

اثر اسید سولفوریک بر خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خرده لاستیک و پت

علی شاهینی^۱، مجتبی یعقوبی سرسختی^{۱*}، هومن جانفشان عراقی^۲

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر، مازندران، ایران

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان، گلستان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۵

بازنگری: ۱۷ آبان ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۵ دی ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۲۵ دی ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

اسید سولفوریک
فرسایش بتن
تغییرات وزن
مقاومت فشاری
سرعت امواج فراصوت

چکیده: در ۲۰ سال اخیر، تمرکز زیادی بر روی قابلیت استفاده از انواع زباله‌های شهری در صنعت ساختمان رواج داده شده است و تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. که در بسیاری از موارد اضافه نمودن مواد بازیافتی علاوه بر فوایدی که برای حفظ محیط زیست به همراه دارد موجب تأثیرات خوبی بر روی خواص محصولات نهایی شده است. یکی از مواد بازیافتی جدید که در صنعت بتن از آن استفاده می‌شود پلاستیک می‌باشد. پلاستیک‌های بازیافتی می‌توانند به عنوان سنگ‌دانه در بتن استفاده شوند و برخی خصوصیات مکانیکی بتن از جمله مقاومت در برابر فرسایش آن را بهبود بخشند. در این تحقیق مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بتنی ساخته شده از پت و لاستیک صورت گرفته و مقاومت بتن در برابر خوردگی اسیدی در بخش سنگدانه بررسی شد. به این صورت که نمونه‌ها در محلول رقیق شده‌ی اسید (pH ≈ ۱) قرار گرفته و در بازه های زمانی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روز تحت آزمایش‌های مدول الاستیسیته، کشش غیرمستقیم، مقاومت فشاری، سنجش اختلاف وزن و سرعت امواج فراصوت قرار گرفتند. در پایان نتایج بدست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بدست آمدن میزان فرسایش بتن از معیارهای تغییرات وزن و مقاومت فشاری و سرعت امواج فراصوت استفاده شد. نتایج نشان داد که جایگزینی پت با سنگ‌دانه، تأثیر مثبتی را بر روی مقاومت بتن تحت اثر اسید سولفوریک دارد.

۱- مقدمه

وسعت‌یابی شهرها در دهه‌های گذشته نیاز به خودرو برای سفرهای درون‌شهری را از اهمیتی ویژه برخوردار کرده است. روزانه ۱۲۰۰ دستگاه خودروی جدید در کشور تولید می‌شود و سالانه بیش از نیم میلیون خودروی جدید وارد معابر می‌شوند. در حال حاضر مقادیر بسیار زیادی از تایرها انباشته شده و یا دفن می‌شوند که شامل ۳ هزار میلیون در اروپا و ۱۰۰۰ میلیون در آمریکا می‌باشند [۱]. و همچنین شعله‌ور شدن تایرها این خطر را افزایش می‌دهد. هنگامی که این مواد به صورت اتفاقی در محل انباشته شدن مشتعل می‌شوند موجب حرارت زیاد و پخش گازهای سمی شده و علاوه بر آن مواد ذوب شده حاصل از مشتعل شدن آن‌ها به صورت مواد روغنی در آمده خاک و آب اطراف خود را آلوده میکند و علی‌رغم این آسیب‌ها، امروزه میلیون‌ها عدد تایر در سرتاسر جهان سوزانده می‌شوند.

در سال ۲۰۰۷ مصرف سالیانه بطری‌های پت (PET) ۲۵۰ میلیارد تن بود؛ که افزایش ۱۵ درصدی را نسبت به سال پیش از خود نشان می‌داد. در آمریکا ۵۰ بیلیون بطری هرساله دفن می‌شود و از آن‌جایی که زباله‌های پت به صورت طبیعی تجزیه پذیر نیستند و می‌توانند صدها سال در طبیعت

باقی بمانند، بررسی‌های اخیر نشان داده است که جای‌گزینی زباله‌های پت به صورت سنگ‌دانه در بتن نتایج بسیار بهتری را نسبت به دفن کردن آن‌ها نشان داده است [۲].

با توجه به استفاده گسترده از این مواد و مدت‌زمان طولانی مورد نیاز برای تجزیه زباله‌های مربوط به این مواد در طبیعت، ارائه راه‌کارهای مهندسی جهت بازیافت و همچنین بهره‌برداری مجدد از مواد مصرفی مزبور، مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است به بخشی از پیشینه آن اشاره می‌شود:

گونسی^۲ (۲۰۱۰) [۳]، ذرات خرده لاستیک را در بتن خود تراکم در درصدهای ۵، ۱۵ و ۲۵ جایگزین سنگ‌دانه کردند و مشاهده نمودند که در ۲۵ درصد جای‌گزینی به همراه ۴ درصد وزن سیمان فوق روان‌کننده، نمی‌توان به اسلامپ هدف (۷۵۰ میلیمتر) رسید. آن‌ها همچنین گزارش نمودند که اضافه کردن خاکستر سرباره به مصرف کمتر فوق روان‌کننده کمک می‌کند. اگرچه محققین زیادی کاهش در اسلامپ را با افزایش جایگزینی خرده لاستیک گزارش کردند اما تعدادی نیز نتایج متناقضی گرفتند که می‌توان نتیجه گرفت که کارایی بتن‌های حاوی خرده لاستیک به میزان زیادی به مشخصات لاستیک جای‌گزین شده دارد.

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mojtabayacobi_s@Qaemiau.ac.ir

الاستیسیته نمونه‌های بتنی با افزایش درصد جای‌گزینی پلاستیک همانند مقاومت فشاری آن کاهش پیدا می‌کند، آن‌ها بیان نمودند که ممکن است رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته وجود داشته باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی با توجه به مطالعات پیشین به بررسی استفاده از زباله‌های فرآوری شده پت به عنوان جایگزین ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و لاستیک به عنوان جایگزین ۱۵ درصد از حجم ماسه در ترکیبات بتن پرداخته شده است.

