ارزیابی تأثیر پلاستیک بازیافتی (PET) بر مشخصات مکانیکی و مقاومت سایشی روسازی بتنی

مقاله پژوهشی

بشیر مرادی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
ابوالفضل حسنی*، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
حامد روح‌الامینی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hassani@modares.ac.ir

دریافت: ۹۹/۱۱/۲۰- پذیرش: ۱٤۰۰/۰٦/۰۵
صفحه۱۳۲-۱۱۳

چکیده

با توجه به افزایش روزافزون زباله‌های پلاستیکی، تجزیه ناپذیر بودن و همچنین مشکلات مربوط به دفن بهداشتی این مواد، مصرف دوباره زباله‌های پلاستیکی پس از فرآوری در راه‌ها می‌تواند مزایای اقتصادی و محیط زیستی فراوانی داشته باشد. طبق گزارشات سالانه مرکز اطلاعات صنعتی و تکنولوژیکی وزارت صنایع و معادن در سال ۱۳۹۶ برای ضایعات بطری‌های پلاستیکی حاصل از مصرف نوشیدنی‌ها و سایر انواع پلاستیک‌های از جنس PET، مجموعاً به میزان قابل توجه ۵۰۹/۳ هزار تن می‌باشد. همچنین در روسازی‌های بتنی، مقاومت سایشی از جمله فاکتورهای مهم دوام است که همواره مشکل‌ساز بوده و موجب هزینه‌های سنگین تعمیر و نگهداری می‌شود و اکثر روش‌های بهبود آن نیز پرهزینه می‌باشد. در این پژوهش PET بازیافتی در درصدهای جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ به صورت حجمی جایگزین ریزدانه طبیعی گردید و در مجموع ۷ طرح کلی ساخته شد و مشخصات بتن تازه و بتن سخت شده از قبیل: مشخصت مکانیکی و مقاومت سایشی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای جایگزینی ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدین قرار است که: جایگزینی PET بازیافتی با مصالح سنگی طبیعی هم‌اندازه موجب کاهش اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه شد، افزایش درصد جایگزینی PET زوال بیشتر مشخصات مکانیکی را بهمراه داشت بطوریکه جایگزینی تا ۳۰ درصد موجب کاهش مقاومت فشاری، کششی غیر مستقیم و خمشی به ترتیب تا ۳۶، ٤۲ و ۲۲ درصد نسبت به نمونه شاهد شد، PET بازیافتی ریزدانه موجب بهبود مقاومت سایشی بتن شد که با افزایش درصد جایگزینی مقاومت سایشی بطور کلی افزایش یافت. با توجه به بررسی مشخصات مکانیکی و مقایسه با حداقل‌های پیشنهادی آیین نامه‌های مختلف و همچنین نظر به مقاومت سایشی نمونه‌ها، لذا در این پژوهش جایگزینی ۲۰ درصد PET بازیافتی با ریزدانه به عنوان محتمل‌ترین درصد جایگزینی بهینه معرفی شده است.

واژه‌های کلیدی: پلاستیک بازیافتی، پلی‌اتیلن ترفتالات(PET)، روسازی بتنی، مشخصات مکانیکی، مقاومت سایشی

۱-مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون زباله‌های پلاستیکی، تجزیه‌ناپذیر بودن و همچنین مشکلات مربوط به دفن بهداشتی این مواد، مصرف دوباره زباله‌های پلاستیکی پس از بازیافت در راه‌ها می‌تواند مزایای اقتصادی و محیط زیستی فراوانی داشته باشد. استفاده از انواع پلاستیک در سطح جهان از دهه‌ی ۱۹۲۰ به طور سرسام‌آوری افزایش یافت، به این دلیل که استفاده از این مواد در این سال‌ها جهت بکارگیری در صنعت توسعه داده شد(Gourmelon, 2015). آمار جهانی در سال ۲۰۱۳، تولید ۲۹۹ میلیون تن پلاستیک بازیافتی در سطح جهان را گزارش کردند(Pacheco-Torgal, 2019). که این آمار

برای سال ۲۰۱۵ حدود ۲ میلیون تن بیشتر از مقادیر پیش بینی شده بوده است (Geyer and Jambeck and law, 2017). در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی بر روی تأثیر پلاستیک بازیافتی بر روی خواص مکانیکی و رفتار بتن صورت انجام شده که در این تحقیقات پلاستیک بازیافتی در شکل و ابعاد مختلف به صورت الیاف و یا جایگزین با سنگدانه مورد استفاده قرار گرفته است، لازم به ذکر است که شکل، مقدار و ابعاد یادشده می‌تواند در تغییر خصوصیات روسازی بتنی تأثیر چشمگیری داشته باشد. آمار جهانی نشان می‌دهد که از میان پسماندهای پلاستیکی بیشترین مقدار را پلی‌اتیلن و پس از آن پلی‌پروپیلن و PET[1] تشکیل می‌دهند(Siddique, 2007) . با توجه به گزارشات سالیانه مرکز اطلاعات و آمار وزارت صنایع و معادن، مقدار تولید شده این نوع از پلاستیک در کشور برای سالهای ۹۵ و ۹۶ به ترتیب ۴۴۵/۲ و ۵۰۹/۳ هزار تن بوده است (Ministry of industry, mine and trade, 2018) . بازیافت PET به روش‌های فیزیکی، شیمیایی صورت می‌گیرد. بازیافت مکانیکی شامل مراحل جداسازی، پاک کردن، خرد کردن ضایعات، شستشوی تکه های PET ، خشک کردن ذرات تمیز شده و در نهایت اکسترود کردن ذرات PET می باشد (Ragaert and Delva and Vand Geem, 2017) . بازیافت شیمیایی شامل روش های متانولیز، گلیکولیز، هیدرولیز، آمونولیز است (Bartolome et al., 2012). در صورت عدم امکان بازیافت و مصرف دوباره PET، بکارگیری این مواد پلاستیکی در صنعتی همچون راهسازی مزایای محیط زیستی و اقتصادی فراوانی به همراه خواهد داشت.

۲-پیشینه تحقیق

با توجه به اینکه استفاده از PET بازیافتی در بتن موجب تغییر در مشخصات بتن تازه و بتن سخت می‌شود، لذا در دو بخش جداگانه مورد بررسی قرار داده شده است.

۲-۱- تاثیر بر خواص بتن تازه

در مورد کارایی بتن تازه که در آن از پلاستیک بازیافتی جایگزین سنگدانه استفاده شده‌است دو تفکر وجود دارد: ۱) استفاده از سنگدانه پلاستیکی در بتن به دلیل وجود گوشه‌های تیز و زاویه‌دار منجر به کاهش اسلامپ بتن می‌شود. ۲) به دلیل عدم جذب آب سنگدانه‌های پلاستیکی و عدم اضافه کردن آب به مخلوط بتن، آب آزاد مخلوط بیشتر بوده و منجر به افزایش اسلامپ می‌شود (Siddique and Khatib and Kaur, 2008. Siddique, 2007).

بر اساس تحقیقات فریگیون که ۵ درصد PET بازیافتی ریزدانه را با سنگدانه طبیعی ریزدانه (ماسه) بصورت وزنی جایگزین کردند بطوریکه پت ریزدانه دارای دانه‌بندی مشابه با ماسه بوده‌است و طرح‌هایی با درصدهای مختلف سیمان و نسبت آب به سیمان ساخته شد، تمامی مخلوط‌های بتنی حاوی PET دارای زمانی نزدیک به زمان بتن مرجع در آزمایش VeBe(مطابق با EN 12350-3) هستند(Frigione, 2010).

رامادوی و مانجو الیاف PET را در درصدهای ۱ تا ۶ به مخلوط اضافه کردند که نتایج کاهش اسلامپ را نشان دادند(Ramadevi and Manju, 2012). کاهش اسلامپ حاصل از افزودن الیاف PET منجر به کاهش کارایی مخلوط بتنی می‌شود. در پژوهشی دیگر PET درشت دانه بازیافتی به میزان ۲۰ تا۵۰ درصد با درشت‌دانه طبیعی جایگزین شد که نتایج آزمایش اسلامپ، با افزایش درصد جایگزینی اسلامپ افزایش می‌یابد (Islam and Meherier and Islam, 2016.).

خلیل و خالاف PET بدست آمده از خرد کردن بطری‌های پلاستیکی بازیافتی را در محدوده ۱۰ تا ۵۰ درصد) به صورت حجمی با درشت‌دانه طبیعی جایگزین کردند. نتایج، بیانگر افزایش اسلامپ تا میزان ٪۷/۷۷ برای جایگزینی ۵۰ درصد مصالح بدلیل سطح صاف و جذب آب بسیار کم PET بازیافتی است(Khalil and Khalaf, 2017).

تحقیقات شیلان و هیلال نشان داد که جایگزینی PET بازیافتی خرد شده ۱ تا ۳/۵ میلیمتر با ریزدانه به صورت حجمی موجب کاهش اسلامپ بتن خواهد شد که با افزودن فوق روان کننده می‌توان کارایی بتن را افزایش داد (Hama and Hilal,2019).

در پژوهش دیگری محققین نشان دادند که جایگزینی PET بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه با مصالح طبیعی به صورت وزنی موجب کاهش ضریب تراکم[2] و متعاقبا کاهش

کارایی بتن می‌شود(Saxena et al., 2018). در پژوهشی نیبودی و همکاران الیاف حاصل از بطری‌های آب معدنی را درصدهای ۰/۵ تا ۳ درصد وزن سیمان و نسبت ظاهری ۳۵ و ۵۰ به بتن اضافه نمودند. با افزایش درصد الیاف PET، کاهش اسلامپ گزارش شده است که برای تمامی درصدهای الیاف مقدار اسلامپ برای الیاف با نسبت ظاهری ۵۰ نسبت به الیاف با نسبت ظاهری ۳۵ کمتر بوده است (Nibudey, 2013).

نتایج تحقیقات گذشته نشان داده است که استفاده از پلاستیک بازیافتی بدون توجه به شکل و اندازه موجب کاهش خصوصیات فیزیکی مانند چگالی و در نتیجه کاهش وزن بتن روسازی خواهد شد که این کاهش با افزایش درصد پلاستیک بازیافتی مورد استفاده بیشتر خواهد شد (Khalil and Khalaf, 2017).

از مزایای استفاده از این مواد تولید بتن سبک (با توجه به آیین‌نامه ACI 213-R) و بتن سبز می‌باشد المناصر و دالال در پژوهش خود پلاستیک درشت‌دانه بازیافتی را در درصدهای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ با سنگدانه جایگزین کردند و نتایج زیر حاصل شد: (۱)وزن مخصوص بتن با افزایش درصد جایگزینی، کاهش یافت. (۲)کاهش وزن مخصوص مستقیما تحت تاثیر میزان مصرف سنگدانه پلاستیکی است. (Al-Manaseer and Dalal, 1997).

