

ارائه راهکاری زیست‌محیطی برای بازیافت بطری‌های زباله پت به کمک جایگزین کردن آن‌ها به عنوان ریزدانه در بتن

ابراهیم رحمانی
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
مهدی دهستانی*
استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
مرتضی حسینی یگی
استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

پلی اتیلن ترفتالات (PET) پلیمری است که در اغلب کشورها برای تولید لیاف پلی استر، رزین بطری و رزین‌های پلی استر مهندسی به کار می‌رود. با توجه به استفاده گسترده از این پلیمر در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی و مدت‌زمان طولانی مورد نیاز برای تجزیه زباله‌های مربوط به این مواد در طبیعت، ارائه راهکارهای مهندسی جهت بازیافت و همچنین بهره‌برداری مجدد از مواد مصرفی مزبور، مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است. در این مطالعه، با رویکرد جامع‌تری نسبت به مطالعات پیشین به بررسی استفاده از زباله‌های فرآوری شده پت به عنوان جایگزین ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از حجم ماسه در ترکیبات بتن پرداخته شده است. بدین منظور نمونه‌های بتنی مکعبی و استوانه‌ای با مقادیر نسبت آب به سیمان مختلف ساخته شده و طی آزمایش‌هایی خواص فیزیکی بتن تازه مشخص گردید. سپس نمونه‌های بتنی در شرایط استاندارد عمل‌آوری شده، مورد آزمایش‌های مختلف جهت تعیین خواص مکانیکی واقع گردیدند. نتایج نهایی حاکی از کاهش کارایی بتن پت تازه بوده است. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی بتن‌های پت نیز بیانگر کاهش قابل توجه در مدول الاستیسیته و کششی غیرمستقیم و یک روند افزایشی و سپس کاهش در مقاومت فشاری و خمشی بوده است. نتایج آزمایش عبور امواج فراصوتی نیز نشان‌دهنده بافت متخلخل برای بتن‌های پت بوده است.

واژه‌های کلیدی: بتن، PET، خواص فیزیکی و مکانیکی.

* نویسنده مسئول: dehestani@gmail.com

۱. مقدمه

در ایران، بیشتر برای ساخت انواع بطری‌های آشامیدنی استفاده شده و از این راه وارد زباله‌های شهری شده است.

با روش‌های متفاوتی می‌توان از این مواد رهایی یافت: دفن کردن، خاکستر سازی و بازیافت [۴]. در خاکستر سازی می‌توان از ارزش حرارتی مواد بهره برد ولی اکسید شدن بعضی از زباله‌ها مانند بطری‌های پت موجب تولید گازهایی می‌شود که می‌تواند برای سلامتی انسان خطرناک باشد. مشکل دیگر این زباله‌ها کندی فساد آن‌هاست. این امر موجب می‌شود تا چرخه بازگشت این مواد به طبیعت پس از دفن نمودن آن‌ها برای صدها سال به طول انجامد، بنابراین به نظر می‌رسد که به دلیل فواید اقتصادی و زیست‌محیطی، بازیافت بهترین راه حل برای رهایی از زباله‌هایی همچون پت و غیره می‌باشد [۵].

بتن‌های پلیمری با جابه‌جایی پلیمر با ملات سیمان در مقادیر خاص تولید می‌شود. در مقایسه با موادی که بر پایه سیمان هستند، هزینه تولید بتن پلیمری به دلیل قیمت بالای رزین‌های دست نخورده، خیلی زیاد است. استفاده از بطری‌های زباله PET در تولید رزین پلی‌استر، قیمت محصول رزین را در مقایسه با حالتی که رزین معمولی مرسوم تولید می‌شود، کاهش می‌دهد [۷ و ۶].

همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، روش دیگر استفاده از بطری‌های زباله PET بازیافت آن‌ها به عنوان فیبر PET و استفاده از آن‌ها برای تولید بتن مسلح فیبری است. البته این امر در حالی است که مقدار حجمی محتوای فیبر در بتن مسلح فیبری بین ۰/۳٪ تا ۱/۵٪ باشد، لذا این روش مقدار کوچکی از زباله‌های پلاستیکی PET را بازیافت می‌کند [۱۲-۸]. از این رو مقرون به صرفه‌ترین راه استفاده از بطری‌های زباله PET در بتن، استفاده از خرده بطری‌های زباله PET به طور مستقیم به عنوان سنگ دانه در بتن و یا ملات تولیدی است. بدین ترتیب استفاده از زباله‌های PET به عنوان سنگ‌دانه در بتن فوایدی همچون کاهش در استفاده از منابع طبیعی، مصرف زباله‌ها، جلوگیری از آلودگی زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در انرژی را فراهم می‌کند [۲۰-۱۳ و ۵].

در یک مطالعه، Mariaenrica Frigione به تحقیق بر روی جان‌نشین‌سازی ۵٪ وزن سنگ دانه‌های ریز با وزن برابر از سنگ‌دانه‌های PET به دست آمده از زباله‌های بطری‌های PET که نشسته شده‌اند، پرداخت. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده آن بوده که بتن WPET (unwashed PET) در رنج مقادیر سیمان

سبک زندگی مدرن در کنار پیشرفت تکنولوژی منجر به افزایش مقدار و نوع زباله‌های تولیدی شده، که این امر سبب به وجود آمدن بحران رهایی از زباله‌ها شده است. بسیاری از مواد زباله زوال ناپذیرند و برای صدها و شاید هزاران سال در محیط زیست باقی خواهند ماند. زباله‌های زوال ناپذیر با افزایش جمعیت و نیز انباشته شدن زباله در سرتاسر جهان موجب بحران زیست‌محیطی گردیده‌اند.

