

The effect of sulfuric acid on the strength and durability of concrete containing waste tire crumbs

Seyed Abbas Hosseini^{1*}, Mansour Bagheri²

1- Assistant Professor, Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

ABSTRACT

The acidic and corrosive environments have necessitated the need for more research on the new concrete that uses cement or aggregates substitutes in their mixing design. The use of waste tires in concrete as part of concrete aggregates has been evaluated and researched in recent years. In this paper, the strength and permeability of concrete containing crumbed tires exposed to sulfuric acid were investigated. For this purpose, 5, 10, and 15% of the sand of the concrete mixing design were replaced with the crumbed tire. After making the concrete, the samples were cured in standard conditions for up to 7 days and then placed in water containing 5% sulfuric acid to continue the curing. The compression strength and water penetration depth tests were performed on the samples at 28 and 90 days. Although the compressive strength of the samples has decreased with increasing the percentage of crumbed-tire, the percentage of crumbed-tire has not had much effect on the amount of difference due to changing curing conditions. The permeability of the concrete increased with increasing the percentage of crumbed-tire and also the samples stored in sulfuric acid showed more permeability. Permeability increased by 13% by changing the curing environment to sulfuric acid.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 October 2021

Revise Date: 06 December 2021

Accept Date: 22 December 2021

Keywords:

Concrete

Crumbed tire

Sulfuric Acid

Curing

Permeability

Compressive strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.298577.2605>

*Corresponding author: Seyed Abbas Hosseini.

Email address: a.hosseini@yu.ac.ir

اثر اسید سولفوریک بر مقاومت و دوام بتن حاوی خرده تابر ضایعاتی

سید عباس حسینی^{۱*}، منصور باقری^۲

۱- استادیار، دانشگاه یاسوج، دانشکده صنعت و معدن، چرام، ایران

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی بیرجند، گروه مهندسی عمران، بیرجند، ایران

چکیده

وجود محیط‌های اسیدی و خورنده، لزوم افزایش تحقیقات درباره بتن‌های جدید که در طرح اختلاط آنها از مواد جایگزین سیمان و یا سنگدانه استفاده شده است را اجتناب ناپذیر کرده است. استفاده از تابرهای فرسوده در بتن به عنوان بخشی از سنگدانه بتن در سالیان گذشته مورد ارزیابی و تحقیقات گوناگونی قرار گرفته است. در این مقاله، مقاومت و نفوذپذیری بتن حاوی خرده تابر که در معرض اسید سولفوریک قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفته است؛ بدین منظور ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از ماسه طرح اختلاط با خرده تابر به صورت حجمی جایگزین گردید و بعد از ساخت بتن، نمونه‌ها تا ۷ روز در شرایط استاندارد عمل‌آوری شده و سپس در آب حاوی اسید سولفوریک ۵ درصد برای ادامه‌ی عمل‌آوری قرار داده می‌شوند. بر روی نمونه‌ها در سن ۲۸ و ۹۰ روز، آزمایشات مقاومت فشاری و عمق نفوذ آب تحت فشار انجام گرفته است. نتایج مقاومت فشاری نشان می‌دهد که به صورت کلی، مقاومت فشاری در محیط اسیدی کاهش یافته است؛ به طوریکه مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در محیط اسید سولفوریک در سن ۲۸ روز، ۲۷ درصد و در سن ۹۰ روز، ۴۵ درصد کمتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در محیط استاندارد بوده‌اند. هر چند با افزایش درصد خرده تابر مقاومت فشاری نمونه‌ها در همه سنین کاهش یافته است ولی درصد خرده تابر تاثیر چندانی در مقدار اختلاف ناشی از تغییر شرایط عمل‌آوری نداشته است. نفوذپذیری نمونه‌ها با افزایش درصد خرده تابر افزایش یافته است و همچنین نمونه‌های نگهداری شده در اسید سولفوریک نفوذپذیری بیشتری را نشان داده‌اند. نفوذپذیری با تغییر محیط عمل‌آوری به اسید سولفوریک تا ۱۳ درصد افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: بتن، خرده تابر، اسید سولفوریک، عمل‌آوری، نفوذ پذیری، مقاومت فشاری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2021.298577.2605	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.298577.2605	۱۴۰۱/۰۷/۳۱	۱۴۰۰/۱۰/۰۱	۱۴۰۰/۱۰/۰۱	۱۴۰۰/۰۹/۱۵	۱۴۰۰/۰۷/۳۰
			سید عباس حسینی		*نویسنده مسئول:	
			a.hosseini@yu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