بدین منظور نمونه‌های بتنی مکعبی و استوانه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ ساخته شد و سپس تحت اثر اسیدسولفوریک با غلظت صددرصد قرار گرفت و میزان مقاومت فشاری، تغییرات وزن و تغییرات سرعت امواج فرا صوت آن‌ها تعیین شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سنگ‌دانه‌ها

براساس استاندارد ASTM C33 [۱۳]، آزمایش دانه‌بندی، جهت تعیین نحوه توزیع اندازه دانه‌های سنگی بکار گرفته شد. مدول نرمی مطابق با استاندارد ASTM C125 [۱۴]، محاسبه شد.

شن مصرفی در این تحقیق از نوع مصالح تیزگوشه می‌باشد. وزن مخصوص ظاهری اشباع با سطح خشک آن ۲/۷۳ و درصد جذب آب آن ۲/۴۸ درصد و حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۲/۵ mm است. دانه‌بندی شن در جدول ۱ و منحنی آن در شکل ۱ ارائه شده است.

ماسه مصرفی نیز از نوع رودخانه‌ای و با اندازه ۰-۴/۷۵ میلی‌متر بوده که میزان نسبت‌های آن به حد مورد نظر استاندارد ASTM C33 [۱۳]، رسیده است. وزن مخصوص ظاهری اشباع با سطح خشک آن ۲/۷ و درصد جذب آب آن ۳ و مدول نرمی ماسه مورد نظر نیز ۲/۷۵ تعیین گردید. دانه‌بندی ماسه در جدول ۲ و شکل ۲ و همچنین مدول نرمی ماسه در جدول ۳ ارائه شده است.

ویرا^۱ و همکاران (۲۰۱۰) [۴]، سه نوع از زباله‌های لاستیکی را مورد مطالعه قرار دادند و همچنین آن‌ها را در درصدهای ۲/۵، ۵ و ۷/۵ جایگزین سنگ‌دانه کردند و نتیجه گرفتند که بهترین عملکرد مکانیکی مربوط به جایگزین ۲/۵ درصد ذرات خرده لاستیک با اندازه ۲/۴ میلی‌متر می‌باشد. محققین مختلفی ذرات خرده لاستیک فرآوری شده را به منظور افزایش چسبندگی دانه‌ها با خمیر سیمان مورد استفاده قرار دادند.

گنجیان و همکاران (۲۰۰۹) [۵]، نشان دادند که مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی ذرات درشت دانه لاستیک کمتر از مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی ذرات ریز خرده لاستیک می‌باشد. در حالت جای‌گزینی درشت دانه کاهش ۳۰ تا ۶۰ درصدی با جای‌گزینی ۵ تا ۱۰ درصدی خرده لاستیک توسط آن‌ها مشاهده شد و در حالت جای‌گزینی ریزدانه کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصدی در همان درصدهای جای‌گزینی مشاهده شد. این رفتار ممکن است به دلیل چسبندگی بسیار ضعیف ذرات درشت دانه لاستیک با خمیر سیمان باشد. خالو و همکاران (۲۰۰۸) [۶]، بیان نمودند که اضافه کردن ذرات خرده لاستیک به بتن موجب افزایش شکل‌پذیری آن می‌شود.

سوکونتاسوکول و چایکاو^۲ (۲۰۰۶) [۷]، نشان دادند که بلوک‌های بتنی حاوی خرده لاستیک مقاومت سایشی کمتری نسبت به بتن معمولی دارند. رحمانی و همکاران (۲۰۱۳) [۸]، گزارش کردند که ذرات پت به دلیل پولکی شکل بودن، سطح مخصوص بیشتری نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی دارند. در نتیجه اصطکاک بیشتر بین ذرات منجر به کاهش کارایی در بتن می‌شود.

فریجن^۳ (۲۰۱۰) [۹]، گزارش کرد که جایگزینی ۵ درصدی ذرات پت با اندازه ۰/۱ تا ۵ میلی‌متر با سنگ‌دانه‌های طبیعی منجر به کاهش در مقاومت فشاری از ۰/۴ تا ۱/۹ درصد بعد از یکسال عمل‌آوری می‌شود. بابو^۴ و همکارانش (۲۰۰۴) [۱۰]، مشاهده کردند که با افزایش سن، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و همچنین این افزایش تقریباً در همه مخلوط‌ها از ۷ روز تا ۲۸ روز و از ۲۸ روز تا ۹۰ روز بیشتر از ۳۵٪ بود و همچنین مقاومت فشاری با افزایش درصد پلاستیک کاهش یافت.

اوچی^۵ و همکاران (۲۰۰۷) [۱۱]، نشان دادند که استفاده از الیاف فرآوری شده پت به طول ۳۰ میلی‌متر به اندازه ۱/۵ درصد جای‌گزینی موجب افزایش در مقاومت کششی می‌شود.

رحمانی و همکاران (۲۰۱۳) [۸]، نشان دادند که کاهش در مدول الاستیسیته بتن می‌تواند به دلیل کم بودن مدول الاستیسیته ذرات پت باشد و این کاهش در مدول الاستیسیته با افزایش مقدار پت از یک رابطه نسبتاً خطی پیروی می‌کند.