پت نام مختصر پلی اتیلن ترفتالات، و از خانواده پلی‌استر است. پلی‌استر پت از طریق ترکیب اتیلن گلی کل و اسید ترفتالیک به وجود می‌آید و نام شیمیایی آن پلی اتیلن ترفتالات یا به اختصار پت است [۱].

در سال ۱۹۴۱، برای اولین بار، پت (به عنوان الیاف مصنوعی) را (British Calico Printers) مورد استفاده قرار داد. بعدها، در اواسط دهه ۱۹۶۰، از پت برای بسته‌بندی فیلم‌ها استفاده شد و سپس، در اوایل دهه ۱۹۷۰، با به دست آمدن تکنیک دمیدن سه محوری این ماده وارد صنعت بطری‌سازی شد [۲].

پت به دلیل استحکام بالا، تحمل فشار بالا، عدم واکنش‌پذیری با مواد و نیز خاصیت عالی محصور نمودن گاز - این ویژگی می‌تواند گاز را در نوشیدنی‌های گازدار نگه دارد تا مزه نوشیدنی در بطری حفظ شود - یکی از پلاستیک‌های رایج در صنعت بسته‌بندی است [۱].

پت در اغلب کشورها برای تولید الیاف پلی‌استر، رزین‌های پلی‌استر مهندسی، ظروف نوشیدنی‌های الکلی و غیر الکلی، آب میوه، آب معدنی، روغن‌های خوراکی، پاک‌کننده‌ها و... به کار می‌رود که به ناچار این مواد مصرفی به جریان زباله‌های شهری می‌گردد. به عنوان مثال انجمن ملی NOPCOR (National Association for PET Container Resources) مجموع بطری‌ها و شیشه‌های پت قابل بازیافت در ایالات متحده در سال ۲۰۰۹ به میزان ۵/۱۴۹ بیلیون پوند (۲/۴۶۸۵۵۳۳ بیلیون کیلوگرم) است، در حالی که مقادیر بازیافت شده به میزان ۱/۴۴۴ بیلیون پوند ۲۸٪ کل مقادیر موجود بوده است [۳].

پلی اتیلن ترفتالات (PET) در اغلب کشورها در صنایع مختلف مهندسی و مواد غذایی و ظروف آشامیدنی به کار می‌رود ولی

۲. طرح آزمایشگاهی

۲-۱. مشخصات مصالح مصرفی

۲-۱-۱. سیمان

سیمان استفاده شده در این مطالعه از نوع پرتلند تیپ ۲، تولید کارخانه سیمان نکا، با توده ویژه $3/14 \text{ gr/cm}^3$ و سطح ویژه (سطح بلین) $3050 \text{ cm}^2/\text{gr}$ است. ترکیبات شیمیایی این سیمان در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۱-۲. سنگ دانه‌ها

مصالح سنگی مصرفی در این مطالعه از نوع شکسته است. مشخصات سنگ دانه‌های ریز و درشت طبق روش‌های تست C29، C33، C127، C128، C136، D2419 از استاندارد ASTM تعیین شده است. چگالی ظاهری در حالت درون اشباع با سطح خشک (SSD) درشت دانه طبق استاندارد ASTM C127 برابر $2/51 \text{ gr/cm}^3$ محاسبه گردیده و حداکثر قطر سنگ دانه آن ۱۹ mm بوده است. همچنین چگالی ظاهری در حالت درون اشباع با سطح خشک ریزدانه نیز طبق استاندارد ASTM C128 برابر $2/75 \text{ gr/cm}^3$ محاسبه شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ دانه‌ها در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. همچنین شکل شماره ۱ نتایج دانه بندی سنگ دانه‌ها را طبق استاندارد ASTM C33 نشان می‌دهد.

۲-۱-۳. ذرات PET

ذرات PET حاصل از آسیاب کردن بطری‌های PET استفاده شده به عنوان سنگ دانه در این تحقیق از یک کارگاه تجاری واقع در شهرک صنعتی ساری در شمال ایران فراهم شده است. این ذرات از جمع آوری بطری‌های زباله PET، شستن و سپس آسیاب نمودن آن‌ها با ماشین آلات صنعتی به دست آمده‌اند. ماکزیمم اندازه ذرات PET، ۷ میلی‌متر، و وزن مخصوص محاسبه شده برای آن $464/265 \text{ kg/m}^3$ است. دانه بندی ذرات PET در جدول شماره ۳ آمده است.