در پژوهش دیگری چوی و همکاران PET با ابعاد ۵ تا ۱۵ میلی‌متر را با سرباره کوره ذوب‌آهن اصلاح کرده و به میزان ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد با مصالح طبیعی جایگزین کردند. نتایج آزمایش وزن مخصوص با افزایش درصد جایگزینی از ۲۵ تا ۷۵ درصد کاهش یافت(Choi et al., 2005).

سایکیا و بریتو PET بازیافتی با اشکال گلوله‌ای و پولکی درشت‌دانه و ریزدانه را با سنگدانه طبیعی به صورت حجمی در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ جایگزین کرده و مشاهده نمودند که با افزایش درصد جایگزینی PET با سنگدانه طبیعی وزن مخصوص بتن تازه کاهش می‌یابد (Saikia and de Brito, 2014).

سوسوی و همکاران PET ریزدانه را با سنگدانه طبیعی ۰ تا ٤ میلیتر در درصدهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ جایگزین کردند. نتایج اسلامپ این پژوهش نشان داد که با افزایش درصد PET بازیافتی، کارایی بتن تازه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج وزن مخصوص نشان داد که یا افزایش مقدار PET بازیافتی جایگزین شده با ریزدانه، وزن مخصوص کاهش می‌یابد(Sosoi et al., 2018).

تحقیقات شیلان و هیلال نشان داد که جایگزینی PET بازیافتی خرد شده ۱ تا ۳/۵ میلیمتر با ریزدانه به صورت حجمی موجب کاهش وزن مخصوص بتن خواهد شد بطوریکه با جایگزینی ٤٠٪ PET، وزن مخصوص ۱۰/۵٪ کاهش خواهد داشت(Hama and Hilal,2019).

۲-۱- تاثیر بر خواص بتن سخت شده

در مطالعات متعددی که انجام شده است، دلیل اصلی مشخصات مکانیکی ضعیف‌تر بتن‌های حاوی سنگدانه پلاستیکی، کاهش چسپندگی بین پلاستیک و خمیر سیمان و ممانعت از هیداراتاسیون کامل سیمان گزارش شده است (Kumar and Kumar, 2016, Gu and Ozbakkaloglu, 2016). جهت بهبود این چسپندگی می‌توان از راهکارهایی مانند پوشش سنگدانه پلاستیکی به وسیله سرباره یا پودر ماسه و یا هرگونه اصلاح شیمیایی استفاده کرد و یا با افزودن سرباره کوره آهن گدازی و خاکستر بادی مشخصات مکانیکی بتن را بهبود بخشید (Choi et al., 2005). لازم به ذکر است که شرایط عمل آوری نیز بر مشخصات مکانیکی و همچنین دوام بتن نیز تاثیرگذار است. تفاوت در شکل، اندازه و بافت PET بر نسبت آب به سیمان همانند اسلامپ اثر می‌گذارد و به طبع آن، خواص مکانیکی نیز تغییر می‌کند (Siddique and Khatib and Kaur, 2008. Siddique, 2007. Saikia and Brito, 2014).

سایکیا و بریتو سه نوع PET با شکل و اندازه مختلف را در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ با سنگدانه طبیعی جایگزین کردند و نتایج این پژوهش بدین صورت است. ۱- مقاومت فشاری ۲۸ روزه با هر درصد جایگزینی PET گلوله‌ای و PET ریزدانه ٪۵، از ٪۷۵ مقاومت فشاری بتن مرجع بیشتر است و این مقدار برای PET ریزدانه ٪۱۰ و ٪۱۵ به ترتیب ٪۷۱ و ٪۵۹، برای PET درشت‌دانه ٪۵، ٪۱۰ و ٪۱۵ به تریتب به ٪۷۳، ٪۵۲ و ٪۳۵ رسیده است. ۲- کاهش مقاومت خمشی بتن برای هر درصد جایگزینی و با هر شکل و اندازه مشاهده شد. ۳- مقاومت کششی بر روی استوانه‌های به قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری، مقاومت کششی نیز مانند

مقاومت فشاری با افزایش مقدار PET با هر شکل و اندازه کاهش می‌یابد. تاثیر ITZ [3] بر این مشخصه مکانیکی بیشتر محسوس است. ٤- مقاومت سایشی نمونه‌های بتنی با جایگزینی PET پولکی ریز و درشت تا ١٠ درصد منجر به بهبود مقاومت سایشی شده و با افزایش درصد جایگزینی PET گلوله‌ای شکل تا ١٥ درصد، تاثیر آن بر بهبود مقاومت سایشی بیشتر شده است(Saikia and de Brito, 2014).

در پژوهش دیگری اژدرپور و همکاران PET بازیافتی ریزدانه را بصورت وزنی با ریزدانه طبیعی جایگزین کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که جایگزینی ٪۵ و ٪۱۰ PET بازیافتی موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی غیر مستقیم و خمشی می‌شود به گونه‌ای که این افزایش برای جایگزینی ٪۵ بیشتر از ٪۱۰ است. با افزایش درصد جایگزینی (بیش از ٪۱۰) مشخصات مکانیکی بتن حاوی PET به تدریج کاهش یافته است (Azhdarpour and Nikoudel and Taheri, 2016).

در پژوهشی، نیبودی و همکاران الیاف PET حاصل از بطری‌های آب معدنی را درصدهای ٠/٥ تا ٣ درصد وزن سیمان و نسبت ظاهری ٣٥ و ٥٠ به بتن اضافه نمودند. در این پژوهش نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی غیر مستقیم و خمشی نمونه ٢٨ روزه، حاکی از آن است که تا ١ درصد الیاف مقادیر مشخصات مکانیکی افزایش یافته و پس از آن (از ١ درصد تا ٣ درصد) به تدریج کاهش می‌یابد(Nibudey, 2013).

مطالعات آلبانو و همکاران بر روی جایگزینی PET ریزدانه (اندازه متوسط ٠/٢٦ و ١/١٤ سانتی‌متر و مخلوط ٥٠/٥٠ از هر رو اندازه در درصدهای ١٠ و ٢٠) بصورت حجمی با ریزدانه طبیعی با نسبت آب به سیمان‌های مختلف نشان داد که: (١) مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد که با افزایش اندازه PET بازیافتی (١/١٤ سانتی‌متر) کاهش بیشتری مشاهده شد. (٢) مقاومت کششی به صورت کلی کاهش می‌یابد و بتن با جایگزینی ٥٠/٥٠ بصورت مخلوطی از هر دو اندازه ذکر شده(٠/٢٦ و ١/١٤ سانتی‌متر) عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشته است. (٣) مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی با افزایش اندازه ذرات و درصد جایگزینی کاهش یافته است(Albano et al., 2009).با توجه به ملاحظات محیط زیستی و همچنین دوام سطوح روسازی بتنی که از فاکتورهای مهم به شمار می رود، استفاده از PET بازیافتی در بتن یکی از راهکارهای مناسب جهت رفع این مسئله است. همچنین با توجه به اینکه تحقیقی در زمینه جایگزینی PET بازیافتی ریزدانه به صورت هم اندازه با ماسه و بررسی طولانی مدت مقاومت سایشی به گونه‌ای که بیانگر سایش در طول عمر طولانی مدت روسازی بتنی باشد، صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش، به منظور بهبود مقاومت سایشی روسازی بتنی و کاهش حجم پسماندهای پلاستیکی، از PET بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه استفاده گردیده و مشخصات بتن تازه، مشخصات مکانیکی و مقاومت سایشی در تعداد دورهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

٣-روش تحقیق

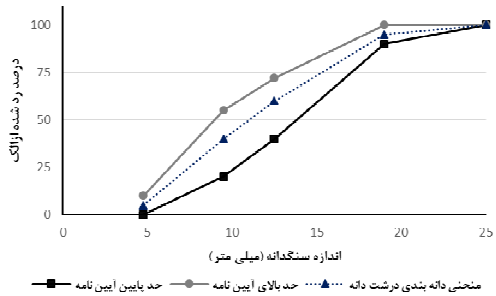
٣-١- مواد و مصالح آزمایش

در این تحقیق، از سیمان پرتلند تیپ I، محصول تولیدی کارخانه آبیک قزوین، استفاده گردیده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این سیمان در جدول ١ آمده است. به منظور افزایش کارایی بتن در هنگام عملیات ساخت و تراکم، از فوق روان کننده استفاده شده است. مقدار فوق روان کننده در این پژوهش ٠/٥ درصد وزن سیمان، به عبارتی در هر متر مکعب ٢/٠٥٥ کیلوگرم از فوق روان کننده PCE با پایه کربوکسیلات اتر استفاده شده است. لازم به ذکر است که این فوق روان کننده دارای استاندارد ASTM C494– Type F و استاندارد ملی ایران است.

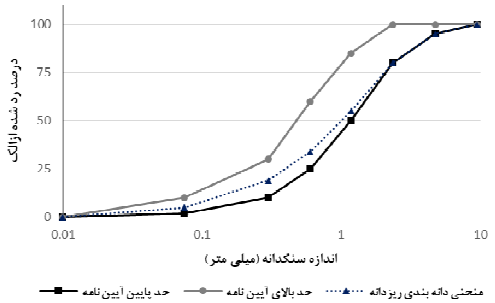
جدول ١. مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان تیپ I مورد استفاده در این تحقیق

وزن مخصوص $\frac{Kg}{(m^3)}$	نرمی $\frac{Cm^2}{(gr)}$	انبساط (درصد)	درصد آب	زمان گیرش		مقاومت فشاری		
				اولیه (دقیقه)	نهایی (دقیقه)	٣ روزه (MPa)	٧ روزه (MPa)	٢٨ روزه (MPa)
٣١٥٠	٣٢٥٠	٠/٠٢٨	٢٣	٨٠	١٨٦	١٢/٥	٢١/٩	٣٢

مصالح سنگی شن و ماسه مورد استفاده در این تحقیق از معدن شن و ماسه واقع در جنوب غربی تهران (منطقه شهریار) تهیه شده‌اند. درشت‌دانه بصورت شکسته و ریزدانه مورد استفاده از نوع رودخانه‌ای بوده و جنس مصالح سیلیس است. دانه‌بندی ریزدانه و درشت‌دانه در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی درشت‌دانه



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه

بر روی مصالح تهیه شده برخی آزمایش‌های مرسوم انجام شده که نتایج آن در جدول ۲ ذکر شده است.

