

بهبود خواص مکانیکی و سازه‌ای بتن‌ها با جایگزینی بطری‌های پت بازیافتی به‌عنوان ریزدانه*محمد کاظم شربتدار^(۱) محمد نورباران^(۲)

چکیده در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی جایگزینی بطری‌های پت به‌عنوان پسماندهای بازیافتی با ماسه در بتن پرداخته شده است. از پت به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد معادل حجم ماسه با ساخت ۹۶ نمونه با ۴ طرح اختلاط با نسبت ثابت آب به سیمان در ترکیبات بتن استفاده شده و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای، مقاومت کششی دو نیم شدن استوانه‌ای، مقاومت ضربه قرص بتنی و مقاومت خمشی دال‌های بتنی مسلح و غیرمسلح به دست آورده شده‌اند. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش تدریجی درصد پت تا ۱۵ درصد، اسلامپ هم تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد. ولی میزان کاهش مقاومت فشاری و کششی به ترتیب تا ۱۸ و ۲۱ درصد بود. همچنین مقاومت خمشی و مقاومت ضربه در ایجاد ترک اولیه و ترک نهایی نیز با افزودن پت تا ۱۳ و ۱۹ درصد افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی بطری پت، خمشی، ضربه، مقاومت فشاری، بازیافتی، کارایی.

Improving of Concrete Mechanical and Structural Characteristics with Replacing Pet Bottles as Fine Aggregates

Mohammad Kazem Sharbatdar Mohammad Noorbaran

Abstract An experimental work on replacing recycle pet bottles with sand in concrete in this paper. 5, 10, and 15% Pet equivalent with sand in concrete including 4 different mixes with constant water to cement ratio and totally 96 specimens was used and made; compressive strengths of cubic and cylinder specimens, tensile split strength of cylinder specimens, impact strengths plus flexural strengths of reinforced and plain concrete slabs were obtained. The results indicated that the workability of fresh concrete was decreased up to 50% by increasing the pet percentage up to 15% but the compressive and tensile strengths of hard concrete were decreased up to 18 and 21%. And also the flexural strengths and impact strength (initial and final cracks) were increased up to 13 and 19% due to increasing recycle pet percentage.

Key Words PET bottles, Flexural, Impact, Compressive strength, Recycled, Workability.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۱/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱/۱۷ می‌باشد.

Email: msharbatdar@semnan.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۲) کارشناس ارشد سازه، دانشگاه سمنان

مقدمه

مختلف مهندسی و مواد غذایی و ظروف آشامیدنی به کار می‌رود ولی در ایران، این پلیمر بیشتر برای ساخت انواع بطری‌های آشامیدنی استفاده شده است که در نتیجه موجب ورود این مواد مصرفی به جریان زباله‌های شهری می‌گردد [3]. روش‌های متفاوتی وجود دارد که می‌توان به کمک آن‌ها از این مواد رهایی یافت مانند: دفن کردن، خاکستر سازی و بازیافت [4]. مشکل این زباله‌ها کندي تجزیه آن‌هاست که این امر موجب می‌شود تا چرخه بازگشت این مواد به طبیعت پس از دفن نمودن آن‌ها برای حدود سیصد سال به طول انجامد، بنابراین به نظر می‌رسد که به دلیل فواید اقتصادی و زیست‌محیطی، بازیافت بهترین راه‌حل برای رهایی از زباله‌هایی همچون پت و غیره است [5]. ملاط پلیمری با جایگزین کردن پلیمر با سیمان در مقادیر خاص، تولید می‌شود. در مقایسه با موادی که بر پایه سیمان هستند، هزینه تولید بتن پلیمری به دلیل قیمت بالای رزین‌های دست‌نخورده، 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 و خواص مکانیکی جدیدی ارائه می‌دهد [6,7]. همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، روش دیگر استفاده از بطری‌های زباله PET بازیافت آن‌ها به‌عنوان الیاف PET و استفاده از آن‌ها برای تولید بتن مسلح شده با الیاف است. البته این امر در حالی است که مقدار حجمی محتوای فیبر در بتن مسلح فیبری بین ۰/۳ تا ۱/۵ درصد است، لذا این روش مقدار کوچکی از زباله‌های پلاستیکی PET را بازیافت می‌کند [8-12]. از این رو مقرون به‌صرفه‌ترین راه استفاده از بطری‌های زباله PET در بتن، استفاده از خرده بطری‌های زباله PET به‌طور مستقیم به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن و یا ملاط تولیدی است. بدین ترتیب استفاده از زباله‌های PET به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن فوایدی همچون کاهش استفاده از منابع طبیعی، مصرف زباله‌ها، جلوگیری از آلودگی زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در انرژی را فراهم می‌کند [13-20].

پت نام مختصر پلی‌اتیلن ترفتالات است که از خانواده پلی‌استر است. پت به دلیل استحکام بالا، تحمل فشار بالا، عدم واکنش‌پذیری با مواد و نیز خاصیت عالی محصور نمودن گاز که این ویژگی می‌تواند گاز را در نوشیدنی‌های گازدار نگه‌داشته و مزه نوشیدنی در بطری حفظ شود، یکی از پلاستیک‌های رایج در صنعت بسته‌بندی است [1]. پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) پلیمری است که در اغلب کشورها برای تولید الیاف پلی‌استر (۷۰ درصد) رزین بطری (۲۲ درصد) فیلم (۶ درصد) و رزین‌های پلی‌استر مهندسی (۲ درصد) به‌کاررفته است. با توجه به مقاومت بالای این بطری‌ها در برابر شکستگی، دما و نفوذ گازها، دارا بودن وزن کم و ارزان بودن قیمت نسبت به سایر مواد بسته‌بندی همچون شیشه و فلز، تولید بطری‌های پلاستیکی از این رزین کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است که بالطبع موجب ورود بطری‌های PET مصرفی به جریان زباله‌های شهری می‌گردد. بالا بودن حجم این بطری‌ها نسبت به وزن که فضای زیادی را در هنگام حمل‌ونقل و دفن به خود اختصاص می‌دهند و تجزیه بسیار طولانی آن در طبیعت (حدود ۳۰۰ سال)، باعث گردیده تا مسئله بازیافت این بطری‌ها، بخصوص در سال‌های اخیر توجه همگان را به خود جلب نماید. در سال ۱۹۴۱ برای اولین بار پت به‌عنوان الیاف مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. بعدها در اواسط دهه ۱۹۶۰ از پت به‌عنوان بسته‌بندی فیلم‌ها استفاده شد و سپس در اوایل دهه ۱۹۷۰ با به دست آمدن تکنیک دمیدن سه محوری این ماده وارد صنعت بطری‌سازی شد [2]. پت در اغلب کشورها برای تولید ظروف نوشیدنی، آب‌میوه، آب‌معدنی، روغن‌های خوراکی، پاک‌کننده‌ها و غیره به کار می‌رود. به‌عنوان مثال بررسی‌های انجام‌شده توسط انجمن ملی ظروف پلاستیکی آمریکا نشان داد که فقط ۲۸٪ کل مقادیر بطری‌ها و شیشه‌های پت در ایالات متحده در سال ۲۰۰۹ بازیافت می‌شوند. پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) پلیمری است که در اغلب کشورها در صنایع

