



## ارائه یک روش جدید برای تولید بتن دوست‌دار محیط زیست با استفاده از خرده پلاستیک ضایعاتی (PET) و دوده سیلیسی و بررسی مشخصات مکانیکی و دوام آن در روسازی بتنی غلتکی

مهدی آخوندی، محمدحسن رامشت\*، توحید پوررستم، علی گلصورت پهلویانی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکز، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۷

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۳

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

### کلمات کلیدی:

الیاف بازیافتی (PET)

میکرو سیلیس

اثرات زیست‌محیطی

روسازی بتنی

مشخصات مکانیکی

ترک بتن

**خلاصه:** در این مقاله به بررسی تأثیر همزمان ذرات پلی اتیلن ترفتلات و دوده سیلیسی بر خواص رئولوژی و مکانیکی روسازی های بتنی پرداخته شده است و به دنبال ارائه یک طرح مخلوط جدید جهت تولید بتن سبز (بتن دوست‌دار محیط زیست) با استفاده از مواد ضایعاتی PET و دوده سیلیسی می‌باشد. از یک سو با توجه به مشکلات روسازی آسفالتی از قبیل به مخاطره انداختن محیط زیست، گرانی قیر و از سوی دیگر با توجه به اینکه کشور ایران در حال حاضر سومین تولید کننده بزرگ سیمان در سطح جهان می‌باشد از مواردی می‌باشد که این تحقیق را حائز اهمیت می‌سازد. امروزه روسازی های بتنی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته و همچنین افزایش مصرف بطری‌های نگهدارنده مواد غذایی پت و به تبع آن افزایش تولید زباله و ازدیاد محل دفع این ضایعات، بر اهمیت استفاده مجدد از این ضایعات می‌افزاید. یکی از موارد مصرف این ضایعات بدون داشتن اثرات مخرب زیست محیطی، استفاده مجدد آنها به صورت محبوس کردن آنها در روسازی‌های صلب بتنی است. تحقیقات نشان می‌دهد که یکی دیگر از محصولات ضایعاتی جانبی تولید صنایع شیشه که به عنوان ذرات میکروسیلیس یا دوده سیلیسی شناخته می‌شود که می‌تواند در بتن روسازی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از ذرات پت در روسازی بتنی تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری نداشته اما در مقابل موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی می‌گردد. در مقابل استفاده از میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری، کاهش جذب آب و کاهش نفوذپذیری در روسازی های بتنی شده است.

### ۱- مقدمه

از متداول‌ترین پلاستیک‌های مصرف شده در جهان PET (پلی اتیلن ترفتلات) می‌باشد. این ماده به عنوان ماده‌ای خام بطور گسترده در ساخت بطری‌های نوشیدنی، ظروف بسته بندی غذا و کالاهای مصرفی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. سالانه بیش از ۶/۷ میلیون تن از این نوع بطری‌ها در جهان تولید می‌شوند. اکثر این بطری‌های نوشیدنی بعد از یک بار مصرف دور ریخته می‌شوند و حجم بسیار بالایی از آنها در چرخه دفع زباله در درون زمین دفن می‌شوند [۱، ۲].

روسازی‌های بتنی دارای انواع مختلفی از نظر ابعاد و نوع کاربری هستند. روسازی‌های با ضخامت بیشتر از ۸ سانتی‌متر که قابلیت تحمل بارهای سنگین و دینامیکی را دارا هستند به عنوان روسازی‌های ترافیکی محسوب می‌شوند. ضخامت‌های کمتر در مسیرهای عبور

اهمیت توسعه‌ی پایدار و حفاظت از منابع محیط زیست موجب توجه بیش از پیش به مواد ضایعاتی و روش‌های استفاده مجدد از آنها گردیده است. یکی از روش‌های متداول در مهندسی عمران استفاده از مواد دورریز در محصولات سیمانی است. به عبارت دیگر تحقیقات نشان می‌دهد یکی از راه‌های حذف پسماندهای شهری حبس آن در نهاده‌های دیگر می‌باشد. استفاده از مواد ضایعاتی علاوه بر اینکه در کاهش هزینه‌های پروژه مؤثر است، نقش بسزایی در حفاظت از محیط زیست ایفاء می‌نماید. بازیافت ضایعات انبوه پلاستیک‌های تولید شده از دغدغه‌های دنیای امروز است. پلاستیک‌ها انواع مختلفی دارند، یکی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Email: mhramesh@yahoo.com



جدول ۱. مشخصات شیمیایی و درصد ترکیبات سیمان مورد استفاده

Table 1. Chemical properties and percentage of cement compounds used

ترکیب	مقدار (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۶
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۶۸
MgO	۱/۸
CaO	۶۳/۲
SO <sub>3</sub>	۱/۷
Na <sub>2</sub> O	۰/۲
K <sub>2</sub> O	۰/۷
Loss on ignition	۱/۲۴

محققان قرار گرفته است [۵، ۶]. از مطالعاتی که پیرامون کاربرد ضایعات PET تاکنون صورت گرفته [۷، ۸]، نتایج مناسبی در زمینه کاهش انقباض، افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلر، کاهش چگالی، افزایش انعطاف پذیری و افزایش مقاومت کششی بدست آمده است [۲، ۹، ۱۰].

