

بررسی تاثیر افزودن الیاف پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی بر عملکرد و خواص مکانیکی بتن

سارا بهمن اورامانی^۱، مجتبی فتحی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه رازی کرمانشاه

چکیده:

بطری های پلی اتیلن ترفتالات (PET) که عمدتاً به عنوان ظروف آشامیدنی استفاده می شوند، پس از استفاده به زباله تبدیل شده و سبب ایجاد مشکلات زیست محیطی می شوند. از خورد کردن و ریسیدن این بطری ها، الیاف PET به دست می آیند. در این تحقیق ابتدا به تشخیص رفتار مکانیکی الیاف و بررسی پیوند آنها با مخلوط بتن پرداخته شد. انواع مختلف الیاف PET با زبافتی خرد شده به صورت مستقیم یا موج دار با طول های ۳۰ و ۵۰ میلی متری با درصدهای متفاوتی در ترکیب با بتن بررسی شدند. ویژگی های کششی الیاف تعیین شدند و در نتیجه به سبب عملکرد بهتر الیاف PET موج دار کوتاه (۳۰ mm)، از این الیاف جهت استفاده در آزمایشات اعضای بتنی استفاده شد. جهت بررسی ظرفیت عملکردی بتن تقویت شده با الیاف PET به مقایسه ی آن با بتن تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن (PP) برای مقادیر حجمی ۰/۷۵٪، ۰/۵٪ و ۰/۱٪ پرداخته شد. آزمایشات مناسب برای اندازه گیری خواص مواد مانند مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته انجام شد. برای بررسی ظرفیت های مقاومت و شکل پذیری اعضای بتنی، آزمایش خمش انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار حجمی الیاف، مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته کاهش می یابند. همچنین در نمونه های تقویت شده با الیاف PET در مقایسه با سایر نمونه های بدون تقویت الیاف، ترک خوردگی ناشی از انقباض خشک شدگی به تاخیر افتاد که این امر حاکی از کنترل ترک و ویژگی های پیوند الیاف PET بود. از لحاظ عملکرد عضو سازه ای، پارامترهای مقاومت نهایی و شکل پذیری تیرهای بتنی تقویت شده با الیاف PET به طور قابل توجهی بزرگتر از سایر نمونه های مشابه بدون تقویت الیاف بودند. در نهایت عملکرد بتن تقویت شده با الیاف PET و PP در مقایسه با نمونه کنترل بررسی گردید.

واژگان کلیدی: بتن، باز یافت، ترک خوردگی، شکل پذیری، عملکرد خواص مکانیکی، الیاف پلی اتیلن ترفتالات، الیاف پلی

پروپیلن.

مقدمه:

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی به علت مقاومت فشاری بالا، عمر طولانی و قیمت کم استفاده گسترده ای در سراسر جهان دارد. به علت ضعف مقاومت کششی و مقاومت ترک خوردگی بتن، در سال های اخیر استفاده از الیاف به منظور غلبه بر این معایب، افزایش پیدا کرده است. این الیاف در بهبود عملکرد خمشی، کششی و دوام بتن نقش موثری دارند و با کاهش ترک خوردگی انقباضی بتن سبب افزایش طول عمر سازه می شوند. سطح عملکرد الیاف وابستگی شدیدی به کیفیت و تعداد الیاف به کار رفته، شکل و ابعاد آنها و پیوندشان با مخلوط بتن دارد. مشکلات زیست محیطی مربوط به مدیریت انواع مختلف مواد دور ریختنی به بررسی احتمال استفاده از آنها به عنوان الیاف در بتن منجر شده است. الیاف استخراج شده از مواد دور ریختنی شامل الیاف آهن حاصل از تیرهای بازیافتی، الیاف طبیعی از کشاورزی و انواع مختلف از پلاستیک های بازیافتی است. پلی پروپیلن (PP)، پلی اتیلن (PE)، پلی وینیل الکل (PVA)، پلی وینیل کلراید (PVC)، نایلون، آرامید و پلی استر به عنوان الیاف پلاستیکی در بتن استفاده می شوند [۱-۳]. در بین این مواد، الیاف PP استفاده ی بیشتری داشته و برای کاربردهایی مانند شاتکریت پوشش تونل، بتن ضد انفجار و پوشش پیاده رو استفاده می شود [۴-۵]. به منظور بازیافت ضایعات PET، مخارج زیادی برای بازفرآوری مورد نیاز است. همچنین تغییر رنگ و تنظیم میزان خلوص پلاستیک های PET بازیافت شده برای تولید محصولات جدید، نیازمند هزینه است [۶]. الیاف بیشترین محصول نهایی حاصل از بازیافت PET است. یکی از کاربردهای اخیر PET بازیافتی در صنعت ساخت و ساز شامل استفاده از آن ها به عنوان رزین در بتن پلیمری و درشت دانه مصنوعی در بتن سبک است [۶-۱۲]. در یک مطالعه، Foti به آنالیز مقدماتی بتن های مسلح شده با الیاف های بطری های زباله PET پرداخت. نتایج حاکی از آن بود که مقدار کم الیاف PET بازیافتی می تواند تاثیر قابل توجهی بر روی رفتار ترک خوردگی المان های بتنی ساده داشته باشد. این الیاف ها همچنین سختی نمونه ها را بهبود بخشیده و نرمی بتن را نیز افزایش می دهند [۱۳]. Kim و همکارانش [۱۴] گزارش دادند که الیاف PET به سبب استحکام پیوند و ایجاد پراکندگی سبب بهبود مقاومت ترک خوردگی انقباضی در مخلوط برپایه ی سیمان می شوند. Ochi و همکارانش [۱۵] در تحقیقی بیان کردند که مخلوط بتن با درصد کمی از الیاف ضایعات PET دانه دار، که از طریق یک فرایند ذوب بدست آمده است عملکرد مکانیکی مناسب دارد. Silva و همکاران [۱۶] ذکر کردند که الیاف PET با گذشت زمان، سبب کاهش قلیایی بودن محیط خمیر سیمان می شوند. در این مطالعه، ابتدا ویژگی های الیاف PET و بررسی پیوندشان با مخلوط بتن، بررسی شد. سپس، خواص مواد اولیه و مقاومت انقباضی ناشی از خشک شدن بتن تقویت شده با الیاف PET ارزیابی شد. همچنین مطالعه آزمایشگاهی از مقاومت، شکل پذیری و طریقه ی شکست تیرهای بتنی تقویت شده با الیاف PET صورت گرفت. بر همین اساس، نتایج تحقیق شامل مقایسه نمونه های حاوی الیاف تقویتی PET و PP و بررسی کاربرد استفاده از بتن تقویت شده با الیاف PET به عنوان یک ماده ساختاری بود.