روی رفتار بعد از ترک خوردگی اولیه اعضاء بتنی ساده داشته باشد. این الیاف همچنین طاق ت نمونه‌ها را بهبود بخشیده و نرمی بتن را نیز افزایش می‌دهند [8]. در تحقیق انجام شده روی استفاده هم‌زمان پت (در اندازه ۰ تا ۴ میلی‌متر) و ماسه و سرباره آهن‌گذاری (۵۰٪ جایگزین سیمان) به این نتیجه رسیدند که این ترکیبات بتن‌های سبک سازه‌ای با وزن مخصوص‌های متفاوت می‌دهد که باعث کاهش وزن ساختمان و در نتیجه میزان بار زلزله و آلودگی محیطی می‌گردد [16]. اخیراً در یک تحقیق گسترده، ۸۴ مطالعه در خصوص بتن‌های ساخته شده با پت و پلاستیک ضایعاتی و اصلی انجام شده است و نتایج کاربرد ذرات پت به‌عنوان سنگ‌دانه و الیاف در ترکیب‌های مختلف بررسی شده است [20]. در تحقیق دیگری توسط اسماعیل و همکارانش بر روی حدود ۳۰۰ آزمایش با جایگزینی صفر و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درصد پت بجای سنگ‌دانه انجام شد و آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت‌های فشاری و خمشی و طاق ت در سنین مختلف بررسی شد و نتایج نشان‌دهنده کاهش ترک‌ها و هزینه‌های تمام شده بود [21]. هدف اصلی از این مطالعه، تحقیق در مورد تأثیر استفاده از خرده زباله‌های پلاستیکی PET بر روی ویژگی‌های بتن حاوی این ذرات در درصد های مختلف بود که با ماسه طبیعی به‌صورت حجمی جانشین شدند.

طرح آزمایشگاهی

مشخصات مصالح مصرفی

مشخصات شن و ماسه طبق روش‌های آزمایش‌های C29، C33، C127، C128، C136، D2419 از استاندارد ASTM تعیین شده است. چگالی ظاهری در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) درشت‌دانه طبق استاندارد ASTM C127 برابر ۲/۵۱ محاسبه گردیده و حداکثر قطر سنگ‌دانه آن ۱۶ میلی‌متر بوده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ‌دانه‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین شکل (۱) نتایج دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C33 را نشان می‌دهد. سیمان استفاده شده در این مطالعه از نوع پرتلند تیپ ۱ تولید

در یک مطالعه انجام شده، به تحقیق بر روی جانشین سازی ۵٪ وزن سنگ‌دانه‌های ریز با وزن برابر از سنگ‌دانه‌های PET به دست آمده از زباله‌های بطری‌های PET پرداخت شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که بتن ساخته شده با PET شسته نشده با مقادیر سیمان بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ دارای کارایی تقریباً مشابه با کارایی بتن تازه معمولی بود. همچنین این بتن دارای مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن و همچنین مدول الاستیسیته کمتری از بتن مرجع بود و به عبارتی دارای تردی کمتری بود [13].

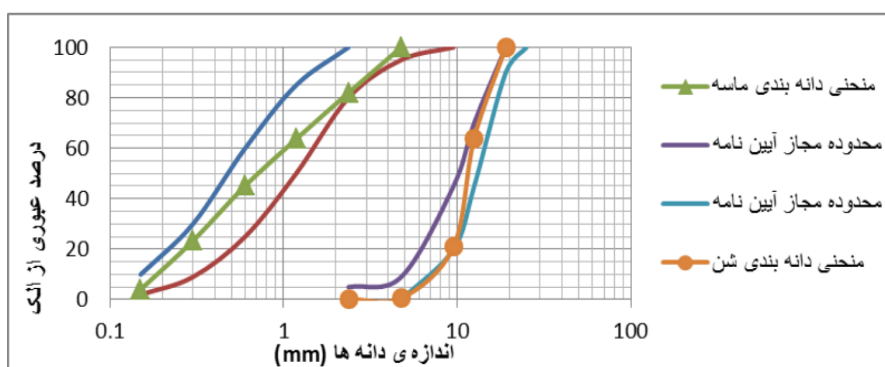
در تحقیقی دیگری توسط هاناوی و همکاران به مدیریت برای استفاده از مواد بازیافتی PC و PET در زمینه ساخت بتن پرداختند. تحلیل SEM در بتن‌های مذکور یک چسبندگی ضعیف را بین سنگ‌دانه‌های پلاستیک و بافت نشان می‌دهد. مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ملاط‌های حاوی این ذرات با افزایش مقادیر پلاستیک، کاهش پیدا نمودند که این امر موجب نرم‌تر شدن این نمونه‌ها و تحمل تغییر شکل‌های بیشتری قبل از گسیختگی و تخریب کامل شدند. همچنین این مطالعه نشان داد که جانشین سازی درصدی از ماسه توسط این ذرات پلاستیک موجب بهبود در مقاومت خمشی و جذب انرژی این کامپوزیت‌ها شد که این امر برای بسیاری از کاربردهای مهندسی عمران مثل سازه‌های مقاوم در برابر ضربه بسیار جالب است [19].

ریس و همکاران درصدهای 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، نرم‌تر شدن مواد، افزایش جذب انرژی و کاهش تردی بوده است [18]. فوتی به آنالیز مقدماتی بتن‌های مسلح شده توسط الیاف‌های بطری‌های زباله PET پرداخت و نتایج حاکی از آن بود که افزودن مقدار کمی از الیاف‌های بازیافتی PET می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ‌دانه‌های ماسه و شن

سنگ‌دانه	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	-	۲/۸۲
ارزش ماسه‌ای (%)	-	۸۰

کارخانه سیمان شاهرود بوده که با چگالی $3/14$ و سطح ویژه (سطح بلین) برابر $3150 \text{ (cm}^2/\text{gr)}$ است. ذرات پت استفاده شده به عنوان سنگ‌دانه‌های ریز در این تحقیق، حاصل از آسیاب کردن بطری‌های پت فراهم شده است. این ذرات از جمع‌آوری بطری‌های زباله پت، شستن و سپس آسیاب نمودن آن‌ها توسط ماشین‌آلات صنعتی به دست آمده‌اند. ماکزیمم اندازه ذرات پت، ۷ میلی‌متر بوده و وزن مخصوص ظاهری محاسبه شده برای آن $464/265$ کیلوگرم بر متر مکعب و چگالی در حدود $1/15$ گرم بر میلی‌متر مکعب بوده است. دانه‌بندی ذرات پت در جدول (۲) آمده است.



