مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۲۵-۳۳

Original Article

# بررسی تأثیر افزودن خرده‌پلاستیک ضایعاتی (PET) بر روی مشخصات مکانیکی و دوام کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی

**ارسلان احمدنیا (کارشناسی ارشد)**
**امیرمحمد رمضانیان‌پور* (دانشیار)**
**محرم دولتشاهی پیروز (دانشیار)**
**پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران**

در این مقاله به تأثیر جایگزینی سنگ‌دانه با ۳٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ خرده‌پلاستیک ضایعاتی (PET) بر روی مشخصات مکانیکی و دوامی کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی و کنترل این مشخصات با ضوابط موجود در آیین‌نامه‌های معتبر پرداخته شده است.
آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش‌های وی‌بی، مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی، امواج اولتراسونیک، مقاومت ذوب و یخبندان و هم‌چنین مقاومت سایشی بوده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که با جایگزینی پلاستیک به جای سنگ‌دانه تا حدود ۳٪، بعضی از خواص نظیر مقاومت کششی و خمشی بهبود یافته است، اما پس از ۵٪ کاهش یافته است. استفاده از پلاستیک در درصدهای پایین، تأثیر چندانی بر روی درصد سایش و مقاومت در برابر چرخه‌ی ذوب و یخبندان نداشته است. هم‌چنین نتایج آزمایش‌های مکانیکی و دوام کف‌پوش‌های بتنی با ۳٪ پلاستیک جایگزینی سنگ‌دانه توانسته‌اند کلیه‌ی الزامات کف‌پوش‌های ترافیکی موجود در آیین‌نامه را برآورده سازند.

**واژگان کلیدی:** الیاف پلاستیکی بازیافتی (PET)، اثرات زیست‌محیطی، کف‌پوش بتنی، مشخصات مکانیکی و دوام.

arsalan.ahmadnia@ut.ac.ir
ramezanian@ut.ac.ir
mdolat@ut.ac.ir

## ۱. مقدمه

اهمیت توسعه‌ی پایدار و حفاظت از منابع محیط‌زیست موجب توجه بیش از پیش به مواد ضایعاتی و روش‌های استفاده‌ی مجدد از آن‌ها شده است. یکی از روش‌های متداول در مهندسی عمران، استفاده از مواد دورریز در محصولات سیمانی است. استفاده از مواد ضایعاتی علاوه بر اینکه در کاهش هزینه‌های پروژه مؤثر است، نقش به‌سزایی در حفاظت از محیط‌زیست ایفا می‌کند. بازیافت ضایعات انبوه پلاستیک‌های تولید شده، از دغدغه‌های دنیای امروز است. پلاستیک‌ها انواع مختلفی دارند، یکی از آن‌ها PET یعنی «پلی‌اتیلن‌ترفتالات» است که یکی از متداول‌ترین پلاستیک‌های مصرف شده درجهان است. این ماده به‌عنوان ماده‌یی خام به طور گسترده در ساخت بطری‌های نوشیدنی، ظروف بسته‌بندی غذا و کالاهای مصرفی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. سالانه بیش از ۶/۷ میلیون تن از این نوع بطری‌های در جهان تولید می‌شوند و اکثر این بطری‌های نوشیدنی بعد از یک بار مصرف دور ریخته می‌شوند. طول عمر تولیدات PET بالا نیست[۱و۲] و حجم بسیار زیادی از آن‌ها در چرخه‌ی دفع زباله در درون زمین دفن می‌شوند. از این‌رو بررسی امکان بازیافت PET و استفاده‌ی مجدد آن در چرخه‌ی تولید، درخور اهمیت است. یکی از راه‌های پیشنهادی برای رفع این معضل، جایگزین کردن ماسه‌ی طبیعی با ضایعات PET، برای تهیه‌ی بتن است که این روش می‌تواند فعالیتی مطلوب برای کمک به محیط زیست باشد. هم‌چنین با توجه به تقاضای بسیار زیاد برای تولید بتن و کمیاب بودن ماسه‌ی طبیعی، این امر از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر است. در سال‌های گذشته استفاده از ضایعات پلاستیک در بتن و کف‌پوش‌های بتنی موضوع تحقیق بسیاری از محققان قرار گرفته است.[۳و۴] از مطالعاتی که پیرامون کاربرد ضایعات PET تاکنون صورت گرفته است.[۵-۷] نتایج مناسبی در زمینه‌ی کاهش انقباض، افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلر، کاهش چگالی و افزایش انعطاف‌پذیری و مقاومت کششی به‌دست آمده است.[۸و۹]

کف‌پوش‌ها دارای انواع مختلفی از نظر ابعاد و نوع کاربری هستند. کف‌پوش‌های با ضخامت بیشتر از ۸ سانتی‌متر کف‌پوش‌های ترافیکی نامیده می‌شوند که قابلیت تحمل بارهای سنگین و دینامیکی دارند و ضخامت‌های کمتر در مسیرهای عبور عابر پیاده و دوچرخه مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمول‌ترین روش برای تولید کف‌پوش‌های بتنی، استفاده از روش پرس خشک است که بتن مصرفی در آن دارای اسلامپ صفر است و با استفاده از لرزش و پرس، متراکم می‌شود. کفپوش‌ها در دو لایه‌ی

* نویسنده مسئول
*تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۶/۴، اصلاحیه ۱۳۹۹/۲/۳۰، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۹.*
*DOI:10.24200/J30.2020.53954.2605*

اصلی به ضخامت‌های حدود ۴۵ درصد ضخامت کل کوبیده می‌شود و لایه‌ی رویه به صورت جداگانه و دانه‌بندی ریزتر و بدون شن، با ضخامت حدود ۱ تا ۱٫۵ سانتی‌متر بر روی لایه‌ی دیگر قرار می‌گیرد.

بلوک‌های بتنی تولیدی به روش پرس خشک، یکی از پر استفاده‌ترین مصالح بتنی است که به‌منظور بهبود شرایط اقتصادی و زیست‌محیطی، نیازمند کاهش استفاده از سنگ‌دانه‌های طبیعی و سیمان است. جایگزینی سنگدانه‌ها با ضایعات تولید شده از مواد پلاستیکی یکی از راهکارهای موجود است که بعد از افزودن این ضایعات به بتن مورد استفاده در تولید کف‌پوش‌ها، می‌توان خواص مکانیکی و کارایی بتن مورد استفاده و خواص مکانیکی و دوام کف‌پوش‌های بتنی را سنجید. عملکرد قابل قبول را می‌توان با تغییر در مقادیر جایگزینی به‌دست آورد.[۱۰و۱۱]

مجامع پژوهشی زیادی در سالیان اخیر در مورد کاربرد پلاستیک در صنایع ساختمانی و به‌ویژه بتن شروع به تحقیق و مطالعه کرده‌اند. با وجود اختلاف فراوان در زمینه‌های کاری و نحوه‌ی کار این پژوهشگران، همه‌ی آنها در یک زمینه توافق دارند: «استفاده مجدد از پلاستیک در صنایع ساختمانی.» علت اصلی علاقه‌مندی به کار روی ترکیب پلاستیک و بتن همان‌طور که ذکر شد برخی از خصوصیات منحصر به‌فرد پلاستیک از جمله چگالی اندک و شکل‌پذیری زیاد آن بوده است. برخی تحقیقات انجام شده اثر دانه‌های پلاستیک را بر روی مقاومت فشاری و چگالی بتن بررسی کرده‌اند که نتایج آنها نشان می‌دهد حضور مصالح پلاستیکی، باعث کاهش مقاومت فشاری و وزن واحد حجم نمونه‌ها می‌شود. هم‌چنین حضور پودر پلاستیک درشت‌تر، باعث افت کمتر مقاومت و وزن واحد حجم می‌شود. نشان داده شده است که کاهش مقاومت با افزایش ابعاد دانه‌های پودر پلاستیک از ۰٫۴ میلی‌متر به ۰٫۶ میلی‌متر، بین ۱ تا ۲ درصد است. هم‌چنین افزایش ابعاد ذرات پودر به این مقدار، باعث کاهش افت چگالی به میزان ۴ تا ۸ درصد می‌شود.[۱۲]