۱. آزمایشات الیاف PET

۱.۱. مواد

۹ مخلوط با ۲ نوع الیاف با طول های متفاوت مطابق جدول ۱ آماده شد. برای آماده سازی این مخلوط ها و مخلوط کنترل از مصالح ذکر شده در جدول ۲، استفاده شد.

جدول (۱): مخلوط های بتنی مورد آزمایش

نام	درصد حجمی	طول الیاف	توضیح	شماره مخلوط
CM	۰%	-	مخلوط کنترل	۱
S۵-۰/۵	۰/۵%	۵۰ mm	الیاف مستقیم	۲
S۵-۱	۱%	۵۰ mm	الیاف مستقیم	۳
S۵-۱/۵	۱/۵%	۵۰ mm	الیاف مستقیم	۴
S۳-۱	۱%	۳۰ mm	الیاف مستقیم	۵
D۵-۰/۵	۰/۵%	۵۰ mm	الیاف موج دار	۶
D۵-۱	۱%	۵۰ mm	الیاف موج دار	۷
D۵-۱/۵	۱/۵%	۵۰ mm	الیاف موج دار	۸
D۳-۱	۱%	۳۰ mm	الیاف موج دار	۹

جدول (۲): مصالح مورد استفاده

سیمان	CEM II/A-LL 42.5 R کلینکر سیمان پرتلند معمولی محتوا: % ۹۴-۸۰
درشت دانه	سنگ آهک قرمز با کیفیت بالای مالتی
درشت دانه	حداکثر اندازه سنگدانه: ۱۲/۵ mm
درشت دانه	جذب آب: % ۱/۹۲
ریزدانه	جذب آب: % ۲/۱۳
ریزدانه	حداکثر اندازه سنگدانه: ۵ mm
مخلوط شیمیایی	Glenium 27 تولید شده توسط شرکت شیمیایی BASF
مخلوط شیمیایی	نرخ مخلوط: ۱ کیلوگرم از مواد افزودنی برای ۱۰۰ کیلوگرم سیمان

برای داشتن الیاف با طول دلخواه، نوارهای ۲ میلی متری به دست آمده از خردن کردن بطری های PET بازیافتی، به وسیله کاترگیلوتین بریده شدند. داده های آماری جمع آوری شده از اندازه گیری ضخامت های مختلف الیاف نشان داد که با وجود ضریب تغییر ۰/۰۷۷ و ۰/۱۴۳، ضخامت الیاف موج دار ۰/۲۰۵ میلی متر است در حالی که این ضخامت برای الیاف مستقیم ۰/۳۳۱ است. با توجه به محیط مقطع عرضی هر کدام از الیاف، قطر معادل یک دایره با محیطی معادل میانگین محیط مقطع عرضی الیاف محاسبه شد. نسبت ابعاد تخمینی از تقسیم طول تقریبی الیاف بر قطر معادل، تعیین شد که برای هر نوع از الیاف در جدول ۳ ارائه شده است [۱۷].

جدول (۳): نسبت ابعاد الیاف

طول الیاف	مقطع عرضی الیاف مستقیم	مقطع عرضی الیاف موج دار
۳۰ mm	۳۳	۴۲
۵۰ mm	۵۵	۷۰

۱.۲ روش اختلاط

طبق متغیرهای تحقیق که در جدول ۱ به صورت جزئی آورده شده، ۹ مخلوط مختلف با ترکیبات نشان داده شده در جدول ۴ آماده شدند.

جدول (۴): نسبت های اختلاط برای متغیرهای مخلوط بتن

مخلوط	کنترل	S۵-۰/۵	S۵-۱	S۵-۱/۵	S۳-۱	D۵-۰/۵	D۵-۱	D۵-۱/۵	D۳-۱
نوع الیاف		S	S	S	S	D	D	D	D
طول الیاف (mm)	-	۵۰	۵۰	۵۰	۳۰	۵۰	۵۰	۵۰	۳۰
مقدار حجمی (%)	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۱	۰/۵	۱	۱/۵	۱
آب به سیمان (W/C)	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵
سیمان (kg/m ³)	۴۰۹	۴۰۹	۴۰۹	۴۰۹	۴۰۹	۴۰۹	۴۰۹	۴۰۹	۴۰۹

آب (kg/m ³)	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵
ریزدانه (kg/m ³)	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰
درشت دانه (۱۲/۵ mm) (kg/m ³)	۷۳۶	۷۲۳/۳	۷۱۰/۶	۶۹۷/۹	۷۱۰/۶	۷۲۳/۳	۷۱۰/۶	۶۹۷/۹	۷۱۰/۶
فوق روان کننده (kg/m ³)	۴/۰۹	۴/۰۹	۴/۰۹	۴/۰۹	۴/۰۹	۴/۰۹	۴/۰۹	۴/۰۹	۴/۰۹
جذب آب (۲۴ساعته) (kg/m ³)	۳۳/۳۰	۳۳/۰۶	۳۲/۸۱	۳۲/۵۷	۳۲/۸۱	۳۳/۰۶	۳۲/۸۱	۳۲/۵۷	۳۲/۸۱

مخلوط کنترل نمونه مکعبی برای مقاومت فشاری متوسط معادل ۳۰ مگاپاسکال و نشستی معادل ۳۰ الی ۶۰ میلی متر طراحی شد. طبق جدول ۴، تمامی بتن ها شامل مقدار ثابتی از ریزدانه ها، سیمان، آب و فوق روان کننده ها بودند. تمامی مخلوط ها با یک نوع مخلوط کن با ظرفیت ۶۰ پوند آماده شدند. سپس الیاف به صورت تدریجی به مخلوط کن در حال چرخش اضافه شدند و بتن برای ۲ دقیقه دیگر مخلوط شد [۱۷].