شکل ۱ دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ماسه و شن

جدول ۲ مشخصات ذرات پت

الک	درصد مانده روی الک
۷ میلی‌متر	۰
۴/۷۵ میلی‌متر	۱۲/۵
۲/۳۶ میلی‌متر	۶۷/۵
۱/۱۸ میلی‌متر	۱۵
۶۰۰ میکرون	۲/۵
۳۰۰ میکرون	۱/۵
۱۵۰ میکرون	۱
کمتر از ۱۵۰ میکرون	۰
وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	۴۶۴/۲۶

طرح‌های اختلاط بتن

جزئیات اجزا طرح‌های اختلاط بتن مطابق با استاندارد ACI-211-1-89 تعیین گردیده و در جدول (۴) داده شده است. برای مخلوط نمودن مصالح با یکدیگر ابتدا شن و نیمی از ماسه را با یکدیگر مخلوط نموده و در ادامه ذرات PET را در میکسر ریخته تا با مصالح موجود مخلوط شود سپس ۲۰٪ از آب موجود را برای به اشباع رساندن سنگ‌دانه‌ها اضافه نموده و در ادامه باقی ماسه به مخلوط اضافه شده است. سپس سیمان را در مخلوط‌کن ریخته و در انتها پس از مخلوط شدن مصالح باقیمانده آب به مصالح اضافه گردید. لازم به ذکر است با افزایش میزان ذرات PET مدت زمان اختلاط مصالح را کمی افزایش داده تا این ذرات به‌طور یکنواخت با دیگر مصالح مخلوط گردند. همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، یک طرح شاهد با نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ و با عیار سیمان ۳۷۹/۶ (kg/m³) در نظر گرفته شده است و کلیه خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد حجمی PET جانشین شده با ماسه موجود با بتن‌های کنترلی فوق مقایسه شده است.

جدول ۳ جزئیات طرح‌های اختلاط مصالح

مؤلفه (کیلوگرم)	پت (PET) (درصد)			
	۰	۵	۱۰	۱۵
سیمان	۳۷۹/۶	۳۷۹/۶	۳۷۹/۶	۳۷۹/۶
آب	۲۱۰/۲	۲۱۰/۲	۲۱۰/۲	۲۱۰/۲
شن	۹۷۶/۱	۹۷۶/۱	۹۷۶/۱	۹۷۶/۱
ماسه	۷۴۵/۹	۷۰۸/۶	۶۷۱/۳	۶۳۴
پت (PET)	۰	۱۵/۰۵	۳۰/۱	۴۵/۱

نمونه‌ها و روش‌های آزمایش

در این تحقیق ۹۶ نمونه به‌عنوان نمونه‌های فشاری، کششی برزیلی دو نیم شدن، خمشی منشوری، تیر خمشی مسلح، دال غیرمسلح، وزن مخصوص و نمونه‌های ضربه انتخاب و ساخته شدند که جزئیات آن‌ها در جدول (۴) داده شده است. برای سنجش

ویژگی بتن‌های تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C143-15a استفاده شده است تا کارایی بتن معین گردد. در این آزمایش، یک قالب فلزی به شکل مخروط ناقص به ارتفاع ۳۰، قطرهای ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر در بالا و پایین استفاده شده که بتن در سه لایه پر شده و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم می‌شود.

نمونه‌های بتنی سخت شده برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن در سن ۲۸ روز آزمایش می‌شوند. آزمایش‌های فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای بر اساس استانداردهای ASTM C39-18 و ASTM C496-17 انجام شدند. در آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های بتنی تحت نیروی محوری افزایش یافته فشاری اعمالی از جک هیدرولیکی اتوماتیک قرار گرفته تا به حد نیروی ماکزیمم می‌رسند، بنابراین مقاومت فشاری از تقسیم نیروی حداکثر تحمل شده توسط نمونه به سطح مقطع آن به دست می‌آید. در تست مقاومت کششی دو نیم شدن، نمونه استوانه‌ای استاندارد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر به‌طور خوابیده در دستگاه فشار قرار می‌گیرد و نیرو به‌صورت یکنواخت در امتداد قطر قائم استوانه وارد می‌شود تا گسیختگی روی دهد و مقاومت نهایی از رابطه $f_t = \frac{2P}{\pi LD}$ به دست می‌آید. به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت خمشی، تیرهایی با ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر ساخته شده است که پس از ۲۸ روز توسط بار متمرکز 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 می‌گیرند و بار در وسط نمونه اعمال می‌شود تا نمونه منهدم گردد. همچنین به‌منظور بررسی بیشتر نتایج، نمونه‌های دال مستطیلی به عرض ۲۰ سانتی‌متر، ضخامت ۴ سانتی‌متر و طول کل ۶۰ سانتی‌متر نیز ساخته شدند که در آزمایش این نمونه‌ها فاصله تکیه‌گاه‌ها برابر ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، نمونه‌های آزمایش‌های کششی، خمشی و دال بتنی در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

جدول ۴ مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی (اوزان بر حسب کیلوگرم در یک مترمکعب)

تعداد	زمان(روز)	ابعاد نمونه (cm)	پت(درصد)	ماسه	آب	شن	سیمان	طرح
۳	۷	۱۰x۱۰x۱۰	۰	۷۴۵/۹	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	مکعبی
۳	۷	۱۰x۱۰x۱۰	۵	۷۰۸/۶	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	مکعبی
۳	۷	۱۰x۱۰x۱۰	۱۰	۶۷۱/۳	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	مکعبی
۳	۷	۱۰x۱۰x۱۰	۱۵	۶۳۴	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	مکعبی
۳	۲۸	۱۰x۱۰x۱۰	۰	۷۴۵/۹	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	مکعبی
۲	۲۸	۱۰x۱۰x۱۰	۵	۷۰۸/۶	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	مکعبی
۲	۲۸	۱۰x۱۰x۱۰	۱۰	۶۷۱/۳	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	مکعبی
۳	۲۸	۱۰x۱۰x۱۰	۱۵	۶۳۴	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	مکعبی
۶	۲۸	۱۵x۳۰	۰	۷۴۵/۹	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	استوانه‌ای
۶	۲۸	۱۵x۳۰	۵	۷۰۸/۶	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	استوانه‌ای
۶	۲۸	۱۵x۳۰	۱۰	۶۷۱/۳	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	استوانه‌ای
۶	۲۸	۱۵x۳۰	۱۵	۶۳۴	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	استوانه‌ای
۳	۲۸	۱۰x۱۰x۵۰	۰	۷۴۵/۹	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	منشوری
۳	۲۸	۱۰x۱۰x۵۰	۵	۷۰۸/۶	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	منشوری
۲	۲۸	۱۰x۱۰x۵۰	۱۰	۶۷۱/۳	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	منشوری
۲	۲۸	۱۰x۱۰x۵۰	۱۵	۶۳۴	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	منشوری
۲	۲۸	۴x۲۰x۶۰	۰	۷۴۵/۹	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	دال
۲	۲۸	۴x۲۰x۶۰	۵	۷۰۸/۶	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	دال
۲	۲۸	۴x۲۰x۶۰	۱۰	۶۷۱/۳	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	دال
۳	۲۸	۴x۲۰x۶۰	۱۵	۶۳۴	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	دال
۲	۲۸	۱۲x۲۰x۶۰	۰	۷۴۵/۹	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	تیر مسلح
۲	۲۸	۱۲x۲۰x۶۰	۵	۷۰۸/۶	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	تیر مسلح
۲	۲۸	۱۲x۲۰x۶۰	۱۰	۶۷۱/۳	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	تیر مسلح
۲	۲۸	۱۲x۲۰x۶۰	۱۵	۶۳۴	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	تیر مسلح
۴	۲۸	۱۵x۶/۳	۰	۷۴۵/۹	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	قرص
۴	۲۸	۱۵x۶/۳	۵	۷۰۸/۶	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	قرص
۴	۲۸	۱۵x۶/۳	۱۰	۶۷۱/۳	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	قرص
۴	۲۸	۱۵x۶/۳	۱۵	۶۳۴	۲۱۰/۲	۹۷۶/۱	۳۷۹/۶	قرص
۹۶	مجموع نمونه‌ها							