۳۰۰ تا 400 Kg/m^3 و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ در حالت تازه کارایی تقریباً مشابه با بتن معمولی را دارا است. همچنین این بتن دارای مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن کمی کمتر از بتن مرجع بوده و این در حالی است که دارای مدول الاستیسیته کمتر و به عبارتی نرمی بیشتر می‌باشد [۱۳]. در تحقیقی دیگر Hannawi و دیگران، به مدیریت برای استفاده از مواد بازیافتی PC و PET در زمینه مهندسی عمران و ساخت بتن پرداختند. تحلیل SEM در بتن‌های مذکور یک چسبندگی ضعیف را بین سنگ دانه‌های پلاستیک و بافت نشان می‌دهد. مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ملات‌های حاوی این ذرات با افزایش مقادیر پلاستیک، کاهش پیدا نمودند که این موجب نرم تر شدن این نمونه‌ها و تحمل بار برای چند دقیقه بعد از گسیختگی بدون تخریب کامل شد. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد که جانشین سازی درصدی از ماسه توسط این ذرات پلاستیک موجب بهبود در مقاومت خمشی و فاکتور سختی شده و موجب جذب انرژی خوب این کامپوزیت‌ها می‌شود که این برای بسیاری از استعمالات مهندسی عمران مثل سازه‌های مورد بحث دینامیک و ضربه بسیار جالب است [۱۹].

Reis و دیگران کسرهای مختلف وزنی ماسه (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪) را با مقدار مشابه وزنی پلاستیک PET جانشین سازی نمودند و به تحقیق بر روی شکست این کامپوزیت‌ها پرداختند. نتایج نمایانگر کاهش در وزن نمونه‌های حاوی مواد پلیمری، بهبود چشمگیر در رفتار خمشی، نرم تر شدن مواد، افزایش جذب انرژی و نمود کاهش در شکست‌های ترد بوده است [۱۸].

Foti به آنالیز مقدماتی بتن‌های مسلح شده با فیبرهای بطری‌های زباله PET پرداخت. نتایج حاکی از آن بود که مقدار خیلی کم اضافه نمودن فیبرهای بازیافتی از بطری‌های زباله PET می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار ترک خوردگی (post-cracking) المان‌های بتنی ساده داشته باشد. این فیبرها همچنین تانسین نمونه‌ها را بهبود بخشیده و نرمی بتن را نیز افزایش می‌دهند [۸].

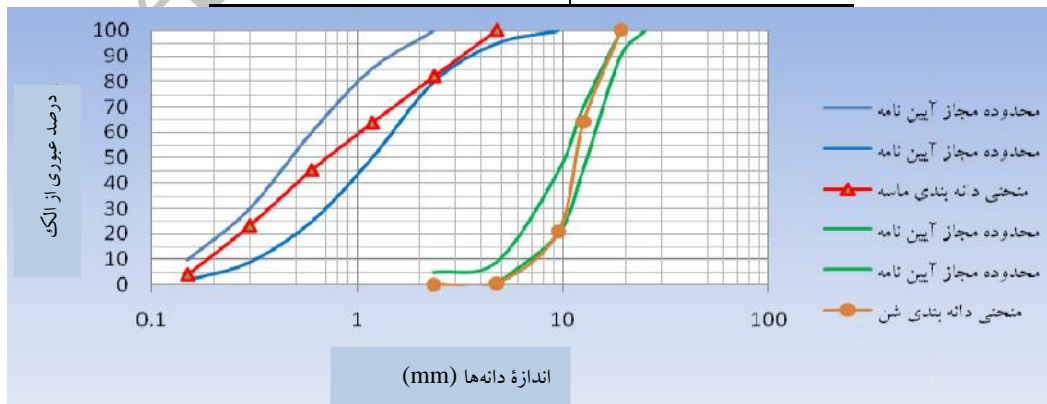
هدف اصلی از این مطالعه، تحقیق در مورد تأثیر استفاده از خرده زباله‌های PET بر روی ویژگی‌های بتن حاوی این ذرات در درصد‌های مختلف جانشین سازی حجمی آن با ماسه طبیعی است.

جدول ۱ - مشخصات شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی	تیپ ۲	
	استاندارد ایران ISIRI 389	نتایج آزمایش
SiO ₂	>۲۰	۲۱/۹۰
Al ₂ O ₃	>۶	۴/۸۶
Fe ₂ O ₃	<۶	۳/۳۰
CaO	-	۶۳/۳۲
MgO	<۵	۱/۱۵
SO ₃	<۳	۲/۱۰
K ₂ O	-	۰/۵۶
Na ₂ O	-	۰/۳۶
Free CaO	-	۱/۱۰
Blaine (cm ² /gr)	-	۳۰۵۰
Compressive Strength (Kg/cm ²)		
۳ روزه	>۱۰۰	۱۸۵
۷ روزه	>۱۷۵	۲۹۵
۲۸ روزه	>۳۱۵	۳۷۹

جدول ۲ - مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ دانه های ریز (ماسه) و درشت (شن)

سنگ دانه	شن	ماسه
چگالی ظاهری (gr/cm ³)	۲/۵۱	۲/۷۵
وزن مخصوص ظاهری (Kg/m ³)	۱۵۸۱/۳	۱۷۲۸/۹
رطوبت نسبی (%)	۰/۲	۰/۴
رطوبت اشباع با سطح خشک (%)	۰/۵	۰/۷
مدول نرمی (F.M)	-	۲/۸۲
ارزش ماسه ای (%) (S.E)	-	۸۰