۲- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی در پژوهش مذکور به شرح ذیل می باشد:

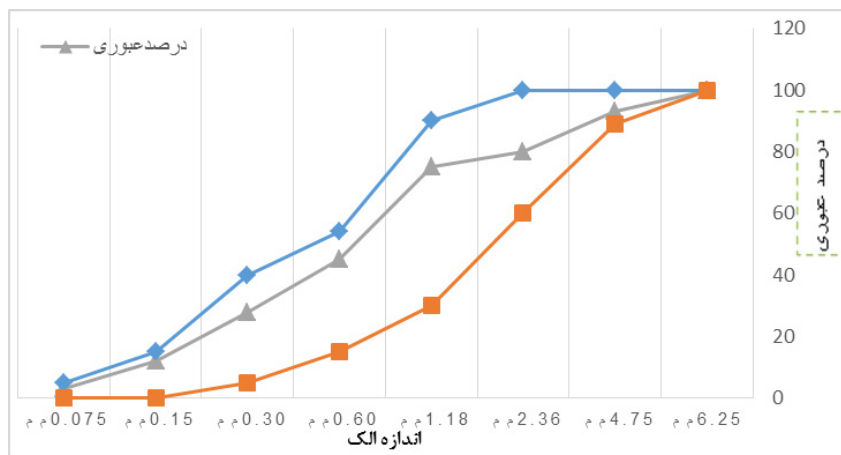
۱-۱- سیمان

سیمان به کار رفته در این پژوهش از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان آبیگ می باشد. دارای وزن مخصوص ۳۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است و ترکیبات شیمیایی عناصر و اکسیدهای موجود سیمان پرتلند تیپ ۲ در جدول ۱ ارائه شده است.

عابریاده و دوچرخه مورد استفاده قرار می گیرند. معمول ترین روش برای تولید روسازی های بتنی، استفاده از بتن غلطکی می باشد، که بتن مصرفی در آن دارای اسلامپ صفر بوده و با استفاده از ویبره و پرس، متراکم می گردد. روسازی ها در سه لایه که دو لایه اصلی به ضخامت های حدود ۴۵ درصد ضخامت کل کوبیده شده و لایه رویه به صورت جداگانه و با دانه بندی ریزتر با ضخامت حدود ۱/۵ تا ۲ سانتی متر بر روی دو لایه دیگر قرار می گیرد [۳].

امروزه کاربرد روسازی بتنی روز به روز در حال افزایش می باشد. به منظور بهبود شرایط اقتصادی و زیست محیطی، نیازمند کاهش استفاده از سنگدانه های طبیعی و سیمان در کشور بسیار حائز اهمیت می باشد. جایگزینی سنگدانه ها با ضایعات تولید شده از مواد پلاستیکی یکی از راهکارهای موجود است که بعد از افزودن این ضایعات به بتن مورد استفاده در تولید روسازی ها، می توان خواص مکانیکی و کارایی بتن مورد استفاده را مورد سنجش قرار داد و عملکرد قابل قبول را می توان با تغییر در مقادیر به کار رفته در بتن بدست آورد [۳، ۴].

از این رو بررسی امکان بازیافت PET و استفاده مجدد آن در چرخه ی تولید، درخور اهمیت می باشد. یکی از راه های پیشنهادی برای رفع این معضل، جایگزین کردن سنگدانه ای طبیعی با ضایعات PET، برای تهیه بتن روسازی است که این روش می تواند به عنوان فعالیتی مطلوب برای کمک به محیط زیست مفید واقع گردد. همچنین با توجه به تقاضای بسیار زیاد برای تولید بتن و پایان پذیر بودن منابع طبیعی تولید سنگدانه، این امر از نظر اقتصادی و زیست محیطی نیز توجیه پذیر است. در سال های گذشته استفاده از ضایعات پلاستیک در بتن و روسازی های بتنی موضوع تحقیق بسیاری از



شکل ۱. نمودار دانه بندی ماسه مصرفی  
Fig. 1. Grain chart of consumed sand



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی شن مصرفی

Fig. 2. Grain diagram of consumed sand

برای تهیه PET مصرفی در این تحقیق از خرد کردن بطری‌های آب معدنی و نوشیدنی کمک گرفته شد که بوسیله دستگاه آسیاب پلاستیک بطری‌ها به صورت ذرات با ابعاد بین ۱ الی ۵ میلی‌متر خرد گردیدند (مطابق «شکل ۳») و لازم به توضیح می‌باشد که جذب آب ذرات PET نیز کمتر از ۰/۱ درصد وزنی آنها می‌باشد.