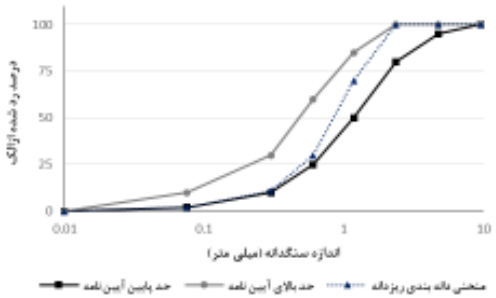
پلاستیک بازیافتی مورد استفاده در این پژوهش، از یک کارگاه تولید مواد پلاستیکی بازیافتی واقع در جنوب تهران تهیه گردیده است که در شکل ۳ ابعاد و شکل این مصالح بازیافتی ریزدانه نشان داده شده است. مصالح بازیافتی در کارگاه آسیاب و دانه‌بندی گردید.

جدول ۲. مشخصات درشت‌دانه و ریزدانه

آزمایش	استاندارد مربوطه	مشخصات درشت‌دانه	مشخصات ریزدانه
حداکثر اندازه درشت‌دانه (میلیمتر)	ASTM C 106	۱۹	–
وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	ASTM C 127	٢٦٦٤	٢٦٧٣
وزن مخصوص بالک (کیلوگرم بر متر مکعب)	ASTM C 127	٢٥٣٢	٢٥٠٥
درصد جذب آب در حالت ssd (درصد)	ASTM C 127	١/٧	٢/٦
آزمایش سلامت با سولفات سدیم(درصد افت وزنی)	AASHTO T 104	١/٨	٣/٢
درصد سایش لس آنجلس (درصد)	ASTM C 131	١٣	–
مدول نرمی (درصد)	ASTM C 136	–	٣/٥٣
ارزش ماسه‌ای (درصد)	ASTM D 2419	–	٨٧

شکل ۳. PET بازیافتی مورد استفاده در این پژوهش

نمودار دانه‌بندی و محدوده مجاز مطابق آیین نامه در شکل ٤ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، نمودار دانه‌بندی پلاستیک بازیافتی تقریباً مطابق با نمودار دانه‌بندی ریزدانه در شکل ۲ بوده و همچنین منحنی دانه‌بندی آن در محدوده ذکر شده در نشریه ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه می‌باشد. بدین صورت که دانه‌بندی بتن‌های ساخته شده با هر درصد جایگزینی مطابق با محدوده آیین نامه بوده و نیاز به اصلاح دانه‌بندی نخواهد بود.



شکل ٤. نمودار دانه‌بندی PET بازیافتی

سایر مشخصات پلاستیک بازیافتی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات PET بازیافتی مورد استفاده

آزمایش	مشخصات پلاستیک بازیافتی
وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	١٣٤٠
درصد جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک (درصد)	۰/۰۰
ضخامت (میلیمتر)	۰/۱۵ تا ۲
شکل مصالح	ذرات آسیاب شده به شکل مصالح تیزگوشه
نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	٢٥٨/٤ درجه سانتی‌گراد
رنگ	عمدتا سفید و کریستالی و بعضاً دانه‌های رنگی

۳-۲- طرح مخلوط و روش ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش از روش حجم مطلق بر اساس استاندارد ACI 211-1، جهت تعیین طرح اختلاط بتن (بتن معمولی) استفاده گردیده است. پلاستیک بازیافتی در هفت طرح به صورت حجمی در مقادیر صفر تا ٪۳۰ ، جایگزین ریزدانه هم‌اندازه گردید. شایان ذکر است که در پژوهش‌های گذشته، پت ریزدانه با ماسه در درصدهای مختلفی جایگزین شده است که نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد جایگزینی مشخصات مکانیکی بتن کاهش بیشتری را تجربه می‌کنند. با توجه به اینکه آیین نامه‌های روسازی بتنی حداقل‌های مجاز برای مشخصات مکانیکی بتن روسازی را ذکر کرده، لذا جایگزینی بیش از ۳۰ درصد موجب کاهش فراتر از حداقل‌های استاندارد شده و در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار نگرفت.مشخصات این هفت طرح مخلوط در جدول ٤ آمده است. از هر طرح مخلوط سه نمونه برای اندازه‌گیری هر یک از مشخصات مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم، مقاومت خمشی و مقاومت سایشی بلوکی (مجموعاً ٨٤ نمونه) برای این پژوهش ساخته شد. در جدول ۵ ابعاد و هدف از ساخت نمونه‌ها بیان شده است. لازم به ذکر است که ساخت نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C 192 صورت گرفت.

جدول ۵. ابعاد، تعداد و هدف از ساخت نمونه‌ها

نوع نمونه	ابعاد (mm)	تعداد	هدف از ساخت
مکعبی	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	۲۱	مقاومت فشاری
استوانه‌ای	۳۰۰ (ارتفاع) ×۱۵۰ (قطر)	۲۱	مقاومت کششی
تیری	۳۵۰×۱۰۰×۱۰۰	۲۱	مقاومت خمشی
سایش چرخ پهن	۱۵۰×۱۰۰×۱۰۰	۲۱	مقاومت سایشی

۳-۳- شرح آزمایش‌ها

۳-۳-۱- آزمایش اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه

در این پژوهش آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C 143 بر روی بتن شاهد و بتن‌های حاوی پلاستیک بازیافتی صورت گرفت.

آزمایش وزن مخصوص بتن تازه بر اساس استاندارد ASTM C 1688 به اینصورت انجام گرفت که وزن قالب قبل از ریختن بتن اندازه‌گیری شده و پس از بتن ریزی و تراکم

جدول ٤. جزییات طرح‌های اختلاط مخلوط‌های حاوی PET بازیافتی

ردیف	درصد جایگزینی	آب (Kg)	سیمان (Kg)	درشت دانه (Kg)	ریزدانه باقیمانده روی الک #٨ (Kg)	ریزدانه رد شده از الک #٨ (Kg)	پلاستیک بازیافتی (ردشده از الک #٨) (Kg)	فوق روان کننده (Kg)	مجموع (Kg)
١	عدم جایگزینی	١٦٤	٤١١	٩٥١	١٥٠/٨	٦٠٣/٢	0	٢/٠٥٥	٢٢٨٢/٠٥٥
٢	PET ٪٥	١٦٤	٤١١	٩٥١	١٥٠/٨	٥٧٣/٠٤	١٥/١٤	٢/٠٥٥	٢٢٦٧/٠٣٢
٣	PET ٪١٠	١٦٤	٤١١	٩٥١	١٥٠/٨	٥٤٢/٨٨	٣٠/٢٧	٢/٠٥٥	٢٢٥٢/٠٠٧
٤	PET ٪١٥	١٦٤	٤١١	٩٥١	١٥٠/٨	٥١٢/٧٢	٤٥/٤١	٢/٠٥٥	٢٢٣٦/٩٨٥
٥	PET ٪٢٠	١٦٤	٤١١	٩٥١	١٥٠/٨	٤٨٢/٥٦	٦٠/٥٥	٢/٠٥٥	٢٢٢١/٩٦٠
٦	PET ٪٢٥	١٦٤	٤١١	٩٥١	١٥٠/٨	٤٥٢/٤٠١	٧٥/٦٨٢	٢/٠٥٥	٢٢٠٦/٩٣٨
٧	PET ٪٣٠	١٦٤	٤١١	٩٥١	١٥٠/٨	٤٢٢/٢٣٩	٩٠/٨١٩	٢/٠٥٥	٢١٩١/٩١٣

در دو لایه تقریبا مساوی و ٢٠ ضربه به هر لایه نیز وزن قالب و بتن اندازه‌گیری می‌شود. سپس از رابطه (١) وزن مخصوص بتن تازه محاسبه شده است.

$$D_f = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (١)$$

در این رابطه، D_f چگالی یا وزن مخصوص بتن تازه (kg/m^3)، M_C وزن قالب پر شده با بتن(kg)، M_m وزن قالب (kg) و m_V حجم قالب (m^3) می‌باشد.

٣-٣-١- آزمایش‌های مشخصات مکانیکی

آزمایش مقاومت فشاری در این پژوهش بر روی نمونه‌های مکعبی ١٠٠×١٠٠×١٠٠ میلی‌متر مطابق استاندارد BS EN 12390-3، انجام گرفت. لازم به ذکر است که بمنظور استفاده از این ابعاد، حداکثر اندازه اسمی سنگدانه نبایستی بیشتر از ٢٠ میلی‌متر باشد. نمونه‌ها بعد از ٢٨ روز عمل‌آوری، با دستگاه بارگذاری فشاری UTM با توان بارگذاری ١٠٠ تن، مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ٥-الف). نرخ بارگذاری ١ میلی‌متر بر دقیقه مطابق استاندارد BS EN 12390-3:2009 در نظر گرفته شده است. نتیجه سه آزمایش به عنوان مقاومت فشاری نمونه‌ها گزارش شد.

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس استاندارد ASTM C 496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ١٥٠ میلی‌متر و ارتفاع ٣٠٠ میلی‌متر، صورت گرفت. این آزمایش نیز با دستگاه UTM با توان بارگذاری ١٠٠ تن انجام شده است(شکل ٥-ب). این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C 496 بارگذاری با نرخ جابجایی ثابت ١ میلی‌متر بر دقیقه است، صورت گرفته است. میانگین نتایج سه نمونه به عنوان مقاومت کششی غیرمستقیم گزارش شد. مقاومت کششی غیرمستقیم طبق رابطه (٢) با استفاده تقسیم نیروی نهایی در هنگام شکست نمونه بر طول در قطر آن محاسبه می‌شود.

$$T = \frac{2P_{ult}}{\pi l d} \quad (٢)$$

که در این رابطه T مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه (MPa)، P_{ult} نیروی نهایی در هنگام شکست نمونه (N)، l طول نمونه (mm) که در اینجا ٣٠٠ میلی‌متر است، d قطر نمونه (mm) که در اینجا ١٥٠ میلی‌متر است.

مقاومت خمشی بتن بر اساس استاندارد ASTM C78، روی نمونه‌های تیرهای منشوری با ابعاد ١٠٠×١٠٠×٣٥٠ میلی‌متر به صورت بارگذاری چهار نقطه‌ای انجام گرفت (شکل ٥- ج). نمونه‌ها بعد از ٢٨ روز عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج نهایی میانگین سه نمونه می‌باشند. آزمایش به وسیله دستگاه UTM با توان بارگذاری ٢٥ تن انجام گردید.