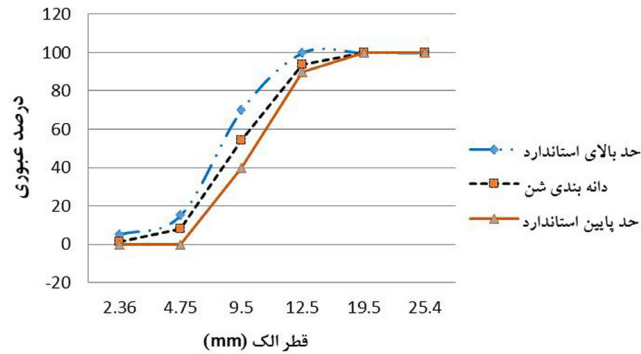
همچنین جو^۶ و همکارانش (۲۰۰۷) [۱۲]، نتیجه گرفتند که مدول

- 1 Vieira
- 2 Sukontasukkul and Chalermphol
- 3 Frigione
- 4 Babu
- 5 Ochi
- 6 Jo

جدول ۱: دانه بندی شن مصرفی

Table 1. Aggregate of Gravel used

شماره الک	قطر الک (mm)	وزن الک خالی	وزن مانده	درصد مانده روی هر الک
۰/۳۷۵ اینچ	۹/۶۵	۶۴۵/۳۰	۰	۰
۴ مش	۴/۷۵	۵۰۴/۴۰	۴/۵۰	۰/۴۵
۸ مش	۲/۳۶	۴۲۷/۵۰	۱۲۸/۹۰	۱۳/۳۲
۱۶ مش	۱/۱۹	۳۵۷/۷۰	۱۴۲/۰۰	۲۷/۵۰
۳۰ مش	۰/۶	۳۵۲/۴	۲۸۴/۴۰	۵۵/۸۹
۵۰ مش	۰/۲۹۷	۳۳۱/۳	۲۴۳/۳۰	۸۰/۱۸
۱۰۰ مش	۰/۱۴۹	۳۱۷/۱۰	۱۵۳/۳۰	۹۵/۴۹
سینی		۲۸۴/۵۰	۴۵/۱۰	-
FM=۲/۷۲			۱۰۰/۱/۵۰	۲۷۲/۸۵



شکل ۱: منحنی دانه بندی شن مصرفی و حدود استاندارد ASTM
Fig. 1. Gravel grading curve and ASTM standard

جدول ۲: دانه بندی ماسه مصرفی

Table 2. Aggregate of Gravel used

شماره الک	قطر الک (mm)	وزن الک خالی	وزن الک + مصالح روی آن	وزن مانده	وزن عبوری	درصد عبوری	محدوده استاندارد
۱ اینچ	۲۵/۴۰	۴۹۵/۱۰	۴۹۵/۱۰	۰	۱۵۰۲	۱۰۰	۱۰۰
۰/۷۵ اینچ	۱۹/۰۵	۵۰۷	۵۰۷/۰۰	۰	۱۵۰۲	۱۰۰	۱۰۰
۰/۵ اینچ	۱۲/۵۰	۵۰۰/۹۰	۶۴۵/۱۰	۹۵	۱۴۰۷	۹۳/۶۷	۹۰-۱۰۰
۰/۳۷۵ اینچ	۹/۶۵	۵۳۰/۵۰	۱۳۸۶/۳۰	۵۹۰	۸۱۷	۵۴/۳۹	۴۰-۷۰
۴ مش	۴/۷۵	۴۸۸/۴۰	۹۲۱/۸۰	۷۰۰	۱۱۷	۷/۷۸	۰-۱۵
۸ مش	۲/۳۶	۳۸۸/۶۰	۴۳۷/۷۰	۱۰۰	۱۷	۱/۱۳	۰-۵
سینی		۳۷۹/۰۰	۳۹۶/۰۰	۱۷	۰	۰	
مجموع				۱۵۰۲			

جدول ۳: مدول نرمی ماسه مصرفی

Table 3. Fineness modulus of sand used

محدوده استاندارد	درصد عبوری	وزن عبوری	وزن مانده	وزن الک + مصالح روی آن	وزن الک خالی	قطر الک (mm)
۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰۲	۰	۴۹۵/۱	۴۹۵/۱	۲۵/۴
۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰۲	۰	۵۰۷	۵۰۷	۱۹/۰۵
۹۰-۱۰۰	۹۳/۶۷	۱۴۰۷	۹۵	۶۴۵/۱	۵۰۰/۹	۱۲/۵
۴۰-۷۰	۵۴/۳۹	۸۱۷	۵۹۰	۱۳۸۶/۳	۵۳۰/۵	۹/۶۵
۰-۱۵	۷/۷۸	۱۱۷	۷۰۰	۹۲۱/۸	۴۸۸/۴	۴/۷۵
۰-۵	۱/۱۳	۱۷	۱۰۰	۴۳۷/۷	۳۸۸/۶	۲/۳۶
سینی	۰	۰	۱۷	۳۹۶	۳۷۹	
مجموع		۱۵۰۲				

۲-۵- ذرات خرده لاستیک

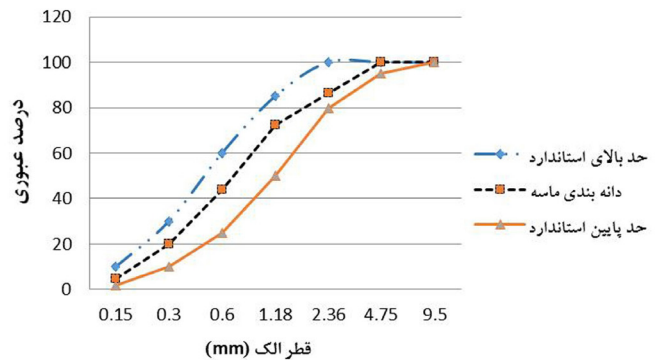
ذرات خرده لاستیک استفاده شده به عنوان سنگ دانه‌های ریز در این تحقیق، حاصل از آسیاب کردن تایرهای فرسوده خودرو است که توسط ماشین آلات صنعتی بدست آمده‌اند. ماکزیمم اندازه ذرات خرده لاستیک، ۳ میلیمتر بوده و وزن مخصوص محاسبه شده برای آن ۱۱۴۲ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. هم‌چنین، نحوه محاسبه مدول نرمی ماسه مصرفی در جدول ۳ ذکر شده است.