در تحقیق دیگری که در سال ۱۹۹۶ منتشر شده است، فرایند شکست نرم و قابلیت جذب مقادیر بزرگ انرژی توسط نمونه‌های بتنی حاوی دانه‌های پلاستیک تحت اثر بارهای فشاری و کششی ثابت شده است. در تحقیق مذکور افت مقاومت خمشی بتن حاوی پلاستیک، کمتر از افت مقاومت‌های کششی و فشاری آن به‌دست آمد.[۱۳] در مطالعاتی مشابه، محققان کره‌یی، نمونه‌های ساخته شده از مخلوط بتن معمولی و ذرات پلاستیک را آزمایش کردند و مقاومت ترک‌خوردگی و قابلیت جذب ضربه‌ی آنها را بیش از مقادیر مشابه در بتن معمولی به دست آورده‌اند که نکته‌ی حائز اهمیتی است.[۱۴]

در تحقیقاتی هم که بر روی مقاومت برشی بتن صورت گرفته است، نتایج این‌گونه به دست آمده است که در تمام حالات و در تمام نمونه‌ها، افزودن الیاف پلاستیک به بتن باعث بهبود خواص رفتاری این مصالح شده است. در بدترین شرایط حداقل ۵۰ درصد و در بهترین شرایط به‌طور متوسط ۱۷۰ درصد، افزایش مقاومت برشی نسبت به رابطه‌ی آیین‌نامه مشاهده شده است. درصد وزنی الیاف برای بهترین حالت ۲۴ درصد وزنی بوده است.[۱۵] در تحقیقاتی هم که بر روی مقاومت برشی بتن صورت گرفته است، نتایج این‌گونه به‌دست آمده است که در تمام حالات و در تمام نمونه‌ها، افزودن الیاف پلاستیک به بتن، باعث بهبود خواص رفتاری این مصالح شده است. در بدترین شرایط حداقل ۵۰ درصد و در بهترین شرایط به‌طور متوسط ۱۷۰ درصد، افزایش مقاومت برشی نسبت به رابطه‌ی آیین‌نامه مشاهده شده است. درصد وزنی الیاف برای بهترین حالت ۲۴ درصد وزنی بوده است.[۱۵]

رحمانی و همکاران[۱۶] اثر جایگزینی ذرات PETدر بتن را مطالعه کردند؛ آن‌ها گزارش کردند که ذرات PET در مقایسه با شن و ماسه‌ی طبیعی دارای سطح خاص‌تری از نظر شکل و بافت‌اند، از این‌رو بین ذرات اصطکاک بیشتری وجود خواهد داشت که باعث کاهش کارایی مخلوط بتن می‌شود. سایکیا و بریتو[۱۷] بر روی تأثیر استفاده از PET با اشکال مختلف مطالعه کردند؛ آن‌ها بر روی مقاومت فشاری با استفاده از ذرات پلاستیک PC و PF و PP در سن ۲۸ روزه با درصد جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ و ۱۵٪ مطالعه کردند. نتایج نشان دادند که استفاده از PP باعث کاهش ۷۵٪ درصدی مقاومت فشاری شده است که این امر به‌دلیل تعامل کمتر پلاستیک با خمیر سیمان است. از این‌رو ضخامت بین فاز منطقه‌ی انتقال (ITZ) در پلاستیک‌های PF و PC کمتر PP است و در نتیجه نتایج مقاومت فشاری کاهش کمتری از خود نشان می‌دهند.

رحمانی و همکاران[۱۶] بر روی اثر استفاده از ذرات PET در بتن بر روی سرعت امواج اولتراسونیک مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند استفاده از ذرات PET در بتن باعث ایجاد تخلخل می‌شود، در نتیجه سرعت امواج با افزایش ذرات PET کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که نسبت آب به سیمان بر روی سرعت UPV تأثیر می‌گذارد. به‌طوری‌که در نسبت‌های آب به سیمان بالا و پس از بین رفتن آب محبوس در بتن حفره‌های خالی در بتن تشکیل و باعث کاهش سرعت UPV می‌شود.

فراترنالی و همکاران[۱۸] تحقیقی روی بتن مسلح به الیاف ضایعاتی انجام دادند. در این مطالعه الیاف به سه حالت بریده شده‌اند:

ـ a: الیاف دارای طول ۴۰ میلی‌متر و سطح مقطع دایره‌یی به قطر ۱٫۱ میلی‌متر (مقاومت کششی ۵۵۰ مگاپاسکال)

ـ b: الیاف دارای طول ۵۲ میلی‌متر و سطح مقطع دایره‌یی به قطر ۰٫۷ میلی‌متر (مقاومت کششی ۲۶۳٫۷۲ مگاپاسکال)

ـ c: الیاف دارای طول ۵۰ میلی‌متر و سطح مقطع دایره‌یی به قطر ۱ میلی‌متر (مقاومت کششی ۲۷۴٫۲۹ مگاپاسکال)

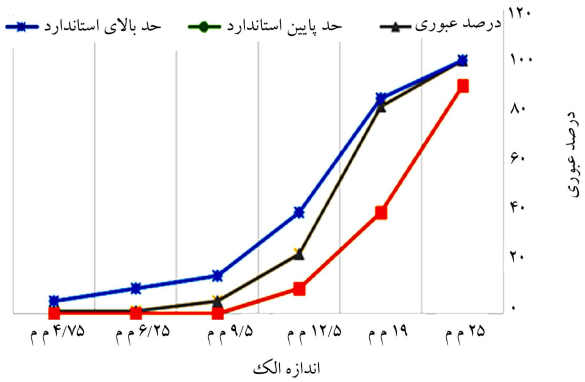
مقدار مصرفی الیاف به میزان ۱٪ حجمی بتن بوده است.

حضور هر سه حالت الیاف در بتن باعث بهبود مقاومت فشاری و شکل‌پذیری شده است. به‌طوری که طرح‌های حاوی الیاف a، b و c به ترتیب سبب افزایش ۳۵٫۱۴، ۲۲٫۰۳ و ۰٫۰۳٪ مقاومت فشاری نسبت به طرح بدون الیاف شده‌اند. در کل طرح حاوی الیاف a عملکرد بهتری نسبت به سایر طرح‌ها داشته است. کلیه‌ی مطالعاتی که تاکنون انجام شده است شامل استفاده از پلاستیک در بتن بوده است و تاکنون پژوهشی بر روی تأثیر استفاده از پلاستیک بر روی مشخصات مکانیکی و دوام کف‌پوش بتنی انجام نشده است و این موضوع از این حیث حائز اهمیت است.