با توجه به اینکه شکست نمونه‌ها همگی در یک سوم میانی رخ داد، لذا از رابطه (٣) مقاومت خمشی محاسبه گردید.

$$R = \frac{PL}{bd^2} \qquad (٣)$$

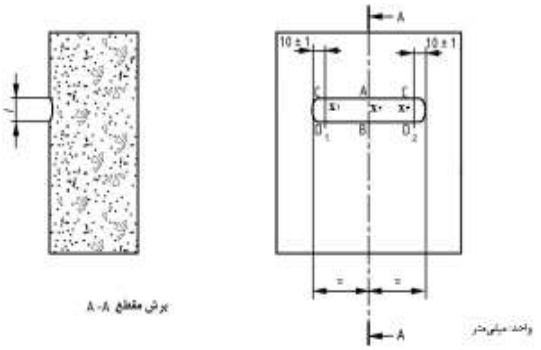
که در این رابطه R مقاومت خمشی نمونه یا مدول گسیختگی (MPa)، P حداکثر نیروی وارد شده تا شکست نمونه (N)، L طول دهانه یا طولی از نمونه که فاصله دو تکیه‌گاه پایین است (mm)، در اینجا ٣٠٠ میلی‌متر است، d عرض نمونه (mm) که در اینجا ١٠٠ میلی‌متر است، b ارتفاع نمونه (mm) که در اینجا ١٠٠ میلی‌متر است.

٣-٣-١- آزمایش مقاومت سایشی

آزمایش مقاومت سطحی در برابر سایش سطحی، بر روی نمونه‌هایی با ابعاد ١٥٠×١٠٠×١٠٠ میلی‌متر مطابق با استاندارد BS EN 1338 انجام پذیرفت(شکل ٥-د). روش آزمایش به این صورت است که در ابتدا تانک استاندارد باید با پودر آلومینا [٤] با اندازه F80 [٥] مطابق استاندارد ISO 8486-1 پر شود. سپس نمونه در دستگاه قرار داده شده و شمارنده تعداد سیکل روی صفر تنظیم شود. دستگاه باید در دقیقه ٧٥ دور بزند به عبارتی چرخ فلزی دستگاه به قطر ٢٠٠ میلی‌متر و پهنای ٧٠ میلی‌متر، هر ١/٢٥ ثانیه یک دور می‌چرخد. بعد از شروع آزمایش، میزان ضخامت شیار ایجاد شده روی نمونه‌ها در سیکل های ٧٥، ١٥٠، ٣٠٠، ٦٠٠ و ١٠٠٠ دور، اندازه گردید. همچنین میانگین حداکثر عمق ساییده شده پس از ١٠٠ دور نیز اندازه‌گیری شد. میانگین اندازه ضخامت شیار در ابتدا ($x_1(CD_1)$)، وسط ($x_2(AB)$) و انتهای شیار ($x_3(CD_2)$) به عنوان ضخامت ساییده شده طبق رابطه (٤) گزارش شده است.

$$l = \frac{x_1 + x_2 + x_2}{3} \qquad (٤)$$

که در این رابطه l میانگین ضخامت شیار گزارش شده، x_1 اندازه ضخامت شیار در ابتدای شیار (CD_1)، x_2 اندازه ضخامت شیار در وسط شیار (AB)، x_3 اندازه ضخامت شیار درانتهای شیار (CD_2) است. در شکل ٦ نحوه اندازه‌گیری و نقاط A و B و C و D نشان داده شده است.



شکل ٦. نحوه اندازه‌گیری ضخامت نمونه بتنی پس از انجام آزمایش سایش بلوک بتنی

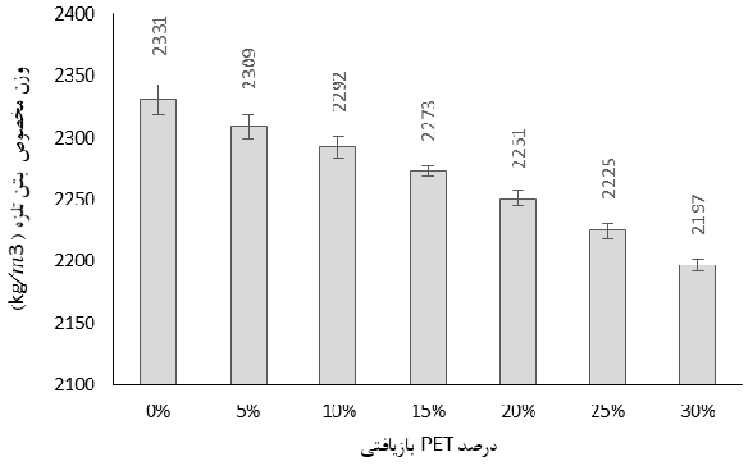
(الف)

(ب)

(ج)

(د)

شکل ٥. نمونه‌های بتنی در حین انجام (الف) آزمایش مقاومت فساری (ب) آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ج) آزمایش مقاومت خمشی (د) آزمایش مقاومت سایشی



شکل ٧ . نتایج وزن مخصوص بتن تازه

٤-نتایج و تفسیر آن

٤-١- نتایج آزمایش اسلامپ

آزمایش اسلامپ بر روی مخلوط‌های مختلف، مطابق استاندارد ASTM C 143 قبل از بتن‌ریزی در قالب‌ها انجام شد. با توجه به اینکه محدوده اسلامپ روسازی بتنی در آیین نامه ACI 211-1 در جدول ٦-٣-١ این آیین نامه، ١ تا ٣ اینچ (در صورت استفاده از افزودنی شیمیایی ممکن است ١ اینچ افزایش یابد) ذکر شده است. با توجه به ادبیات فنی موضوع، PET ریزدانه موجب کاهش کارایی بتن می‌شود، در این پژوهش از افزودنی فوق روان کننده استفاده شده است. لذا جهت تعیین مقدار استفاده از افزودنی فوق روان کننده مخلوط‌های آزمایشی با بیشترین درصد جایگزینی ساخته شده و میزان فوق روان کننده به گونه‌ای تعیین شده است که اسلامپ این مخلوط به پایین‌ترین حد آیین‌نامه برسد.

مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده اسلامپ هر پیمانه قبل از بتن ریزی در جدول ٦ آورده شده است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که میزان اسلامپ بتن برای نمونه شاهد ١٤ سانتی‌متر (ریزشی) و برای درصدهای جایگزنی ٥، ١٥ و ٢٥ به ترتیب به ٩/٦، ٦/٢ و ٣/٩ سانتی‌متر کاهش یافته است که درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد نیز به ترتیب ٣١/٥، ٥٦ و ٧٢ درصد محاسبه شده است.

دلیل کاهش اسلامپ بتن با افزایش درصد جایگزنی PET بازیافتی با ریزدانه طبیعی را می‌توان به وجود لبه‌های تیز ذرات PET ارتباط داد که موجب استحکام بتن تازه شده و متعاقبا اسلامپ بتن را کاهش دهد.

جدول ٦. نتایج آزمایش اسلامپ

ردیف	درصد جایگزینی	اسلامپ (cm)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد
١	٪٠ (شاهد)	١٤	٠
٢	٪٥	٩/٦	- ٣١/٤٣
٣	٪١٠	٧/٨	- ٤٤/٢٩
٤	٪١٥	٦/٢	- ٥٥/٧١
٥	٪٢٠	٥/١	- ٦٣/٥٧
٦	٪٢٥	٣/٩	- ٧٢/١٤
٧	٪٣٠	٢/٧	- ٨٠/٧١

٤-٢- نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

پس از اختلاط و تهیه مخلوط‌های مختلف، مخلوط بتنی در قالب آزمایش با ابعاد مشخص ریخته شده که پس از تراکم و ویبره قالب‌ها، نمونه‌ها با درصد جایگزینی‌های متفاوت PET بازیافتی ریزدانه با سنگدانه طبیعی توزین شده است. سپس با توجه به حجم مشخص قالب‌های مورد استفاده، وزن مخصوص مخلوط‌های مختلف بدست آمده که نتایج وزن مخصوص بتن تازه طرح اختلاط‌های مختلف در شکل ٧ نشان داده شده است. اعداد ذکر شده میانگین وزن مخصوص اندازه‌گیری شده ٩ نمونه برای هر طرح اختلاط است. بدیهی

است که با توجه بـه وزن مخصـوص کمتـر PET نسـبت بـه سنگدانه‌های طبیعی، کاهش وزن مخصوص بـتن مـورد انتظـار بوده که نتایج این آزمایش نیـز گویـای همـین موضـوع اسـت. مشاهده می‌شـود کـه وزن مخصـوص بـتن شـاهد تـازه ۲۳۳۱ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که ایـن مقـدار بـرای درصـدهـای جایگزینی ۲۰ و ۳۰ به ترتیب به ۲۲۵۱ و ۲۱۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب، کاهش یافته است.

همچنین جهت مقایسه و درک بیشـتر، نتـایج ایـن آزمـایش برای هر طرح اختلاط با درصد جایگزینی مشـخص و درصـد کاهش وزن مخصوص نسـبت بـه نمونـه شـاهد در جـدول ۷ آورده شده است. وزن مخصوص بتن تازه برای نمونه‌هـای بـا جـایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصـد PET بازیـافتی بـا ریزدانـه طبیعی، به ترتیب ۱/۷، ۳/٤ و ۵/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. به عبارتی نسبت با افزایش درصد جایگزینی بتن ساخته شده سبک‌تر می‌شود.

جدول ۷. تغییرات وزن مخصوص بتن تازه نسبت به نمونه شاهد

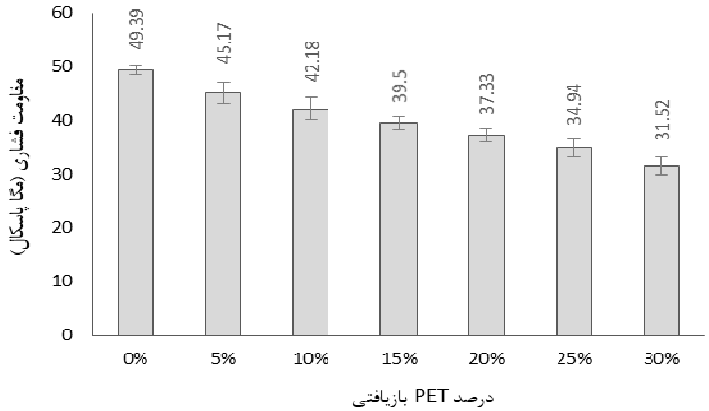
ردیف	درصد جایگزینی	میانگین وزن مخصوص بتن تازه برای ۹ نمونه ($kg/m3$)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد
۱	٪۰ (شاهد)	۲۳۳۱	۰
۲	٪۵	۲۳۰۹	- ۰/۹٤
۳	٪۱۰	۲۲۹۲	- ۱/٦۷
٤	٪۱۵	۲۲۷۳	- ۲/٤۹
۵	٪۲۰	۲۲۵۱	- ۳/٤۳
٦	٪۲۵	۲۲۲۵	- ٤/۵٤
۷	٪۳۰	۲۱۹۷	- ۵/۷۵

همچنین لازم به ذکر است با توجه به اینکه مواد پلاسـتیکی جذب آب ندارند، لذا مقدار آب آزاد در مخلوط بیشتر بوده که پس از عمل آوری و سخت شدن بتن، قسمتی از ایـن آب آزاد صرف هیدراتاسیون سیمان شده و بخش دیگر تبخیر می‌شـود، لذا انتظار مـی‌رود کـه وزن مخصـوص بـتن سـخت شـده در درصدهای جایگزینی بالاتر به دلیل افزایش درصد فضای خالی بتن، در نتیجه عـدم جـذب آب توسـط پلاسـتیک بازیـافتی و تبخیـر بخشـی از آب آزاد، کـاهش بیشـتری نسـبت بـه وزن مخصوص بتن تازه داشته باشد.