۲-۶- ذرات پت

ذرات پت استفاده شده به عنوان سنگ‌دانه‌های ریز در این تحقیق، حاصل از آسیاب کردن بطری‌های پت است. این ذرات از جمع‌آوری بطری‌های زباله پت، شستن و سپس آسیاب نمودن آن‌ها توسط ماشین آلات صنعتی بدست آمده‌اند. ماکزیمم اندازه ذرات پت، ۴/۷۵ میلیمتر و وزن مخصوص محاسبه شده برای آن ۴۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب است.

۲-۷- طرح مخلوط بتن حاوی خرده لاستیک و پت

پارامتر متغیر اصلی تمام طرح مخلوط‌ها میزان جای‌گزینی ذرات پت با سنگ‌دانه‌های ریزدانه است و مقدار جای‌گزینی خرده لاستیک با سنگ‌دانه‌های ریزدانه به اندازه ی ثابت ۱۵ درصد حجمی نگه داشته شده است. در جدول ۴ میزان مصالح مصرفی در هر یک از طرح مخلوط‌ها آمده است.



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی و حدود استاندارد ASTM

Fig. 2. Sand grading curve and ASTM standard

۲-۲- فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان‌کننده نسل سوم با پایه کربوکسیلیک‌اتر استفاده شده است. این ماده کدر و به رنگ ابری بوده و چگالی آن در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر ۱/۱ کیلوگرم و مقدار یون کلرید موجود در آن کمتر از ۰/۱ درصد است.

۲-۳- سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع پرتلند II محصول کارخانه سیمان شاهرود، دارای وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح مخصوص به روش بلین ۳۰۶ متر مربع بر کیلوگرم بوده است.

۲-۴- آب

آب مصرفی در این پروژه آب آشامیدنی است.

جدول ۴: میزان مصالح مصرفی در ساخت بتن حاوی خرده لاستیک (kg/m³)

Table 4. She materials used in concrete containing crumb rubber (kg / m³)

مصالح	طرح مخلوط ۱	طرح مخلوط ۲	طرح مخلوط ۳	طرح مخلوط ۴	طرح مخلوط ۵
ماسه	۷۴۵/۸۸	۶۳۴/۱	۵۹۶/۸	۵۵۹/۵	۵۲۲/۱۷
شن	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵	۹۷۶/۰۵
سیمان	۳۷۹/۶۳	۳۷۹/۶۳	۳۷۹/۶۳	۳۷۹/۶۳	۳۷۹/۶۳
آب	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۵
لاستیک	-	۷۳/۸۴	۷۳/۸۴	۷۳/۸۴	۷۳/۸۴
پت	-	-	۱۰/۰۳	۲۰/۰۶	۳۰/۱
فوق روان کننده	-	۰/۸۱۵	۰/۸۱۵	۰/۸۱۵	۰/۸۱۵

۲-۸- تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت ارزیابی مقاومت فشاری، وزن مخصوص و سرعت عبور امواج فراصوت، از هر مخلوط تعداد ۱۲ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر ساخته شد که تعداد ۳ نمونه از هر مخلوط در سنین ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روز غوطه‌وری در اسید، مورد آزمایش قرار گرفتند و مقادیر میانگین گزارش شد. همچنین برای محاسبه مدول الاستیسیته استاتیکی در سن ۲۸ روز، برای هر طرح مخلوط، از ۳ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر مطابق با استاندارد ASTM C469 [۱۵]، استفاده شد.

۲-۹- آزمایش‌های بتن سخت شده

۲-۹-۱- وزن مخصوص

به منظور تعیین وزن نمونه‌های بتنی در هر مرحله از آزمایش، ۳ نمونه مکعبی از هر طرح مخلوط، جهت محاسبه وزن مخصوص استفاده شد.

۲-۹-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سنین ۲۸ روزه عمل‌آوری در آب و ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روزه غوطه‌وری در اسید توسط دستگاه جک فشاری اندازه‌گیری شد. در هر مرحله آزمایش، ۳ نمونه از هر طرح مخلوط در جهت عمود بر جهت بتن‌ریزی زیر جک قرار گرفت و میانگین آن‌ها به عنوان مقاومت نهایی بتن ثبت شد.

۲-۹-۳- مدول الاستیسیته استاتیکی

برای تعیین مدول الاستیسیته در سن ۲۸ روزه، با نصب کرنش سنج با دقت ۰/۰۰۲ میلیمتر بر روی رینگ مدول الاستیسیته و قراردادن نمونه‌های استوانه‌ای در آن، امکان کرنش نمونه‌ها را در اثر نیروهای مختلف فراهم شد. طبق استاندارد ASTM C469 [۱۸]، برای تعیین مدول الاستیسیته با

کرنش مربوط به ۴۰ درصد مقاومت نهایی و طبق رابطه ۱ اقدام به محاسبه مدول الاستیسیته شد.

$$E = \frac{\sigma_{40\% \sigma_v}}{\epsilon} \quad (1)$$

۲-۹-۴- آزمایش سرعت عبور امواج فراصوت^۱

در این تحقیق آزمایش سرعت عبور امواج فراصوت به وسیله دستگاه پاندیت^۲ با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز و دقت ۰/۱ میکروثانیه، در سنین ۲۸ روزه عمل‌آوری در آب و ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روزه غوطه‌وری در اسید بر روی نمونه‌های مکعبی انجام شد. از ۳ نمونه برای هر طرح مخلوط استفاده شد. آزمایش به صورت انتقال مستقیم، بر روی ۴ وجه از ۶ وجه نمونه‌های مکعبی صورت گرفت (۴ وجه عمود بر جهت بتن‌ریزی). هر وجه به ۵ قسمت تقسیم شد و زمان عبور امواج در هر ۵ نقطه ثبت گردید. میانگین این اعداد به عنوان زمان عبور امواج در نظر گرفته شد.