۱.۳. آزمایش مقاومت کششی

۳ نمونه از هر یک از انواع الیاف مورد آزمایش قرار گرفت. الیاف در گیره های با فاصله ۵۰ میلی متر و تحت سلول بار ۵۰ کیلو نیوتن قرار داده شدند. بار با سرعت ۲ نیوتون بر ثانیه اعمال شد. یک نوار لاستیکی با ضخامت ۱ میلی متر در لبه بیرونی گیره ها قرار داده شد تا اصطکاک میان گیره ها و الیاف را افزایش دهد و هنگام سفت کردن گیره ها مانع از بریده شدن الیاف توسط گیره های فلزی بار شود. جهت محاسبه تنش کششی نهایی و درصد تغییر طول برای هر نمونه، بار کششی نهایی بر محیط مقطع عرضی تقسیم شد [۱۷].

۲. آزمایشات خواص مصالح و ظرفیت عضو بتنی

۱.۲. طرح اختلاط

نسبت اختلاط در جدول ۵ داده شده است. سیمان پرتلند معمولی با چگالی ۳/۱۵ kg/cm³ و ریزی ۳/۴۹ × ۱۰^۲ cm²/g، همراه با جایگزینی ۱۰/۱٪ وزنی خاکستر بادی استفاده شدند. نسبت آب به چسباننده (W/B)، ۰/۴۱ بود. شن خرد شده با حداکثر اندازه ۲۵mm به عنوان درشت دانه و ماسه رودخانه ای به عنوان ریزدانه استفاده شدند. عامل کاهش هوا به منظور رسیدن به مقدار هوای ۱/۵ ± ۴/۵٪ و کارایی مناسب اضافه شد [۱۸].

جدول (۵): نسبت اختلاط بتن

نمونه ها	W/B	S/a(٪)	وزن واحد حجم (kg/m ³)						مقدار درصد حجمی (٪)	
			C	FA	W	S	G	AE	PET باز یافتی	PP
NF									-	-
RPET ۰/۵									۰/۵	-
RPET ۰/۷۵									۰/۷۵	-
RPET ۱	۰/۴۱	۴۳/۸	۳۵۵	۴۰	۱۶۱	۷۷۵	۹۹۴	۲/۳۷	۱	-
PP ۰/۵									-	۰/۵
PP ۰/۷۵									-	۰/۷۵

PP ^۱									-	۱
-----------------	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---

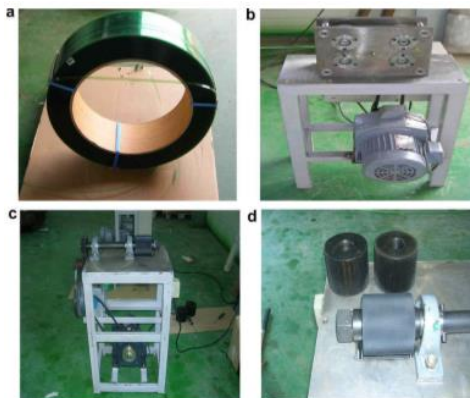
۲.۲ الیاف PET باز یافتی

ورقه های پلاستیکی حاصل از بطری های PET ضایعاتی مطابق شکل ۱ به دست آمدند.



شکل(۱): فرآیند تولید الیاف PET باز یافتی

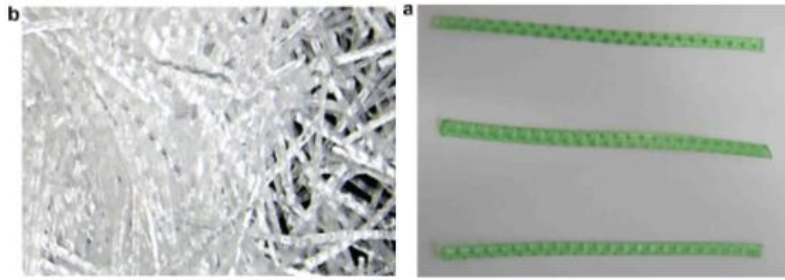
رشته های نازک الیاف پیوسته مستقیم از بریدن ورقه های پلاستیکی ایجاد شدند اما به دلیل مقاومت چسبندگی کم الیاف با مخلوط بتن ومقاومت کم آن هادر برابر ترک خوردگی، هندسه ی این الیاف تغییر داده شد. به طور کلی، الیاف های تولیدی از نوع موج دار، پیچ خورده و برجسته هستند. در تحقیقات گذشته از آزمایشات بیرون کشیدگی بر روی الیاف نتیجه گیری شد که الیاف کوتاه وموج دار عملکرد بهتری دارند. در نتیجه در مطالعه ی حاضر از این نوع الیاف استفاده شده است [۱۹]. در این مطالعه، الیاف های برجسته به خاطر خاصیت چسبانندگی خوب انتخاب شدند [۲۰]. برای مواد الیافی دیگر، الگوهای تغییر شکل مختلف، اثرات ساختاری بیشتری دارند [۲۱]. رشته های الیاف باز یافتی جهت رسیدن به یک پیکربندی ظاهری مطلوب، با انیدرید مالئیک پیوند شده با پلی پروپیلن، پوشش داده شد. این پوشش سطحی، مقاومت چسبانندگی و پارامترهای پراکندگی الیاف PET باز یافتی را بهبود می بخشد [۱۴]. پس از فرآیند پوشش، برای داشتن طول الیاف دلخواه، رشته ها قطعه قطعه شدند. شکل های ۱ و ۲، سیستم تولید الیاف های PET باز یافتی را نشان می دهند.



شکل(۲): دستگاه تولید الیاف های PET باز یافتی؛ (a) ورق PET باز یافتی

(b) ماشین برش؛ (c) ماشین تغییر شکل دهنده؛ (d) چرخ دنده ماشین تغییر شکل دهنده

به منظور بررسی خواص الیاف PET باز یافتی، این الیاف با الیاف PP با سایز مشابه، مقایسه شد. الیاف PP استفاده شده در این مطالعه یک تولید تجاری واز نوع چروکیده موج دار بود. شکل های ۳a و ۳b، به ترتیب عکس هایی را از PET باز یافتی تولید شده والیاف های PP خریداری شده، نشان می دهند.