٤-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری در این پژوهش مطـابق بـا اسـتاندارد BS EN 12390-3 انجام شد. این آزمایش بر روی ۲۱ نمونه بتنی ۲۸ روزه مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر انجام شد.

نتایج حاصل از میانگین ۳ نمونه برای هر حالت پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۷ نشان داده شده است. این نتایج مطابق با پژوهش‌های پیشین است، بطوریکه با افزایش درصد PET بازیافتی جایگزین شده با ماسه، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. بررسی نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه شاهد از ٤۹/۳۹ مگاپاسکال به ۳۱/۵۲ مگاپاسکال برای ۳۰٪ جایگزینی PET رسیده است که کاهش ۳٦/۱۷ درصدی این مشخصه را نشان می‌دهد. کاهش مقاومت حاصل از جایگزینی PET با ریزدانه طبیعی را می‌توان ضعف بتن در ناحیه ITZ بیان کرد به گونه‌ای که چسبندگی PET با خمیر سیمان ضعیف‌تر از چسبندگی خمیر سیمان با سنگدانه طبیعی است. در برخی از مطالعات پیشین جهت بهبود این ویژگی



شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

سطح مصالح پلاستیک بازیافتی با روش‌های مختلف اصلاح شده‌اند که از مشکلات این روش زمان‌بر بودن و عدم صرفه اقتصادی قابل ذکر هستند. در اکثر پژوهش‌های گذشته جایگزینی مصالح پلاستیک بازیافتی با سنگدانه طبیعی به صورت وزنی انجام گرفته است، با توجه به اختلاف مشهود در وزن مخصوص PET و مصالح سنگی طبیعی جایگزینی به صورت وزنی موجب تغییر در دانه‌بندی بتن می‌شود که متعاقبا بر روی مقاومت فشاری و سایر مشخصات مکانیکی اثر می‌گذارد، لذا کاهش یا افزایش ناشی از جایگزینی به صورت مستقیم مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

جایگزینی PET با ریزدانه در این پژوهش با مقاومت فشاری رابطه معکوس نشان داد بطوریکه با افزایش درصد جایگزینی، کاهش مقاومت فشاری بیشتر بوده است. در جدول ٨ نتایج و درصد کاهش طرح‌های مختلف با نمونه شاهد نشان داده شده است که برای جایگزینی ٥، ١٠، ١٥، ٢٠، ٢٥ و ٣٠ درصد به ترتیب ٨/٥، ١٤/٦، ٢٠، ٢٤/٤، ٢٩/٢ و ٣٦/٢ درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد.

آیین‌نامه‌های مختلف طراحی، مقادیر متفاوتی را برای حداقل مشخصات مکانیکی بتن مورد استفاده در روسازی ذکر نموده‌اند. انجمن روسازی بتنی آمریکا (ACPA[٦]) مقدار مقاومت فشاری بتن مورد استفاده در روسازی را بین ١٢٠٠٠psi و ٢٨٠٠ psi پیشنهاد کرده است که مقدار حداقلی آن ١٩/٣١ مگاپاسکال است. وزارت هوانوردی آمریکا (FAA[٧]) نیز برای فرودگاه‌ها با هواپیماهای سبک‌تر از ١٣/٥ تن، حداقل مقاومت فشاری بیست و هشت روزه بتن مطابق استاندارد ASTM C 39 را (٤٤٠٠ psi) ٣٠/٣٣٧ مگاپاسکال پیشنهاد کرده است. با توجه به اینکه مقدار حداقلی پیشنهاد شده توسط FAA بحرانی‌تر است، لذا برای مقایسه لازم است ابتدا مقاومت نمونه‌های مکعبی ١٠ سانتی‌متری به مقاومت فشاری معادل نمونه استوانه‌ای به قطر ١٥ سانتی‌متر و راتفاع ٣٠ سانتی‌متر تبدیل شود. مطابق با بند ٩-٥-١-٣ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان جهت تبدیل مقاومت فشاری نمونه مکعبی غیر ٢٠٠ میلی‌متر به استوانه استاندارد لازم است از ضرایبی برای این تبدیل استفاده شود. پس از تبدیل مقاومت فشاری مکعب به استوانه‌ی استاندارد، مقاومت فشاری تبدیل شده هر یک از نمونه‌ها در جدول ٨ آورده شده است.

با توجه مقاومت‌های تبدیل شده و حداقل مقاومت پیشنهاد شده توسط FAA، لذا جایگزینی ٢٠ درصد PET بازیافتی با ریزدانه به صورت حجمی دارای مقاومت فشاری بالاتر از ٣٠/٣٣٧ مگاپاسکال خواهد داشت. جایگزینی ٢٥ و ٣٠ درصد ریزدانه دارای مقاومت فشاری استاندارد به ترتیب ٢٨/٢ و ٢٥/١ مگاپاسکال خواهد بود که از حداقل مقاومت فشاری پیشنهاد کمتر است.

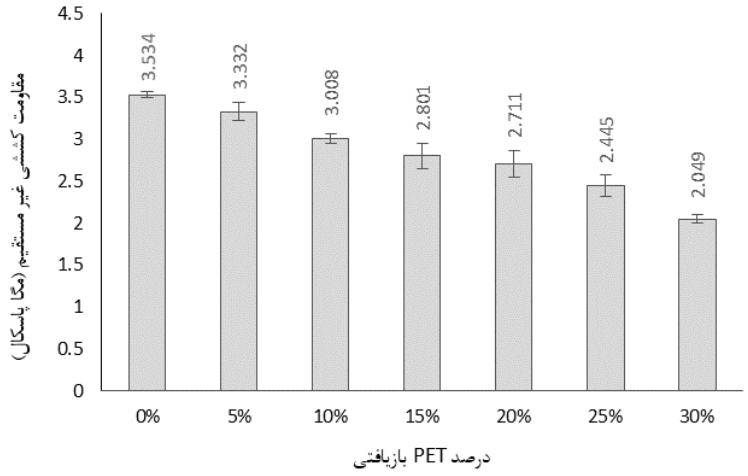
٤-٤- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی ٢١ نمونه‌ی بتنی استوانه‌ای به قطر ١٥ سانتی‌متر و ارتفاع ٣٠ سانتی‌متر به وسیله دستگاه UTM با توان بارگذاری ١٠٠ تن انجام گرفت. مطابق استاندارد ASTM C496 جهت چلوگیری از پانچ نمونه‌ها در زمان بارگذاری از دو تکه چوب چندلایه در قسمت فوقانی و تحتانی نمونه استفاده شده است.

میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم ٣ نمونه برای هر درصد جایگزینی در شکل ٩ نمایش داده شده است. نتایج این

جدول ٨ نتایج آزمایش مقاومت فشاری و تبدیل آن به مقاومت معادل استوانه استاندارد و مقایسه با حداقل پیشنهادی آیین‌نامه

ردیف	درصد جایگزینی	میانگین مقاومت فشاری نمونه مکعبی ١٠ سانتی متری (MPa)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد	مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد (MPa)	مقبولیت با توجه حداقل مقاومت فشاری پیشنهاد شده
١	٪٠ (شاهد)	٤٩/٣٨٥٧٥٦٦٧	٠	٤٢/٣٧٣	✓
٢	٪٥	٤٥/١٧٤٥٦٦٦٧	- ٨/٥٣	٣٨/٠٧٤	✓
٣	٪١٠	٤٢/١٧٥٢٩	- ١٤/٦٠	٣٥/٢٣٤	✓
٤	٪١٥	٣٩/٤٩٧١٢٣٣	- ٢٠/٠٢	٣٢/٦٣٥	✓
٥	٪٢٠	٣٧/٣٣١٧١٦٦٧	- ٢٤/٤١	٣٠/٤٦٣	✓
٦	٪٢٥	٣٤/٩٤٣٤٨٣٣	- ٢٩/٢٤	٢٨/٢١١	×
٧	٪٣٠	٣١/٥٢٤٧٤٣٣٣	- ٣٦/١٧	٢٥/١٠٣	×



شکل ۹. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

آزمایش نیز مانند مقاومت فشاری، کاهش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ای بتنی با افزایش درصد جایگزینی PET بازیافتی را نشان می‌دهند بطوریکه میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه شاهد و نمونه‌های بتنی با درصد جایگزینی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ به ترتیب ۳/۵۳، ۳/۳۳، ۳/۰۱، ۲/۸۰، ۲/۷۱، ۲/٤٥ و ۲/۰٥ می باشد. کاهش مقاومت کششی غیر مستقیم حاصل از جایگزینی PET بازیافتی را نیز می‌توان به چسبندگی ضعیف‌تر مواد پلاستیکی با خمیر سیمان به دلیل سطح صاف این مواد دانست. پس از بررسی صفحه شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمایش، مشاهده شد که در نمونه‌های دارای درصد جایگزینی بیشتر PET با مصالح سنگی طبیعی، غالباً شکست از ITZ ملات و PET بازیافتی رخ داده است.

نتایج این آزمایش و تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده با طرح اختلاط‌های مختلف در جدول ۹ نشان داده شده است. مطابق انتظار، مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد پلاستیک بازیافتی کاهش یافت به گونه‌ای که با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد جایگزینی PET بازیافتی با ریزدانه طبیعی، مقاومت کششی به ترتیب ۵/۷، ۱٤/۹، ۲۰/۸، ۲۳/۳، ۳۰/۸ و ٤۰ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است.

انجمن روسازی بتنی آمریکا (ACPA) مقدار مقاومت کششی بتن ۲۸ روزه مطابق با ASTM C 496 را بین ۳۰۰psi تا ۱۲۰۰۰ psi بیان کرده است که مقدار حداقلی آن ۲/۰٦۸ مگاپاسکال می‌باشد. لذا با توجه به ستون پنجم جدول ۹، جایگزینی ۲۵ درصد PET بازیافتی با ریزدانه طبیعی دارای مقاومتی بیشتر از ۲/۰٦۸ مگاپاسکال است. بتن با جایگزینی ۳۰ درصد PET بازیافتی دارای مقاومت کششی غیر مستقیم ۲/۰۵ مگاپاسکال است که کمتر از حداقل پیشنهادی می‌باشد.