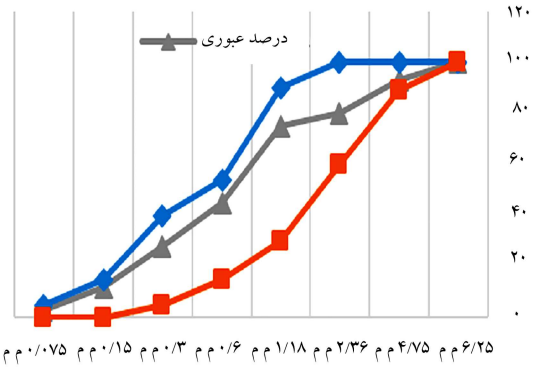
## ۲. مشخصات مصالح مصرفی

با توجه به توصیه‌ی آیین‌نامه‌ها، حداکثر مجاز اندازه‌ی اسمی شن مصرفی در ساخت کف‌پوش بتنی ۱۲٫۵ میلی‌متر است که درشت‌دانه‌های مورد استفاده در این تحقیق با همین اندازه از نوع طبیعی و شکسته بوده‌اند. منحنی دانه‌بندی شن مصرفی در شکل ۱ مشخص شده است. محدوده‌ی درصد عبوری شن مصرفی با محدوده‌ی درصد عبوری استاندارد ASTM-۳۳ استاندارد ملی ایران به شماره‌ی ۳۰۲ مطابقت داشته است. پس با توجه به محدودیت‌های در نظر گرفته شده، حداکثر اندازه‌ی مصرفی درشت‌دانه برای ساخت کف‌پوش بتنی مناسب است.

با توجه به اینکه تمام انواع ریزدانه‌ها برای استفاده در کف‌پوش بتنی مجازند، در این تحقیق از ماسه‌با اندازه‌ی اسمی (میلی‌متر ۶-۰) استفاده شده است. منحنی




شکل ۱. منحنی دانه‌بندی شن مصرفی.




شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی مصرفی.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح.

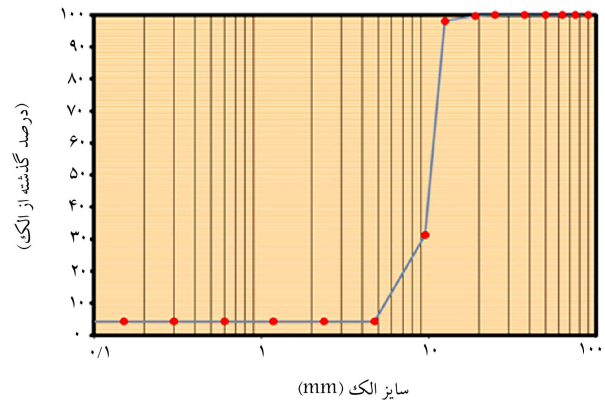
| نوع مصالح | وزن مخصوص $kg/m^3$ | درصد جذب آب |
|---|---|---|
| شن | ۲۶۰۰ | ۲ |
| ماسه | ۲۵۵۰ | ۲٫۸ |

دانه‌بندی ماسه‌ی به‌کار رفته در شکل ۲ مشخص شده است. محدوده‌ی درصد عبوری ماسه‌ی مصرفی با محدوده‌ی درصد عبوری استاندارد ASTM-۳۳ و استاندارد ملی ایران به شماره‌ی ۳۰۲ مطابقت دارد.

مشخصات مکانیکی مصالح شامل وزن مخصوص در حالت اشباع با سطح خشک و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌ها برای شن و ماسه‌ی مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع تیپ ۲ پرتلند تولید شده در کارخانه‌ی سیمان آبیک است که دارای توده‌ی ویژه‌ی ۳۱۵۰ $kg/m^3$ و سطح مخصوص ۳۱۶۰ $gr/cm^2$ است. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۲ آورده شده است.

آب مصرفی در ساخت و عمل‌آوری بتن‌ها از آب شرب شهرستان کرج است که با توجه به مصرف آشامیدنی آن برای ساخت بتن بدون مشکل است (ASTM C-۱۶۰۲).

میکروسیلیس مصرفی به‌عنوان افزودنی معدنی، از کارخانه‌ی صنایع فروسیلیس سمنان تهیه شده است. مشخصات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی در جدول ۳ آورده شده است. به طورکلی تمام ذرات مضاف غیرپودری نظیر انواع الیاف، ذرات پلیمری و پلاستیکی مانند پت ضایعاتی، قابلیت عبور و جریان‌پذیری بتن را کم می‌کنند، با توجه به این واقعیت باید میزان بهینه‌ی ذرات برای رسیدن به مشخصات




شکل ۳. منحنی دانه‌بندی PET بازیافتی.

شکل ۴. شکل ظاهری ذرات PET بازیافت.

بتن تازه و سخت شده تعیین شود. در این پژوهش از ذرات PET ضایعاتی خردایش به‌طریقه‌ی فیزیکی استفاده شده که مشخصات این ذرات در جدول ۴ و شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

## ۳. طرح اختلاط

طرح‌های اختلاط درنظرگرفته شده مطابق جدول ۵ بوده است. نسبت آب به سیمان در تمام نمونه‌ها ۰٫۴۴ بوده است و پلاستیک پت ضایعاتی با درصدهای ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ جایگزین سنگ‌دانه شده است. برای مخلوط کردن مصالح ابتدا سنگ‌دانه‌ها و PET در مخلوط‌کن ریخته شدند و بعد سیمان و در انتها آب و فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه شدند. افزایش درصد ذرات PET، زمان اختلاط را بیشتر کرده است تا این ذرات کاملاً در بتن به‌طور یکنواخت مخلوط شوند.

## ۴. عمل‌آوری بتن

کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی در ابعاد ۸۰ × ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متر به روش پرس خشک در دو لایه‌ی رویه و بستر تحت فشار ۱۰۰ بار، بسامد ۳۶۰۰ هرتز و مدت زمان لرزش ۳٫۵ ثانیه تولید شده و سپس تحت عمل‌آوری بخار به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته است و سپس با قرارگیری درحوضچه‌ی آب تا تاریخ آزمایش مطابق استاندارد شکل ۵ نگهداری شده است.

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی.

| مشخصات | $SiO_2$ | CaO | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | $SO_3$ | $C_3A$ | $C_2S$ | $C_3S$ | $C_4AF$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| درصد | ۲۱/۳۹ | ۶۳/۸۲ | ۵/۰۳ | ۳/۸۷ | ۱/۶۲ | ۲/۴ | ۶/۹۳ | ۵۱/۸۲ | ۲۲/۲۳ | ۱۱/۷۷ |

جدول ۳. مشخصات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی.

| مشخصات شیمیایی | $SiO_2$ | CaO | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | $SO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| درصد | ۹۹/۱ | ۰/۰۱ | ۰/۱۳ | ۰/۰۳۵ | ND | ND |

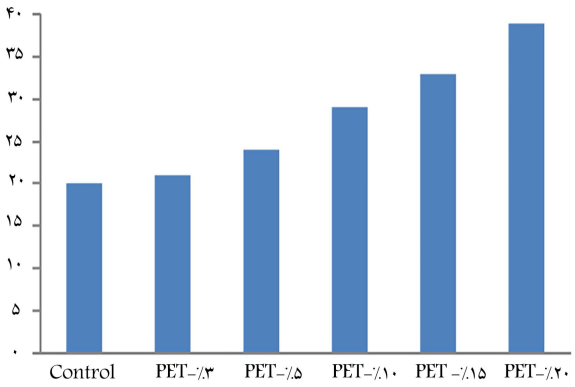
جدول ۴. مشخصات ذرات PET مصرفی.

| نام | ذرات PET ضایعاتی |
|---|---|
| اندازه | عبوری از ۱/۲ اینچ یا کوچک‌تر از ۱۲/۵ میلی‌متر |
| قطر (mm) | ۱ (ضخامت) |
| وزن مخصوص ($Kg/cm^3$) | ۱۱۰۰-۱۳۰۰ |
| مقاومت کششی ($MPa$) | ۶۰-۱۰۰ |
| جذب آب (٪) | ٪۰/۱۵ |
| افزایش طول تا پارگی (٪) | ۱۰-۳ |
| مدول الاستیسیته کششی (GPa) | ۲/۹ |
| مدل الاستیسیته خمشی (GPa) | ۲/۴ |

جدول ۵. نسبت های اختلاط نمونه‌ها.

| طرح | سیمان | میکروسیلیس Kg | شن Kg | ماسه Kg | آب Liter | الیاف PET بازیافتی Kg |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Control | ۴۰۵ | ۴۵ | ۵۶۸ | ۹۰۰ | ۱۸۰ | ۰ |
| PET ٪۳ | ۴۰۵ | ۴۵ | ۵۵۰ | ۸۷۳ | ۱۸۰ | ۴۴ |
| PET ٪۵ | ۴۰۵ | ۴۵ | ۵۳۹ | ۸۵۵ | ۱۸۰ | ۷۳ |
| PET ٪۱۰ | ۴۰۵ | ۴۵ | ۵۱۱ | ۸۱۰ | ۱۸۰ | ۱۴۶ |
| PET ٪۱۵ | ۴۰۵ | ۴۵ | ۴۸۲ | ۷۶۵ | ۱۸۰ | ۲۲۰ |

شکل ۵. اتاق عمل‌آوری.