### ۲-۶- دوده سیلیس

دوده سیلیس مصرفی به عنوان پرکننده، از کارخانه صنایع فرو آلیاژ ایران (ازنا) تهیه شده است. مشخصات شیمیایی دوده سیلیس مصرفی در جدول ۲ آورده شده است.

### ۳- طرح اختلاط

مطابق جدول ۳، از نسبت‌های اختلاط اجزا براساس استاندارد R ۳۲۷.ACI [۲] استفاده می‌گردد. برای مخلوط کردن مصالح در



شکل ۳. بطری‌های پلاستیکی خرد شده

Fig. 3. Shredded plastic bottles

### ۲-۲- ماسه

ماسه مصرفی به صورت طبیعی در محدوده ۰-۶ میلی‌متر بوده که پس از دانه‌بندی و کنترل کیفیت مطابق استاندارد ASTM C۳۳ [۱۱] مورد استفاده قرار گرفته است. نمودار دانه‌بندی ماسه بتن مصرفی در «شکل ۱» نشان داده شده است.

### ۲-۳- شن

شن به صورت ترکیبی از سنگدانه‌های شکسته و طبیعی از معادن شهریار کرج با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر بوده که پس از دانه‌بندی و مطابقت آنها با استاندارد ASTM C۳۳ [۱۲] مورد استفاده قرار گرفته و کیفیت آن از لحاظ وجود دانه‌های پولکی، همچنین درصد خاک موجود در آن توسط آزمایشات مربوطه مورد تأیید قرار گرفته است و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک آن ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و جذب آب آن نیز ۲ درصد بدست آمده است. نمودار دانه‌بندی درشت‌دانه‌ها در «شکل ۲» نمایش داده شده است.

### ۲-۴- آب

آب مصرفی در ساخت و عمل‌آوری بتن‌ها از آب شرب شهر کرج می‌باشد که با توجه به مصرف آشامیدنی آن برای ساخت بتن بدون مشکل است.

### ۲-۵- ذرات پلی اتیلن ترفنالات بازیافتی (PET)

تمامی طرح ها ثابت و برابر ۰/۳۴ در نظر گرفته شده است.

#### ۴- بررسی و نتایج

##### ۴-۱- مقاومت فشاری

مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های روسازی بتنی معمولی (Control) و روسازی بتنی مسلح به ذرات پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی (PET) و میکروسیلیس در «شکل ۴» نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که حضور ذرات PET بازیافتی کاهش اندکی در مقاومت فشاری را خواهند داشت. این کاهش مقاومت فشاری شاید به این دلیل باشد که استفاده از ذرات PET بازیافتی در روسازی بتنی سبب کاهش تراکم‌پذیری بتن می‌گردند که این امر ممکن است باعث ایجاد نقاط ضعف در بافت بتن به دلیل ایجاد تخلخل موضعی ناشی از نفوذ حباب هوا در اطراف ذرات پلاستیکی شوند و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری را فراهم می‌آورد.

از طرفی دیگر از آنجا که ذرات پت خاصیت آبریزی دارند جذب آب این ذرات کمتر از ۰/۱ درصد است. لذا مانع از عبور آب از روی این ذرات و نفوذ به ساختار بتن جهت انجام فرایند هیدراتاسیون (آب‌پوشی) می‌شوند. ولی بعد از شکست نمونه‌ها در آزمایشگاه مشاهده

جدول ۲. مشخصات شیمیایی و درصد ترکیبات دوده سیلیس  
Table 2. Chemical Properties and Percentages of Silica Fume Compounds