ج- دال بتنی خمشی



ب- تیر منشوری خمشی

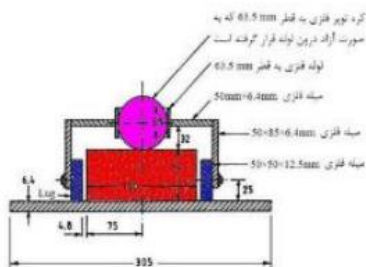
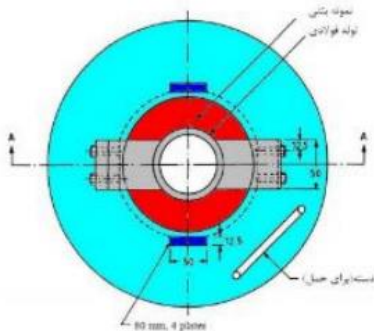


الف- استوانه کششی برزیلی

شکل ۲ نمونه‌های خواص مکانیکی بتن نمونه در زیر فک برای اعمال فشار



الف) نمای کلی



مقطع (A-A) دستگاه تست مقاومت ضربه (ابعاد به میلیمتر)

ب) جزئیات دستگاه ضربه

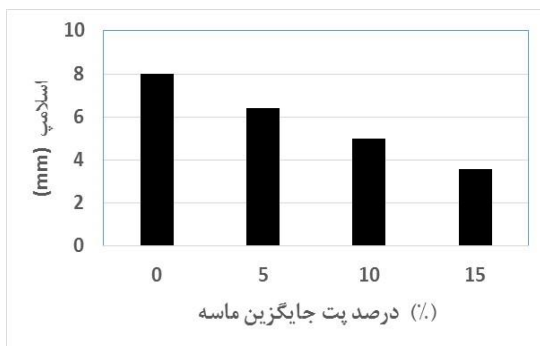
شکل ۳ دستگاه تست ضربه

تجزیه و تحلیل نتایج

جهت بررسی تأثیر جانشین‌سازی ذرات پت با در صداهای متفاوت به‌عنوان بخشی از ماسه مصرفی در بتن‌های موردنظر، نتایج ارائه‌شده در بخش خواص

مطالعه وزن مخصوص توسط اندازه‌گیری وزن نمونه مکعبی در حالت خشک در مقایسه آن با وزن نمونه مشابه مرجع در سنین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش خمشی تیرهای بتنی مسلح ساخته‌شده با بتن حاوی پت با هدف تعیین طاقت خمشی این تیرها و امکان کاربرد این بتن‌ها در تیرهای واقعی سازه‌ای انجام شد و رفتار تیر بتنی مسلح با مقادیر متفاوت پت مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد نمونه‌های ساخته‌شده برابر $12 \times 20 \times 60$ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و طوری طراحی شدند تا شکست غالب کششی در مقاطع خمشی باشد و از دو میلگرد طولی به قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده شده و تعداد کافی خاموت پیش‌بینی شده تا از بروز شکست احتمالی برشی جلوگیری شود. آزمایش سقوط وزنه با ضربات تکرار شونده، ساده‌ترین نوع آزمایش ضربه است. تعداد ضربه برای ایجاد سطح مشخص از گسیختگی یا شکست در نمونه در این آزمایش به دست می‌آید که نشان‌دهنده کیفی از ظرفیت جذب انرژی مصالح است. این آزمایش برای مقایسه کیفی بتن‌های الیافی با بتن معمولی، مناسب است. لذا برای مقایسه رفتار نسبی دو نمونه با ضخامت‌های مختلف تحت ضربه به کار می‌آید. برای انجام این آزمایش بر اساس توصیه‌نامه ACI-544.2R، چکش متراکم کننده استاندارد به وزن ۴.۵۴ کیلوگرم و قطر ۴۵۷ میلی‌متر، کره فولادی به قطر ۶۳٫۵ میلی‌متر، یک صفحه فولادی مسطح و قالب بتن به قطر ۱۵۲ میلی‌متر و ضخامت ۶۳٫۵ میلی‌متر مورد نیاز است که در شکل (۳) دستگاه تست ضربه و جزئیات پلان و مقطع دستگاه نشان داده شده است. در این آزمایش ابتدا نمونه‌های دیسکی شکل بتنی به قطر ۱۵۲ و ضخامت ۶۳٫۵ میلی‌متر از نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متری استاندارد بریده می‌شود. سقوط وزنه از ارتفاع نیم متری مطابق شکل (۳) انجام می‌شود و ضربات تکراری تا رسیدن به سطح مشخص از ترک خوردگی (اولین ترک خوردگی و گسیختگی نهایی ادامه) می‌یابد.

بت باعث کاهش در وزن مخصوص خشک در یک سن ثابت شد.



شکل ۴ تغییرات اسلامپ مخلوط بتن با درصدهای مختلف PET

این کاهش در وزن مخصوص به دلیل وزن مخصوص کمتر ذرات بت در مقایسه با ماسه طبیعی است، همچنین زمانی که بخشی از ماسه طبیعی با ذرات بت که دارای یک دانه‌بندی متفاوت است جایگزین شود، یک تخلخل مخصوص و متفاوت به دلیل شکل صفحه‌ای این ذرات نسبت به نمونه‌های درست‌شده توسط ماسه طبیعی به وجود می‌آورد. مطابق جدول ۵، میزان کاهش وزن مخصوص بتن تازه برای نسبت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب برابر ۰/۷، ۱/۹ و ۳/۲ درصد و برای وزن مخصوص بتن خشک ۲۸ روزه به ترتیب برابر ۰/۷، ۲/۱ و ۳/۴ درصد به دست آمده است که در حال افزایش تا حد ۱۵٪ بت هم تغییر قابل توجهی در وزن مخصوص بتن به وجود نمی‌آید.

مکانیکی شامل نتایج آزمایش‌های حاصل بر روی بتن تازه (اسلامپ و وزن مخصوص) و مقاومت فشاری، کششی غیرمستقیم، خمشی و وزن مخصوص خشک بتن سخت شده و همچنین در بخش سازه‌ای شامل مقاومت خمشی تیر مسلح و در نهایت مقاومت ضربه است.

خواص مکانیکی

خواص بتن تازه. کارایی بتن یا اسلامپ با سهولت در حمل و نقل و ریختن در قالب، تراکم و پرداخت سطح آن، بدون ایجاد جداشدگی، متناسب است. شکل (۴) اسلامپ مخلوط‌های بتن وقتی که PET در درصدهای مختلف اضافه گردید را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که برای یک نسبت آب به سیمان ثابت با افزایش مقدار PET، اسلامپ و لزجت کاهش می‌یابد و ویژگی‌های جریان پذیری و روانی بتن و همگن بودن مخلوط با افزودن این الیاف تغییر یافته است. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است میزان کاهش اسلامپ برای درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵٪ به ترتیب برابر ۱۸/۷، ۳۷/۵ و ۵۶/۲ درصد محاسبه شده است.