جدول ۹. درصد تغییرات مقاومت مقاومت کششی غیر مستقیم نسبت به نمونه شاهد و مقایسه با حداقل پیشنهادی آیین‌نامه

ردیف	درصد جایگزینی PET بازیافتی با ریزدانه طبیعی	میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم ۳ نمونه (MPa)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد	مقبولیت با توجه حداقل مقاومت کششی غیر مستقیم پیشنهاد شده
۱	٪۰ (شاهد)	۳/٥۳٤۲۹٦٥۲٥	۰	✓
۲	٪٥	۳/۳۳۲۲۱۳٦۰٤	- ٥/۷۲	✓
۳	٪۱۰	۳/۰۰۷۸۹۳۰۸٤	- ۱٤/۸۹	✓
٤	٪۱٥	۲/۸۰۰۱٦٦٤۱	- ۲۰/۷۷	✓
٥	٪۲۰	۲/۷۱۰٥۳۳۱۷٥	- ۲۳/۳۱	✓
٦	٪۲٥	۲/٤٤٥٤۷۲٥۲٥	- ۳۰/۸۱	✓
۷	٪۳۰	۲/۰٤۹٦۲٤۷۰۸	- ٤۲/۰۱	×

٤-٥- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

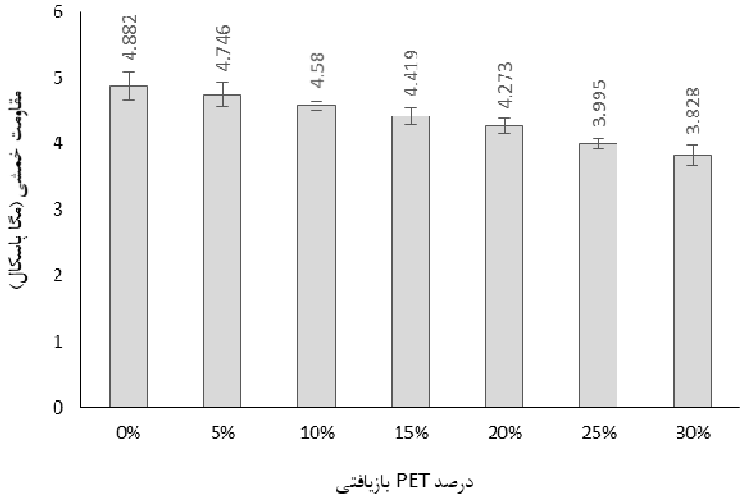
مطابق با نشریه ٧٣١ سازمان برنامه و بودجه (دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راهها) حداقل ضریب گسیختگی مشخصه (مقاومت خمشی) بتن مورد استفاده در روسازی بتنی برابر ٤ مگاپاسکال (٤٠ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) است. بررسی نتایج آزمایش خمش ٤ نقطه‌ای نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی PET بازیافتی با ماسه طبیعی منجر به کاهش مقاومت خمشی بتن می‌شود. در این آزمایش مقادیر مقاومت خمشی بدست آمده برای نمونه شاهد ٤/٨٨٢ مگاپاسکال است که با افزایش درصد PET بازیافتی تا ٣٠٪ به مقدار ٣/٨٢٨ مگاپاسکال رسیده است. مقادیر اندازه‌گیری مقاومت خمشی طرح اختلاط‌های مختلف با درصد PETهای جایگزین شده در شکل ١٠ آورده شده است. روند کاهشی مقاومت خمشی بتن با افزایش مقدار جایگزینی به خوبی قابل مشاهده است که در درصدهای جایگزینی ٥ و ١٠، مقاومت خمشی ٤/٧٥ و ٤/٥٨ حاصل شده است که به بیشتر از ٩٠ درصد مقاومت نمونه شاهد رسیده‌اند.

کاهش مقاومت خمشی را نیز می‌توان مانند مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیر مستقیم و ضعیف‌تر بودن ناحیه ITZ بدلیل چسبندگی خمیر سیمان و ذرات PET دانست. در شکل ١١ یک نمونه شاهد و یک نمونه با جایگزینی ٣٠ درصد PET بازیافتی پس از شکست تحت آزمایش مقاومت خمشی نشان داده شده است. در نمونه شاهد، غالباً شکست در سنگدانه یا خمیر سیمان رخ داده است اما در نمونه ٣٠ درصد جایگزینی انتشار ترک و شکست عمدتاً از ناحیه ITZ ما بین ملات بتن و ذرات PET رخ داده است.

شکل ١١. نمونه‌های شکسته شده پس از انجام آزمایش مقاومت خمشی

در جدول ١٠ درصد تغییرات مقاومت خمشی درصدهای جایگزینی مختلف نسبت به نمونه شاهد نشان داده شده است. کاهش این مشخصه مکانیکی برای درصدهای جایگزینی ٥، ١٠، ١٥، ٢٠، ٢٥، ٣٠ نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ٢/٨، ٦/٢، ٩/٥، ١٢/٥، ١٨/٢، ٢١/٦ بوده است.

انجمن روسازی بتنی آمریکا (ACPA) مقدار مقاومت خمشی بتن مطابق با استاندارد ASTM C 78 مورد استفاده در روسازی را بین psi ١٠٠٠ و psi ٤٨٠ پیشنهاد کرده است که مقدار حداقلی آن ٣/٣٠٩ مگاپاسکال است. وزارت هوانوردی آمریکا (FAA) نیز مقاومت فشاری ٢٨ روزه بتن مطابق استاندارد ASTM C 78 را بین psi ٧٠٠ تا psi ٦٠٠ پیشنهاد کرده است که مقدار حداقلی آن ٤/١٣٦ مگاپاسکال است. با توجه به اینکه مقدار حداقلی پیشنهاد شده توسط



شکل ١٠. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

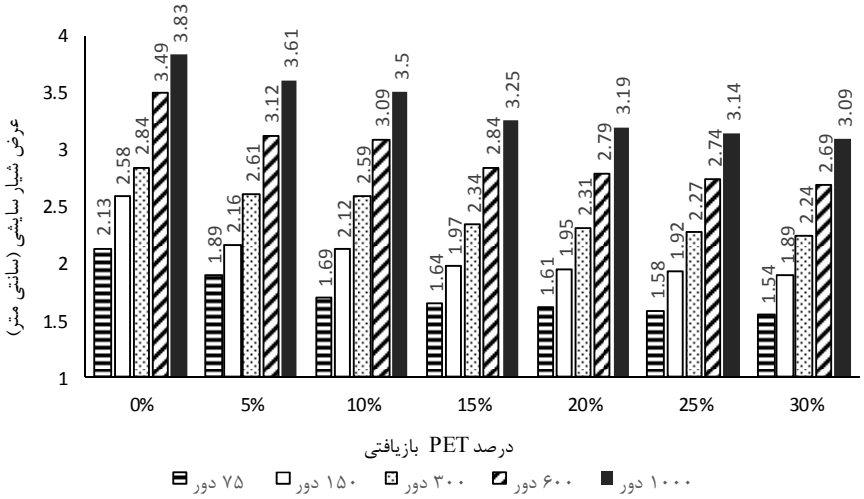
جدول ۱۰. درصد تغییرات مقاومت مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد و مقایسه با حداقل پیشنهادی آیین‌نامه

ردیف	درصد جایگزینی	میانگین مقاومت خمشی ۳ نمونه (MPa)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد	مقبولیت با توجه حداقل مقاومت فشاری پیشنهاد شده
۱	٪۰ (شاهد)	٤/٨٨٢٢٢	۰	✓
۲	٪۵	٤/٧٤٥٨٢	– ۲/۷۹	✓
۳	٪۱۰	٤/٥٨٠١١	– ٦/١٩	✓
٤	٪۱۵	٤/٤١٩٦٥	– ۹/٤٧	✓
۵	٪۲۰	٤/٢٧٢٨٥	– ۱۲/٤٨	✓
٦	٪۲۵	٣/٩٩٤٧١	– ۱۸/۱۸	×
۷	٪۳۰	٣/٨٢٧٨	– ۲۱/٦	×

FAA بحرانی‌تر است لذا با نوجه به ستون پنجم شکل ، جایگزینی تا ۲۰ درصد PET بازیافتی با ریزدانه طبیعی به صورت حجمی مقاومت خمشی بالاتری نسبت به مقدار ٤/١٣٦ مگاپاسکال را از خود نشان می‌دهد. جایگزینی ۲۵ و ۳۰ درصد منجر به مقاومت خمشی به ترتیب ۳/۹۹۵ و ۳/۸۲۸ مگاپاسکال شده که از مقدار حداقلی پیشنهاد شده کمتر می‌باشد.

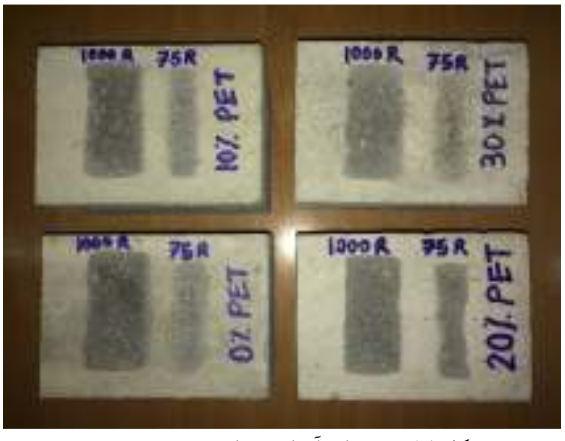
٤-٦- نتایج آزمایش مقاومت سایشی

پس از انجام آزمایش آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌های منشوری ۱۵×۱۰×۱۰ سانتی‌متری، آزمایش سایش چرخ پهن مطابق استاندارد BS EN 1338 بر روی این نمونه‌ها انجام شد. در این آزمایش چرخ سایشی در هر دقیقه ۷۵ دور می‌چرخد و پودر آلومینا از مخزن تعبیه شده با دبی ۲/۵ لیتر بر دقیقه روی سطح تماس چرخ و نمونه می‌ریزد تا عمل سایش انجام شود. این آزمایش در دورهای ۷۵، ۱۵۰، ۳۰۰، ٦۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر روی تعداد ۲۱ نمونه (۳ نمونه از هر درصد جایگزینی) انجام شد و عرض شیار سایشی با توجه به رابطه (۵) مشخص شد. نتایج اندازه‌گیری عرض شیار سایشی پس از تعداد دورهای یاد شده در نمودار شکل ۱۲ آورده شده است. بطور کلی استفاده از PET بازیافتی با هر درصد جایگزینی موجب کاهش عرض شیار سایشی و متعاقبا سبب بهبود مقاومت سایشی بتن شده است. عرض شیار سایشی با افزایش درصد جایگزینی PET بازیافتی کاهش یافت که این روند کاهشی در تعداد دورهای بیشتر نیز قابل مشاهده است، بطوریکه میانگین عرض شیار ایجاد شده برای نمونه شاهد پس از ۷۵، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ دور به ترتیب ۲/۱۳، ۲/۸٤، ۳/۸۳ سانتی‌متر است که این مقدار برای نمونه‌های با ۳۰ درصد جایگزینی PET برای تعداد دور یکسان به ۱/٥٤، ۲/۲٤، ۳/۰۹ سانتی‌متر رسیده است. برای تعداد دورهای برابر و با افزایش درصد PET، عرض شیار سایشی کمتر از نمونه شاهد مشاهد شد که حاکی از بهبود مقاومت سایشی نمونه‌های بتنی می‌باشد. معمولاً برای بهبود سایش سطحی رویه بتنی از مواد نانو استفاده می‌شود که با توجه به هزینه بالای این مواد، استفاده از PET بازیافتی ریزدانه صرفه اقتصادی داشته و از نظر حفظ