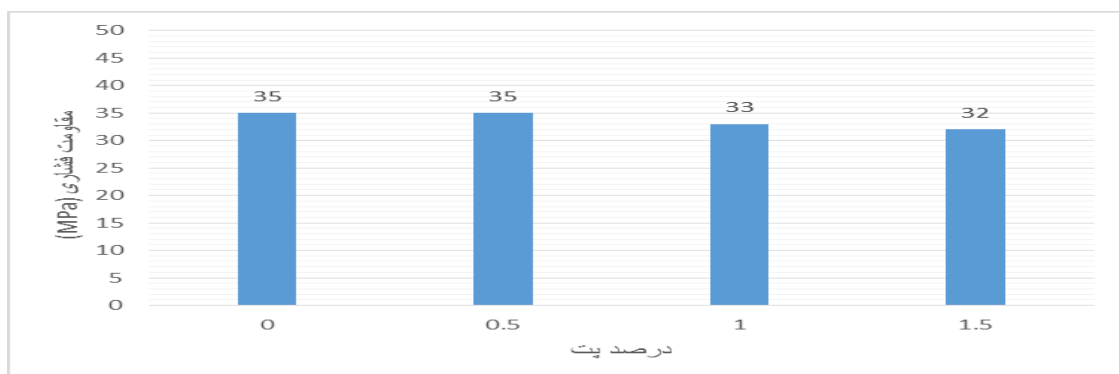
درصد	مشخصات شیمیایی
۹۵/۱	SiO <sub>2</sub>
۰/۴۹	CaO
۱/۳۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۸۷	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۹۷	MgO
۰/۱	SO <sub>3</sub>

ابعاد آزمایشگاهی ابتدا سنگدانه‌ها و PET را در میکسر ریخته و بعد سیمان و در انتها آب که با دوده سیلیس مخلوط شده است را به مخلوط اضافه گردیدند. لازم به ذکر است که با افزایش درصد ذرات PET زمان اختلاط را بیشتر نموده تا این ذرات کاملاً در بتن به طور یکنواخت مخلوط شوند. با توجه به تحقیقات شکل گرفته از گذشته تا کنون و آیین‌نامه‌های مربوطه، درصد افزودن ذرات پت را با عنایت به دانه‌بندی آن به عنوان جایگزین ماسه تلقی نموده و بین ۱ تا ۵ درصد از ماسه مصرفی را با آن جایگزین شده است [۹]. در این تحقیق علاوه بر مطالعات گذشته مقدار ۸ درصد از کل وزن سیمان با دوده سیلیس جایگزین شده است و نسبت آب به سیمان (سیمان+ مواد پودری) در

جدول ۳. نسبت‌های اختلاط نمونه‌ها

Table 3. Sample mixing ratios

طرح	سیمان Kg/m <sup>3</sup>	شن Kg/m <sup>3</sup>	ماسه Kg/m <sup>3</sup>	آب Kg/m <sup>3</sup>	نسبت آب به سیمان	دوده سیلیس Kg/m <sup>3</sup>	الیاف PET بازیافتی Kg/m <sup>3</sup>
Control	۳۸۰	۵۵۰	۱۳۰۰	۱۳۰	۰/۳۴	۰	۰
PET 0.5%	۳۵۰	۵۵۰	۱۲۹۳/۵	۱۳۰	۰/۳۴	۳۰	۶/۵
PET 1%	۳۵۰	۵۵۰	۱۲۸۷	۱۳۰	۰/۳۴	۳۰	۱۳
PET 1.5%	۳۵۰	۵۵۰	۱۲۸۰,۵	۱۳۰	۰/۳۴	۳۰	۱۹,۵



شکل ۴. مقایسه مقاومت فشاری بتن معمولی روسازی و بتن روسازی حاوی ذرات بازیافتی و میکروسیلیس با درصدهای مختلف

Fig. 4. Comparison of compressive strength of conventional pavement and pavement concrete containing recycled particles and silica with different percentages

تأثیر ذرات PET بازیافتی بر مقاومت فشاری توسط سایر محققین نیز بررسی شده است [۱۳]. بر اساس نتایج بدست آمده توسط محققان بر نمونه‌های بتن پرسیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ذرات PET بازیافتی، مقاومت فشاری بتن پرمقاومت را در سن ۲۸ روز با شرایط عمل‌آوری مرطوب، اندکی کاهش می‌دهد. در مطالعه ای دیگر توسط محققان صورت گرفته دال بر این می‌باشد که حضور ذرات PET بازیافتی سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود [۱۴].