شکل ۶. نتایج آزمایش وی‌بی، کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET ضایعاتی.

## ۵. آزمایش‌های انجام شده

آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش مربوط به بتن تازه و سخت شده شامل: وی‌بی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، جذب آب، درصد سایش و مقاومت در برابر ذوب و انجماد بوده است. تعداد نمونه‌های بتنی مورد آزمایش در سنین مورد نظر برای بررسی رفتار مهندسی کف‌پوش بتنی ترافیکی (Control) حاوی ذرات PET ضایعاتی برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی به روش دونیم شدن، مقاومت خمشی، سرعت امواج اولتراسونیک، درصد سایش، جذب آب و ذوب و انجماد در جدول ۶ ارائه شده است. هم‌چنین استاندارد مربوط به هر آزمایش نیز مشخص شده است. از آن‌جایی که استفاده از کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی در معابر و روسازی‌های شهری نیازمند برآورده کردن الزامات مطرح‌شده در آیین‌نامه‌هاست، در این تحقیق بعد از تولید محصول و انجام آزمایش‌های مکانیکی و دوام کف‌پوش‌ها، نتایج با الزامات آیین‌نامه‌های BS-۶۷۱۷، ASTM-C-۹۳۶، ASTM-C-۵۹۷، BS-۱۳۳۸ مقایسه شده است.

## ۶. نتایج و تفسیر

### ۱.۶. نتایج آزمایش‌های بتن تازه

#### ۱.۱.۶. نتایج وی‌بی

نتایج آزمایش وی‌بی بر روی طرح‌های اختلاط در شکل ۶ نشان داده شده است. نتیجه‌ی آزمایش وی‌بی مخلوط بتن تازه حاوی ۳ درصد ذرات PETضایعاتی از نظر روانی، قابلیت پرکنندگی و هم‌چنین مقاومت کافی در برابر جداشدگی بسیار مناسب بود. مخلوط کف‌پوش بتنی حاوی ۵ درصد ذرات PET ضایعاتی نتایج وی‌بی مناسبی داشت، ولی در خصوصیات ظاهری و کارایی بتن مورد نیاز ساخت کف‌پوش بتنی به‌صورت مرزی عمل کرده است. اما مخلوط بتن تازه با اسلامپ صفر

جدول ۶. تعداد نمونه‌های بتنی در آزمایش‌های بتن سخت شده.

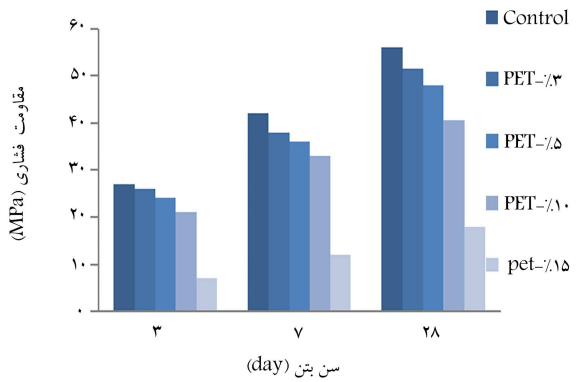
| نوع آزمون | ابعاد نمونه (cm) | آیین‌نامه‌ی کنترلی | تعداد نمونه در هر سن | عنوان طرح | سن آزمایش |
|---|---|---|---|---|---|
| مقاومت فشاری | ۲۰ × ۱۰ × ۸ | ASTM-C۹۳۶ | ۱۰ | Control-PET | ۲۸،۷،۳ روزه |
| مقاومت خمشی | ۲۰ × ۱۰ × ۸ | ASTM-C۹۳۶ | ۱۰ | Control-PET | ۲۸،۷،۳ روزه |
| مقاومت کششی | ۲۰ × ۱۰ × ۸ | BS-۶۷۱۷ | ۸ | Control-PET | ۲۸،۷،۳ روزه |
| سرعت امواج | ۲۰ × ۱۰ × ۸ | ASTM-C۵۹۷ | ۸ | Control-PET | ۲۸ روزه |
| جذب آب | ۲۰ × ۱۰ × ۸ | ASTM-C۹۳۶ | ۸ | Control-PET | ۲۸ روزه |
| مقاومت سایشی | ۲۰ × ۱۰ × ۸ | BS-۱۳۳۸ | ۴ | Control-PET | ۲۸ روزه |
| مقاومت یخبندان | ۲۰ × ۱۰ × ۸ | BS-۶۷۱۷ | ۴ | Control-PET | ۲۸ روزه |

و حاوی ۱۰ درصد ذرات PET ضایعاتی، بیرون‌زدگی پت از سطح بتن (هم‌چنین تجمع خفیف سنگ‌دانه و ذرات پت در مرکز قالب) مشاهده شد. از این آزمایش نتیجه گرفته شد که در کف‌پوش بتنی با افزایش ذرات پت ضایعاتی، قابلیت کارایی و جریان‌پذیری بتن مورد نیاز تولید کف‌پوش بتنی با درصد جایگزینی PET به جای سنگ‌دانه (۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪) به‌ترتیب ۰٫۵٪ افزایش و ۲، ۴۵، ۶۵ و ۹۵ درصد کاهش یافت.

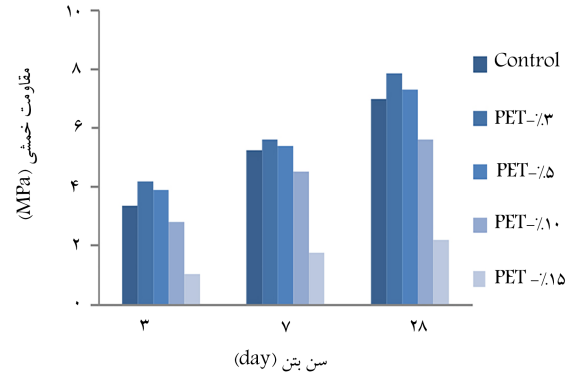
## ۲.۶. نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

### ۱.۲.۶. مقاومت فشاری

مقایسه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌های کف‌پوش بتنی ترافیکی (Control) و کف‌پوش بتنی حاوی ذرات پلی‌اتیلن‌ترفتالات ضایعاتی (PET) در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که حضور ذرات PET ضایعاتی با درصدهای پایین تأثیر اندکی بر مقاومت فشاری دارد، اما در مقادیر بالا موجب کاهش قابل ملاحظه‌یی بر مقاومت فشاری می‌شود که این کاهش در سنین بالای بتن و با افزایش میزان ذرات پت محسوس‌تر است. احتمالاً این کاهش مقاومت فشاری به این دلیل است که استفاده از ذرات PET ضایعاتی در کف‌پوش بتنی، سبب کاهش تراکم‌پذیری بتن شده است که این امر باعث ایجاد نقاط ضعف در بافت بتن (به دلیل ایجاد تخلخل موضعی ناشی از نفوذ حباب هوا) شود و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری را فراهم می‌آورد. از طرفی دیگر از آن‌جا که ذرات پت خاصیت آب‌گریزی دارند (جذب آب این ذرات کمتر از ۰٫۱۵ درصد است) مانع از عبور آب از روی این ذرات و نفوذ به ساختار بتن به‌منظور انجام فرایند هیدراتاسیون می‌شوند. نکته‌ی حائز اهمیت آن است که گسیختگی در همه‌ی نمونه‌های کف‌پوش بتنی حاوی ذرات PET ضایعاتی در حین بارگذاری فشاری، از شکست ترد (ناگهانی) به شکست نرم و تدریجی تغییر ماهیت پیدا کرده است.