شکل (۳): هندسه الیاف های PET باز یافتی و الیاف PP: (a) الیاف RPET: (b) الیاف PP.

خواص اساسی هر دو نوع از الیاف ها در جدول ۶ نشان داده شده است [۱۴]. متغیرهای اصلی در این مطالعه، (a) نوع الیاف مصنوعی و (b) مقدار حجمی الیاف است. مقدار حجمی الیاف ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ انتخاب شد که در جدول ۶ نشان داده است.

جدول (۶): خواص الیاف های مصنوعی

الیاف ها	نوع	ابعاد (mm)	طول (mm)	چگالی (g/cm ²)	مدول الاستیسیته (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	کشیدگی نهایی (%)
PET باز یافتی	برجسته	۰/۲ × ۱/۳	۵۰	۱/۳۸	۱/۰۲ × ۱۰ ^۴	۴۲۰/۷	۱۱/۲
PP	موج دار	۰/۳۸ × ۰/۹	۳۰	۰/۹۱	۶ × ۱۰ ^۱	۵۵۰	۱۵

۳.۲. آزمایشات خواص مصالح

۳.۲.۱. آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

استوانه های نمونه های بتنی تقویت شده با الیاف PP و PET باز یافتی، با ابعاد ۱۰۰ × ۲۰۰ × ۲۸۰ mm در سن ۲۸ روزگی آزمایش شدند. این نمونه ها با ماشین آزمایش همگانی (UTM) با بیشینه ی ظرفیت بارگذاری ۲۰۰۰ KN، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج هر نمونه، حاصل میانگین مقدار ۳ نمونه تکراری آزمایش شده از آن بود. آزمایشات مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته براساس استاندارد ۲۴۰۵ و روش آزمایش ۲۴۳۸ کره انجام شدند [۲۲-۲۳]. مدول الاستیک استاتیکی قابل اجرا در محدوده رنج تنش کاری مرسوم ۰ تا ۰/۴۰ مقاومت نهایی بتن، طبق فرمول زیر محاسبه شد:

$$E_c = \frac{0.4f'_c - f_t}{\epsilon_1 - 0.00005} \quad (1)$$

که در آن E_c مدول الاستیسیته است (Gpa):

$$f_t = \text{تنش مربوط به کرنش طولی } 0.00005 \text{ Mpa}$$

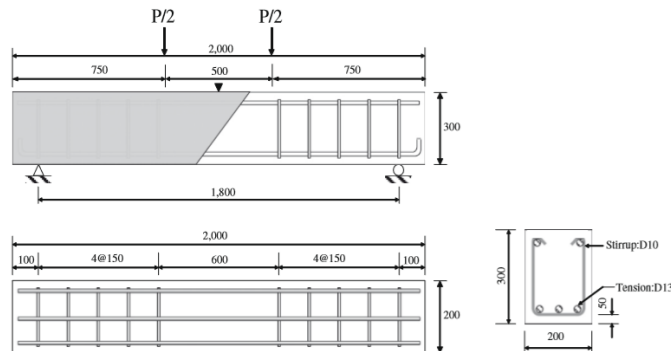
$$\epsilon_1 = \text{کرنش طولی متناظر با تنش } 0.4 f'_c$$

۳.۲.۴. آزمایش ظرفیت عضو سازه ای

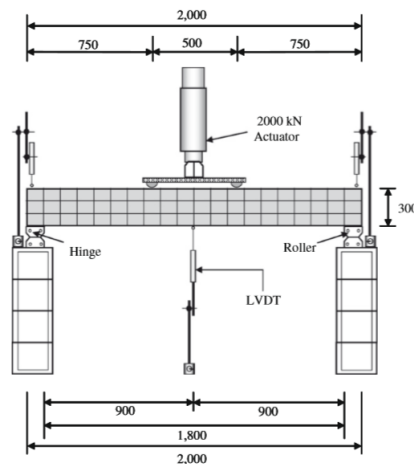
برای شبیه سازی شرایط تنش واقعی در سازه ها، نمونه های تیر تقویت شده با الیاف (RC) به کار گرفته شده برای تحمل برش و تنش های خمشی، با نسبت $\frac{\text{دهانه}}{\text{ارتفاع}} = 2/6$ طراحی شدند. نمونه ها تحت بارگذاری ۴ نقطه ای قرار گرفتند. شکل پذیری کلی و ظرفیت جذب انرژی تیرها، محاسبه شد [۱۸].

۱.۴.۲. آزمایش مقاومت خمشی

۷ نمونه پس از ۲۸ روز از قالب گیری، مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه ها دارای ۳ میلگرد D۱۳ برای تقویت کششی، میلگردهای D۱۰ برای تقویت فشاری و رکابی های با قطر ۱۰ mm (با فاصله ی ۱۵۰ mm) برای تقویت برشی بودند. شکل ۴، ابعاد و جزئیات نمونه تیرها را نشان می دهد. شکل ۵، آزمون راه اندازی را نشان می دهد [۱۸].



شکل (۴): ابعاد و جزئیات نمونه تیرهای بتنی RC (واحد: mm)



شکل (۵): راه اندازی آزمایش (واحد: mm)