۳- نتایج

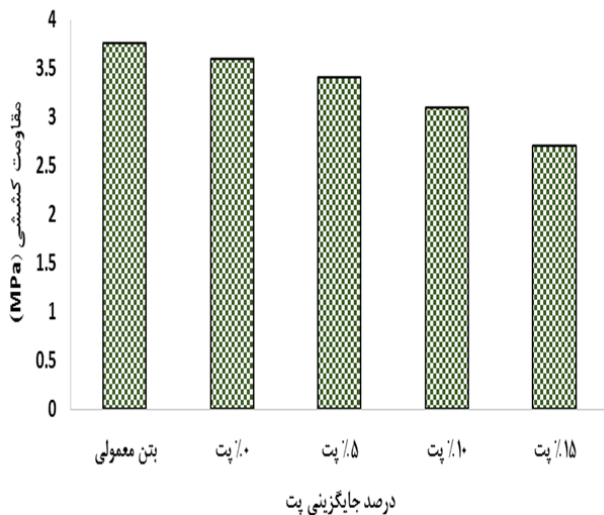
۳-۱- آزمایش اسلامپ

شکل ۳ نتایج آزمایش اسلامپ را برای نمونه‌های بتنی حاوی ذرات لاستیک و درصدهای مختلف پت را نشان می‌دهد. با مشاهده شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش جای‌گزینی ذرات پت و لاستیک، اسلامپ نمونه‌های بتنی کاهش می‌یابد. به طوری که با جایگزینی ۱۵٪ پت با ریزدانه در بتن، اسلامپ به میزان ۴۶ میلیمتر کاهش یافت. دلیل این امر می‌تواند تیز گوشه و پولکی شکل ذرات پت و جلوگیری کردن آن‌ها از حرکت روان بتن تازه باشد.

1 Ultrasonic waves

2 Portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester

شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی جایگزینی پت و خرده لاستیک به عنوان ریزدانه در نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، مقاومت کششی نمونه‌های حاوی درصد‌های بیشتر پت کمتر می‌باشد.

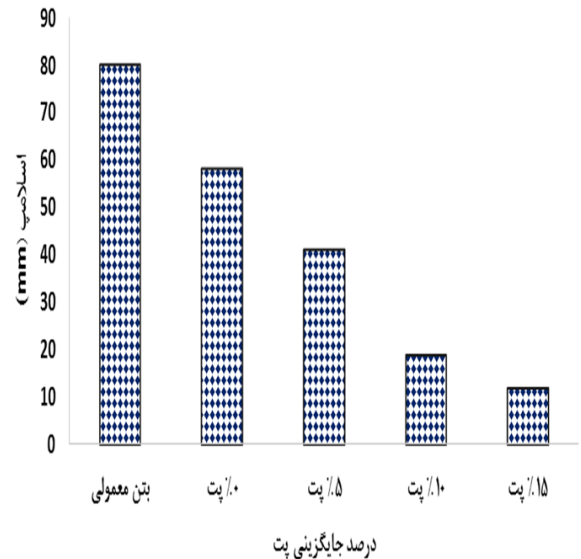


شکل ۵: مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف پت
Fig. 5. Shows the indirect tensile strength of samples containing different percentages of PET

می‌توان گفت به دلیل آن که اندازه‌ی مقاومت کششی بتن به میزان زیادی به ناحیه‌ی انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان بستگی دارد و با توجه به ضعیف بودن ناحیه‌ی انتقال بین دانه‌های پلاستیکی و لاستیکی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، با جایگزینی ذرات لاستیکی و پلاستیکی با سنگدانه‌های طبیعی، مقدار مقاومت کششی بتن کاهش پیدا می‌کند.

۳-۳- خصوصیات بتن‌های غوطه‌ور شده در اسید سولفوریک
۳-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف پت غوطه‌ور شده در اسید در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و بدون غوطه‌وری در آب دارای مقاومت فشاری ۳۳/۹، ۳۲/۹۵، ۳۱/۷۴ و ۲۹/۴۳ به ترتیب با جایگزینی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پت می‌باشد. با گذشت زمان غوطه‌وری در اسید سولفوریک به تدریج بتن فرسایش یافته و مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش پیدامی‌کند. در ابتدا به دلیل چسبندگی ضعیف بین ذرات پلاستیک و خمیر سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی درصد‌های بیشتر پت کمتر بود. اما با گذشت زمان غوطه‌وری در اسید سولفوریک به تدریج این اختلاف کم شده به طوری که نمونه‌های حاوی درصد‌های بیشتر پت مقاومت فشاری بیشتری نسبت به

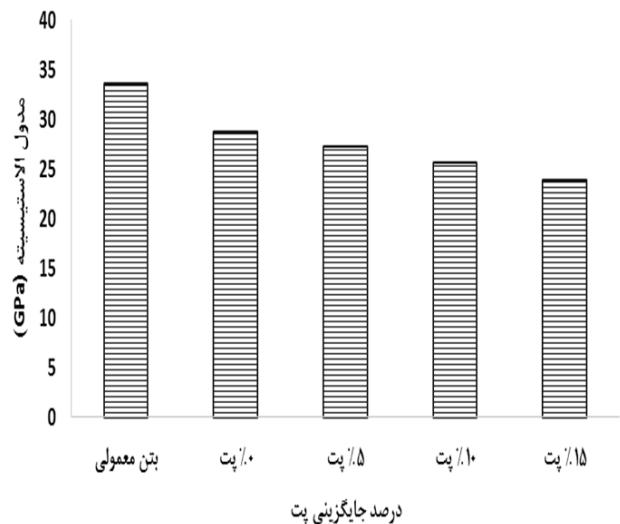


شکل ۳: اسلاپ نمونه‌های بتنی حاوی پت و لاستیک

Fig. 3. Shows the result of slump testing of concrete samples containing PET and rubber