**شکل ۷. مقایسه‌ی مقاومت فشاری بتن معمولی کف‌پوش و بتن کف‌پوش حاوی ذرات بازیافتی با درصدهای مختلف.**

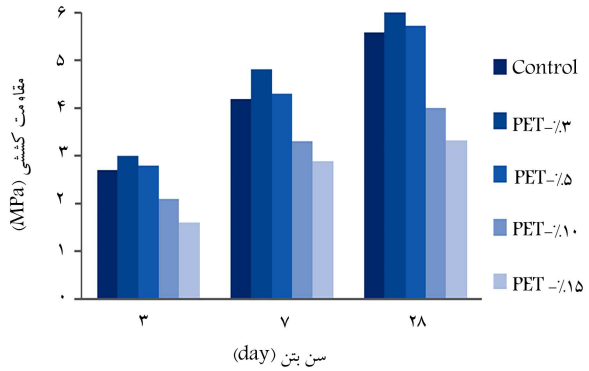



**شکل ۸. مقایسه‌ی مدول گسیختگی کف‌پوش معمولی و کف‌پوش‌های حاوی پلاستیک.**

### ۲.۲.۶. مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مدول گسیختگی در شکل ۸ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند افزودن ذرات PET ضایعاتی سبب بهبود مقاومت خمشی بتن در درصدهای پایین (۳ و ۵ درصد) شد و هرچه مقدار این ذرات بیشتر شد، تأثیر آن در افزایش مقاومت خمشی کمتر شد، به‌طوری که برای طرح‌های حاوی ذرات PET ضایعاتی با نسبت های ۳ و ۵ درصد نسبت به طرح بدون ذرات، در سن ۲۸ روز حدود ۱۳ و ۵ درصد افزایش و برای درصدهای ۱۰ و ۱۵ درصد PET، حدود ۲۰ و ۶۰ درصد کاهش مشاهده شد.

استفاده از ذرات PET ضایعاتی باعث می‌شود نمونه‌ها به‌صورت ترد شکافته نشوند و بعد از افزایش بار، گسیختگی با دو نیم شدن کامل نمونه‌ها همراه نباشد. سازوکار افزایش مقاومت خمشی در اثر استفاده از ذرات را می‌توان بدین‌صورت توضیح داد: استفاده از ذرات به معنی اتصال بسیار وسیع و فاصله‌ی کم ذرات است، پس از اعمال بار و بروز ترک‌های بسیار ریز در بافت بتن (ترک‌های میکروسکوپی)، ذرات قادر خواهند بود از گسترش ترک‌ها به ترک‌های ماکروسکوپی جلوگیری کنند 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.



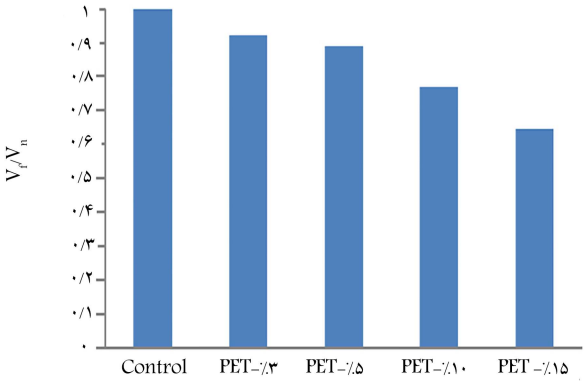

شکل ۹. نمودار مقایسه‌ی مقاومت کششی کف‌پوش معمولی و کف‌پوش‌های حاوی PET.

### ۳.۲.۶. مقاومت کششی

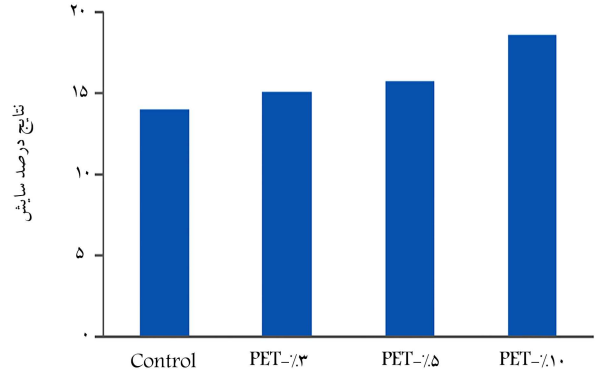
مقاومت کششی برای هر طرح، در شرایط یکسان نگهداری در سنین ۳ تا ۲۸ روز در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که حضور ذرات PET ضایعاتی در درصدهای پایین (۳ و ۵ درصد) باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود و هرچه میزان این ذرات افزایش می‌یابد (۱۰ و ۱۵ درصد) به دلیل عدم تراکم‌پذیری مناسب این ذرات پلاستیکی، میزان مقاومت کششی کاهش یافته است. مثلاً درصد افزایش مقاومت کششی طرح کف‌پوش بتنی حاوی ذرات PET ضایعاتی به میزان ۳ درصد وزنی سنگ‌دانه، نسبت به طرح بدون ذرات در سن ۲۸ روز حدود ۷٪ بوده است. نحوه‌ی شکست نمونه‌های کف‌پوش بتنی حاوی ذرات پت در آزمایش کششی، متفاوت با نمونه‌های کف‌پوش بتنی ترافیکی است و از حالت شکست ترد (ناگهانی) به حالت نرم و تدریجی تبدیل شده است. آنچه را به هنگام افزایش مقاومت کششی در نتیجه استفاده از ذرات اتفاق می‌افتد، 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.

### ۴.۲.۶. نتایج آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک

در شکل ۱۰، نتایج سرعت امواج اولتراسونیک بر حسب افزایش درصد پت آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد جایگزینی پت در نمونه‌های بتن، سرعت امواج اولتراسونیک در هر طرح کاهش یافته است؛ اما به‌طورکلی حضور ذرات PET ضایعاتی موجب کاهش اندکی در سرعت عبور امواج می‌شود که این کاهش با افزایش میزان ذرات پت محسوس‌تر است. حضور ذرات PET ضایعاتی با ۳ درصد وزنی تأثیر چشم‌گیری روی سرعت امواج اولتراسونیک نداشته است، ولی استفاده از درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد PETبه ترتیب موجب کاهش ۱۰، ۲۲ و ۳۵ درصدی سرعت امواج اولتراسونیک در کف‌پوش بتنی شده‌اند. این کاهش سرعت عبور امواج یا به تعبیری دیگر افزایش تخلخل در بتن، احتمالاً به این دلیل است که استفاده از ذرات PET ضایعاتی در کف‌پوش بتنی، سبب کاهش تراکم‌پذیری بتن می‌شود که این امر ناشی از ایجاد نقاط ضعف در بافت بتن (به دلیل ایجاد تخلخل موضعی ناشی از نفوذ حباب هوا) است و در نتیجه کاهش سرعت عبور امواج را فراهم می‌آورد.