شکل ۱ - دانه بندی ریزدانه و درشت دانه به همراه حدود مجاز استاندارد ASTM C33

جدول ۳ - مشخصات ذرات PET

الک	درصد مانده روی الک
۷/۰۰mm	۰
۴/۷۵mm	۱۲/۵
۲/۳۶mm	۶۷/۵
۱/۱۸mm	۱۵
۶۰۰ μm	۲/۵
۳۰۰ μm	۱/۵
۱۵۰ μm	۱
<۱۵۰ μm	۰
وزن مخصوص ظاهری (kg/m ³) (ASTM C29)	۴۶۴/۲۶۵

پلی اتیلن ترفتالات (PET) پلیمری قابل ارتجاع در اثر حرارت است با مدول الاستیسیته کششی و خمشی به ترتیب در حدود ۲/۹ و ۲/۴ GPa، مقاومت کششی بالای ۶۰ MPa و مقاومت شیمیایی بالا. PET پلیمری نیمه متبلور با نقطه ذوبی در حدود ۲۶۰°C و دمای تغییر حالت (از یک حالت به حالت دیگر) در محدوده‌ای از ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی ظاهری در حدود ۱/۴ - ۱/۳ gr/cm³ است [۱۱].

پلی اتیلن ترفتالات (PET) پلیمری قابل ارتجاع در اثر حرارت است با مدول الاستیسیته کششی و خمشی به ترتیب در حدود ۲/۹ و ۲/۴ GPa، مقاومت کششی بالای ۶۰ MPa و مقاومت شیمیایی بالا. PET پلیمری نیمه متبلور با نقطه ذوبی در حدود ۲۶۰°C و دمای تغییر حالت (از یک حالت به حالت دیگر) در محدوده‌ای از ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی ظاهری در حدود ۱/۴ - ۱/۳ gr/cm³ است [۱۱].

۲-۳. روش‌های آزمایش

برای سنجش ویژگی بتن‌های تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد (2004) ASTM C143 استفاده شده است. این تست برای اندازه‌گیری ویسکوزیته مخلوط در حالت تازه مطرح می‌شود. این تست در آمریکا توسعه یافته است و به دلیل سادگی به میزان وسیع در کارگاه‌های ساختمانی تمام دنیا به کار برده می‌شود. آزمایش اسلامپ کارایی بتن را نمی‌سنجد ولی می‌توان آن را به صورت سنجشی از روانی بتن توصیف کرد و برای پی‌بردن به تغییرات در یکنواختی مخلوط بتن با نسبت‌های اسمی معین، بسیار مفید است. در این آزمایش، یک قالب به شکل مخروط ناقص به ارتفاع ۳۰ cm، قطر ۱۰ cm در بالا و قطر ۲۰ cm در پایین، با بتن در سه لایه که هر لایه با ۲۵ ضربه مارپیچ متراکم می‌شود، پر می‌شود. سپس قالب به آهستگی بلند می‌گردد. مخروط بتنی بدون حایل، بر اثر وزن خود نشست پیدا می‌کند. مقدار این نشست، موسوم به اسلامپ بتن است.

نمونه‌های بتنی سخت‌شده برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روز تست می‌شوند. این آزمایشات

۲-۲. طرح‌های اختلاط بتن

درصدهای اختلاط اجزای بتن مطابق با استاندارد -1-211-1 ACI-89 تعیین گردیده است. طرح‌های مختلف مخلوط نمودن اجزا در جدول ۴ داده شده است. برای مخلوط نمودن مصالح ابتدا شن و نیمی از ماسه را مخلوط نمودیم، در ادامه ذرات PET را در میکسر ریختیم تا با مصالح موجود میکس شود، سپس ۲۰٪ از آب موجود را برای به اشباع رساندن سنگ‌دانه‌ها اضافه و در ادامه باقی ماسه را اضافه کردیم. سپس سیمان را در میکسر ریختیم و در انتها پس از مخلوط کردن مصالح، باقی مانده آب به مصالح اضافه گردید. لازم به ذکر است با افزایش میزان ذرات PET زمان میکس مصالح را کمی افزایش دادیم تا این ذرات به‌طور یکنواخت با دیگر مصالح مخلوط گردند. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، دو طرح شاهد با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۲ و ۰/۵۴ و با عیار سیمان

می‌گیرند و بار در وسط نمونه اعمال می‌شود تا نمونه منهدم گردد.

مطالعه وزن مخصوص با اندازه‌گیری وزن نمونه مکعبی در حالت خشک در مقایسه آن با وزن نمونه مشابه مرجع در سنین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همچنین به منظور اندازه‌گیری سرعت فراصوت از یک دستگاه الکترونیکی غیر مخرب (Ultrasonic) PUNDIT 7 MODEL (PC1012) با ارزیابی و دقت 0.1 میکرو ثانیه استفاده شده است. مبدل با فرکانس لرزشی (KHZ) 54 با دقت $\pm 1\%$ برای زمان حرکت کردن و $\pm 2\%$ برای مسافت بوده است. نه اندازه‌گیری برای هر نمونه انجام شده است که کمترین زمان بین آن‌ها ثبت شده است. در این آزمایش از وازلین (Vaseline) به عنوان وسیله اتصال بین سطح مبدل و سطح نمونه بتن استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. ویژگی بتن‌های تازه