شکل ۱۲. عرض شیار سایشی در آزمایش سایش چرخ پهن

منابع طبیعی و همچنین حفظ محیط زیست نیز می‌تواند مورد استقبال قرار گیرد. با توجه به اینکه این آزمایش در دورهای بیشتر انجام شد. لذا نتایج روند افزایش عرض شیار سایشی نمونه‌ها را نیز نشان می‌دهد. برای نمونه‌های با ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد جایگزینی، عرض شیار سایشی از ۷۵ تا ۱۰۰۰ دور به ترتیب ۱/۵۸، ۱/۵٦ و ۱/۵۵ سانتی‌متر افزایش یافته است که این مقدار برای نمونه شاهد ۱/۷ سانتی‌متر است. "هر چند که به دلیل چسبندگی کمتر مواد PET بازیافتی با خمیر سیمان به نسبت چسبندگی سنگدانه با خمیر سیمان، تاثیر منفی بر عملکرد سایشی دارد. از منظر مکانیزم سایشی، مصالح سنگی در تماس مکرر با چرخ پودر گردیده و عمق سایش زیاد می‌گردد. منتهی مواد PET بازیافتی بدلیل سختی سایشی بالا و خاصیت کشسانی که دارد در تماس با چرخ سایشی بدون پودرشدگی تغییر شکل داده و بعضاً بصورت کشسان تغییر شکل داده و مانع از ایجاد شیار بدلیل سایش می‌گردد. این ویژگی مواد PET در جهت افزایش مقاومت سایشی برای تمامی درصدهای بکارگرفته شده در این تحقیق پابرجا بوده و با افزایش درصد PET مصرفی مقاومت سایشی افزایش یافته است." در شکل ۱۳ تعدادی از نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته نشان داده شده است که بصورت عینی نیز کاهش میزان عرض شیار با افزایش درصد جایگزینی PET برای دورهای ۷۵ و ۱۰۰۰ دور مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳. نمونه‌های آزمایش سایش چرخ پهن

در جدول ۱۱ نتایج این آزمایش و میزان تغییرات هر یک از درصدهای جایگزینی نسبت به نمونه شاهد در تعداد دور برابر آورده شده است. افزایش درصد تغییرات با افزایش درصد جایگزینی PET به معنی تاثیر زیاد این پلاستیک بر مقاومت سایشی بتن می‌باشد. بیشترین تغییرات نسبت به نمونه شاهد در تعداد دور یکسان برای ۳۰ درصد جایگزینی ثبت شده است. بطوریکه میزان کاهش عرض شیار سایشی در تعداد دورهای ۷۵، ۱۵۰، ۳۰۰، ٦۰۰ و ۱۰۰۰ نسبت به نمونه شاهد با تعداد دور برابر به ترتیب ۲۸، ۲۷، ۲۱، ۲۳ و ۱۹ درصد است. به عبارتی درصد کاهش عرض را می‌توان به عنوان پارمتر بهبود مقاومت سایشی معرفی نمود که با جایگزینی ۲۵ و ۳۰ درصد PET در ۷۵ دور به ترتیب ۲٦ و ۲۷ درصد و در ۱۰۰۰ دور به ترتیب ۱۸ و ۱۹ درصد بهبود مقاومت سایشی نسبت به نمونه کنترل مشاهده شد.

جدول ۱۱. درصد تغییرات عرض شیار سایشی نسبت به نمونه شاهد

ردیف	درصد جایگزینی PET بازیافتی با ریزدانه طبیعی	تعداد دور	میانگین عرض شیار سایشی ۳ نمونه (cm)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد در تعداد دور یکسان*
۱	٪۰ (شاهد)	۷۵	۲/۱۳۳	۰
		۱۵۰	۲/۵۷۸	۰
		۳۰۰	۲/۸٤٤	۰
		٦۰۰	۳/٤۸۹	۰
		۱۰۰۰	۳/۸۳۳	۰
۲	٪۵	۷۵	۱/۸۸۹	- ۱۱/٤٤
		۱۵۰	۲/۱۵٦	- ۱٦/۳۷
		۳۰۰	۲/٦۱۱	- ۸/۱۹
		٦۰۰	۳/۱۱۷	- ۹/٦٦
		۱۰۰۰	۳/٦۰٦	- ۵/۹۲
۳	٪۱۰	۷۵	۱/٦۹٤	- ۲۰/۵۸
		۱۵۰	۲/۱۱۷	- ۱۷/۸۸
		۳۰۰	۲/۵۹٤	- ۸/۷۹
		٦۰۰	۳/۰۹٤	- ۱۱/۳۲
		۱۰۰۰	۳/۵	- ۸/٦۹
٤	٪۱۵	۷۵	۱/٦۳۸	- ۲۱/۲۳
		۱۵۰	۱/۹۷۲	- ۲۳/۵۱
		۳۰۰	۲/۳٤٤	- ۱۷/۵۸
		٦۰۰	۲/۸۳۹	- ۱٦/۸۹

		۱۰۰۰	۳/۲۵۶	– ۱۵/۰۵
۵	٪۲۰	۷۵	۱/۶۱۱	– ۲۴/۴۷
		۱۵۰	۱/۹۵	– ۲۴/۳۶
		۳۰۰	۲/۳۱۱	– ۱۸/۷۴
		۶۰۰	۲/۷۹۴	– ۱۹/۹۲
		۱۰۰۰	۳/۱۸۹	– ۱۶/۸۰
۶	٪۲۵	۷۵	۱/۵۷۸	– ۲۶/۰۲
		۱۵۰	۱/۹۱۷	– ۲۵/۶۴
		۳۰۰	۲/۲۷۲	– ۲۰/۱۱
		۶۰۰	۲/۷۳۹	– ۲۱/۵۰
		۱۰۰۰	۳/۱۳۹	– ۱۸/۱۱
۷	٪۳۰	۷۵	۱/۵۳۹	– ۲۷/۸۵
		۱۵۰	۱/۸۹۴	– ۲۶/۵۳
		۳۰۰	۲/۲۴۴	– ۲۱/۱۰
		۶۰۰	۲/۶۹۴	– ۲۲/۷۹
		۱۰۰۰	۳/۰۸۹	– ۱۹/۴۱

*منفی بودن اعداد این ستون به معنای کاهش عرض شیار سایشی می‌باشد.

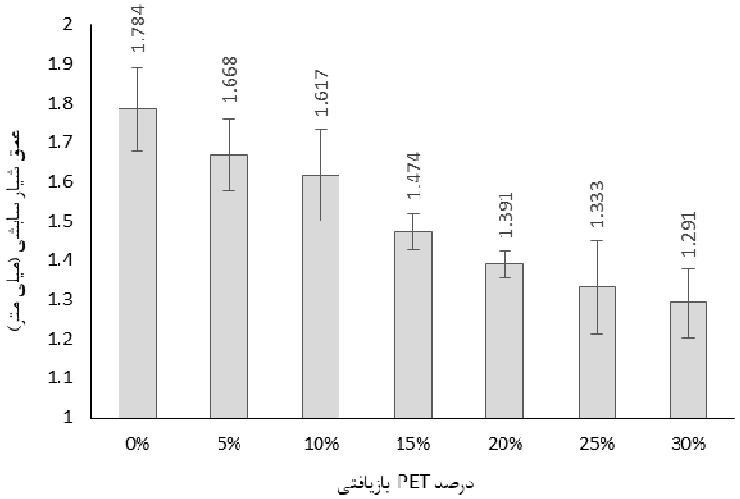
پس از انجام آزمایش مقاومت سایش چرخ پهن در ۱۰۰۰ دور، میزان حداکثر عمق ایجاد شده در مرکز شیار ایجاد شده به وسیله عمق سنج در ۱۰ نقطه برای هر نمونه اندازه‌گیری شد.

نتایج حاصل در شکل ۱۴ نشان داده شده است که اعداد ذکر شده میانگین اندازه‌گیری عمق در ۳۰ نقطه مختلف می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد PET بازیافتی میزان عمق نیز کاهش یافته است بطوریکه این عمق برای نمونه شاهد ۱/۷۸۴ میلی‌متر و برای نمونه با ۲۵ و ۳۰ درصد PET، به ترتیب ۱/۳۳۳ و ۱/۲۹۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای نمونه ۲۵ و ۳۰ درصد به ترتیب مقدار ۲۵ و ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش عمق مشاهده شد. با توجه به اینکه مقاومت سایشی با عمق شیار سایشی رابطه عکس دارد و هرچه مقاومت سایشی بیشتر باشد، عمق شیار سایشی کمتر خواهد بود، در این پژوهش از عکس عمق به عنوان مقاومت سایشی یاد شده و از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$AR = \frac{1}{D} \qquad (۶)$$

که در این رابطه AR مقاومت سایشی (بر حسب $1/m$)، D عمق شیار سایشی (بر حسب متر) است.

در جدول ۱۲ برای هر یک از درصدهای جایگزینی بر اساس عمق سایشی پس از ۱۰۰۰ دور، مقاومت سایشی و تغییرات آن نسبت به مقاومت سایشی آورده شده است. با توجه به مقاومت سایشی پس از ۱۰۰۰ دور، بشترین مقاومت سایشی به ازای ۳۰ درصد جایگزینی PET با ($1/m$) ۷۷۴/۵۹ و کمترین مقاومت سایشی برای نمونه شاهد با ($1/m$) ۵۶۰/۵۴ بوده است. افزایش مقاومت سایشی نسبت به نمونه شاهد برای جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد، به ترتیب ۷، ۱۰، ۲۱، ۲۸، ۳۴، ۳۸ درصد می‌باشد.