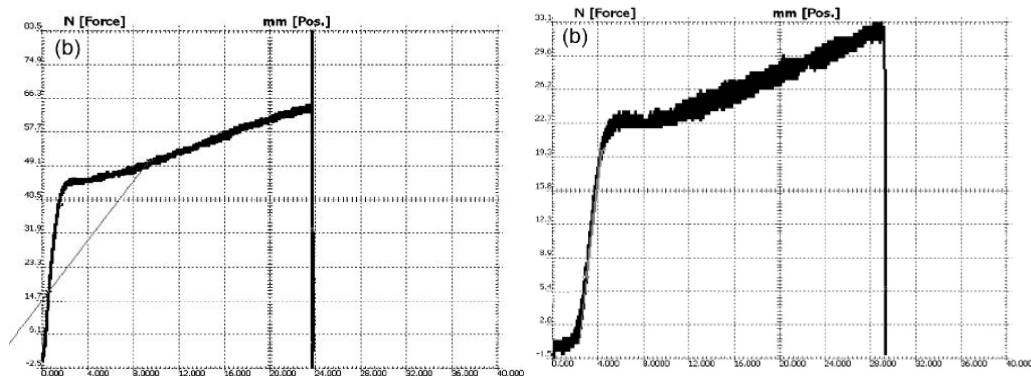
نمونه های تیر RC دارای تکیه گاه های مفصلی و غلتکی، با استفاده از ماشین آزمایش UTM با ظرفیت بارگذاری بیشینه ی ۲۰۰۰ KN آزمایش شدند. نرخ جابه جایی عمودی در وسط دهانه، 0.25 mm/s بود. قبل از بارگذاری، یک کرنش سنج در بالای سطح تیر بتنی جهت اندازه گیری کرنش کششی نصب شد. برای قرائت دقیق خمش، یک مبدل دیفرانسیل متغیر خطی (LVDT) در وسط دهانه نصب شد. شروع ترک و انتشار آن در طی آزمایش با استفاده از بازرسی چشمی تحت نظر قرار گرفت.

۳. بحث و نتایج آزمایشگاهی

۱.۳. آزمایش کشش بر روی الیاف های R-PET

دو نوع الیاف رفتار یکسان را نشان دادند. الیاف ها در مراحل اولیه بارگذاری، تا فرارسیدن حد الاستیک، رفتار الاستیک داشتند. تا رسیدن به این حد، درصد کشیدگی برای الیاف های مستقیم و موج دار، به ترتیب، تقریباً $3/5\%$ و $9/5\%$ بود. پس از این مرحله، مقاومت الیاف ها در برابر بار وارده تا وقتی که بار نهایی تقریباً 110 Mpa شود که در آن درصد کشیدگی بیشتر از 80% شد، ادامه داشت. شکل ۶ و ۷ به ترتیب نمودار بار-جابه جایی را برای الیاف مستقیم (RPET ۰/۵٪) و الیاف موج دار (RPET ۰/۵٪) نشان

می دهند. در الیاف های موج دار، درصد کشیدگی بالاتر می تواند مربوط به صاف کردن اولیه ی قطعه های PET باشد، که این رفتار اولیه در نمودار شکل ۷ هم قابل مشاهده است.



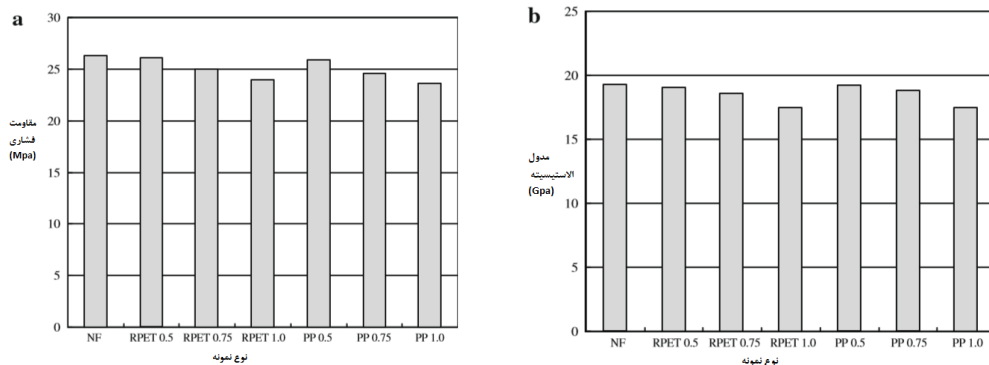
شکل (۷): نمودار بار - جابه جایی، الیاف موج دار (b)

شکل (۶): نمودار بار - جابه جایی، الیاف مستقیم (b)

۲.۳. آزمایشات خواص مصالح

۱.۲.۳. مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

شکل ۸a-b نتایج آزمایشات مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته را به ترتیب برای مقادیر حجمی ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ الیاف ارائه می دهند. نمونه های تقویت شده با الیاف PET باز یافتی و PP به ترتیب کاهش مقاومت ۹-۱٪ و ۱۰-۱۱٪ در مقایسه با نمونه های تقویت نشده داشتند. سایر مطالعات، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتری را برای بتن تقویت شده با الیاف مصنوعی در مقایسه با مقاومت بتن تقویت نشده با الیاف محاسبه کردند [۲۵]. همچنین انتظار میرفت، نمونه های بتنی PP و PET باز یافتی، مدول الاستیک کمتری را در مقایسه با نمونه های تقویت نشده نشان دهند. مدول الاستیسیته با افزایش مقدار الیاف، کاهش یافت.

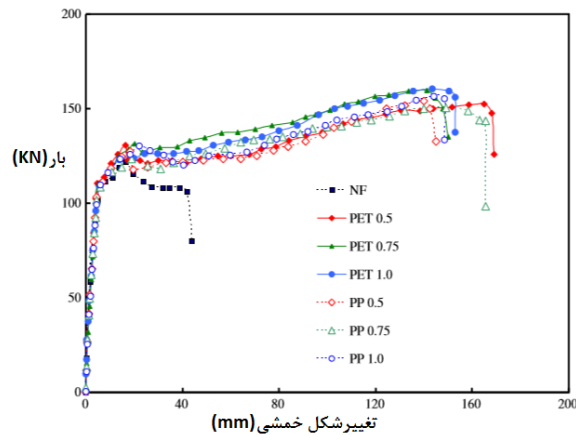


شکل (۸): مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای مقادیر حجمی نمونه های NF، RPET، PP؛ (a) مقاومت فشاری؛ (b) مدول الاستیسیته.

۳.۳. آزمایش ظرفیت عضو سازه ای

۱.۳.۳. نتایج بار-تغییر شکل خمشی

روابط بار - خمش اندازه گیری شده از آزمایشات تیرهای RC در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل (۹): منحنی های بار-خمش نمونه های بتنی NF، RPET، PP در سن ۲۸ روزگی.

