIHPGC-CAM specimens containing: (a) tire; (b) PET

۳- آنالیز انرژی گسیختگی نمونه‌های TIHPGC-CAM نشان داد که بیش‌ترین انرژی گسیختگی در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک فرسوده یا پودر PET به دست آمد. در مقایسه با نمونه شاهد، انرژی گسیختگی نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی ۱۰ درصد پودر PET، ۱/۴۳ برابر افزایش یافت، در حالی که نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک، ۱/۰۷ برابر افزایش انرژی گسیختگی را نشان دادند.

نمونه‌ها به ترتیب ۲۰٪، ۲۹٪، ۴۲٪، ۵۷٪ و ۷۳٪ کاهش یافت. این نشان می‌دهد که استفاده از پودر لاستیک به عنوان جای-گزین برای سنگ‌دانه‌های TIHPGC-CAM باعث تولید رسانایی حرارتی کمتر و بتن عایق بیشتر در مقایسه با نمونه‌های حاوی پودر PET می‌شود.

با افزایش درصد پودر لاستیک فرسوده و PET مورد استفاده در نمونه‌های TIHPGC-CAM، کاهش ضریب هدایت حرارتی مشاهده می‌شود. این کاهش را می‌توان به افزایش هوای به دام افتاده و حفره‌های درون TIHPGC-CAM نسبت داد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نوع جدیدی از بتن ژئوپلیمری عایق حرارتی سازگار با محیط زیست شامل مواد فعال شده با اکسید کلسیم، پودر PET و لاستیک فرسوده را توسعه داد. برای اهداف تحقیق درصدهای مختلف از سنگ دانه‌ها با پودر لاستیک فرسوده یا پودر PET جایگزین شد. آزمایش‌های مختلفی برای تعیین خواص مکانیکی TIHPGC-CAM انجام شد. آزمایش ضریب هدایت حرارتی برای تجزیه و تحلیل خواص حرارتی بتن توسعه یافته انجام شد. نتایج تحقیق به شرح زیر خلاصه شده است.

۱- آزمایش‌های مکانیکی انجام‌شده روی نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی درصدهای مختلف لاستیک فرسوده یا پودر PET، کاهش مقاومت فشاری، خمشی و کششی را در مقایسه با نمونه‌های کنترل نشان داد. استفاده از ۱۰٪ پودر لاستیک منجر به بالاترین مقاومت خمشی، فشاری و کششی به ترتیب به میزان ۸/۱، ۱۰۲ و ۵/۱ مگا پاسکال شد. به طور مشابه، بالاترین مقاومت فشاری، خمشی و کششی به میزان ۱۰۵، ۸/۶ و ۵/۴ مگا پاسکال در نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی ۱۰ درصد پودر PET در مقایسه با سایر درصدهای جایگزینی به دست آمد.

۲- نتایج نشان داد که تغییر مکان لحظه گسیختگی نمونه‌های TIHPGC-CAM حاوی پودر لاستیک فرسوده به