شکل ۱۰. مقایسه‌ی نسبت سرعت امواج اولتراسونیک کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات پت ($V_f$) با کف‌پوش بتنی ترافیکی ($V_n$) در سنین مختلف.



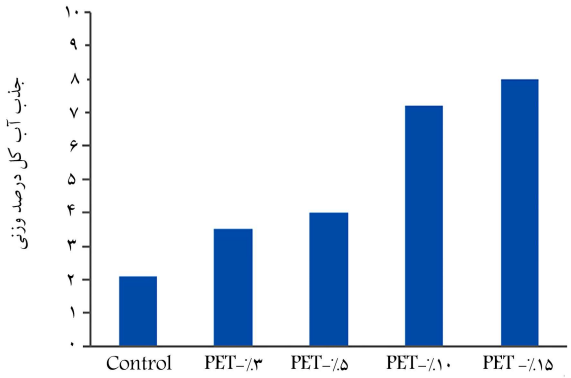

شکل ۱۱. مقایسه‌ی مقاومت سایش کف‌پوش‌های ترافیکی حاوی ذرات پت.

### ۵.۲.۶. نتایج مقاومت سایشی

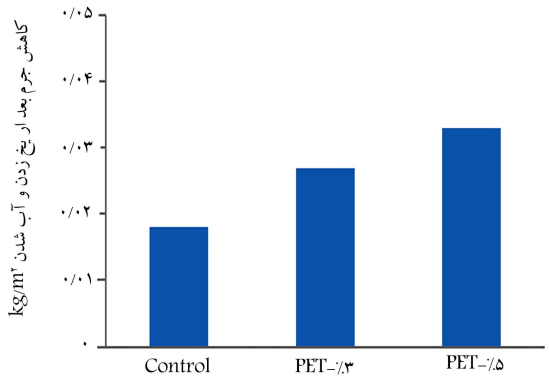
نتایج آزمایش سایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که استفاده از پلاستیک ضایعاتی (PET) تأثیر چندانی بر روی مقاومت سایشی کف‌پوش‌های بتنی نداشته است؛ در حقیقت میزان درصد سایش کف‌پوش‌های بتنی با مقدار جای‌گزینی ۳، ۵ و ۱۰ درصد PET به جای سنگ‌دانه به ترتیب ۷، ۱۱ و ۳۲ درصد کاهش یافته است. این امر به‌دلیل ساختار کف‌پوش‌هاست؛ زیرا همان‌طور که در ابتدا ذکر شد، کف‌پوش‌های بتنی از دو لایه‌ی رویه[1] و بستر[2] تشکیل شده و در این تحقیق پلاستیک‌های ضایعاتی فقط در لایه‌ی بستر به کار برده شده است. پس از آنجاکه تقریباً ۱٫۵ سانتی‌متر روی کف‌پوش‌ها از مصالح لایه‌ی رویه تشکیل شده است و آزمایش مقاومت سایشی در سطح رویه‌ی کف‌پوش انجام می‌شود، در درصدهای پایین جایگزینی پلاستیک (۳ و ۵٪) تغییر محسوسی نسبت به نمونه‌ی کنترل کف‌پوش ترافیکی مشاهده نمی‌شود؛ در حالی‌که با افزایش جایگزینی PET به جای سنگ‌دانه در درصدهای بالا (۱۰، ۱۵ و ۲۰٪) مشاهده شد که به دلیل اشکال نامتقارن پلاستیک، وجود قطعاتی با ابعاد بزرگ‌تر از حد مجاز دانه‌بندی در کف‌پوش‌های بتنی، و خاصیت ارتجاعی بالای پلاستیک‌ها با اعمال فشار برای تراکم کف‌پوش‌ها در هنگام تولید، بعضاً مقداری پلاستیک بعد از عملیات بارگذاری و باربرداری در سطح رویه ظاهر می‌شود و این امر باعث ضعف لایه‌ی رویه و خارج شدن نتایج آن از مقدار حد سایش مجاز می‌شود که این امر باعث شد تا آزمایش‌های درصد سایش برای کف‌پوش‌های ترافیکی جایگزین با پلاستیک با درصدهای ۱۵ و ۲۰ به‌دلیل برآورده نکردن الزامات ظاهری کف‌پوش‌های بتنی انجام نپذیرد. کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی جزء رده‌ی ۴ رده‌های مقاومت سایشی محسوب می‌شوند که مطابق با استاندارد باید نتایج سایش نمونه‌های منفرد آنها طبق روش چرخ پهن، کوچک‌تر یا مساوی ۲۰ میلی‌متر باشد.

جدول ۷. مقایسه‌ی نتایج کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات پت با درصدهای مختلف با الزامات آیین‌نامه‌یی.

| نوع آزمایش | آیین‌نامه‌ی کنترلی | حداقل نتایج موردنیاز | Control | PET | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | ٪-۳ | ٪۵ | ٪-۱۰ | ٪-۱۵ | ٪-۲۰ |
| مقاومت فشاری | ASTM-C۹۳۶ | ۵۰ $MPa$ | ۵۶ | ۵۱٫۵ | ۴۸ | ۴۰٫۵ | ۱۸ | - |
| مقاومت خمشی | ASTM-C۹۳۶ | ۴ $MPa$ | ۷ | ۷٫۸ | ۷٫۲ | ۵٫۶ | ۲٫۲ | - |
| مقاومت کششی | BS-۶۷۱۷ | ۲٫۹ $MPa$ | ۵۶ | ۶ | ۵٫۷ | ۴ | ۲٫۲ | - |
| مقاومت سایشی | BS-۱۳۳۸ | ≥ ۲۰ میلی‌متر | ۱۴ | ۱۵ | ۱۵٫۶ | ۱۸٫۵ | - | - |
| جذب آب | ASTM-C۹۳۶ | ≥ ۶ درصد وزنی | ۲٫۱ | ۲٫۵ | ۴ | ۷٫۲ | ۸ | - |
| مقاومت ذوب و یخ | BS-۶۷۱۷ | < ۳۰ درصد وزنی $gr/m^2$ | ۱۸ | ۲۷ | ۳۳ | - | - | - |
| سرعت امواج اولتراسونیک | ASTM-C۵۹۷ | ۳٫۵-۴٫۵ | ۴٫۶۷۳ | ۴٫۳۰۴ | ۴٫۱۶۸ | ۳٫۶۰۵ | ۳٫۰۲۳ | - |




شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج جذب آب کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات پت.




شکل ۱۳. مقایسه‌ی نتایج آزمون ذوب و یخ کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات پت.

### ۶.۲.۶. نتایج آزمایش تعیین جذب آب کل

نتایج آزمایش جذب آب کف‌پوش‌های بتنی در شکل ۱۲ آورده شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که با افزایش مقدار پلاستیک جایگزین درکف‌پوش‌های ترافیکی، مقدار جذب آب افزایش یافته است، این امر در حالی اتفاق افتاده که پلاستیک‌های ضایعاتی از جذب آب نزدیک به صفر برخوردار هستند. به نظر می‌رسد آب جذب شده در بین فضاهای خالی و متخلخل بتن قرار می‌گیرد و شکل ناهمگون پلاستیک‌ها باعث افزایش این فضاهای خالی درکف‌پوش‌ها شده است. در حالی که با جایگزینی پلاستیک در درصدهای پایین ۳٪ و ۵٪، تغییر محسوسی در نتایج جذب آب با نمونه‌ی کنترل مشاهده نشد، ولی با افزایش درصد پلاستیک، به‌تدریج جذب آب نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و از حد مجاز آیین‌نامه (۶ ≥ میانگین) فراتر رفته است.