کارایی بتن متناسب است با سهولت در حمل و نقل و ریختن در قالب، تراکم و پرداخت سطح آن، بدون ایجاد جداشدگی. اندازه‌گیری کارایی یا لزجت بتن اسلامپ می‌باشد که از ملزومات طرح و نقطه مقابل سختی مخلوط است. طرح‌ها در دمای هوای 20°C و رطوبت هوای ۷۴ درصد ساخته شده‌اند. شکل ۲ اسلامپ مخلوط‌های بتن وقتی که PET در نسبت‌های مختلف و نسبت آب به سیمان مختلف اضافه گردید را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که برای یک نسبت آب به سیمان

بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بر اساس استانداردهای ASTM C39 (2004) و ASTM C496 (2004) معین شده‌اند. در آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های بتن با اعمال نیروی محوری فشاری با سرعتی مشخص (با یک جک هیدرولیکی اتوماتیک)، به حد مقاومت نهایی می‌رسند (تا جایی که دیگر قادر به تحمل نیروی بیشتری نباشند). مقاومت فشاری از تقسیم حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه، به سطح مقطع آن به دست می‌آید. در تست مقاومت کششی دو نیم شدن، یک نمونه استوانه‌ای استاندارد $15\text{cm} \times 30\text{cm}$ به‌طور خوابیده در رینگ مخصوص در دستگاه فشار قرار می‌گیرد و نیرویی به صورت یکنواخت در امتداد قطر قائم استوانه وارد می‌شود تا گسیختگی روی دهد.

همچنین نمونه‌های استوانه‌ای جهت تعیین مدول الاستیسیته طبق استاندارد (2004) ASTM C469 ساخته شده نیز تست می‌شوند، به منظور محاسبه مدول الاستیسیته، هر نمونه در رینگ مخصوص قرار گرفته که این رینگ شامل یک گیج نشانگر با دقت 0.02mm می‌باشد. بار و تغییر شکل تا 40% بار نهایی اندازه‌گیری می‌شود که به منظور انجام آن ۵ سیکل شارژ و دی‌شارژ صورت گرفته است.

به منظور اندازه‌گیری مقاومت خمشی تیرهایی با ابعاد $10 \times 10 \times 50$ سانتی‌متر ساخته شده است که پس از ۴۹ روز توسط یک سوم بار نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM C78 توسط دستگاه یونیورسال خمشی مورد آزمایش قرار گرفته است. تیرها روی دو تکیه‌گاه در نزدیک دو انتها به فاصله ۴۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار

جدول ۴ - جزئیات طرح‌های اختلاط مصالح

ترکیبات	مقدار (kg/m^3)							
	w/c = ۰/۴۲				w/c = ۰/۵۴			
	۰٪	۵٪	۱۰٪	۱۵٪	۰٪	۵٪	۱۰٪	۱۵٪
	PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET
سیمان	۴۸۸/۱۰	۴۸۸/۱۰	۴۸۸/۱۰	۴۸۸/۱۰	۳۷۹/۶۳	۳۷۹/۶۳	۳۷۹/۶۳	۳۷۹/۶۳
آب	۲۰۹/۸۸	۲۰۹/۸۸	۲۰۹/۸۸	۲۰۹/۸۸	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۵
شن	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵
ماسه	۶۵۴/۸۴	۶۲۲/۱۰	۵۸۹/۳۶	۵۵۶/۶۱	۷۴۵/۸۸	۷۰۸/۵۹	۶۷۱/۲۹	۶۳۴/۰۰
PET	-	۸/۸۱	۱۷/۶۲	۲۶/۴۲	-	۱۰/۰۳	۲۰/۰۶	۳۰/۱۰

وجود می‌آیند. وقتی آب تبخیر می‌شود، آن فضاهای خالی مقاومت بتن را کاهش می‌دهند. در شرایط مشابه وقتی نسبت آب به سیمان پایین باشد (۰/۳۵) مقاومت فشاری بالایی را می‌توان مشاهده نمود (Neville, 1981). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این پارامتر تاثیر گذارترین عامل بر روی مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن است.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در این مطالعه به بررسی تأثیر اندازه بر روی مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی تحت شرایط بارگذاری یکسان پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش اندازه نمونه‌ها، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش خواهد یافت.

۳-۳. آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن

آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 در عمل آوری ۲۸ روزه صورت گرفت. در شکل شماره ۴ می‌توان تأثیر اضافه نمودن PET در نسبت‌های W/C مختلف را ارزیابی نمود. مطابق شکل ۴ روند کلی تغییرات مقاومت کششی با افزایش مقدار ذرات PET به صورت کاهش است. به‌عنوان مثال با جایگزین نمودن ۱۵٪ حجم ماسه با PET در سن ۲۸ روز برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۲ و ۰/۵۴ به ترتیب ۱۵/۰۹ و ۱۸/۰۶ درصد کاهش در مقاومت کششی رخ می‌دهد. بنابراین با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش در مقاومت کششی دو نیم شدن بیشتر مشهود است.

۳-۴. مدول الاستیسیته

شکل ۵ مدول الاستیسیته استاتیکی به‌دست آمده برای مخلوط‌های بتن در زمانی که PET در مقادیر مختلف و نسبت‌های آب به سیمان متفاوت اضافه می‌شود را نشان می‌دهد. از آنجا که تغییر شکل حاصل در بتن تا یک اندازه به تغییر شکل الاستیک سنگ‌دانه‌ها ارتباط دارد [۲۱] نوع سنگ‌دانه‌های مصرفی بر روی مدول الاستیسیته تأثیر گذار است. بدین ترتیب جانشین‌سازی ذرات سنگ‌دانه‌های ریز با PET کاهش تدریجی مدول، تا زمانی که مقاومت PET کمتر از ماسه شود را در بر دارد.