۳-۲- آزمایش مدول الاستیسیته

شکل ۴ نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب را نشان می‌دهد. به روشنی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش جایگزینی ذرات پت، مدول الاستیسیته کاهش پیدا می‌کند. با توجه به آن که مقادیر مدول الاستیسیته‌ی بتن‌ها به میزان زیادی به ترکیبات ماتریس بتن وابسته است می‌توان عنوان کرد که این کاهش در مدول الاستیسیته می‌تواند به دلیل کمتر بودن مدول الاستیسیته‌ی دانه‌های لاستیک و پت نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی باشد.

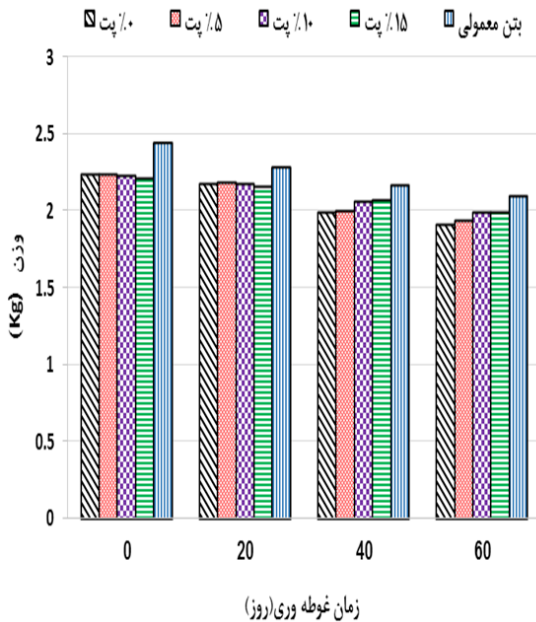


شکل ۴: مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف پت

Fig. 4. Modulus of elasticity of samples containing different percentages of PET

۳-۲-۳- آزمایش تغییرات وزن

شکل ۸ نتایج آزمایش تعیین وزن نمونه‌های حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف پت را در سن ۲۸ روزه عمل‌آوری در آب و سنین ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روزه غوطه‌وری در اسید سولفوریک را نشان می‌دهد. همان‌طور که از مشاهده‌ی شکل نتیجه می‌شود، در ابتدا با جای‌گزینی پلاستیک به بتن وزن آن کاهش یافت که به دلیل وزن کمتر ذرات پلاستیکی نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی بود. با افزایش سن غوطه‌وری در اسید سولفوریک، نمونه‌ها فرسایش یافته و وزن آن‌ها کاهش پیدا کرد. با کمی دقت می‌توان دریافت که در سنین نهایی غوطه‌وری بر خلاف سنین اولیه، نمونه‌های حاوی درصد‌های بیشتر پت وزن بیشتری نسبت به بتن مرجع دارند. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش جای‌گزینی پت بتن کمتر فرسایش یافته و وزن کمتری را از دست می‌دهد.

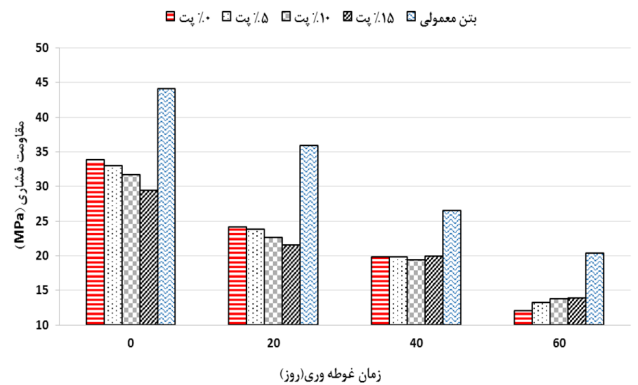


شکل ۸: نتایج آزمایش تعیین وزن نمونه‌های حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف پت

Fig. 8. Test results determine the weight of samples containing crumb rubber and different percentages of PET

شکل ۹ مقادیر تغییرات وزنی نمونه‌های غوطه‌ور شده در اسید را برای بتن معمولی، بتن معمولی حاوی خرده لاستیک و بتن حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف پت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که با اضافه کردن خرده لاستیک به بتن، نمونه‌های بتنی کاهش وزن بیشتری را نسبت به بتن معمولی بعد از ۶۰ روز غوطه‌وری در اسید از خود نشان داده است. اما با افزایش جای‌گزینی ذرات پت در بتن‌های حاوی خرده‌لاستیک، به میزان قابل توجهی تغییرات وزنی کاهش پیدا کرده و نمونه‌های بتنی مقاومت بالاتری را از خود در برابر فرسایش ناشی از اسید سولفوریک نشان دادند.