استفاده از بتن به عنوان دومین ماده پر مصرف جهان دارای مخاطراتی برای محیط زیست بوده است. مصرف بی رویه منابع طبیعی برای تولید مواد اولیه بتن و از طرف دیگر افزایش آلودگی‌های زیست محیطی از قبیل افزایش تولید گاز دی اکسید کربن از مهمترین این مخاطرات بوده است. استفاده از مواد جایگزین سیمان و یا سنگدانه در بتن به صورتیکه موجب اثرات زیانبار کمتری بر محیط زیست باشد و در ضمن موجب بهبود برخی خواص بتن گردد در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. در این بین، مخصوصاً استفاده مجدد از مواد بازیافتی مانند تیرهای فرسوده، که در صورت عدم استفاده موجب افزایش آلودگی‌های زیست محیطی می‌شوند مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. برآوردها نشان می‌دهد که سالانه ۱۰۰۰ میلیون حلقه لاستیک مستهلک می‌شود و نبود یک شیوه مناسب فنی و زیست محیطی برای انهدام و یا بازیافت این لاستیک‌ها موجب انباشت و یا رهاسازی این تیرها در طبیعت می‌گردد [۱].

واکنش‌های شیمیایی مضر به عنوان یکی از مهمترین عوامل زوال تدریجی و کاهش عملکرد سازه‌های بتنی شناخته می‌شوند. مهمترین عواملی که موجب واکنش‌های شیمیایی مخرب در بتن می‌شوند شامل کربناسیون، نفوذ یون کلر، واکنش قلیایی، حمله اسیدها و سولفات‌ها شدن می‌باشد [۱]. باران‌های اسیدی، محیط‌های صنعتی و برخی آب‌های زیرزمینی و همچنین سیستم‌های تصفیه فاضلاب، شرایط و موقعیت‌هایی هستند که موجب قرار گرفتن سازه بتنی در معرض اسید سولفوریک می‌شوند [۲، ۳]. مجموع واکنش‌های فیزیکی و البته عمدتاً شیمیایی بین اسید سولفوریک و محصولات ناشی از هیدراسیون سیمان در بتن موجب به مخاطره افتادن دوام سازه‌های بتنی می‌گردد [۴]. از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر شدت تخریب اسید سولفوریک و نوع مکانیزم اثر آن بر بتن، می‌توان به نوع و ترکیبات سیمان، مقدار درشت دانه، pH محیط بتن و نسبت آب به سیمان اشاره کرد [۵، ۶]. برآوردها نشان می‌دهد در برخی کشورها هزینه تعمیر سیستم‌های انتقال فاضلاب که به واسطه‌ی اسید سولفوریک دچار آسیب شده‌اند، بیشتر از هزینه ساخت سیستم‌های جدید می‌باشد که لزوم بررسی این اثر بر سازه‌های بتنی را بیش از پیش ضروری می‌کند [۷].

تولید سیمان و استخراج سنگدانه‌های بتن از طبیعت موجب ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و همچنین هدر رفت بسیاری از منابع طبیعی می‌شود. استفاده از مواد جایگزین سیمان و یا سنگدانه به صورتیکه موجب اثرات زیانبار کمتری بر محیط زیست باشد و در ضمن؛ موجب بهبود برخی خواص بتن گردد؛ در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است [۸]. در این بین، استفاده مجدد از مواد بازیافتی مانند تیرهای فرسوده، که در صورت عدم استفاده موجب افزایش آلودگی‌های زیست محیطی می‌شوند نیز به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه بتن مورد اقبال قرار گرفته است [۹]. خرده تیرها معمولاً بعد از جدا سازی سیم‌های فلزی و الیاف‌های درون تیر به وسیله‌ی دستگاه خرد کن، به اندازه‌های مختلفی در ابعاد شن و ماسه تبدیل می‌شوند. خرده تیرها اگرچه همانند سنگدانه‌ها از صلبیت مناسبی برخوردار نیستند ولی جایگزینی بخشی از سنگدانه با خرده تیر می‌تواند در برخی انواع بتن‌ها مثل بتن‌های استفاده شده در روسازی‌ها مورد توجه قرار گیرد. بررسی خواص بتن‌های حاوی درصد‌های مختلف خرده تیر در طی دهه گذشته مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. مارکوس و همکاران گزارش کرده‌اند که خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری با جایگزینی ۱۲ درصد از ریزدانه با خرده تیر در تمام سنین کاهش می‌یابد [۱۰]. طیب و همکاران شکل‌پذیری بتن با جایگزینی تا ۲۰ درصد خرده تیر را در برابر بارهای ضربه‌ای گزارش کرده‌اند [۱۱]. هولمز و همکاران با جایگزینی ۷ درصد سنگدانه با خرده تیر، افزایش در مقاومت خمشی به دلیل رفتار شکل پذیر این نوع بتن را گزارش کردند [۱۲]. فام و همکاران جایگزینی تا ۱۵ درصد سنگدانه با خرده تیر را تقریباً فاقد اثر کاهنده بر مقاومت فشاری گزارش کرده‌اند؛ درحالیکه در جایگزینی ۳۰ درصد، کاهش ۴۰ درصدی در حداکثر باربری نمونه‌های بتنی ایجاد شده است [۱۳]. در مجموع، در اکثر تحقیقات انجام شده جایگزینی تا ۱۵ درصد سنگدانه با خرده تیر دارای اثرات کاهشی ناچیز گزارش شده است [۱۴، ۱۵].