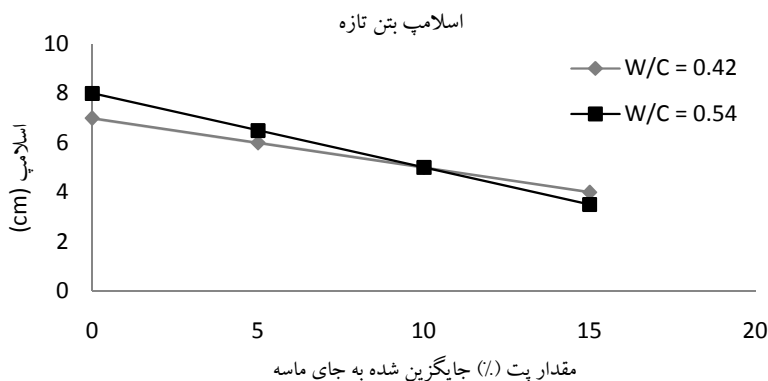
ثابت با افزایش مقدار PET، به دلیل تأثیری که PET بر روی مخلوط می‌گذارد، اسلامپ کاهش می‌یابد. ویژگی‌های جریان و تغییر شکل ماده و همگن بودن مخلوط با افزودن این پلیمر تغییر یافته است، مخصوصاً جریان و تراکم. افزایش مقدار PET موجب کاهش در شکل‌پذیری و لزجت بتن تازه می‌شود. شایان ذکر است که این افزایش مقدار PET وقتی که نسبت W/C افزایش یابد، بیشتر بر روی کارایی تأثیر گذار است.

۳-۲. آزمایش مقاومت فشاری

به منظور بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان و درصد‌های متفاوت جانشین‌سازی PET و همچنین تأثیر اندازه نمونه‌ها بر روی مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روز از نمونه‌های مکعبی 5×5 ، 10×10 و 15×15 سانتی‌متر و همچنین نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متر استفاده شده است. تمام نمونه‌ها یک روز پس از ساخت، قالب‌برداری شده و در حوضچه آب عمل‌آوری شده‌اند. شایان ذکر است از هر مخلوط ۲ نمونه برای قالب‌های مکعبی شکل و ۳ نمونه برای قالب‌های استوانه‌ای ساخته شده است و مقادیر میانگین آن در جدول ۵ و شکل ۳ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود به‌طور کلی با افزایش میزان جانشین‌سازی ماسه با ذرات PET در ابتدا مقاومت فشاری افزایش و در ادامه کاهش می‌یابد. برای مثال جایگزینی ۵ درصد حجم ماسه با ذرات PET در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۲ و ۰/۵۴ به ترتیب موجب افزایش ۸/۸۶ و ۱۱/۹۷ درصدی در مقاومت شده است. همچنین جایگزین کردن ۱۵ درصد حجم ماسه توسط ذرات PET در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۲ و ۰/۵۴ به ترتیب کاهش ۵/۱۱ و ۸/۴۵ درصدی در مقاومت را موجب شده است. این امر نشان می‌دهد در نسبت‌های آب به سیمان پایین‌تر افزایش و کاهش مقاومت شدیدتر است.

مقایسه میان مقاومت‌های فشاری مخلوط‌ها در نسبت‌های مختلف آب به سیمان (شکل ۳)، نشان دهنده مقادیر کمتری برای نسبت ۰/۵۴ است. وقتی نسبت آب به سیمان بالاتر می‌رود یک آب مازادی وجود دارد که در واکنش آب و سیمان شرکت ندارد، بنابراین کانال‌هایی با قطر خیلی کوچک مثل لوله بسیار باریک به



شکل ۲ - مقادیر اسلامپ مخلوط بتن PET در نسبت‌های آب به سیمان مختلف

جدول ۵ - مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سن ۲۸ روز (MPa)

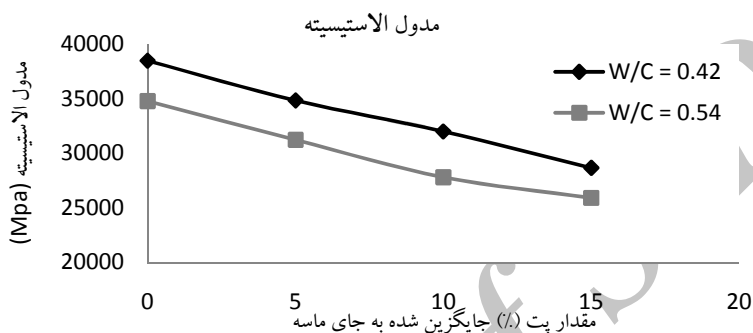
نمونه ۱۵×۱۵	نمونه ۱۰×۱۰	نمونه ۵×۵	مقدار پت (%)	نسبت آب به سیمان
۵۲/۲۰	۵۴/۴۹	۵۵/۴۰	۰	W/C = ۰/۴۲
۵۳/۲۴	۵۵/۵۶	۵۹/۵۱	۵	
۵۰/۵۲	۵۲/۵۵	۵۵/۵۰	۱۰	
۴۶/۵۹	۵۰/۴۶	۵۲/۰۷	۱۵	
۴۱/۱۰	۴۱/۸۵	۴۶/۱۷	۰	W/C = ۰/۵۴
۴۴/۷۶	۴۸/۰۱	۴۹/۸۰	۵	
۳۹/۹۴	۴۳/۰۹	۴۵/۸۸	۱۰	
۳۸/۵۲	۴۱/۵۷	۴۲/۰۹	۱۵	