آزمایش وزن مخصوص بتن تازه پس از ریختن بتن در قالب و آزمایش وزن مخصوص خشک در سنین مختلف صورت گرفته است که مقادیر آن و درصد تغییرات در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سن عمل‌آوری، وزن مخصوص نیز کاهش یافته است، همچنین افزایش میزان

جدول ۵ وزن مخصوص بتن تازه و خشک (kg/m^3)

تغییرات وزن مخصوص خشک ۲۸ روزه (%)	تغییرات وزن مخصوص تازه (%)	وزن مخصوص خشک		وزن مخصوص تازه	بت (درصد)
		تعداد روزهای عمل‌آوری			
		۲۸	۱۴		
-	-	۲۲۲۱/۸۳	۲۲۵۳/۷۷	۲۴۱۳/۹۶	۰
-۰/۷	-۰/۷	۲۲۰۷/۲۸	۲۲۳۶/۲۳	۲۳۹۶/۹۸	۵
-۲/۱	-۱/۹	۲۱۷۵/۸۷	۲۲۰۱/۸۱	۲۳۶۸/۶۸	۱۰
-۳/۴	-۳/۲	۲۱۴۷/۶۸	۲۱۷۷/۶۲	۲۳۳۷/۲۶	۱۵

ضعیفی بین بافت و سنگ‌دانه‌های پلاستیک وجود دارد این ذرات به صورت مانعی عمل می‌کنند که باعث عدم چسبیدن خمیر سیمان به سنگ‌دانه‌ها طبیعی می‌گردند، در نتیجه اثر اصطکاک در قیاس با پدیده فوق ناچیز بوده و به تدریج از مقاومت بتن کاسته می‌گردد. در نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 کاهش مقاومت فشاری برای نسبت‌های جایگزینی ۱۰،۵ و ۱۵ درصد به ترتیب برابر $2/4$ ، $10/3$ و $18/4$ درصد به ثبت رسید. همچنین این کاهش مقاومت در نمونه‌های مکعبی به ترتیب برابر $3/2$ ، $10/1$ و $15/4$ درصد به دست آمد. با استفاده از منحنی‌های به دست آمده می‌توان یک ضریب کاهش متوسط $0/85$ را برای مقاومت فشاری بتن‌های حاوی ذرات پت نسبت به بتن معمولی برای نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی پیشنهاد داد.

خواص بتن سخت شده. به منظور بررسی تأثیر درصد‌های متفاوت جانشین‌سازی PET و همچنین تأثیر شکل نمونه‌ها بر روی مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روز از نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و همچنین نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متر استفاده شده است. تمام نمونه‌ها یک روز پس از ساخت، قالب برداری شده و به صورت غرقابی عمل‌آوری شدند. شایان‌ذکر است از هر مخلوط تعداد ۳ نمونه برای قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای ساخته شده و مقادیر میانگین آن‌ها در جداول (۶) و (۷) و شکل (۵) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود به‌طور کلی با افزایش میزان جانشین‌سازی ماسه توسط ذرات PET مقاومت فشاری به تدریج کاهش می‌یابد. زمانی که درصد استفاده از ذرات پت افزایش می‌یابد، به دلیل اینکه اساساً چسبندگی

جدول ۶ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی (MPa)

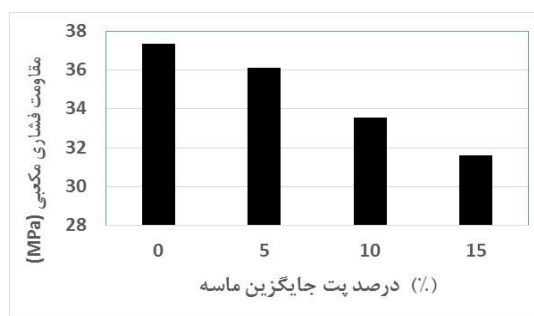
پت (درصد)				شماره نمونه	ابعاد نمونه (cm)
۱۵	۱۰	۵	۰		
۳۳/۶۶	۳۴/۲۰	۳۶/۴۵	۳۷/۶	۱	۱۰x۱۰x۱۰
۳۱/۴۶	۳۳/۶۵	۳۹/۱۵	۳۶/۹۳	۲	
۳۱/۷۵	۳۲/۸۵	۳۵/۸۴	۳۷/۵۶	۳	
۳۱/۶۲	۳۳/۵۶	۳۶/۱۴	۳۷/۳۶	میانگین	
-۱۵/۴	-۱۰/۱	-۳/۲	-	درصد تغییرات (%)	

جدول ۷ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای (MPa)

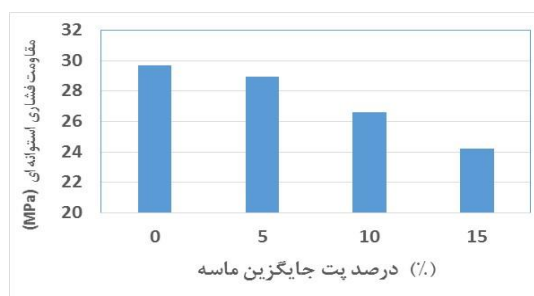
پت (درصد)				شماره نمونه	ابعاد نمونه (cm)
۱۵	۱۰	۵	۰		
۲۴/۶۷	۲۶/۴۲	۲۸/۲۵	۲۹/۸	۱	۱۵x۳۰
۲۳/۸۶	۲۷/۰۸	۲۸	۲۹/۱۵	۲	
۲۴/۱۳	۲۶/۳۳	۲۷/۹۲	۲۹/۲۰	۳	
۲۴/۲۲	۲۶/۶۱	۲۸/۹۶	۲۹/۶۹	میانگین	
-۱۸/۴	-۱۰/۳	-۲/۴	-	درصد تغییرات (%)	

مقادیر آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت برای بتن‌های حاوی پت می‌توان در جهت اطمینان همان ضرایب آیین‌نامه استفاده شود.

با نتایج آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متر داده شده در جدول (۹) و شکل (۶) می‌توان تأثیر اضافه نمودن پت را ارزیابی نمود. مطابق شکل (۶) روند کلی تغییرات مقاومت کششی با افزایش مقدار ذرات پت به صورت کاهشی است. به دلیل شکل ظاهری ذرات پت و انعطاف پذیر بودن آن‌ها، احتمال درگیری میان ذرات پت در سطوح شکست زیاد بوده که این امر سبب می‌شود تا نمونه پس از انهدام از هم گسیخته نشود. کاهش مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی برای نسبت‌های جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب برابر ۷/۲، ۱۲/۸ و ۲۱/۲ درصد است. در آیین‌نامه ACI رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و کششی به صورت $f_t = \alpha \sqrt{f_c}$ در نظر گرفته شده است که برای بتن معمولی مقدار α برابر ۰٫۵۷ است. به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی و تطبیق آن با رابطه آیین‌نامه مقادیر میانگین مقاومت‌های فشاری و مقاومت‌های کششی آزمایش کششی دونیم شدن را در رابطه فوق جاگذاری کرده تا مقادیر ضریب α را برای بتن‌های حاوی پت به دست آید و همان‌طور که در جدول (۱۰) مشاهده می‌شود مقادیر ضریب α برای بتن‌های پت اختلاف چندانی با بتن معمولی ندارد و یک ضریب کاهشی متوسط ۰/۹ را برای ضریب α برای محاسبه مقاومت کششی بتن‌های حاوی ذرات پت بر اساس مقاومت فشاری همان بتن پیشنهاد داده می‌شود.