علاوه بر خواص مکانیکی، خواص مرتبط با دوام بتن حاوی خرده تیر تحت اثر عوامل محیطی مختلف نیز مورد بررسی برخی از محققین قرار گرفته است [۱۶، ۱۷]. گانسان و همکاران به بررسی اثر آب دریا و همچنین محلول اسید سولفوریک بر نمونه‌های حاوی ۱۵

درصد خرده تایر پرداختند و بر اساس نتایج بدست آمده کاهش بیشتر وزن نمونه‌های حاوی خرده تایر نسبت به نمونه شاهد را گزارش کردند [۱۸]. شاهی و همکاران با جایگزینی درصد‌های مختلف سنگدانه با خرده لاستیک بدست آمده از بطری‌های پت و نگهداری نمونه‌ها در محیط‌های اسیدی رفتار مناسب نمونه‌های حاوی خرده لاستیک را گزارش کردند [۱۹]. ازودو و همکاران اثر نامطلوب در شرایط محیطی اسیدی برای بتن‌های با درصد جایگزینی متفاوت سنگدانه با خرده تایر را گزارش کرده‌اند ولی ثابت ماندن خواص نفوذپذیری در برابر آب تا جایگزینی ۱۵ درصد را نیز نتیجه گرفته‌اند [۲۰]. در رابطه با میزان نفوذ پذیری بتن حاوی خرده تایر نیز تحقیقات زیادی انجام شده است که نتایج از پراکندگی زیادی برخوردار است. پدرو و همکاران تقریباً ۹ درصد کاهش در میزان جذب آب برای ملات‌های بتنی حاوی ۵ درصد خرده تایر را گزارش کرده‌اند [۲۱]. گسگلو و همکاران ۴۴ درصد کاهش نفوذپذیری بتن حاوی ۱۰ درصد خرده تایر را بیان کرده است [۲۲]. هلال ۱۰ درصد افزایش جذب آب برای بتن‌های حاوی ۲۰ درصد خرده تایر را گزارش کرده است [۲۳]. بنابراین با توجه به پراکندگی نتایج ارائه شده در رابطه با نفوذپذیری بررسی این موضوع از اهمیت زیادی برخوردار است.

نانوسیلیس در دسته مواد پوزولانی قرار دارد که اضافه کردن آن به بتن می‌تواند موجب بهبود خواص نفوذپذیری و همچنین مقاومت بتن گردد [۲۱ و ۲۰]. پوزولان‌ها معمولاً به دلیل واکنش‌های تاخیری که دارند بعد از گذشت مدت زمانی اثرات خود در بهبود مشخصات بتن را نشان می‌دهند؛ ولی به دلیل شدت زیاد واکنش‌های پوزولانی نانو سیلیس، بتن حاوی نانو سیلیس در روزهای ابتدایی و حین عمل‌آوری نیز دارای مقاومت و دوام بهتری نسبت به بتن معمولی می‌باشد [۲۲].

مقصودی و همکاران تاثیر مثبت اضافه کردن نانو سیلیس در برابر خوردگی ناشی از سولفاته شدن بتن را گزارش کرده‌اند [۲۳]. کومار و همکاران با جایگزینی ۲/۵ درصد از سیمان با نانو سیلیس و قراردادن نمونه‌های بتنی در محلول‌های حاوی ۵ درصد اسید سولفوریک و ۵ درصد هیدروکلریک گزارش دادند که بتن حاوی نانو سیلیس در طی ۲۸ روز قرار گیری در معرض شرایط اسیدی، کمتر دچار خوردگی می‌گردد [۲۴].