شکل ۳ - مقاومت فشاری ۲۸ روز نمونه استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی متر



شکل ۴- مقاومت کششی نمونه ها در مقادیر مختلف PET در نسبت های آب به سیمان متفاوت



شکل ۵- مدول الاستیسیته مخلوط های بتنی PET در نسبت های آب به سیمان مختلف

۳-۵. آزمایش مقاومت خمشی

آب به سیمان در درصدهای جانشین سازی یکسان (شکل ۶)، مقادیر کمتری را برای نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ نشان می دهد.

۳-۶. سرعت امواج فرا صوتی (Ultrasonic)

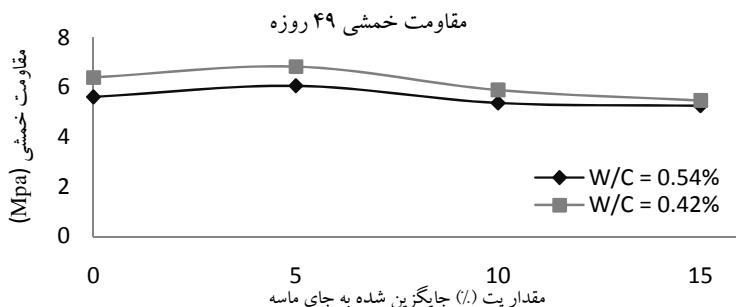
مطابق شکل ۷ با افزایش میزان ذرات PET در مخلوط، کاهش سرعت امواج فراصوت مشاهده می شود. علت این امر عمل اضافه نمودن PET به طور مستقیم بر روی خلل و فرج بتن است. این حفره های به وجود آمده در اثر ذرات PET موج فراصوتی را در اثر مقاومت عبور صوتی تضعیف می نماید. وقتی تابش موج از میان مواد مختلف عبور می کند (بتن، PET و سوراخ ها) اندکی باز تابش می کند و اندکی نیز عبور می کند، بنابراین سرعت آن کاهش می یابد.

از طرف دیگر، کاهش سرعت حرکت فراصوتی در اثر افزایش نسبت W/C نیز مشاهده می شود. این امر به علت وجود آب مازاد اضافه شده است که در خلل و فرج نگاه داشته می شود و وقتی که آب زدایی می شود، سوراخ های خالی در بتن سفت باقی می ماند که کاهش حرکت فراصوتی را موجب می شود.

به منظور بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان و درصدهای مختلف جانشین سازی ماسه توسط PET بر روی مقاومت خمشی بتن از نمونه های تیر با ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی متر استفاده شده است. تمام نمونه ها یک روز پس از ساخت، قالب برداری شده و در حوضچه آب عمل آوری شده اند. شایان ذکر است از هر مخلوط ۳ نمونه ساخته شد، وبا دستگاه یونیورسال مورد تست خمش قرار گرفت. مقادیر میانگین آن در شکل ۶ آورده شده است.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود به طور کلی با افزایش میزان جانشین سازی ماسه توسط ذرات PET در ابتدا مقاومت فشاری افزایش و در ادامه کاهش می یابد. برای مثال جایگزینی ۵ درصد حجم ماسه با ذرات PET در نسبت های آب به سیمان ۰/۴۲ و ۰/۵۴ به ترتیب موجب افزایش ۶/۷۱ و ۸/۰۲ درصدی در مقاومت شده است. همچنین جایگزین کردن ۱۵ درصد حجم ماسه توسط ذرات PET در نسبت های آب به سیمان ۰/۴۲ و ۰/۵۴ به ترتیب کاهش ۱۴/۶۶ و ۶/۲۵ درصدی در مقاومت را موجب شده است.

مقایسه میان مقاومت های خمشی مخلوط ها در نسبت های مختلف



شکل ۶- مقاومت خمشی ۴۹ روز نمونه تیر ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر



شکل ۷- میزان سرعت امواج فراصوتی در سن ۲۸ روز در اثر تغییرات میزان PET در نسبت‌های آب به سیمان متفاوت

به عنوان سنگ‌دانه برای بتن مورد استفاده مجدد قرار گیرد. بنابراین می‌توان حفاظت از محیط زیست را با بازیافت منابع زباله انتظار داشت.