الف) نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر

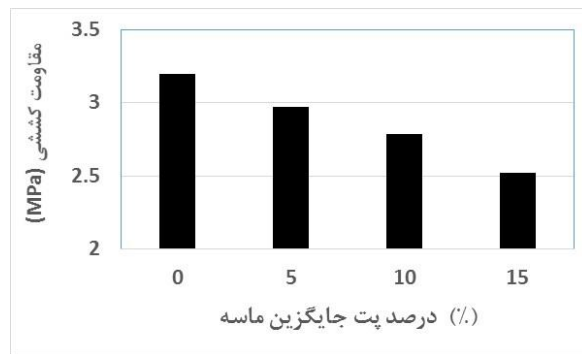


ب) استوانه‌ای ۳۰×۱۵ سانتی‌متر
شکل ۵ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی

در جدول (۸) نسبت‌های مقاومت‌های فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ۳۰×۱۵ سانتی‌متر به نمونه‌های مکعبی استاندارد ۱۵×۱۵ برای درصد‌های مختلف پت آمده است تا تطابق ضریب آیین‌نامه برای بتن‌های حاوی پت بررسی گردد لذا مقاومت نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متر به ضریب ۱/۰۵ تقسیم تا به مقاومت معادل نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری برسد. نسبت داده شده در آیین‌نامه‌ها برای تبدیل نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای برابر ۰/۸ است درحالی‌که این مقادیر در جدول (۸) برای نمونه‌های بتنی حاوی پت تا حدود ۵٪ بیش از نسبت استاندارد است و از مقایسه ضریب آیین‌نامه با

جدول ۸ نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای به مکعبی ۱۵ سانتی‌متری

پت (درصد)	مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای	مقاومت فشاری نمونه مکعبی	نسبت مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای به مکعبی
۰	۲۹/۶۹	۳۵/۵۸	۰/۸۳
۵	۲۸/۹۶	۳۴/۴۲	۰/۸۴
۱۰	۲۶/۶۱	۳۱/۹۶	۰/۸۳
۱۵	۲۴/۲۲	۳۰/۱۱	۰/۸۱



شکل ۶ مقاومت کششی نمونه‌ها در مقادیر مختلف PET

جدول ۹ مقاومت کششی برزیلی ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای برزیلی (MPa)

پت (درصد)				شماره نمونه	ابعاد نمونه (cm)
۱۵	۱۰	۵	۰		
۲/۴۹	۲/۸۳	۳/۰۴	۳/۲	۱	۱۵x۳۰
۲/۵۱	۲/۸	۲/۹۸	۳/۱۲	۲	
۲/۵۷	۲/۷۵	۲/۹۰	۳/۲۹	۳	
۲/۵۲	۲/۷۹	۲/۹۷	۳/۲	میانگین	
-۲۱/۲	-۱۲/۸	-۷/۲	-	درصد تغییرات (%)	

جدول ۱۰ مقایسه مقاومت فشاری با مقاومت کششی غیرمستقیم

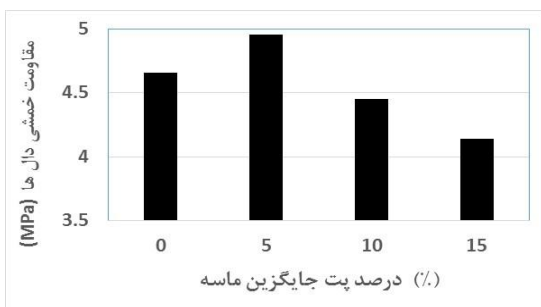
پت (درصد)	میانگین مقاومت فشاری	میانگین مقاومت کششی	مقدار ضریب α	پت/بتن معمولی (ضریب α)
۰	۲۹/۶۹	۳/۲	۰/۵۸	۱
۵	۲۸/۹۶	۲/۹۷	۰/۵۴	۰/۹۳
۱۰	۲۶/۶۱	۲/۷۹	۰/۵۲	۰/۹
۱۵	۲۴/۲۲	۲/۵۲	۰/۵۱	۰/۸۸

جدول ۱۱ مقاومت خمشی بتن‌های حاوی ذرات پت (MPa)

پت (درصد)				شماره نمونه
۱۵	۱۰	۵	۰	
۵/۲۴	۵/۷۴	۶/۳۹	۵/۹۴	۱
۵/۳۲	۵/۸۵	۶/۱۰	۵/۸۶	۲
۴/۹۵	۵/۹۲	۶/۴۸	۶/۱۲	۳
۵/۲	۵/۸۳	۶/۳۲	۵/۹۷	میانگین
-۱۲/۹	-۲/۳	+۵/۹	-	درصد تغییرات (%)

جاگذاری کرده تا مقادیر ضریب β را برای بتن‌های حاوی پت به دست آید و ملاحظه می‌شود که دلیل اثر پت در بهبود مقاومت خمشی مقادیر ضریب در بتن‌های حاوی پت افزایش می‌یابد.

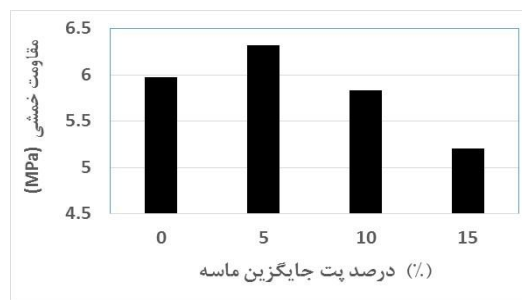
بنابراین برای استفاده از رابطه ذکر شده برای بتن‌های حاوی پت می‌توان ضریب متوسط $1/15$ برای محاسبه مقاومت خمشی متناسب با مقاومت فشاری بتن حاوی پت پیشنهاد نمود. به منظور بررسی و آنالیز بیشتر رفتارهای خمشی بتن‌های حاوی درصد‌های متفاوت پت، نمونه‌های دال مستطیلی به عرض 20 ، ضخامت 4 و طول کل 60 سانتی‌متر و برای هر طرح اختلاط سه نمونه از این دال‌ها ساخته و همانند تیرهای منشوری توسط دستگاه یونیورسال و با فاصله تکیه‌گاه 50 سانتی‌متر مورد تست خمشی قرار گرفتند و مقادیر میانگین آن در جدول (۱۳) و شکل (۸) آورده شده است و مشاهده می‌شود همانند آزمایش خمشی تیر منشوری با جایگزینی 5 ، 10 و 15 درصد به ترتیب موجب افزایش 6.4 و کاهش $4/05$ و 11.1 درصدی در مقاومت را در پی داشته است.



شکل ۸ مقاومت خمشی دال‌های بتنی حاوی ذرات پت (MPa)

به منظور بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان و درصد‌های مختلف جانشین‌سازی ماسه توسط PET بر روی مقاومت خمشی بتن از نمونه‌های تیر منشوری با ابعاد $10 \times 10 \times 50$ سانتی‌متر استفاده شده و از هر مخلوط تعداد ۳ نمونه ساخته و توسط دستگاه یونیورسال مورد آزمایش قرار گرفتند و مقادیر میانگین آن در جدول (۱۱) و شکل (۷) آورده شده است.

مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش میزان جانشینی ماسه توسط ذرات PET در ابتدا مقاومت خمشی افزایش و در ادامه کاهش می‌یابد بنابراین جایگزینی 5 ، 10 و 15 درصد به ترتیب موجب افزایش $5/8$ و کاهش $2/3$ و $12/8$ درصدی در مقاومت گردید.