با توجه به کمبود اطلاعات درباره اثرات محیط‌های اسیدی بر خواص بتن حاوی خرده تایر و تمایل به شناخت بیشتر این نوع بتن جهت استفاده عملی در صنایع راه و ساختمان و همچنین نبود ضوابط آیین‌نامه‌ای برای این نوع بتن، در این پژوهش به بررسی اثر قرارگیری بتن حاوی خرده تایر در شرایط اسید سولفوریک با غلظت مرسوم در محیط‌های پرمخاطره پرداخته شده است. با توجه به اینکه بر اساس تحقیقات قبلی جایگزینی تا ۱۵ درصد از سنگدانه بتن با خرده تایر تقریباً دارای اثرات زیانباری بر خواص مکانیکی و دوام بتن نبوده است در این تحقیق حداکثر درصد جایگزینی به این مقدار محدود شده است. به دلیل اینکه بر اساس نتایج سایر تحقیقات، جایگزینی درشت دانه با خرده تایر موجب کاهش بیشتری در مقاومت فشاری بتن می‌گردد؛ بنابراین صرفاً اقدام به جایگزینی ریزدانه بتن با خرده تایر شد تا اثرات کاهش این جایگزینی موجب افت شدید مقاومت فشاری بتن قبل از اینکه در معرض اسید قرار بگیرد نشود.

۲- مواد و مصالح

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل سنگدانه‌ها، سیمان، خرده تایر و آب است. سیمان استفاده شده، سیمان تیپ II کارخانه سیمان فارس است که نتایج آزمایش XRF آن در جدول ۱ آورده شده است. سنگدانه‌ها از معادن غرب شیراز تهیه شده که دانه‌بندی آن بعد از اصلاح بر اساس استاندارد ASTM C33 در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۴]. شن مصرفی از خرد کردن سنگ آهک دولومیتی به دست آمده است که دارای وزن مخصوص ظاهری اشباع ۲/۶۵ و درصد جذب آب ۲/۳۳ درصد می‌باشد. وزن مخصوص ظاهری اشباع ماسه استفاده شده ۲/۷۶ و درصد جذب آب آن ۲/۸۱ درصد می‌باشد. مدول نرمی ماسه طبق استاندارد ASTM C125 برابر با ۲/۹ بدست آمده است [۲۵].

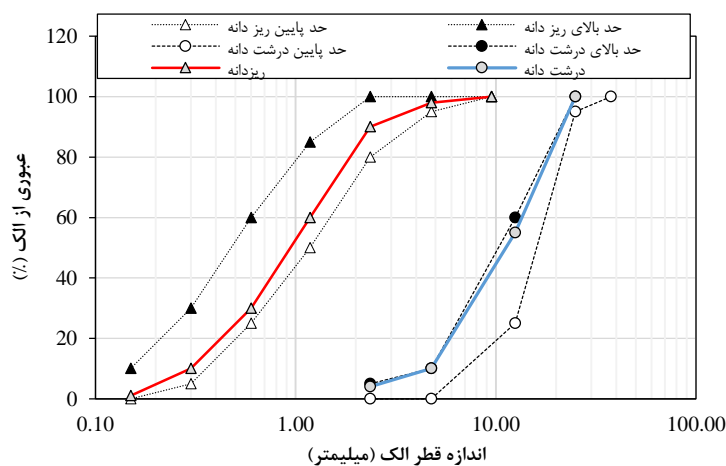
جدول ۱: ترکیبات شیمیایی سیمان

ترکیبات شیمیایی (%)							
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
۶۳/۲	۲۲/۶	۴/۱	۳/۵	۱/۵	۲/۶	۰/۲	۰/۵

خرده تایر از پودر کردن تایرهای مستهلک بدست آمده و دانه بندی آن در محدوده اندازه ماسه (با قطر بیشینه ۵ میلیمتر) قرار دارد؛ بنابراین در این تحقیق خرده تایر با دانه هایی که در محدوده اندازه ماسه هستند جایگزین شده است. آب مصرفی برای طرح اختلاط و برای عمل آوری نمونه های شاهد، آب شرب شهری و برای رقیق کردن اسید از آب مقطر استفاده گردید. خواص شیمیایی و فیزیکی آب طرح اختلاط در جدول ۲ نشان داده شده است. خواص آب مورد استفاده منطبق بر استاندارد ASTM C1602 می باشد [۲۶]. اسید سولفوریک با نماد شیمیایی H₂SO₄ با غلظت ۹۸ درصد مورد استفاده قرار گرفت که بر اساس حجم آب مورد استفاده برای نگهداری نمونه ها به غلظت مورد نظر یعنی ۵ درصد رسانده شد. استاندارد ASTM C1898 استفاده از غلظت ۲ درصد محلول اسید سولفوریک را برای بررسی اثر این اسید بر بتن توصیه رده است که در این تحقیق برای انجام آزمایش تسریع شده بر مبنای مطالعات قبلی غلظت ۵ درصد مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲: خواص آب طرح اختلاط و عمل آوری نمونه شاهد