۵. مراجع

- [1]. <http://www.plasticseurope.org>
- [2]. <http://www.petcore.org>
- [3]. National Association for PET Container Resources (Report on Post Consumer PET Container Recycling Activity), www.napcor.com, 2009.
- [4]. P.T.Williams, "Waste Treatment and Disposal," Wiley, Chisterter, 1998.
- [5]. C. Albano, N. Camacho, M. Hernandez, A. Matheus, A. Gutiérrez; "Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios;" Waste Management 29 (2009) 2707-2716, 2009.
- [6]. K.S Rebeiz, D.W.Fowler, D.R.Paul, "Making polymer concrete with recycled PET" *Plastics Engineering* 47 (2), 33-34, 1991.
- [7]. K. S. Rebeiz, "Precast use of polymer concrete using Unsaturated polyester resin based on recycled

۴. نتیجه‌گیری

مخلوط‌های حاوی ذرات PET در نسبت‌های مختلف جایگزینی رفتار متفاوتی را در مقاومت فشاری و خمشی از خود نشان می‌دهند به طوری که با جانشین سازی ۵ درصدی شاهد افزایش مقاومت فشاری و خمشی بوده و این در حالی است که جانشین سازی ۱۵ درصدی این ذرات کاهش در مقاومت فشاری و خمشی را به همراه داشته است. همچنین بتن‌های حاوی ذرات PET کاهش در مقاومت کششی دو نیم شدن و مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر دخول ذرات PET نقایصی را در ساختار داخلی بتن در بر دارد که کاهش در مقاومت کششی و سختی را تولید می‌کند. این رفتار می‌تواند در زمانی که نرمی مواد مورد نیاز است سودمند باشد. از آنجا که در اثر کارایی پایین افزایش در خلل و فرج را خواهیم داشت، این امر سبب می‌شود که سرعت حرکت فراصوتی به علت تضعیف بالای خلل و فرج در انتشار امواج فراصوتی، کاهش یابد. به عنوان یک نتیجه‌گیری جامع، می‌توان مدعی این امر بود که بطری‌های زباله PET می‌تواند

- [15]. Yun-Wang Choi, Dae-Joong Moon, Jee-Seung Chung, Sun-Kyu Cho, "Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete," *Cement and Concrete Research* 35, 776–781, 2005.
- [16]. Semiha Akçao zoglu, Cengiz Duran Atis, Kubilay Akçao zoglu, "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete," *Waste Management* 30, 285–290, 2010.
- [17]. O. Yazoghli Marzouk, R.M. Dheilly, M. Queneudec, "Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites," *Waste Manage* 27, 310–318, 2007.
- [18]. J.M.L. Reis, R. Chianelli-Junior, J.L. Cardoso, F.J.V. Marinho, "Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar," *Construction and Building Materials* xxx, xxx–xxx, 2011.
- [19]. Kinda Hannawi, Siham Kamali-Bernard, William Prince, "Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates," *Waste Management* 30, 2312–2320, 2010.
- [20]. Semiha Akçaozo lu, Cengiz Duran Ati, "Effect of Granulated Blast Furnace Slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates," *Construction and Building Materials* 25, 4052–4058, 2011.
- [21]. R. Jones, I. Facaroau, "Incerearea Nedistructiva a Betonului," Editura Technica, Bucuresti, 1971.
- PET waste," *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 3, pp. 215-220, 1995-1996.
- [8]. Dora Foti, "Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers," *Construction and Building Materials* 25 1906, 2010- (2011).
- [9]. Luiz A. Pereira de Oliveira, João P. Castro-Gomes, "Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar," *Construction and Building Materials* 25 1712–1717, 2010-(2011)
- [10]. Sung Bae Kim, Na Hyun Yi, Hyun Young Kim, Jang-Ho Jay Kim, Young-Chul Song, "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete," *Cement & Concrete Composites* 32 232–240, 2010.
- [11]. T. Ochi, S. Okubo, K. Fukui, "Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber," *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 448–455, 2007.
- [12]. D.A. Silva, A.M. Betioli, P.J.P. Gleize, H.R. Roman, L.A. Gomez, J.L.D. Ribeiro, "Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials," *Cement and Concrete Research* 35, 1741–1746. 2005.
- [13]. Mariaenrica Frigione, "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete," *Waste Management* 30 (2010) 1101–1106, 2010.
- [14]. Yun Wang Choi, Dae Joong Moon, Yong Jic Kim, Mohamed Lachemi, "Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles," *Construction and Building Materials* 23, 2829–2835, 2009.

Environmental solution for waste PET bottles by using them in concrete

E. Rahmani

M.Sc. student in Structural Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

M. Dehestani

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

M.H. Beygi*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 2012/4/13 Accepted: 2012/6/23)

Abstract

Poly Ethylene Terephthalate is a kind of polymer which is used in manufacturing polyester fibers, bottle resin and engineering polyester in most of the countries around the world. Vast usage of this polymer in food packing industries and long-term decomposition of this kind of waste in nature encouraged many researchers around the world to find new ways to recycle and reuse them. In this article, with a more comprehensive approach than previous studies, effects of 5, 10 and 15 percent of PET particle usage instead of sand were investigated. For this purpose, cubic and cylindrical samples with different water to cement ratios were made and the physical properties were obtained with the corresponding tests. Moreover, the samples which were cured in a standard condition were used for mechanical properties testing and the factors were extracted. Results show that fresh concrete with PET particles has less workability. Mechanical properties tests show that the elasticity modulus decreases for these concrete samples. The compressive and flexural strength increases at first but they decrease after a while. Ultrasonic wave tests show that concrete samples with PET particles have porous structure.

Keywords: concrete, PET, physical and mechanical properties.

* Corresponding author: dehestani@nit.ac.ir