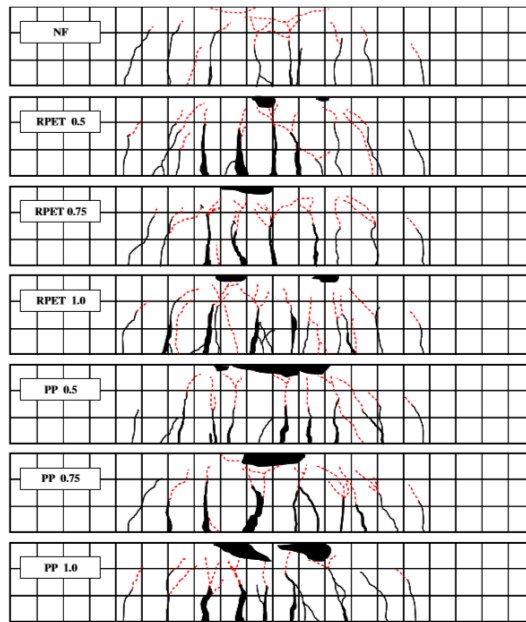
نتایج نشان داد که رفتار الاستیک نمونه ها قبل از ترک خوردگی به ازای مقادیر متفاوت حجمی الیاف، مشابه بود. قبل از تسلیم آرماتور کششی، شروع ترک در همه ی نمونه های بتنی تقویت شده با الیاف (به جز در نمونه دارای ۰/۵٪ PP) نسبت به نمونه های بدون الیاف زودتر رخ می دهد. با این حال، بتن تقویت شده با الیاف در اثر تسلیم آرماتور، مقاومت ترک خوردگی بهتری را نسبت به سایر نمونه های بدون الیاف نشان داد. بهبود مقاومت ترک خوردگی سبب افزایش مقاومت خمشی و شکل پذیری عضو RC شده که منجر به تثبیت رفتار کلی عضو می شود. مقاومت خمشی محاسبه شده از اطلاعات آزمایش در جدول ۷ ارائه شده است. مطابق جدول ۷، نمونه های R-PET با مقادیر حجمی الیاف ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪، به ترتیب افزایش مقاومت نهایی ۲۵٪ و ۳۱٪ و ۳۲٪ را در مقایسه با نمونه های بتنی بدون الیاف تقویتی داشتند. نمونه های بتنی تقویت شده با الیاف PP، روندی مشابه نمونه های بتنی تقویت شده با الیاف PET نشان دادند.

جدول (۷): نتایج آزمایش مقاومت خمشی

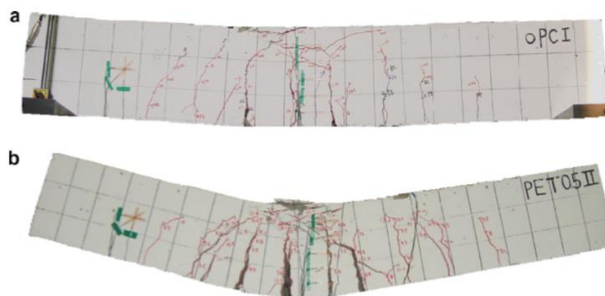
نمونه ها	P_{cr} (KN)	A_{cr} (mm)	P_y (KN)	A_y (mm)	P_u (KN)	P_u/P_{unf} (%)	A_u (mm)
NF	۳۲/۶	۱/۰۱	۱۰۱/۴	۴/۸	۱۲۱/۶	۱۰۰	۱۶/۹۴
RPET ۰/۵	۲۴/۸	۰/۴۳	۱۰۹	۴/۵۲	۱۵۲/۶	۱۲۵/۵	۱۶۵
RPET ۰/۷۵	۲۲	۰/۵۱	۱۰۸/۸	۴/۶۷	۱۵۹/۸	۱۳۱/۴	۱۴۱/۳۶
RPET ۱	۳۲/۴	۰/۶۲	۱۰۷/۸	۵/۳۱	۱۶۰/۴	۱۳۱/۹	۱۴۳/۳۶
PP ۰/۵	۳۲/۸	۰/۷۵	۱۰۸/۲	۴/۹۳	۱۵۴	۱۲۷	۱۴۰/۰۷
PP ۰/۷۵	۲۸	۰/۶۹	۱۰۶/۳	۵/۲۱	۱۵۰/۴	۱۲۳/۷	۱۴۹/۱۶
PP ۱	۲۵/۶	۰/۶۱	۱۰۶/۶	۴/۷۱	۱۵۶/۶	۱۲۸/۶	۱۴۴/۲۲

۳.۳.۲. حالت های ترک خوردگی برای تیرها

انتشار ترک به سبب شکست همه ی نمونه های آزمایش در شکل ۱۴ نشان داده شده است، که خطوط پر و نقطه چین، به ترتیب ترک های مراحل قبل و بعد از تسلیم آرماتور کششی را نشان می دهند. نمونه های کنترل بدون الیاف تقویتی، رفتار شکست نرم را نشان دادند. در این مطالعه، نمونه های بدون الیاف تقویتی برای شکست به وسیله ی تسلیم آرماتور کششی طراحی شدند که به وسیله ی توزیع ترک نشان داده شده در شکل ۱۰ تثبیت شدند. با این حال، نمونه های تقویت شده با الیاف PET باز یافتی و الیاف PP، شکست نهایی شان به وسیله ی هردوی شکست فشاری بتن و تسلیم آرماتورهای کششی رخ داد. نمودار بار - خمش (شکل ۹) نشان می دهد که بیشینه ی تغییر شکل وسط دهانه در نمونه های با الیاف تقویتی نسبت به نمونه های بدون الیاف تقریباً ۴۰٪ بزرگتر است. عکس های شکل ۱۱ تفاوت قابل توجه چرخش عضو نمونه های دارای الیاف تقویتی و نمونه های بدون الیاف را نشان می دهد.



شکل (۱۰): الگوی ترک خوردگی برای شکست نهایی نمونه های بتنی NF، RPET، PP.



شکل (۱۱): حالت شکست؛ (a) تیر بتنی بدون الیاف (NF)؛ (b) تیر بتنی تقویت شده با الیاف (RPET).