ترکیبات شیمیایی (mg/L)						خواص فیزیکی		
SO ₄	Cl	TDS	CaCO ₃	NO ₃	Na	K ₂ O	چگالی (kg/m ³)	pH
۱۴۵	۶۲	۶۳۰	۴۱۵	۲۱	۱۹	۰/۵	۱۰۰۰	۷/۴



شکل ۱: دانه بندی سنگدانه.

۳- طرح اختلاط و آماده سازی نمونه ها

طرح اختلاطها بر اساس استاندارد ACI و نسبت آب به ترکیب سیمانی (w/b) برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است [۲۷]. در این تحقیق خرده تایر به نسبت ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به صورت حجمی جایگزین سنگدانه شد. نحوه نامگذاری و مقدار ترکیبات مختلف تشکیل دهنده نمونه ها در جدول ۳ نشان داده شده است. خرده تایرها قبل از استفاده کاملاً شسته می شوند تا از هر گونه مواد شیمیایی و ذرات ریز پاک گردند و در نهایت pH آب شستشو با آب مصرفی یکسان گردد.

برای هر طرح اختلاط، ۱۸ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتیمتر ساخته شد. به منظور حفظ کارایی بتن، مقدار اسلامپ آن با اضافه کردن فوق روان کننده با پایه کربوکسیلات در محدوده ۱۰ سانتیمتر نگه داشته شده است. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق زیر پوشش پلاستیک جهت حفظ رطوبت نگهداری شده و بعد از خارج کردن از قالب‌ها به مدت ۷ روز به صورت مستغرق در شرایط طبیعی عمل‌آوری گردیدند و بعد از این زمان، ۹ عدد از هر طرح اختلاط در محلول با غلظت ۵ درصد اسید سولفوریک قرار داده شد و بقیه همچنان در شرایط استاندارد عمل‌آوری شدند. در شکل ۲، ظروف پلاستیکی بزرگ که برای عمل‌آوری در شرایط اسیدی مورد استفاده قرار گرفته است، نشان داده شده است. دمای محلول‌ها و همچنین محیط عمل‌آوری طبق استاندارد ASTM C192 در محدوده ۲۳ درجه سانتیگراد حفظ گردید [۲۸]. نمونه‌ها بعد از ۲۸ و ۹۰ روز (از زمان ساخت) نگهداری در این شرایط، تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذ آب تحت فشار قرار گرفتند. آزمایشات در آزمایشگاه شرکت ساوانا بتن شیراز انجام گرفته است.

جدول ۳: نامگذاری و طرح اختلاط نمونه‌ها

نام طرح اختلاط	سیمان (kg/m^3)	خرده تایلر (kg/m^3)	فوق روان کننده (درصد سیمان)	خرده تایلر (درصد حجم ماسه)	سنگدانه (kg/m^3)
					شن ماسه
T0	۴۰۰	۰	۰/۵	۰	۱۳۳۷
T5	۴۰۰	۱۵	۰/۷	۵	۱۳۳۷
T10	۴۰۰	۴۰	۰/۸	۱۰	۱۳۳۷
T15	۴۰۰	۶۶	۱/۱	۱۵	۱۳۳۷



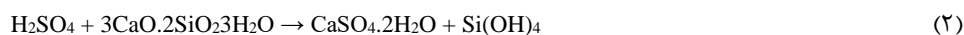
شکل ۲: نگهداری نمونه‌ها در مخازن پلاستیکی حاوی اسید سولفوریک.

۴- نتایج و بحث

نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه از محیط نگهداری خارج گردیدند و بعد از تمیز کردن سطح از مواد خورده شده، مورد ارزیابی قرار گرفتند. در شکل ۳ وضعیت ظاهری نمونه حاوی ۱۰ درصد خرده تایلر نگهداری شده در محلول اسید سولفوریک نشان داده شده است. سطح سفید رنگ این نمونه‌ها به دلیل تشکیل اترینگیت‌های مختلف می‌باشد. تشکیل این مواد موجب تخریب بتن و اثرگذاری بر خواص بتن می‌گردد که در ادامه، نتایج آزمایشات وزن و مقاومت فشاری ارائه شده است.