#### ۴-۲- مقاومت خمشی

آزمایش مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) روی نمونه‌های روسازی انجام شد. نمونه‌ها تا روز آزمایش تحت عمل‌آوری بوده و در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش مدول گسیختگی در «شکل ۷» آورده شده است. استفاده از الیاف PET بازیافتی باعث می‌شود نمونه‌ها به صورت ترد شکافته نشوند و بعد از افزایش بار، گسیختگی با دو نیم شدن کامل نمونه‌ها همراه نباشند. نحوه افزایش مقاومت خمشی در اثر استفاده از



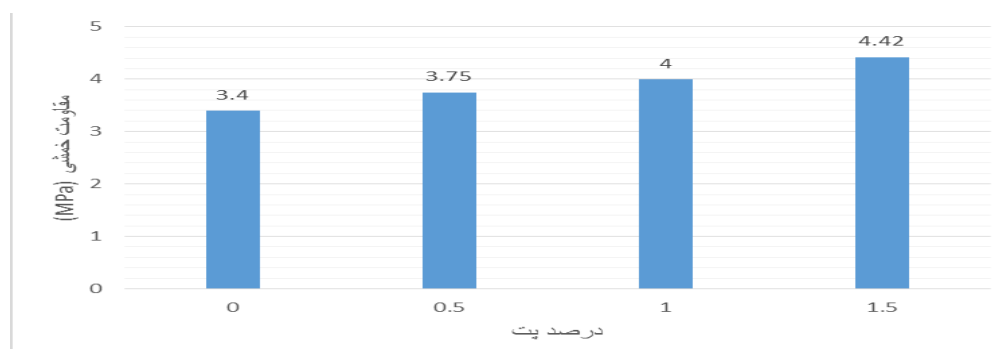
شکل ۵. مقایسه حالت شکست تحت بارگذاری فشاری: تصویر سمت راست نمونه بدون الیاف پت و تصویر سمت چپ نمونه حاوی ذرات پت  
**Fig. 5. Comparison of failure mode under compressive loading**

گردید در همه نمونه‌های روسازی بتنی حاوی ذرات PET بازیافتی در حین بارگذاری فشاری از شکست ترد (ناگهانی) به شکست نرم و تدریجی مطابق «شکل ۵» تغییر ماهیت پیدا کرده است. که این امر بیانگر افزایش خاصیت ارتجاعی روسازی بتنی خواهد گردید که در نتیجه افزایش آسایش راندگی بر روی آن را به همراه خواهد داشت.



شکل ۶. نمونه‌های شکسته شده روسازی بتنی حاوی پت

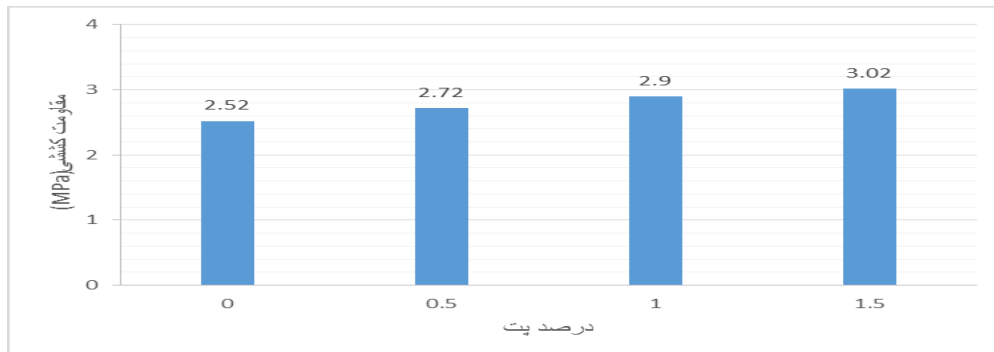
**Fig. 6. Broken concrete pavement samples containing pet**



شکل ۷. مقایسه مدول گسیختگی بتن معمولی روسازی و بتن حاوی الیاف PET

**Fig. 7. Comparison chart of rupture modulus of conventional pavement and PET containing concrete**





شکل ۸. نمودار مقایسه مقاومت کششی بتن معمولی روسازی و بتن حاوی PET

Fig. 8. Comparison chart of tensile strength of conventional pavement and PET containing concrete

بدلیل خاصیت کشسانی این ذرات پلاستیکی میزان مقاومت کششی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، درصد افزایش مقاومت کششی طرح روسازی بتنی حاوی ذرات PET بازپافتی به میزان ۱/۵ درصد وزن حجمی ذرات PET نسبت به طرح بدون ذرات در سن ۲۸ روز حدود ۳۰٪ می‌باشد. نحوه‌ی شکست نمونه‌های روسازی حاوی ذرات پت در آزمایش کششی، متفاوت با نمونه‌های معمولی بوده و از حالت شکست ترد (ناگهانی) به حالت نرم و تدریجی تبدیل شده است. آنچه به هنگام افزایش مقاومت کششی در نتیجه استفاده از ذرات اتفاق می‌افتد را می‌توان بدین صورت تشریح کرد که ذرات به هنگام شکافته شدن در بین بخش‌های شکافته شده از ماتریس، از طریق انتقال تنش‌ها از ماتریس به ذرات، کرنش کششی بزرگتری را تحمل می‌کنند. در نتیجه، افزایش در مقاومت کششی مشاهده می‌شود.