شکل ۷ مقاومت خمشی بتن‌های حاوی ذرات پت (MPa)

در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان رابطه بین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی (خمشی) به صورت $f_r = \beta \sqrt{f'_c}$ در نظر گرفته شده که برای بتن معمولی مقدار β برابر $0/6$ است. به منظور بررسی نوج آزمایشگاهی و تطبیق آن با رابطه مبحث نهم مقادیر میانگین مقاومت‌های فشاری و مدول‌های گسیختگی (ی) برای تیر منشوری را در رابطه فوق در جدول (۱۲)

جدول ۱۲ مقایسه مقاومت فشاری با مقاومت خمشی

پت (درصد)	میانگین مقاومت فشاری	میانگین مقاومت خمشی	مقدار ضریب β	پت/بتن معمولی (ضریب β)
۰	۲۹/۶۹	۵/۹۷	۰/۹۲	۱
۵	۲۸/۹۶	۶/۳۲	۱/۱۷	۱/۲۷
۱۰	۲۶/۶۱	۵/۸۳	۱/۱۲	۱/۲۱
۱۵	۲۴/۲۲	۵/۲	۱	۱/۰۸

جدول ۱۳ مقاومت خمشی دال‌های بتنی حاوی ذرات پت (MPa)

شماره نمونه	پت (درصد)			
	۱۵	۱۰	۵	۰
۱	۴/۶۳	۵/۰۵	۴/۴۴	۴/۲۲
۲	۴/۵۴	۴/۸۶	۴/۵۷	۴/۱۳
۳	۴/۸۳	۴/۹۷	۵/۳۷	۴/۰۸
میانگین	۴/۶۶	۴/۹۶	۴/۴۵	۴/۱۴
درصد تغییرات (%)	-	+۶/۴	-۴/۵	-۱۱/۱

خواص سازه‌ای

مقاومت خمشی تیر مسلح. به منظور بررسی تأثیر جایگزینی درصد‌های مختلف پت در رفتار سازه‌ای تیرهای مسلح، تیرهای بتنی به عرض ۲۰ و ارتفاع ۱۲ و طول کل ۶۰ سانتی‌متر ساخته شدند و از هر مخلوط ۲ نمونه مشابه به وسیله دستگاه یونیورسال تحت بار متمرکز در وسط دهانه با فاصله تکیه‌گاهی ۵۰ سانتی‌متر مورد آزمایش خمش قرار گرفتند که مقادیر میانگین آن‌ها در جدول (۱۴) آورده شده است. نکته قابل توجه در آزمایش خمش تیر مسلح در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح افزایش قابل توجه مقاومت خمشی در درصد‌های پایین و کاهش ناچیز آن در درصد بالاتر است به طوری که جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد موجب افزایش ۱۳/۳ و ۶ درصدی و جایگزین کردن ۱۵ درصد تنها کاهش ۲/۷۸ درصدی در مقاومت را در پی داشته است. به منظور بررسی بیشتر اثر پت روی تیر مسلح

می‌توان نتایج آزمایشگاهی را با نتایج حاصل از روابط تئوری مقایسه کرد که نتایج در جدول (۱۵) داده شده است. با توجه به جدول (۱۵) می‌توان تأثیر افزودن پت را در رفتار خمشی تیر مسلح ملاحظه نمود. درحالی‌که با افزودن پت از مقادیر مقاومت فشاری کاسته می‌شود و به همین واسطه نتایج حاصل از روابط تئوری، مقادیر کمتری نسبت به بتن مرجع را نشان می‌دهد ولی با مقایسه نسبت نتایج آزمایشگاهی به نتایج تحلیلی بهبود عملکرد بتن مسلح حاوی پت قابل ملاحظه است که این بهبود عملکرد را می‌توان به رفتار بتن حاوی پت در ناحیه کششی نسبت داد. عموماً اختلاف حدود ۲۰٪ بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی ناشی از ضرایب ایمنی آیین‌نامه‌های طراحی بتن‌های معمولی متداول است ولی اختلاف بیش از این باید در روابط جدید منظور گردد. لذا پیشنهاد می‌شود یک ضریب افزایشدهنده ۱/۱۵ در ظرفیت نهایی تحلیلی بتن‌های حاوی پت افزوده گردد.

جدول ۱۴ نیروی متمرکز خمشی تیرهای مسلح بتنی حاوی ذرات پت (kN)

شماره نمونه	پت (درصد)			
	۱۵	۱۰	۵	۰
۱	۳۵/۴۸	۳۹	۳۷/۱۸	۳۴/۹۴
۲	۳۶/۲	۴۲/۲۴	۳۸/۷۷	۳۴/۷۳
میانگین	۳۵/۸۴	۴۰/۶۲	۳۷/۹۵	۳۴/۸۳
درصد تغییرات (%)	-	+۱۳/۳	+۶/۰	-۲/۸

جدول ۱۵ مقایسه نتایج آزمایشگاهی نیروی خمشی تیر مسلح با نتایج نیروی حاصل از روابط تئوری

پت (درصد)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	مقاومت جاری شدن میلگرد (MPa)	مقاومت آزمایشگاهی	مقاومت تحلیلی	نسبت مقاومت آزمایشگاهی به تحلیلی
۰	۲۹/۶۹	۴۰۰	۳۵/۸۴	۲۹/۵۹	۱/۲
۵	۲۸/۹۶	۴۰۰	۴۰/۶۲	۲۹/۲۱	۱/۳۹
۱۰	۲۶/۶۱	۴۰۰	۳۷/۹۷	۲۷/۷۷	۱/۳۷
۱۵	۲۴/۲۲	۴۰۰	۳۴/۸۳	۲۶/۰۶	۱/۳۳

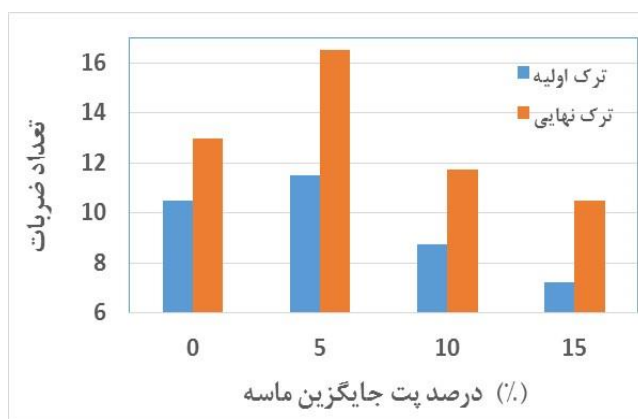
ایجاد ترک‌های اول و ترک نهایی نمونه‌های بتنی با جایگزینی ذرات پت در ابتدا افزایش یافته و در ادامه با افزایش درصد جایگزینی پت کاهش می‌یابد، به طوری که با جایگزینی ۵ درصد موجب افزایش ۲۶/۹ درصدی و جایگزین کردن ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش ۹/۶ و ۱۹/۲ درصدی در مقاومت نهایی ضربه و ایجاد ترک نهایی به وجود آمده است.