### ۷.۲.۶. نتایج مقاومت در برابر ذوب و انجماد

نتایج مربوط به آزمایش‌های ذوب و انجماد در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که استفاده از پلاستیک ضایعاتی PET با درصد پایین (۳ و ۵ درصد) تأثیر چندانی بر روی مقاومت در برابر یخبندان کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی نداشته است. این امر به‌دلیل ساختار کف‌پوش‌هاست؛ زیرا همان‌طور که پیش‌تر هم ذکر شد، کف‌پوش‌های بتنی از دو لایه‌ی رویه و بستر تشکیل شده‌اند و در این آزمایش محلول نمک فقط با سطح نمونه در تماس است که این سطح دارای نفوذپذیری کم است و به‌نظر می‌رسد با افزایش درصد پلاستیک، نتایج به دست آمده از محدوده‌ی تعریف شده در آیین‌نامه خارج شود.

- با توجه به نتایج قبلی به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی مشخصات مکانیکی کف‌پوش بتنی ترافیکی، استفاده از پلاستیک ضایعاتی در درصدهای بالا (۱۰ و ۱۵٪) باعث متخلخل شدن کف‌پوش و برآورده نشدن الزامات ظاهری کف‌پوش شد، از این رو فقط به ارزیابی کف‌پوش‌ها با درصد کم پلاستیک جایگزین به جای سنگدانه در این آزمایش پرداخته شده است.

## ۳.۶. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها با الزامات آیین‌نامه‌یی

برای درک بهتر و مشخص شدن شرایط بیشترین مقدار پلاستیک مصرفی در کف‌پوش‌های بتنی بدون اثرات منفی، نتایج نمونه‌های سن ۲۸ روزه به همراه حداقل الزامات موردنیاز آیین‌نامه‌یی در جدول ۷ دسته‌بندی شده است. در جدول ۷ نتایج علامت‌گذاری‌شده با رنگ سبز به معنی قرار داشتن نتایج در بازه‌ی مورد نیاز آیین‌نامه‌هاست، نتایج نشانه‌گذاری شده به رنگ زرد نمایانگر قرارگرفتن نتایج به‌صورت مرزی نسبت به نتایج آیین‌نامه‌های مربوط و نتایج نشانه‌گذاری شده به رنگ قرمز غیرقابل پذیرش نسبت به الزامات آیین‌نامه‌های مربوط است.

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، کف‌پوش‌های تولید شده با نسبت جایگذاری ۳٪ PET به جای سنگ‌دانه توانسته تمام الزامات مورد نیاز آیین‌نامه‌های مختلف را برآورده کند و می‌توان گفت این مقدار بیشترین میزان استفاده از پت بدون به‌وجود آمدن تأثیرات منفی درکف‌پوش بتنی است. در حالی‌که با بهینه‌سازی شرایط تولید و عمل‌آوری کف‌پوش بتنی می‌توان تا ۵٪ از جای‌گذاری PET به جای

سنگ‌دانه، بدون مشاهده‌ی اثرات منفی در نتایج را استفاده کرد. ولی تأثیر استفاده از PET به جای سنگ‌دانه در مقادیر بیشتر (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) به صورتی است که بر عملکرد کف‌پوش‌های بتنی و احراز الزامات آیین‌نامه‌ای تأثیر منفی می‌گذارد.

## ۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر استفاده از پلاستیک ضایعاتی (PET) بر روی خواص مکانیکی کف‌پوش بتنی ترافیکی، پس از تعیین میزان نسبت‌های اختلاط مذکور برای تقویت بتن اسلامپ صفر، آزمایش‌های لازم بر روی بتن تازه و سخت شده انجام شد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر حاصل شد.

- ساخت کف‌پوش بتن ترافیکی با استفاده از ذرات PET ضایعاتی به میزان ۳٪ جای‌گذاری به جای سنگ‌دانه باعث ایجاد تأثیرات منفی بر روی کف‌پوش‌های بتنی نشده است. نتایج آزمایش بتن تازه نشان دادند که با افزودن ذرات از خصوصیات جریان‌پذیری و پرکنندگی بتن کاسته شده است، بیشترین کاهش در طرح کف‌پوش بتنی حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد ذرات بوده است. هم‌چنین نتایج حاکی از آن بود که استفاده از ذرات PET در درصدهای پایین تأثیر چندانی بر روی جریان‌پذیری بتن تازه با اسلامپ صفر نداشته است.
- کاهش مقاومت فشاری کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET ضایعاتی با درصدهای ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سنگ‌دانه در سن ۲۸ روزه به‌ترتیب ۸، ۱۴، ۲۷ و ۶۷ درصد بوده است.
- مقدار افزایش مقاومت کششی کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET ضایعاتی با درصدهای جایگزینی ۳ و ۵ درصد سنگ‌دانه در سن ۲۸ روزه به‌ترتیب ۷ و ۲ درصد است. نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان دادند که افزودن ذرات PET با درصدهای بالا ۱۰، ۱۵ باعث کاهش مقاومت کششی شده است؛ کاهش مقاومت کششی کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET با درصدهای ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سنگ‌دانه درسن ۲۸ روزه به ترتیب ۲۸ و ۴۰ درصد بوده است.
- مقدار افزایش مقاومت خمشی کف‌پوش بتنی حاوی ذرات PET با درصدهای ۳ و ۵ درصد وزنی سنگ‌دانه در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۱۲ و ۴ درصد حاصل شده است. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان دادند که افزودن ذرات PE ۱mT با درصدهای بالای ۱۰، ۱۵ درصد باعث کاهش مقاومت خمشی شده است، کاهش مقاومت خمشی کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET با درصدهای ۱۰، ۱۵ درصد وزنی سنگ‌دانه در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۲۰ و ۶۸ درصد بوده است.
- نحوه‌ی شکست نمونه‌های کفپوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET تحت آزمایش مقاومت‌های فشاری، کششی، و خمشی متفاوت با نمونه‌های کف‌پوش بتنی ترافیکی (بدون ذرات) بوده است و به‌صورت نرم و تدریجی شکست صورت می‌گیرد.
- به‌طورکلی حضور ذرات PET ضایعاتی روی سرعت امواج اولتراسونیک کف‌پوش بتنی ترافیکی تأثیر چندانی نداشت. سرعت امواج اولتراسونیک کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی اعم از بدون ذرات و حاوی ذرات، با افزایش سن بتن‌ها در هر طرح نسبت به خودش افزایش یافته بود. از طرفی با افزایش میزان مصرف ذرات PET ضایعاتی، شاهد کاهش اندک سرعت عبور امواج بودیم؛ همان‌طورکه توضیح داده شد، این امر می‌تواند ناشی از ایجاد نقاط ضعیف در بافت بتن به دلیل ایجاد تخلخل موضعی ناشی از نفوذ حباب هوا در اطراف ذرات PET ضایعاتی باشد که در نتیجه کاهش سرعت عبور امواج را فراهم می‌آورد. بنابراین، رابطه‌ی سرعت امواج با گذشت زمان نتایج آزمایش مقاومت فشاری را تأیید کرده است.
- با توجه به اینکه آزمایش مقاومت سایشی فقط بر روی لایه‌ی رویه انجام شده است، استفاده از PET در درصدهای پایین تأثیر چندانی بر روی مقاومت سایشی نداشته است. ولی نتایج مقاومت سایشی به‌دست آمده حاکی از آن است که استفاده از PET جایگزین سنگ‌دانه درکف‌پوش‌های بتنی ترافیکی در درصدهای بالا (۱۰ درصد)، باعث کاهش مقاومت سایشی کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی می‌شود. این امر به‌دلیل خاصیت کشسانی پلاستیک‌ها و اعمال ارتعاش و فشار به کف‌پوش‌ها در هنگام فرایند تولید است که در مواردی شاهد نفوذ پلاستیک از لایه‌ی بستر به سطح رویه‌ی کف‌پوش‌ها بوده‌ایم که در نتیجه باعث کاهش مقاومت سایشی به‌صورت جزئی در درصدهای بالای جایگزینی پلاستیک PET درکف‌پوش‌های بتنی ترافیکی شده بود.
- نتایج آزمایش‌های درصد جذب آب کل بر روی کف پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET نشان دادند که با افزایش مقدار پلاستیک جایگزین درکف‌پوش‌های ترافیکی، مقدار جذب آب کل افزایش یافته است. این امر در حالی است که در درصدهای پایین جایگزینی پلاستیک به جای سنگ‌دانه (۳ و ۵ درصد) درمقدار جذب آب کل نسبت به نمونه‌ی کنترل تغییر محسوسی را شاهد نبوده‌ایم، ولی با افزایش مقدار جایگزین PET به‌جای سنگ‌دانه، جذب آب در درصدهای بالاتر (۱۰ و ۱۵٪) به صورت صعودی افزایش یافته است. به‌نظر می‌رسد آب جذب شده در بین فضاهای خالی و متخلخل قرار می‌گیرد و شکل ناهمگون پلاستیک‌ها باعث افزایش این فضاهای خالی درکف‌پوش می‌شود. جذب آب نزدیک به صفر پلاستیک، به‌تنهایی گواه افزایش فضاهای خالی و در نتیجه افزایش مقدار آب جذب شده توسط این منافذ در نمونه‌هاست.
- افزودن ذرات PET ضایعاتی با درصدهای پایین (۳ و ۵ درصد) تأثیر چندانی بر روی مقاومت ذوب و انجماد نداشته است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از پلاستیک ضایعاتی در لایه‌ی بستر (main) کف‌پوش‌های بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET با درصدهای پایین، تا حدودی به‌صورت کاهشی عمل کرده است که قابل چشم‌پوشی است. به‌نظر می‌رسد با افزایش درصد جایگزینی پلاستیک، کاهش بیشتری در نتایج آزمایش مقاومت ذوب و انجماد را شاهد باشیم.
- ذرات PET بر روی خواص مکانیکی کف‌پوش بتنی ترافیکی تأثیرگذار بوده است و مقاومت کششی و خمشی را در درصدهای پایین جایگزینی افزایش داده است و تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری نگذاشته است؛ زیرا ذرات PET دارای مدول کشسانی خمشی و کششی بالایی هستند و قابلیت تحمل بار تا پارگی زیادی را دارند. مدول کششی ذرات PET نسبت به مدول خمشی آن حدود ۲۰٪ بیشتر بوده است و به همین دلیل تأثیر آن بر روی مقاومت کششی بیشتر است.
- تمام نتایج آزمایش‌های مشخصات مکانیکی بر روی کف‌پوش بتنی ترافیکی حاوی ذرات PET در درصدهای مختلف جایگزینی پلاستیک به جای سنگ‌دانه، حاکی از آن بود که استفاده از پلاستیک ضایعاتی PET در درصدهای پایین ۳ و ۵ درصد تأثیر منفی کمتری بر روی مشخصات مکانیکی کف‌پوش گذاشته است و حتی در برخی از موارد باعث بهبود رفتار مکانیکی کف‌پوش‌ها شده است. این امر در حالی حائز اهمیت بوده است که با استفاده از پلاستیک در تولید این نوع کف‌پوش‌ها، بخشی از پلاستیک ضایعاتی از چرخه‌ی محیط زیست حذف