#### ۴-۴- دوام

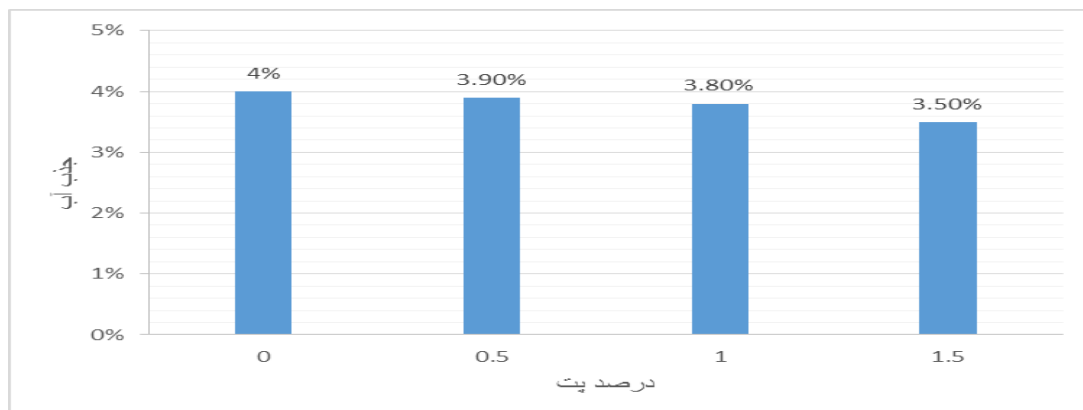
آزمایش جذب آب روی نمونه‌های روسازی انجام گرفت و نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است.

الیاف را می‌توان بدین صورت توضیح داد که استفاده از الیاف به معنی اتصال بسیار وسیع و فاصله کم الیاف می‌باشد، لذا پس از اعمال بار و بروز ترک‌های بسیار ریز در بافت بتن (ترک‌های میکروسکوپی)، الیاف قادر خواهند بود از گسترش ترک‌ها به ترک‌های ماکروسکوپی جلوگیری کرده و با انتقال تنش بین لبه‌های ترک از میزان تنش موجود در نوک ترک‌ها کاسته و از این طریق، از افزایش عرض ترک‌ها و تبدیل شدن ترک‌های میکروسکوپی به ماکروسکوپی جلوگیری کنند.

#### ۴-۳- مقاومت کششی

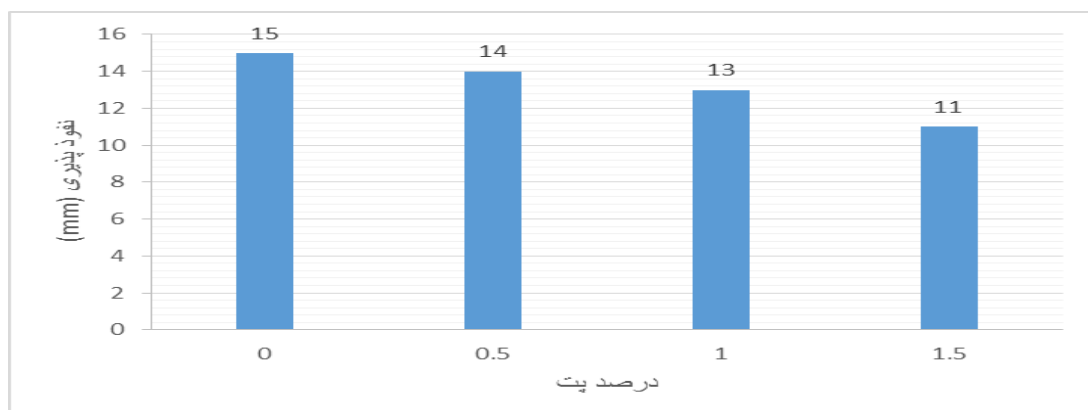
آزمایش مقاومت کششی برای تعیین مقاومت کششی بتن به روش دو نیم شدن روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام شد. نمونه‌ها در سن ۲۸ روز پس از عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج در «شکل ۸» نشان داده شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهند که حضور ذرات PET بازپافتی باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود و هرچه میزان این ذرات افزایش می‌یابد



شکل ۹. نمودار مقایسه درصد جذب آب بتن معمولی روسازی و بتن حاوی PET

Fig. 9. Comparison chart for water absorption percentages of conventional pavement and PET containing concrete