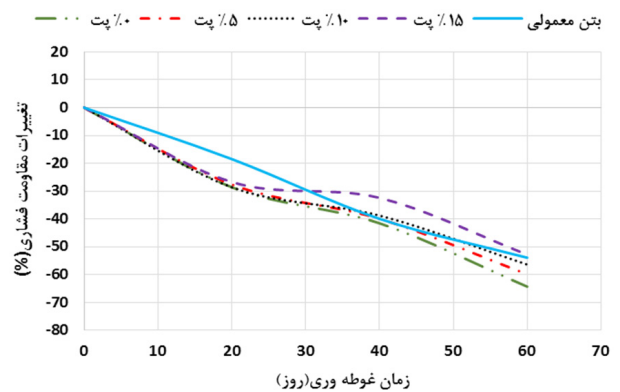
بتن معمولی حاوی خرده لاستیک داشتند. در نتیجه می‌توان برداشت کرد که با افزایش جای‌گزینی ذرات پت به بتن حاوی خرده لاستیک، مقاومت آن در برابر فرسایش ناشی از اسید سولفوریک بهبود پیدا می‌کند.



شکل ۶: نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن‌های حاوی درصد‌های مختلف پت در اسید سولفوریک

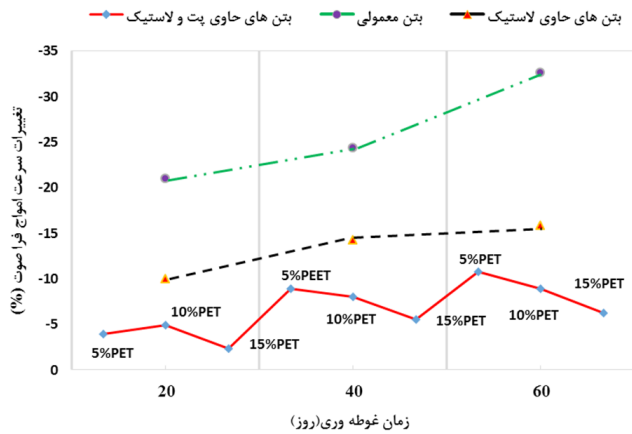
Fig. 6. Shows the results of testing compressive strength of concrete containing different percentages of PET in sulfuric acid

همچنین شکل ۷ تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف پت غوطه‌ور شده در اسید سولفوریک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های بیشتر جای‌گزینی پت، تغییرات کمتری در مقاومت فشاری از خود نشان داده و کمتر فرسایش یافت و در نتیجه مقاومت بیشتری را در برابر حمله‌ی اسید سولفوریک از خود نشان داده است.



شکل ۷: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف پت غوطه‌ور شده در اسید سولفوریک

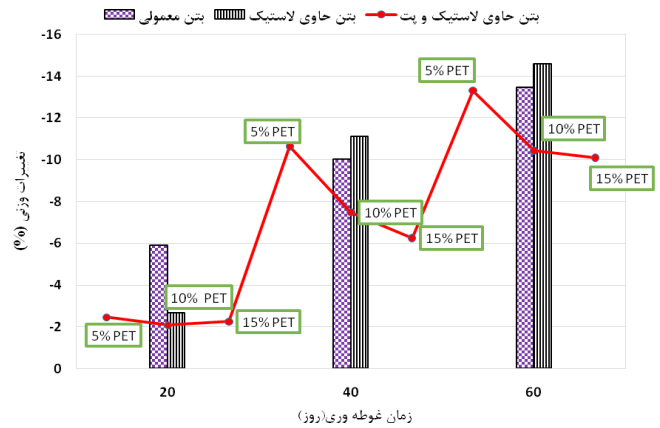
Fig.7. Variations the values of the compressive strength of samples immersed in acid for normal concrete, normal concrete containing crumb rubber and crumb rubber and concrete containing different percentages of replacement PET



شکل ۱۰: مقادیر تغییرات سرعت امواج فراصوت نمونه‌های غوطه‌ور شده در اسید برای بتن معمولی، بتن حاوی خرده لاستیک و بتن حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف جای‌گزینی پت

Fig. 10. The values of changes in the ultrasonic velocity of samples immersed in acid for normal concrete, concrete with crumb rubber and concrete containing crumb rubber and various percentages of PET replacement

- ذرات لاستیک و پت به دلیل پولکی شکل و تیز گوشه بودنشان موجب کاهش در اسلامپ نمونه‌های بتنی شده به طوری که با افزایش میزان جای‌گزینی، کاهش بیشتری در مقادیر اسلامپ مشاهده شد.
- مقاومت کششی نمونه‌های بتنی با افزایش جای‌گزینی ذرات پت کاهش پیدا کرد که می‌تواند به دلیل ضعیف بودن چسبندگی ذرات پت با خمیر سیمان نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی باشد.
- با افزایش جای‌گزینی پت با سنگ‌دانه‌های طبیعی در بتن، مدول الاستیسیته نمونه‌ها کاهش پیدا کرد که می‌تواند به دلیل کمتر بودن مدول الاستیسیته ذرات پت نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی و همچنین پیوستگی و چسبندگی کمتر بین ذرات پلاستیک و سنگ‌دانه‌های طبیعی باشد.
- مقاومت فشاری بتن‌های حاوی خرده لاستیک با مقادیر مختلف جای‌گزینی پت بررسی شد و نتیجه این بود که بتن حاوی مقادیر بیشتر ذرات پلاستیک هرچند که در سنین اولیه غوطه‌وری مقاومت کمتری نسبت به بتن مرجع داشت اما بعد از در معرض قرار گیری در محیط‌های اسیدی مقاومت خود را حفظ کرده به طوری که بعد از ۶۰ روز غوطه‌وری مقاومتی تقریباً یکسان (با اختلاف حدود ۲ درصد) از بتن مرجع را از خود نشان داد.
- پس از بررسی تغییرات وزنی نمونه‌ها بعد از طی غوطه‌وری ۶۰ روزه در محیط اسیدی نتیجه گرفته شد که با افزایش سن غوطه‌وری، وزن نمونه‌ها کاهش پیدا کرد و این درصد کاهش برای نمونه‌های حاوی درصد‌های جای‌گزینی بالاتر پت حدود ۵ درصد