شکل ۱۴. عمق شیار سایشی پس از ۱۰۰۰ دور در آزمایش سایش چرخ پهن

٥-بحث

روسازی بتنی از نظر مهندسی دارای نقاط ضعف و قوتی می‌باشد که پیشتر آن اشاره شد. استفاده از پلاستیک بازیافتی در بتن، همانطور که به تفصیل تشریح شد بر مشخصات مکانیکی و دوام تاثیر دارد. زوال مشخصات مکانیکی ناشی از جایگزینی PET با مصالح سنگی موجب تضعیف استحکام روسازی بتنی می‌شود اما مطابق با آیین‌نامه‌های ذکر شده، زوال این مشخصات مقاومتی تا درصد جایگزینی یاد شده در بازه آیین نامه قرار دارد در حالیکه با وجود قرار گرفتن این مشخصه مکانیکی در محدوده حداقلی آیین‌نامه، مقاومت اصطکاکی و مقاومت سایشی افزایش یافته است. بصورت کلی آیین نامه‌ای برای مقایسه مشخصات مکانیکی و دوام وجود ندارد، به این معنی که مقاومت سایشی که از فاکتورهای مهم دوام است نیاز به بررسی بلند مدت و تاثیر بر مشخصات ایمنی دارد و مقایسه با فاکتورهای استحکام نیازمند پژوهش‌های بیشتر می‌باشد. بطور کلی مقایسه از نظر وزنی و اعتبار سنجی مشخصات ذکر شده نیازمند اطلاعاتی در مورد نوع روسازی و کاربرد آن دارد. استفاده از پلاستیک بازیافتی در بتن به خودی خود یک روش دفع محیط زیستی است که در مقایسه با سایر روش‌های بهبود مقاومت سایشی به مراتب هزینه کمتری دارد.

جدول ١٢- درصد تغییرات مقاومت سایشی نسبت به نمونه شاهد در آزمایش سایش چرخ پهن

ش	درصد جایگزینی PET بازیافتی با ریزدانه طبیعی	مقاومت سایشی ($1/m$)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد
١	٪٠ (شاهد)	٥٦٠/٥٤	٠
٢	٪٥	٥٩٩/٥٢	+ ٦/٩٥
٣	٪١٠	٦١٨/٤٣	+ ١٠/٣٣
٤	٪١٥	٦٧٨/٤٣	+ ٢١/٠٣
٥	٪٢٠	٧١٨/٩١	+ ٢٨/٢٥
٦	٪٢٥	٧٥٠/١٩	+ ٣٣/٨٣
٧	٪٣٠	٧٧٤/٥٩	+ ٣٨/١٩

٦-نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر PET بازیافتی بر سایش روسازی بتنی و همین‌طور بررسی تأثیر آن بر مشخصات مکانیکی می‌باشد. نمونه‌ها در ٧ نوع طرح مخلوط ساخته‌شده و شامل جایگزینی ٥ تا ٣٠ درصدی PET بازیافتی با ریزدانه می‌باشد. نتایج کلی این پژوهش به شرح زیر است.

١- استفاده از PET بازیافتی در روسازی بتنی به دلایلی چون حفظ منابع طبیعی و کمک به حفظ محیط زیست می‌تواند بسیار سودمند واقع گردد.

٢- بکارگیری PET بازیافتی ریزدانه در بتن موجب کاهش کارایی و همچنین کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی PET بازیافتی، اسلامپ و وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابند.

٣- بر اساس یافته ها، مشخصات مکانیکی بتن ساخته شده با PET بازیافتی کمتر از بتن شاهد است که مقدار کاهش به درصد جایگزینی بستگی دارد. بطوریکه با افزایش درصد جایگزینی این کاهش بیشتر خواهد بود.

٤- مقاومت سایشی بتن ساخته شده با PET بازیافتی در هر صورت بیشتر از نمونه شاهد است که تغییرات این مشخصه با افزایش عبور چرخ (تعداد دور) نمایان تر خواهد بود.

٥- با توجه به نتایج حاصل از انجام آزمایشات و با در نظر گرفتن حداقل‌های دو آیین نامه ACPA و FAA، بهینه‌ترین درصد استفاده از PET بازیافتی ریزدانه، جایگزینی ٢٠ درصد بوده است.

٧-پی نوشت‌ها

1- Polyethylene Terephthalate
2- Compaction Factor
3- Interfacial Transition Zone
4- Alumina (Aluminium Oxide) Al_2O_3
٥- ٠/١٨ میلی‌متر یا ١٨٠ میکرون
6-American Concrete Pavement Association
7- Federal Aviation Administration

۸-مراجع

- "گزارشات عملکرد سالانه مرکز اطلاعات و آمار وزارت صنعت، معدن و تجارت، گزارش های مربوط به سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۵"، آدرس الکترونیکی:
http://www.mimt.gov.ir/web_directory/13543%DA%AF%D8%B2%D8%A7%D8%B1%D8%B4%D8%A7%D8%AA%D8%B3%D8%A7%D9%84%D8%A7%D9%86%D9%87.html.

–ACI Committee. (2009), "ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete".

–Al-Manaseer, A. and T. Dalal, (1997), "Concrete containing plastic aggregates". Concrete International,. 19(8), pp. 47-52.

-ASTM, C., 192/C 192M–02. (2002), "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory". West Conshohocken (PA): ASTM International.

-ASTM, C., 143/C 143M–03, (2010), "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete". Annual Book of ASTM Standards,. 4.

-ASTM C496 / C496M, (2011), "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens".

-ASTM, C78, (2010), "Standard test method for flexural strength of concrete" (using simple beam with third-point loading). in American society for testing and materials.

-Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., & Gutierrez, A., (2009),"Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios". Waste Management, 29(10), pp.2707-2716.

-(2008), "Concrete, Construction and Building materials", 125, pp. 946-951.

-khalil, w.i. and k.j. khalaf, (2017), "eco-friendly concrete containing pet plastic waste aggregate". Diyala Journal of Engineering Sciences, 10(1), pp. 92-105.

-Azhdarpour, A. M., Nikoudel, M. R., & Taheri, M., (2016),"The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation". Construction and building Materials, 109, pp.55-62.

-Bartolome, L., et al., (2012), "Recent developments in the chemical recycling of PET, in Material recycling-trends and perspectives". Intech Open.

-Choi, Y.-W., et al., (2005), "Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete". Cement and concrete research, 35(4), pp. 776-781.

-EN, B., 1338 (2003),"Concrete paving blocks. Requirements and test methods". British Standards,(London, UK), 2003: p. 76.

-Frigione, M., (2010), "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete". Waste management,. 30(6), pp. 1101-1106.

-Geyer, R., J.R. Jambeck, and K.L. Law, (2017), "Production, use, and fate of all plastics ever made". Science advances, 3(7), p. e1700782.

-Gourmelon, G., (2015), "Global plastic production rises, recycling lags". Vital Signs, 22, pp. 91-95.

-Gu, L., & Ozbakkaloglu, T., (2016), "Use of recycled plastics in concrete: A critical review". Waste Management, 51, pp.19-42

-Hama, S. M., & Hilal, N. N., (2019), "Fresh properties of concrete containing plastic aggregate". In Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete, Woodhead Publishing, pp. 85-114.

-Islam, M.J., M.S. Meherier, and A.R. Islam, (2016), "Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of

-Nibudey, R., et al., (2013), "Strength and fracture properties of post consumed waste plastic fiber reinforced concrete". International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD), 3(2), pp. 9-16.

natural aggregate". Construction and building materials, 52, pp. 236-244.

-Saxena, Rajat, Trilok Gupta, Ravi K. Sharma, Sandeep Chaudhary, and Abhishek Jain. (2018), "Assessment of Mechanical and Durability Properties of Concrete Containing PET Waste", Scientia Iranica.

-Siddique, R., (2007), "Waste materials and by-products in concrete". Springer Science & Business Media.

-Siddique, R., J. Khatib, and I. Kaur, (2008), "Use of recycled plastic in concrete": a review. Waste management, 28(10), pp. 1835-1852.

-Sosoi, G., et al., (2018), "Wastes as aggregate substitution in polymer concrete". Procedia Manufacturing, 22, pp. 347-351.

-Pacheco-Torgal, F., (2019), "Introduction to the use of recycled plastics in eco-efficient concrete, in Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete"., Elsevier, pp. 1-8.

-Ragaert, K., L. Delva, and K. Van Geem, (2017), "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste". Waste Management, 69, pp. 24-58.

-Ramadevi, K. and R. Manju, (2012). "Experimental investigation on the properties of concrete with plastic PET (bottle) fibres as fine aggregates". International journal of emerging technology and advanced engineering, 2(6), pp. 42-46.

-Saikia, N. and J. de Brito, (2014). "Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of

Evaluating the Effects of Recycled Plastic (PET) on the Mechanical Properties and Abrasion Resistance of Concretes

Bashir Moradi, M.Sc., Grad., Highway and Transportation Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Abolfazl Hassani, Professor, Highway and Transportation Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Hamed Rooholamini, Assistant Professor, Highway and Transportation Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

E-mail: hassani@modares.ac.ir

Received: July 2021-Accepted: August 2021

ABSTRACT
The vulnerability of non-biodegradable wastes and their exploiting to reduce contamination of environment has been abundantly attracted the engineers' attention. In addition, the abrasion resistance of concrete pavement is one of the prominent factors of durability causing non-affordable maintenance and rehabilitation costs. Thus, utilizing plastic wastes either as aggregate replacement or fiber is considered as an eco-friendly idea. Recently, numerous studies have been carried out to investigate the effects of PET (with different shapes and sizes) on mechanical properties and durability characteristics of concrete. In the present research, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% by volume fraction of natural river sand in concrete mixes were replaced with recycled PET and specifications of fresh and hardened concrete so as to evaluate mechanical properties and abrasion resistance of concrete specimens. The obtained results revealed that replacing recycled PET aggregates with natural sand decreases slump and fresh density of concrete. Nevertheless, the mechanical properties were degraded as PET content increased. Furthermore, the results that replacing up to 30 percent of PET resulted in reducing compressive, splitting tensile and flexural strength, respectively, 36, 42 and 22 percent compared to control sample. In addition, replacing fine recycled PET improved the abrasion resistance of concrete. According to criteria implied by standards, the experimental results admitted that replacing 20% of fine recycled PET resulted in the most possible mechanical behavior and abrasion resistance.

Keywords: Concrete Pavement, Waste Plastic, Polyethylene Terephthalate (PET), Mechanical Properties, Abrasion Resistance