در جدول ۴ مقادیر وزن نمونه‌ها برای شرایط عمل‌آوری استاندارد و محیط اسیدی نشان داده شده و همچنین در شکل‌های ۴ و ۵ نسبت وزن هر نمونه (M_i) نسبت به وزن نمونه‌ی شاهد (فاقد خرده تایلر و عمل‌آوری شده در آب) ارائه شده است. همانطور که مشخص است برای شرایط عمل‌آوری استاندارد، در سن ۲۸ روز، جایگزینی ۱۵ درصد ریزدانه با خرده تایلر موجب کاهش ۱۰ درصدی در وزن نمونه‌ها شده است که این مقدار با افزایش سن نمونه‌ها به ۹۰ روز تقریباً تغییری نداشته است. برای ۱۰ درصد جایگزینی ماسه با خرده تایلر، این مقدار کاهش در وزن نمونه‌ها، تقریباً ۶ درصد بوده است. در جدول ۵ درصد کاهش وزن تنها با در نظر گرفتن خوردگی ناشی از اثر اسید سولفوریک نشان داده شده است. در شرایط قرارگیری در برابر اسید سولفوریک، مشاهده می‌شود که وزن نمونه‌ی فاقد خرده تایلر نگهداری شده در محلول اسید در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۱۱ و ۲۲ درصد نسبت به شرایط استاندارد کاهش یافته است. برای نمونه‌ی حاوی ۱۵ درصد خرده تایلر، در این سنین مقدار کاهش وزن نسبت به نمونه‌ی شاهد برابر با ۱۶ و ۳۴ درصد بوده است که این مقدار کاهش بیانگر هم اثر جایگزینی ماسه با خرده تایلر و هم بیانگر اثر اسید می‌باشد. مقایسه تفاوت وزن نمونه‌ی T15 با شرایط استاندارد به منظور در نظر گرفتن اثر اسید به تنهایی، کاهش ۵ و ۲۴ درصدی در وزن را نشان می‌دهد که بیانگر کمتر بودن کاهش وزن در سن ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های فاقد خرده تایلر می‌باشد.

کاهش وزن نمونه‌های عمل‌آوری شده در محیط اسید سولفوریک به دلیل تشکیل اترینگیت‌های مختلف می‌باشد که هم ناشی از واکنش هیدرواکسید کلسیم (CH) و هم واکنش هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) به عنوان مهمترین محصولات ناشی از هیدراسیون سیمان با اسید سولفوریک می‌باشد. واکنش‌های مربوط به این فرآیند شیمیایی در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده است [۲۹].



در واکنش‌های نشان داده شده در روابط (۱) و (۲) تشکیل گچ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) کاملاً مشهود است.



(ب)

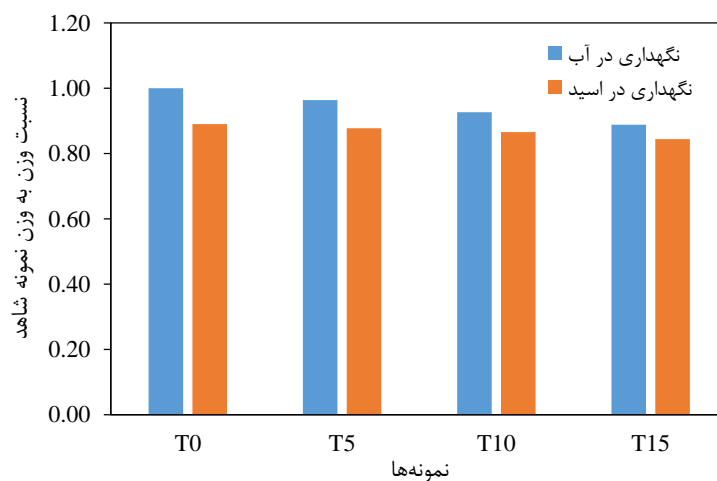


(الف)