- [6] Foti D. 2013 Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete, *Compos. Struct.* 96, 396–404.
- [7] Thomas B.S., Gupta R.C. 2016 A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 1323–1333.
- [8] Gu L., Ozbakkaloglu T. 2016 Use of recycled plastics in concrete: a critical review, *Waste Manage.* 51, 19–42.
- [9] Mohammed A.A. 2017 Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete, *Constr. Build. Mater.* 155, 593–604.
- [10] Islam M.J., Meherier M.S., Islam A.K.M.R. 2016 Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and hardened properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* 125, 946–951.
- [11] Choi Y.W., Moon D.J., Kim Y.J., Lachemi M. 2009 Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles, *Constr. Build. Mater.* 23, 2829–2835.
- [12] Al-Manaseer A.A., Dalal T.R. 1997 Concrete containing plastic aggregates, *Concr. Int.* 19, 47–52.
- [13] Soroushian P., Plasencia J., Ravanbakhsh S. 2003 Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete, *Mater. J.* 100, 203–207.
- [14] Marzouk O.Y., Dheilly R.M., Queneudec M. 2007 Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites, *Waste Manage.* 27, 310–318.
- [15] Chou L.-H., Lin C.-N., Lu C.-K., Lee C.-H., Lee M.-T. 2010 Improving rubber concrete by waste organic sulfur compounds, *Waste Manage. Res.* 28, 29–35.
- [16] Pierce C.E., Williams R.J. 2004 Scrap tire rubber modified concrete: Past, present and future, in: *Proc. Int. Conf. Organ. by Concr. Mason. Res. Group, Kingst. Univ. Eds MC Limbachiya JJ Roberts, Sustain. Waste Manag. Recycl. Used-Post-Consumer Tyres*, Thomas Telford, 1–16.
- [17] Holmes N., Browne A., Montague C. 2014 Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, *Constr. Build. Mater.* 73, 195–204.
- [18] Sukontasukkul P., Tiamlom K. 2012 Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size, *Constr. Build. Mater.* 29, 520–526.
- [19] Iman M. Nikbin, Soudabeh Dezhampahan, Shahin Charkhtab, Sadegh Mehdipour, Iman Shahvareh, Mahdi Ebrahimi, Ahmad Pournasir, Hasan Pourghorban, 2022 Life cycle assessment and mechanical properties of high strength steel fiber reinforced concrete containing waste PET bottle, *Constr. Build. Mater.* 337, 127553.
- [20] Bahmani H., Mostofinejad D., Dadvar S.A. 2020 Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete containing synthetic and mineral fibers, *ACI Mater. J.* 117 (3), 155–168.

۴. افزایش میزان لاستیک یا پودر PET از ۱۰٪ به ۵۰٪ در نمونه‌های TIHPGC-CAM منجر به کاهش مساحت زیر منحنی تنش-تغییر مکان شد. در حقیقت، با وجود اینکه میزان جابه‌جایی در تمامی درصدهای جایگزینی تقریباً مشابه بود، افزایش درصد جایگزینی باعث کاهش بیشترین بار و در نتیجه کاهش مساحت زیر منحنی تنش-تغییر مکان شد.
- ۵- آزمایش ضریب هدایت حرارتی نشان داد که نمونه‌های شامل ۵۰ درصد پودر لاستیک منجر به کم‌ترین ضریب هدایت حرارتی به میزان 0.34 W/mK شد که نشان‌دهنده کاهش ۷۰ درصدی ضریب هدایت حرارتی نسبت به نمونه شاهد بود.
- ۶- نتایج نشان داد که نمونه‌های شامل ۵۰٪ پودر PET ضریب هدایت حرارتی 0.48 W/mK را به همراه داشت که تقریباً ۶۰٪ کمتر از نمونه کنترل بود.

سیاسگزاری از حمایت مالی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۲۷۲۳۳ انجام شده است.

اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافع وجود ندارد.

مراجع

- [1] Siddique R., Khatib J., Kaur I. 2008 Use of recycled plastic in concrete: a review, *Waste Manage.* 28, 1835–1852.
- [2] Saikia N., de Brito J. 2012 Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review, *Constr. Build. Mater.* 34, 385–401.
- [3] Yadav I., Kumar M.G., Goyal S.G. 2008 Laboratory investigations of the properties of concrete containing recycled plastic aggregates.
- [4] Pacheco-Torgal F., Ding Y., Jalali S. 2012 Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview, *Constr. Build. Mater.* 30, 714–724.
- [5] Fraternali F., Ciancia V., Chechile R., Rizzano G., Feo L., Incarnato L. 2011 Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete, *Compos. Struct.* 93, 2368–2374.

immobilize toxic metals: Part I, Theory Appl. Miner. Eng. 10, 659–669.

[26] Shi C., Day R.L. 1996 Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements, Cem. Concr. Res. 26, 439–447.

[27] Bahmani H., Mostofinejad D. 2023 High-performance concrete based on alkaline earth metal ions-activated slag at ambient temperature: Mechanical and microstructure properties, Journal of Materials Research and Technology.

[28] ASTM C496. (2004) Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, Annual Book of ASTM Standards

[29] ASTM C1018-97, 1992. Standard Test for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third Point Loading). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

[21] Bahmani H., Mostofinejad D., Dadvar S.A. 2020 Effects of Synthetic Fibers and Different Levels of Partial Cement Replacement on Mechanical Properties of UHPFRC. J. Mater. Civ. Eng., 32(12), 04020361.