شکل ۹: مقادیر تغییرات وزنی نمونه‌های غوطه‌ور شده در اسید برای بتن معمولی، بتن معمولی حاوی خرده لاستیک و بتن حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف جای‌گزینی پت

Fig. 9. Immersed in acid sample weight change values for normal concrete, normal concrete and concrete containing crumb rubber and crumb rubber containing different percentages of replacement PET

۳-۳-۳- آزمایش سرعت امواج فراصوت

شکل ۱۰ مقادیر تغییرات سرعت امواج فراصوت نمونه‌های غوطه‌ور شده در اسید را برای بتن معمولی، بتن معمولی حاوی خرده لاستیک و بتن حاوی خرده لاستیک و درصد‌های مختلف پت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان استنباط کرد که بر خلاف مقاومت فشاری و وزن، با افزودن لاستیک به بتن، میزان سرعت امواج فراصوت کاهش پیدا می‌کند که به دلیل این می‌باشد که ذرات لاستیک به صورت عایق صوت عمل کرده و سرعت آن‌را کاهش می‌دهد و همچنین با توجه به گزارش محققین، بتن‌های حاوی خرده لاستیک میزان تخلخل بیشتری نسبت به بتن معمولی دارند که این مسئله نیز موجب کاهش در سرعت امواج فراصوت می‌شود. همچنین با افزایش جای‌گزینی ذرات پت به صورت مشابه سرعت امواج کم می‌شود. نکته‌ی قابل توجه این می‌باشد که در درصد‌های بالاتر جای‌گزینی پت با سنگ‌دانه‌های طبیعی، کاهش کمتری در سرعت امواج فراصوت در سنین نهایی غوطه‌وری در اسید سولفوریک دیده می‌شود. این روند می‌تواند به این دلیل باشد که بتن‌های حاوی پت بیشتر یکپارچگی خود را بعد از حمله‌ی اسید سولفوریک حفظ کرده و کمتر فرسایش یافته‌اند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از آزمایش‌های گوناگون از جمله اسلامپ، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، مقاومت فشاری و تغییرات وزنی و سرعت امواج فراصوت رفتار نمونه‌های بتنی حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پت به همراه ۱۵ درصد خرده لاستیک در محیط‌های خورنده و اسیدی بررسی شد که نتایج حاصل از آن به شرح ذیل می‌باشد:

- [5] E. Ganjian, M. Khorami, A.A. Maghsoudi, Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Construction and building materials*, 23(5) (2009) 1828-1836.
- [6] A.R. Khaloo, M. Dehestani, P. Rahmatabadi, Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles, *Waste Management*, 28(12) (2008) 2472-2482.
- [7] P. Sukontasukkul, C. Chaikaew, Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber, *Construction and Building Materials*, 20(7) (2006) 450-457.
- [8] E. Rahmani, M. Dehestani, M. Beygi, H. Allahyari, I. Nikbin, On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1302-1308.
- [9] M. Frigione, Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete, *Waste management*, 30(6) (2010) 1101-1106.
- [10] K.G. Babu, D.S. Babu, Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates, *Cement and concrete composites*, 26(6) (2004) 605-611.
- [11] T. Ochi, S. Okubo, K. Fukui, Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber, *Cement and Concrete Composites*, 29(6) (2007) 448-455.
- [12] B.-W. Jo, G.-H. Tae, C.-H. Kim, Uniaxial creep behavior and prediction of recycled-PET polymer concrete, *Construction and Building Materials*, 21(7) (2007) 1552-1559.
- [13] ASTM C33 / C33M, ASTM C33 / C33M – 16e1 Standard Specification for Concrete Aggregates, See also URL <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C33C33M-16e1>

کمتر است.

- با افزودن خرده لاستیک و پت میزان سرعت امواج فراصوت تا ۳۰ درصد کاهش پیدا می کند و با افزایش سن غوطه وری نمونه های حاوی درصد های بالاتر پت بیشتر یکپارچگی خود را حفظ کرده و فرسایش کمتری پیدا می کنند.
- در مجموع به عنوان نتیجه گیری نهایی می توان گفت که بتن حاوی خرده لاستیک همراه با مقادیر بالاتر جایگزینی پت، مقاومت یکسانی را بعد از در معرض قرار گیری در محیط اسیدی از خود نشان داد و حدود ۵ درصد وزن کمتری را از دست می دهد و بیشتر یکپارچگی خود را حفظ می کند که خود می تواند در تولید محصولاتی با انتظار چنین عملکردهایی مفید واقع شود. همچنین با توجه به خصوصیات مطلوبی مانند عایق بودن صدا و حفظ محیط زیست می توان در جهت هم افزایی و ایجاد توسعه پایدار، تولید، اشتغال زایی و اقتصادی زاینده گامی موثر برداشته شود.

مراجع

- [1] N. Oikonomou, S. Mavridou, The use of waste tyre rubber in civil engineering works, in: *Sustainability of construction materials*, Elsevier, 2009, pp. 213-238.
- [2] A. Gore, *Our choice: A plan to solve the climate crisis*, Rodale Books, 2009.
- [3] E. Güneysisi, Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash, *Materials and structures*, 43(8) (2010) 1037-1048.
- [4] R.K. Vieira, R.C. Soares, S.C. Pinheiro, O.A. Paiva, J.O. Eleutério, R.P. Vasconcelos, Completely random experimental design with mixture and process variables for optimization of rubberized concrete, *Construction and Building Materials*, 24(9) (2010) 1754-1760.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

A. Shahini, M. Yaghobi Sarsakhti, H. Janfeshan Araghi, Sulfuric Acid Effect on the Mechanical Properties of Concrete Containing Crumb Tires and PET, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018) 111-120.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11573.5036