شکل ۱۰. نمودار مقایسه نفوذ پذیری بتن معمولی روسازی و بتن حاوی PET

Fig. 10. Comparison chart of permeability of conventional pavement and PET containing concrete

خلأ و اشباع کردن با آب، داخل سلول دستگاه قرار گرفته و آزمایش انجام شده است. آزمون داخل سلول از یک وجه با محلول سود (NaOH) و وجه دیگر با محلول نمک (NaCl) در تماس قرار گرفته شده است. الکتروود طرفی از سلول که محلول سود درون آن است به قطب مثبت و الکتروود طرف دیگر سلول که محلول نمک درون آن است به قطب منفی دستگاه مولد جریان مستقیم متصل شده و با روشن کردن دستگاه ولتاژ ۶۰ ولت به آزمون‌ها از طریق الکتروودها اعمال می‌گردد. جریان عبوری از نمونه طی ۶ ساعت ثبت و سپس با محاسبه سطح زیر نمودار جریان زمان، بار الکتریکی عبوری از هر آزمون در سنین شار عبوری محاسبه می‌شود. نتایج آزمایش RCPT در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در جدول ۴ و در هر سن روی چهار آزمون نشان داده شده است.

از بررسی جدول این نتیجه حاصل شده است که حضور میکروسیلیس موجب کاهش نفوذ پذیری و خلل و فرج در بتن می‌شود که در مقایسه با طرح شاهد کاهش چشم‌گیری داشته است. ولی با توجه به اینکه ذرات پلاستیکی پت تأثیر چندانی بر پر کردن خلل و فرج ندارد و حتی بعضاً در روزهای بالاتر موجب افزایش اندک یون کلر

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد پت، جذب آب اندکی کمتر شده و اثر مثبتی در دوام بتن دارد.

#### ۴-۵- نفوذ پذیری آب تحت فشار

نتایج تست عمق نفوذ آب تحت فشار مطابق با استاندارد EN ۱۲۳۹۰-۸ در «شکل ۱۰» نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عمق نفوذ آب در نمونه‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد به مقدار ۶/۶۷٪، ۱۳/۳٪ و ۲۶/۷٪ کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد افزودن PET و میکروسیلیس موجب کاهش عمق نفوذ آب در روسازی بتنی می‌شود.

#### ۴-۶- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر (RCPT)

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C ۱۲۰۲ روی نمونه شاهد (بدون میکروسیلیس و پت) و روی نمونه حاوی پت و میکروسیلیس با درصد‌های ۰/۵، ۱ درصد و ۱/۵ درصد انجام گردیده است. در این آزمایش از نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، آزمون‌هایی به ضخامت ۵ سانتی‌متر تهیه و پس از اعمال

جدول ۴. نسبت‌های اختلاط نمونه‌ها

Table 4. Sample mixing ratios

شار عبوری (کولومب)		نام طرح
۹۰ روزه	۲۸ روزه	
۳۱۱۰	۳۴۰۰	کنترل (شاهد)
۲۳۰۰	۲۷۱۰	میکروسیلیس با پت ۰/۵ درصد
۲۳۶۰	۲۸۱۵	میکروسیلیس با پت ۱ درصد
۲۴۱۰	۲۹۱۰	میکروسیلیس با پت ۱/۵ درصد

هم گردیده است که نشان‌دهنده این می‌باشد که با توجه به مزایای دیگر این کاهش اندک قابل چشم‌پوشی خواهد بود.

## ۵- نتیجه‌گیری

از جمله نوآوری‌های این تحقیق در مقایسه با تحقیقاتی که در این زمینه تاکنون انجام شده است، استفاده همزمان و تأثیر متقابل ذرات پت بازیافتی و دوده سیلیسی می‌باشد که از یکسو ذرات پت افزایش مقاومت کششی و خمشی را به همراه داشته است ولی تأثیر چندانی در مقاومت فشاری و پارامترهای دوامی نداشته؛ ولی از سوی دیگر استفاده از دوده سیلیسی پارامترهای دوامی را بهبود بخشیده و موجب پر کردن فضاهای مویینه و خلل و فرج‌های میکرو در بتن گردیده است. که این مقوله سبب بهبود ریز ساختارهای بتن در جلوگیری از بوجود آمدن ترک‌های ریز شده است.

- استفاده از PET که از جمله ضایعات تقریباً تجزیه‌ناپذیر در طبیعت است، می‌تواند با کاستن مشکلات زیست محیطی و اقتصادی ناشی از انباشته شدن و یا دفع آن در محیط زیست از یکسو و از سوی دیگر با کاهش دادن میزان استخراج سنگدانه از معادن و یا بستر رودخانه‌ها، از تخریب روزافزون محیط زیست بکاهد.