[22] Bahmani H., Mostofinejad D., Dadvar S.A. 2022 Fiber type and curing environment effects on the mechanical performance of UHPFRC containing zeolite, Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.

[23] Bahmani H., Mostofinejad D. 2022 Microstructure of ultra-high performance concrete (UHPC)-a review study, J. Build. Eng. 50, 104118.

[24] Van Deventer J.S., Provis J.L., Duxson P. 2012 Technical and commercial progress in the adoption of geopolymers, Miner. Eng. 29, 89–104.

[25] Van Jaarsveld J., Van Deventer J., Lorenzen L. 1997 The potential use of geopolymers to

Development of thermal-insulating high-performance geopolymer concrete containing rubber and PET powders with calcium oxide-activated materials

H Bahmani^{*1}, D Mostofinejad²

¹ PhD, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT)

² Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT)

^{*}h.bahmani@cv.iut.ac.ir

Abstract:

In research conducted about the development of HPC/UHPC using geopolymer technology, only the activation of aluminosilicate materials using expensive and risky sodium-based activators has been discussed. In such research, the effects of replacing aggregate with tire and PET powders in UHPC/HPC developed with geopolymer technology have not been investigated. In addition, the development of HPC/UHPC heat insulation using tire and PET powders has been neglected. The high percentage of aggregate replaced with tire and PET powders has not been considered. This means that the development of eco-friendly heat insulation with HPC using tire and PET powders can be a new path for future research. The use of this concrete can help minimize the problems related to polymer waste in the environment as well as environmental problems related to cement production. Previous research has not explored the development of heat-insulating HPC/UHPC using materials activated with calcium oxide. Moreover, the effects of substituting high proportions of sand with PET and tire powders on the mechanical and thermal properties of high-performance geopolymer concrete have not been investigated. This study addresses this issue and examines the development of heat-insulating high-performance geopolymer concrete with materials activated by calcium oxide. A new mixing method also has been developed for better compaction of TIHPGC-CAM containing tire and PET powders. For research purposes, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% of the aggregate have been replaced with tire and PET powders. The compressive strength, four-point bending, and tensile strength tests were performed to determine the mechanical characteristics of the concrete. The porosity of the samples and water absorption percentage also were tested. SEM analysis was performed at 91 days of age to study the microstructure of the specimens. Finally, the thermal performance and thermal conductivity coefficient were tested to determine the thermal properties of the TIHPGC-CAM. Mechanical tests conducted on TIHPGC-CAM samples containing varying percentages of tire or PET powder revealed a reduction in compressive, bending, and tensile strengths compared to control samples. The optimal replacement percentage was found to be 10% tire powder, resulting in the highest bending, compressive, and tensile strengths of 8.1 MPa, 102.0 MPa, and 5.1 MPa, respectively. Similarly, the highest compressive, bending, and tensile strengths of 105.0 MPa, 8.6 MPa, and 5.4 MPa were achieved in TIHPGC-CAM samples containing 10% PET powder compared to other replacement percentages. The lowest tensile strength was for TIHPGC-CAM specimens containing 50% tire powder at 1.4 MPa. In fact, the densest geopolymer matrix was recorded in the samples without scrap tire and PET powders. Fracture energy analysis of TIHPGC-CAM samples revealed that the highest fracture energy was achieved in samples containing 10% tire powder or PET powder. Compared to the control sample, the fracture energy of TIHPGC-CAM samples containing 10% PET powder increased by 1.43 times, while samples containing 10% tire powder showed a 1.07 times increase in fracture energy. The thermal conductivity tests revealed that incorporating 50% tire powder resulted in the lowest thermal conductivity of 0.34 W/mK, representing a 70% reduction compared to the control sample. Similarly, the inclusion of 50% PET powder yielded a thermal conductivity coefficient of 0.48 W/mK, which was approximately 60% lower than that of the control sample.

Keywords: Scrap tire; PET; Thermal conductivity; Geopolymer concrete.