۳.۲.۲.۳. شکل پذیری و ظرفیت انرژی شکست نهایی

برای تعیین کمیت ظرفیت بار-خمش نمونه های آزمایش شده، شاخص شکل پذیری و ظرفیت انرژی شکست نهایی استفاده می شوند. شاخص شکل پذیری خمشی می تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

که در آن خمش عضو و شاخص شکل پذیری u و y، به ترتیب به شرایط نهایی و تسلیم اشاره دارند. ظرفیت انرژی شکست نهایی عضو به عنوان سطح زیر منحنی رابطه بار - خمش تعریف می شود. شاخص های شکل پذیری و ظرفیت انرژی تیرهای آزمایش شده در جدول ۸ ارائه شده است. طبق جدول ۸، نمونه های بتنی تقویت شده با الیاف PET باز یافتی، شاخص شکل پذیری نسبی از ۱۰/۳۴ - ۷/۶۵ دارند، که تقریباً ۷-۱۰ برابر بزرگتر از از نمونه های بدون الیاف تقویتی هستند. ظرفیت انرژی شکست نهایی محاسبه شده ی اعضای بتنی دارای الیاف تقویتی، تقریباً ۴-۴/۸ برابر بزرگتر از سایر نمونه های بدون الیاف تقویتی است. قابل ذکر است که نمونه ی R-PET ۰,۵ نتایج ظرفیت انرژی و شاخص شکل پذیری بزرگتری دارد که نشان می دهد که یک مقدار بهینه حجم الیاف برای طراحی مخلوط و فرآیند تولید وجود دارد.

جدول (۸): محاسبه شاخص شکل پذیری و ظرفیت انرژی نمونه های آزمایش.

نمونه ها	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	شاخص شکل پذیری (Δ_u/Δ_y)	شاخص شکل پذیری نسبی	ظرفیت انرژی (KN.m)	ظرفیت انرژی نسبی
NF	۴/۸	۱۶/۹۴	۳/۵۳	۱	۴/۶۴	۱
RPET _{۰/۵}	۴/۵۲	۱۶۵	۳۶/۵	۱۰/۳۴	۲۲/۵	۴/۸۵
RPET _{۰/۷۵}	۴/۶۷	۱۴۱/۳۶	۳۰/۲۷	۸/۵۸	۲۰/۸۷	۴/۳
RPET _۱	۵/۳۱	۱۴۳/۳۶	۲۷	۷/۶۵	۲۱/۰۵	۴/۳۴
PP _{۰/۵}	۴/۹۳	۱۴۰/۰۷	۲۸/۴۱	۸/۰۵	۱۸/۷۴	۴/۰۴
PP _{۰/۷۵}	۵/۲۱	۱۴۹/۱۶	۲۸/۶۳	۸/۱۱	۲۱/۷۷	۴/۶۹
PP _۱	۴/۷۱	۱۴۴/۲۲	۳۰/۶۲	۸/۶۷	۱۹/۶۴	۴/۲۳

۳. نتایج

در این مطالعه الیاف های PET باز یافتی اضافه شده به ساختار بتن باهدف بهبود عملکرد مواد و عملکرد ساختاری بود. مزایای زیست محیطی موثر استفاده از این مصالح ضایعاتی یکی دیگر از انگیزه های اصلی برای این کار بود. نتیجه گیری به شرح زیر است:

۱- آزمایش کشش الیاف نشان داد که هر دو نوع الیاف مستقیم و موج دار تا قبل از رسیدن به حد تسلیم، رفتار الاستیک دارند. پس از این مرحله، ازدیاد طول ۳/۵٪ و ۹/۵٪ به ترتیب برای الیاف مستقیم و موج دار مشاهده شد. پس از این مرحله، مقاومت الیاف ها در برابر بار وارده تا وقتی که بار نهایی تقریباً برابر ۱۱۰ Mpa شود که در آن درصد کشیدگی بیشتر از ۸۰٪ شد، ادامه داشت.

۲- با توجه به آزمایش خواص مصالح، بتن تقویت شده با الیاف PET باز یافتی با افزایش مقدار حجمی الیاف دچار کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته شد. نمونه های تقویت شده با الیاف PET باز یافتی و الیاف PP افزایش مقاومت فشاری ۹٪-۱۰٪ و ۱-۱۰٪ را در مقایسه با نمونه های بدون الیاف تقویتی نشان دادند. همچنین، نمونه های بتنی PP و PET باز یافتی، مدول الاستیک کمتری را در مقایسه با نمونه های تقویت نشده نشان دادند. مدول الاستیسیته نمونه ها با افزایش مقدار الیاف، کاهش یافت.

۳- بررسی رفتار خمشی در حین بارگذاری نشان داد که رفتار الاستیک نمونه ها قبل از ترک خوردگی به ازای مقادیر متفاوت حجمی الیاف، مشابه بود. بتن تقویت شده با الیاف در اثر تسلیم آرماتور، با داشتن مقاومت ترک خوردگی بهتر سبب افزایش مقاومت خمشی و شکل پذیری عضو RC نسبت به سایر نمونه های بدون الیاف شده و منجر به تثبیت رفتار کلی عضو می شود. نمونه های R-PET با مقادیر حجمی الیاف ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪، به ترتیب افزایش مقاومت نهایی ۲۵٪، ۳۱٪ و ۳۲٪ را در مقایسه با نمونه های بتنی بدون الیاف تقویتی نشان دادند.

۴- نمونه های بتنی تقویت شده با الیاف PET باز یافتی، در اثر هر دو عامل فشرده سازی بتن و تسلیم آرماتور کششی دچار شکست شدند. این رفتار زمانی که بار مقاوم باقی مانده ی وسط دهانه تقریباً معادل بار وسط دهانه ی اصلی است می تواند رخ دهد. سالم باقی ماندن اتصال بین میلگرد و بتن سبب داشتن محصول یکنواخت می شود. ترک های تشکیل شده در طول مراحل اولیه ی بارگذاری در داخل عضو، توسط الیاف های کوتاه، اتصال داده می شوند. حداکثر تغییر شکل وسط دهانه در نمونه های تقویت شده با الیاف نسبت به نمونه های بدون تقویت الیاف حدود ۴۰٪ بزرگتر است.