شکل ۹ نمونه‌های تست ضربه قبل و بعد از انجام آزمایش

مقاومت ضربه. مقاومت ضربه قطعات بتنی در ضربه‌های تصادفی و در حمل و نقل قطعات پیش ساخته بتنی، از اهمیت‌های ویژه‌ای برخوردار است. رابطه واحدی بین مقاومت ضربه‌ای و مقاومت فشاری استاتیکی وجود ندارد. به این دلیل مقاومت ضربه‌ای باید مستقیماً تعیین شود که معمولاً با توانایی نمونه بتنی در تحمل ضربه‌های متوالی و جذب انرژی، سنجیده می‌شود و مقاومت ضربه‌ای و مجموع انرژی جذب‌شونده توسط بتن، با افزایش مقاومت فشاری استاتیکی افزایش می‌یابد. در شکل (۹) نمونه‌های تست ضربه قبل و بعد از انجام آزمایش نشان داده شده و نتایج حاصل از آزمایش‌های ضربه را در جدول (۱۶) و شکل (۱۰) داده شده است.

مشاهده می‌شود مقاومت ضربه و تعداد ضربه برای



شکل ۱۰ مقاومت ضربه در انواع ترک‌های اولیه و نهایی

جدول ۱۶ مقاومت ضربه

درصد تغییرات (%)		میانگین		نمونه ۴		نمونه ۳		نمونه ۲		نمونه ۱		پت (درصد)
انهدام	ترک اول	انهدام	ترک اول	انهدام	ترک اول	انهدام	ترک اول	انهدام	ترک اول	انهدام	ترک اول	
-	-	۱۳	۱۰/۵	۱۲	۹	۱۳	۱۰	۱۳	۹	۱۴	۱۱	۰
۲۶/۹	۹/۵	۱۶/۵	۱۱/۵	۲۱	۱۶	۱۴	۹	۱۵	۱۱	۱۶	۱۳	۵
-۹/۶	-۱۶	۱۱/۷۵	۸/۷۵	۱۲	۸	۱۲	۹	۱۱	۸	۱۲	۱۰	۱۰
-۱۹/۲	-۳۰/۹	۱۰/۵	۵/۲۵	۱۲	۹	۱۰	۷	۱۱	۷	۹	۶	۱۵

نتیجه گیری

می یابد، درحالی که جایگزینی ۵ درصد باعث افزایش ۵/۸ درصدی و جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصدی موجب کاهش ۲/۳ و ۱۲/۸ درصدی در مقاومت خمشی تیر بتنی می شود و همین روند افزایش و کاهش در مقاومت خمشی دال های بتنی حاوی پت مشاهده شد. ۵. جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد پت در نیروی خمشی تیرهای بتن مسلح در مقایسه با نمونه های غیرمسلح موجب افزایش ۱۳/۳ و ۶ درصدی و جایگزینی ۱۵ درصد موجب کاهش ۲/۷۸ درصدی در مقاومت خمشی شد. ۶. با جایگزینی ۵ درصد پت موجب افزایش ۲۶/۹ درصدی مقاومت ضربه و جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد موجب کاهش ۹/۶ و ۱۹/۲ درصدی در مقاومت ضربه نمونه های بتنی شده است.

با ساخت ۹۶ نمونه مکعبی، استوانه ای و قرص بتنی و تیر و دال بتنی با ۴ طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵۴، تأثیر جایگزینی پودر بطری های ضایعاتی (پت) به میزان ۵ تا ۱۵٪ حجم معادل ماسه بر خواص مکانیکی و سازه ای بتن بررسی و نتایج زیر حاصل گردید:

۱. اسلامپ بتن های حاوی ذرات پت با افزایش مقدار پت، به دلیل تأثیری که پت بر روی مخلوط می گذارد، کاهش می یابد.
۲. افزایش میزان پت موجب کاهش بیشتر وزن مخصوص خشک در مقایسه با وزن مخصوص تر می شود.
۳. با جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پت، مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای 15×30 سانتی متر به ترتیب ۲/۴، ۱۰/۳ و ۱۸/۴ درصد و نمونه های مکعبی ۱۰ سانتی متر به ترتیب برابر ۳/۲، ۱۰/۱ و ۱۵/۴ درصد کاهش یافته است.
۴. با جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پت، مقاومت کششی برزیلی به ترتیب ۷/۲، ۱۲/۸ و ۲۱/۲ درصد کاهش

مراجع

1. Association of European Plastic Manufactures, "Plastic-the fact 2018", Technical report, (2018).
2. Petcore Europe, "European PET Bottle Platform - EPBP", Technical report, www.epbp.org, (2017).
3. National Association for PET Container Resources (Report on Post Consumer PET Container Recycling Activity), (2009).
4. Williams, P.T., "Waste Treatment and Disposal", Wiley, Chisterter, (1998).
5. Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., Gutiérrez, A., "Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios", *Journal of Waste Management*, Vol. 29, pp. 2707-2716, (2009).
6. Jo, B.W., Park, S.K., Park, J.C., "Mechanical properties of polymer concrete made with recycle PET and recycle concrete aggregates". *Construction and Building Materials*. Vol. 22, Issue12, pp. 2281-2291, (2008).
7. Rebeiz, K. S., "Precast use of polymer concrete using Unsaturated polyester resin based on recycled PET waste", *Construction and Building Materials*; Vol. 10, No. 3, pp. 215-220, (1996).
8. Foti, D., "Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers", *Construction and*

- Building Materials, 25, pp. 1906-1915, (2011).
9. Pereira de Oliveira, L.A., Castro-Gomes, J.P., "Physical and mechanical behavior of recycled PET fiber reinforced mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 1712–1717, (2011).
 10. Kim, S.B., Yi, N.H., Kim, H.Y., Kim, J.H.J., Song, Y.Ch., "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 32 , pp. 232–240, (2010).
 11. Ochi, T., Okubo, S., Fukui, K., "Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 448–455, (2007).
 12. Silva, D.A., Betioli, A.M., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., Gomez, L.A., Ribeiro, J.L.D., "Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp.1741–1746, (2005).
 13. Frigione, M., "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete", *Journal of Waste Management*, Vol. 30, Issue 6, pp. 1101–1106, (2010).
 14. Choi, Y.W., Moon, D.J., Kim, Y.J., Lachemi, M., "Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp.2829–2835, (2009).
 15. Choi, Y.W., Moon, D.J., Chung, J.S., Cho, S.K., "Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 776–781, (2005).
 16. Akçaözoglu , S. Duran Atiş,C., Akçaözoglu, K., "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete", *Journal of Waste Management*, Vol. 30, Issue 2, pp. 285–290, (2010).
 17. Marzouk, O.Y., Dheilily, R.M., Queneudec, M., "Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites", *Waste Manage*, Vol. 27, pp.310–318, (2007).
 18. Reis, J.M.L., Chianelli-Junior, R., Cardoso, J.L., Marinho, F.J.V., "Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, Issue 6, pp. 2799-2804 (2011).
 19. Hannawi,K., Kamali-Bernard,S., Prince, W., "Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates", *Waste Management* , Vol. 30 , pp.2312–2320, (2010).
 20. Gu, L., Ozbakkaloglu, T., "Use of recycled plastics in concrete: A critical review", *Journal of Waste Management*, Available online 9 March, (2016).
 21. Ismail , Z.Z., AL-Hashmi, E.A., "Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement", *Journal of Waste Management*, Vol. 28, Issue 11, No. 2008, pp. 2041–2047, (2008).