- نتایج نشان می‌دهند که حضور ذرات PET بازیافتی کاهش اندک مقاومت فشاری را در پی خواهند داشت، که این مقدار برای حالت بیشینه ۱/۵ درصد جایگزینی پت، حدود ۸ درصد کاهش مقاومت را در پی داشته است. این کاهش مقاومت فشاری شاید به این دلیل باشد که استفاده از الیاف PET بازیافتی در بتن سبب کاهش تراکم‌پذیری بتن می‌گردند که این امر باعث ایجاد نقاط ضعف در بافت بتن (به دلیل ایجاد تخلخل موضعی ناشی از نفوذ حباب هوا) خواهد شد و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری را فراهم می‌آورد.

- مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های اخذ شده از روسازی بتنی، با افزودن ۱/۵ درصد پت جایگزین سنگدانه، به ترتیب حدود ۳۰ درصد و ۲۰ درصد افزایش یافته است.

- در این تحقیق، در مقایسه با تحقیقات مشابه داخلی و خارجی انجام شده این نتیجه حاصل شد که ذرات پت بازیافتی جایگزین مناسبی برای سنگدانه‌های بتن می‌باشد، در این راستا حتی وزن مخصوص بتن نیز کاهش می‌یابد. که در این راستا می‌توان با جایگزینی مقدار زیاد پت جایگزین سنگدانه می‌توان طرح‌های اختلاط

بتن سبک دست پیدا کرد.

- با استفاده از ذرات پت بازیافتی ترک‌های حین اجرا در روسازی‌های بتنی و همچنین ترک‌های ماکروسکوپی تا حد زیادی کنترل شده و بتن خاصیت ارتجاعی به خود می‌گیرد که این امر موجب آسایش رانندگان هنگام رانندگی می‌گردد.

## تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، مراتب تشکر و قدردانی خود را از آزمایشگاه همکار استاندارد آپتوس ایران و آقای دکتر بزرگمهر مدیر تحقیقات و توسعه کارخانه مذکور اعلام دارند.

## مراجع

- [1] C. Albano, N. Camacho, M. Hernandez, A. Matheus, A. Gutierrez, Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios, Waste Management, 29(10) (2009) 2707-2716.
- [2] A.I. Al-Hadithi, Improving impact and mechanical properties of gap-graded concrete by adding waste plastic fibers, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 4(2) (2013) 118-131.
- [3] C. ASTM, 1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, Annual Book of ASTM Standards, 4 (2012) 7.
- [4] A.F. Avila, M.V. Duarte, A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites, Polymer Degradation and Stability, 80(2) (2003) 373-382.
- [5] M. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Use of selected waste materials in concrete mixes, Waste management, 27(12) (2007) 1870-1876.
- [6] S. Chidiac, S. Mihaljevic, Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates, Cement and concrete composites, 33(8) (2011) 855-863.
- [7] M. Dadsetan, H. Mirzadeh, N. Sharifi-Sanjani, M. Daliri, Cell behavior on laser surface-modified polyethylene terephthalate in vitro, Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for



- properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 22(12) (2008) 2281-2291.
- [12] S. Kakooei, H.M. Akil, M. Jamshidi, J. Rouhi, The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures, *Construction and Building Materials*, 27(1) (2012) 73-77.
- [13] S. Mindess, F. Young, D. Darwin, *Concrete 2nd Editio*, Technical Documents, (2003).
- [14] K. Rebeiz, Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET, *Cement and Concrete Composites*, 17(2) (1995) 119-124.
- Biomaterials*, 57(2) (2001) 183-189.
- [8] P. Domone, A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, *Cement and concrete composites*, 29(1) (2007) 1-12.
- [9] D. Foti, Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers, *Construction and building materials*, 25(4) (2011) 1906-1915.
- [10] H. Gamalath, T. Weerasinghe, S. Nanayakkara, Use of waste rubber granules for the production of concrete paving blocks, *Traffic*, 40(32) (2017) 80,100.
- [11] B.-W. Jo, S.-K. Park, J.-C. Park, Mechanical

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Akhondi, M. H. Ramesht, T. Pourostam, A. Golsoorat Pahlaviani, *Presentation of a New Method for Production of Environment-Friendly Concrete using PET Waste/Silica Fume and Its Mechanical/Durability Properties Investigation in Concrete Pavement*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021): 1107-1116.

DOI: [10.22060/ceej.2020.16789.6346](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16789.6346)