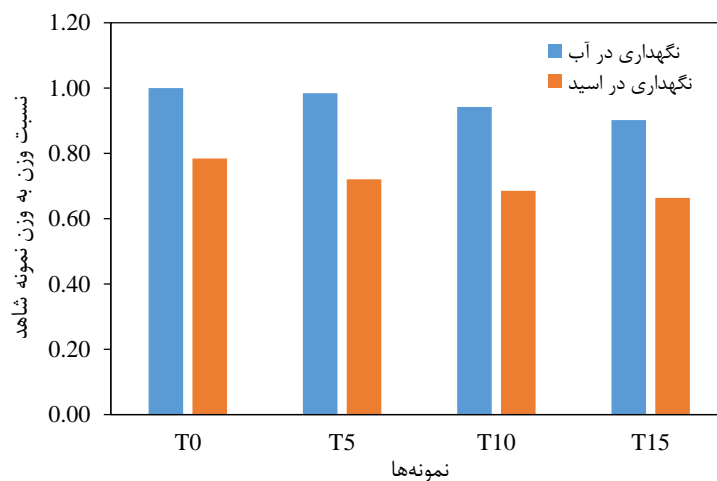
شکل ۳: وضعیت ظاهری نمونه حاوی ۱۰ درصد خرده تایلر نگهداری شده در اسید (الف) ۲۸ روز (ب) ۹۰ روز.

جدول ۴: وزن نمونه‌ها (گرم)

ردیف	طرح اختلاط	روزه ۲۸		روزه ۹۰	
		عمل آوری در آب	عمل آوری در اسید	عمل آوری در آب	عمل آوری در اسید
۱	T0	۸۲۸۰	۷۳۷۲	۸۳۱۸	۶۵۲۱
۲	T5	۷۹۸۱	۷۲۶۵	۸۱۸۶	۵۹۹۱
۳	T10	۷۶۸۰	۷۱۶۸	۷۸۳۸	۵۷۰۰
۴	T15	۷۳۶۰	۶۹۹۱	۷۵۰۱	۵۵۲۰



شکل ۴: اثر درصد خرده تایر و شرایط عمل آوری بر وزن نمونه‌ها در سن ۲۸ روز.



شکل ۵: اثر درصد خرده تایر و شرایط عمل آوری بر وزن نمونه‌ها در سن ۹۰ روز.

جدول ۵: درصد کاهش وزن صرفاً ناشی از اثر اسید سولفوریک

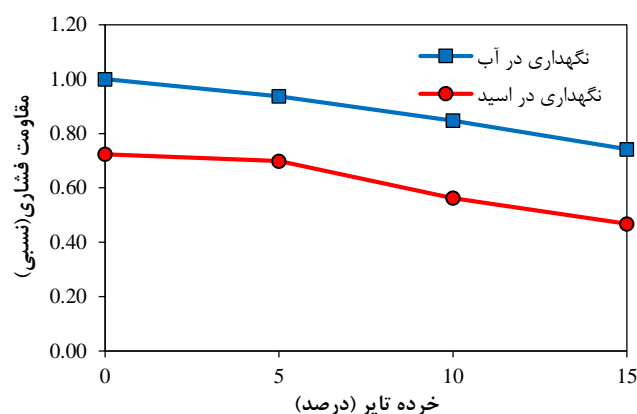
ردیف	طرح اختلاط	مدت زمان	
		۲۸ روز	۹۰ روز
۱	T0	۱۱	۲۲
۲	T5	۸	۲۶
۳	T10	۶	۲۵
۴	T15	۵	۲۴

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. نسبت مقاومت فشاری به نمونه شاهد نیز در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. همانطور که از نتایج مشخص است، در سن ۲۸ روز، برای شرایط عمل‌آوری استاندارد، مقاومت نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده تاپر نسبت به نمونه شاهد به ترتیب برابر با ۰/۹۴، ۰/۸۵ و ۰/۷۴ می‌باشد. بر اساس شکل ۸ این مقادیر در سن ۹۰ روزه به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۸۳ و ۰/۷۲ می‌باشد که اثر افزایش سن نمونه‌ها در نسبت مقاومت‌ها بسیار ناچیز بوده است. در شرایط عمل‌آوری در محیط اسید سولفوریک برای نمونه‌ی فاقد خرده تاپر در سن ۲۸ روز مقدار نسبت مقاومت به ۰/۷۲ رسیده است که تقریباً ۳۰ درصد کاهش مقاومت را نشان می‌دهد. شایان توجه است که برای محاسبه مقاومت از سطح مقطع کاهش یافته به دلیل خوردگی استفاده شده است. در سن ۹۰ روز، نسبت مقاومت نمونه فاقد خرده تاپر که در محیط اسیدی قرار گرفته بود نسبت به نمونه عمل‌آوری شده در محیط استاندارد برابر با ۰/۵۵ بدست آمده است.