۵- نمونه های بتنی تقویت شده با الیاف PET، انعطاف پذیری نسبی حدود ۱۰-۷ برابر بیشتر از سایر نمونه های بدون تقویت الیاف داشتند. ظرفیت انرژی شکست نهایی محاسبه شده ی اعضای بتنی دارای الیاف تقویتی، تقریباً ۴/۸-۴ برابر بزرگتر از سایر نمونه های بدون الیاف تقویتی است. اما برای مقدار حجمی ۰/۵٪، با افزایش مقدار حجمی الیاف، شاخص شکل پذیری و ظرفیت انرژی کاهش پیدا می کند.

مراجع:

- [1] Li VC, Horii H, Kabele P, Kanda T, Lim YM. Repair and retrofit with engineered cementitious composites. *Eng Fract Mech* 2000;65(2-3):317-34.
- [2] Cengiz O, Turanli L. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cem Concr Comp* 2004;34(8):1357-64.
- [3] Zollo RF. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cem Concr Comp* 1997;19(2):107-22.
- [4] Mwangi JPM. Flexural behavior of sisal fiber reinforced concrete beams. PhD thesis. University of California Davis; 2001.
- [5] Aulia TB. Effects of polypropylene fibers on the properties of high-strength concrete. *Leipzig Annu Civ Eng Rep* 2002;5:43-59.
- [6] Rebeiz KS, Fowler DW, Paul DR. Recycling plastics in polymer concrete for construction applications. *J Mater Civ Eng ASCE* 1993;5(2):237-48.
- [7] Choi YW, Moon DJ, Chung JS, Cho SK. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cem Concr Res* 2005;35(4):776-81.
- [8] Jo BW, Park SK, Park JC. Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater* 2008;22(12):2281-91.
- [9] Jo BW, Tae GH, Kim CH. Uniaxial creep behavior and prediction of recycled PET polymer concrete. *Constr Build Mater* 2007;21(7):1552-9.
- [10] Rebeiz KS. Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. *Cem Concr Compos* 1995;17(2):119-24.
- [11] Rebeiz KS, Fowler DW. Flexural strength of reinforced polymer concrete made with recycled plastic waste. *ACI Struct J* 1996;93(5):524-30.
- [12] Rebeiz KS, Serhal S, Fowler DW. Shear behavior of steel reinforced polymer concrete using recycled plastic. *ACI Struct J* 1993;90(6):675-82.
- [13] Dora Foti, "Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers," *Construction and Building Materials* 25 1906, 2010-(2011).
- [14] Won J, Park C, Kim H, Lee S. Effect of hydrophilic treatments of recycled PET fibre on the control of plastic shrinkage cracking of cement-based composites. *J Korean Soc Civ Eng* 2007;27:413-9.
- [15] Ochi T, Okubo S, Fukui K. Development of recycled PET fibre and its application as concrete-reinforcing fibre. *Cement Concr Compos* 2007;29:448-55.
- [16] Silva D, Betioli A, Gleize P, Roman H, Gomez L, Ribeiro J. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cem Concr Res* 2005;35:1741-6.
- [17] Borg, Ruben Paul, Owen Baldacchino, and Liberato Ferrara. "Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete." *Construction and Building Materials* 108 (2016): 29-47.
- [18] Kim, Sung Bae, et al. "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete." *Cement and concrete composites* 32.3 (2010): 232-240.
- [19] Borg, Ruben Paul, Owen Baldacchino, and Liberato Ferrara. "Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete." *Construction and Building Materials* 108 (2016): 29-47.
- [20] Kim JHJ, Park CG, Lee SW, Lee SW, Won JP. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Compos Part B: Eng* 2008;39(3):441-50.
- [21] Kim D-J, Naaman AE, El-Tawil S. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cem Concr Compos* 2008;30(10):917-28.
- [22] KS F 2405. Method of test for compressive strength of concrete. Korea Standards Association; 2005 [in Korean].
- [23] KS F 2438. Testing method for static modulus of elasticity and poisson's ratio in compression of cylindrical concrete specimens. Korea Standards Association; 2002 [in Korean].
- [24] KS F 2595. Method of test for drying shrinkage cracking of restrained concrete. Korea Standards Association; 2004 [in Korean].
- [25] Bayasi Z, Zeng J. Properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *ACI Mater J* 1993;90(6):605-10.
- [26] Ohno T, Uomoto T. Prediction of occurrence of cracks due to autogeneous shrinkage and drying shrinkage. *Jpn Soc Civ Eng* 2000;49:29-44.

The effect of adding fiber-reinforced polyethylene terephthalate waste on yield and mechanical properties of concrete (61G)

S.bahman ooramani¹,M.fathi²

1. Master student of structure engineering at Razi University of Kermanshah,Iran(providing oral)
2. Assistant Professor Faculty of Engineering Razi University of Kermanshah,Iran

Abstract:

The polyethylene terephthalate(PET)bottles that mainly are using as beverage containers after making use turns to waste and are causing environmental problems.From Crushing and spinning these bottles PET fiber are obtained.In this research at the first have payed to the recognition of mechanical behavior of fiber and assessing they linked with concrete mixture.Different types of recycled PET fibers, straight and deformed,together with different fiber lengths,30 mm and 50 mm,have been assessed ,for varying percentages addition in concrete.Fiber tensile features determined and therefore due to better performance of short deformed fiber(30mm),from this fiber used for testing concrete members.For checking concrete performance capacity which reinforced by PET fiber to compared it with concrete reinforced by polypropylene(PP)for the volume of 0.5%, 0.75% and 1%.Appropriate laboratory tests for measuring of material properties such as compressive strength, elastic modulus performed.For checking the strength and the ductility of concrete members capacities, bending tests performed.The results show that compressive strength and elastic modulus both decreased as fiber volume fraction increased. Also cracking due to drying shrinkage was delaed in the PET fiber reinforced concrete specimens ,compared to sush cracking in non-reinforced specimens without fiber reinforcement(NF),which indicates crack controlling and bridging characteristics of the recycled PET fibers.Regarding structural member performance, ultimate strength and relative ductility of PET fiber reinforced RC beams are significantly larger than those of companion specimens without fiber reinforcement. Finally the concrete performance which reinforced by PET and PP fiber in comparison with control specimens assessed.

Keywords: Concrete, recycling, cracking, ductility, performance mechanical properties, polyethylene terephthalate fibers, polypropylene fibers.