می‌شود و هم‌چنین می‌توان یک عضو بتنی با مشخصات مکانیکی کاملاً دقیق و همگن تولید کرد که ضعف عمده‌ی قطعات بتنی یعنی کشش و خمش را تا حدی بهبود بخشد و در عین حال ضوابط ملزم در آیین‌نامه‌های موجود را برآورده کند.

- با توجه به نتایج به‌دست آمده توصیه می‌شود اولاً پلاستیک به شکل الیاف درآید و در بتن مورد استفاده قرار گیرد و نه به‌صورت پودری، ثانیاً مقدار پلاستیک برای گرفتن نتایج بهینه به ۵٪ وزن سیمان محدود شود.
- با عنایت به بالارفتن انعطاف‌پذیری بتن به‌ازای افزایش مقدار پلاستیک، توصیه می‌شود تا جایی‌که مقاومت فشاری طرح اجازه می‌دهد، به‌منظور سبک‌ترکردن بتن، افزایش انعطاف‌پذیری، جلوگیری از شکست‌ها و ریزش‌های ناگهانی و جذب بیشتر انرژی، حتماً از پلاستیک در بتن استفاده شود.

## تقدیر و تشکر

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

## پانوشت‌ها

1. face
2. main

## منابع (References)


1. John, A.C., Martin, G. and Lai, W.L. "Properties of concrete prepared with PET granules", *Time Development of the Material Properties and Bond*, **21**, pp. 100-109 (2000).
2. Orumieh A, A.R. "Polyethylene terephthalate", First. Tehran: Iran Polymer Society, (In Persian) (2014).
3. Rebeiz, K.S. "Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET", *Cem. Concr. Compos*, **17**, pp. 119-124. (1995).
4. Avila, A.F. and Duarte, M.V. "A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites", *Polym. Degrad*, **80**(2), pp. 373-382 (2003).
5. Batayneh, M., Marie, I. and Asi, I. "Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Manag*, **27**(12), pp. 1870-1876 (2007).
6. Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M. and et al. "Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behavior at different w/c ratios", *Waste Manag*, **29**(10), pp. 2707-2716 (2009).
7. Sadrmomtazi, A, Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O. and et al. "The combined effects of waste polyethylene terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete", *Journal of Cleaner Production*, **12**(4), pp. 2363-2373 (2016).
8. Al-Hadithi, A.I. "Improving impact and mechanical properties of gap-graded concrete by adding waste plastic fibers", *Int. J. Civil Eng Technol*, **4**(2), pp. 118-131 (2013).
9. Okamura H. and Ouchi M. "Self-compacting concrete", *J Adv Concrete Technol*, **1**(1), pp. 5-15 (2003).
10. Gamalath, H.G.P., Weerasinghe, T.G.P.L. and Nanayakkara. S.M.A. "Use of waste rubber granules for the production of concrete paving blocks", *The 7th International Conference on Sustainable Built Environment*, Sri Lanka (2016).
11. Chidiac, S.E., and Mihaljevic, S.N. "Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates", *Cement & Concrete Composites*, **33**, pp. 855-863 (2011).
12. Mostofinejad, D. and Najjar, M. "Compressive strength test of containing grain and recycled plastic powders", *Second International Conference on Concrete and Development*, pp. 925-932, Tehran, May (2005).
13. Naiki, T. R., Singh, S. S., Huber, C. O. and et.al."Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites", *Cement and concrete research*, **26**(10), pp.1489-1492 (1996).
14. kim, J.R. and Korea, G. "Characteristics of crumb rubber modified(Crm) asphalt concrete", *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 157-164 (June 2001).
15. Azadegan, O., Zekri, S., Fada'i, M.J. and et al. "Reinforcement of shear properties of concrete by plastic fibers", *First National Conference on Engineering and Infrastructure Management College of Engineering*, Tehran University, Iran, November (2009).
16. Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M.H.A. and et al. "On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles", *Constr. Build. Mater*, **47**, 1302-1308 (2013).
17. Saikia, N., Brito, J.D. "Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate", *Constr. Build. Material*, **52**, pp. 236e-244 (2014).
18. Fraternali, V., Ciancia, R. and Chechile, G. and et al. "Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete", *Composite Structures*, **93**, pp. 2368-2374 (2011).