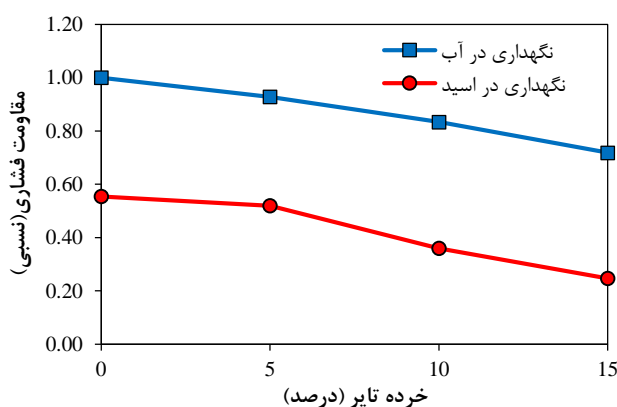
برای نمونه‌های حاوی خرده تاپر مشاهده می‌شود که عمل‌آوری در محیط اسیدی همانند نمونه شاهد باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. برای همه نمونه‌های حاوی خرده تاپر با هر درصدی، در سن ۲۸ روز مقاومت‌ها تقریباً ۲۷ درصد نسبت به شرایط استاندارد کاهش یافته است و برای سن ۹۰ روز مقدار این کاهش نیز شبیه نمونه‌ی بدون خرده تاپر بوده است و تقریباً برابر با ۴۷ درصد بدست آمده است.

جدول ۶: مقاومت فشاری نمونه‌ها (مگا پاسکال)

ردیف	طرح اختلاط	روزه ۲۸		روزه ۹۰	
		عمل‌آوری در آب	عمل‌آوری در اسید	عمل‌آوری در آب	عمل‌آوری در اسید
۱	T0	۳۱۱/۵	۲۲۵/۵	۳۳۳/۲	۱۸۴/۷
۲	T5	۲۹۱/۸	۲۱۷/۶	۳۰۹/۲	۱۷۳/۰
۳	T10	۲۶۴/۰	۱۷۵/۲	۲۷۷/۷	۱۱۹/۹
۴	T15	۲۳۱/۶	۱۴۵/۸	۲۳۹/۴	۸۲/۳



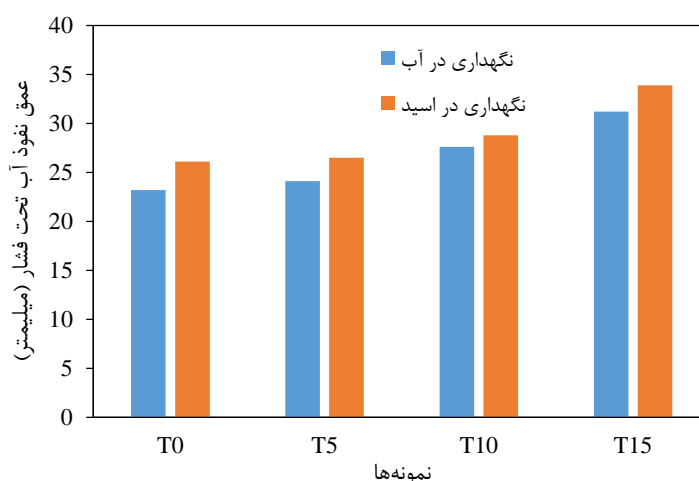
شکل ۷: اثر درصد خرده تایلر و شرایط عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روز.



شکل ۸: اثر درصد خرده تایلر و شرایط عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۹۰ روز.

مقدار نفوذ آب به درون نمونه‌ها تحت فشار در سن ۲۸ روز در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج بدست آمده مشخص است برای نمونه‌های نگهداری شده در شرایط استاندارد، با افزایش درصد خرده تایلر، نفوذپذیری بتن افزایش یافته است به طوری که عمق نفوذ آب از ۲۳/۲ برای نمونه شاهد به ۲۴/۱، ۲۷/۶ و ۳۱/۲ میلیمتر به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده تایلر افزایش یافته است که همگی تاثیر نامناسب خرده تایلر در جهت افزایش نفوذپذیری را نشان می‌دهد. افزایش جذب آب به دلیل زیادتیر بودن تخلخل بتن حاوی خرده تایلر می‌باشد که این امر مخصوصاً در زمان ساخت بتن به دلیل غیر قطبی بودن ذرات پلاستیک و محبوس شدن ذرات هوا تشدید می‌شود.

با تغییر شرایط عمل‌آوری مشاهده می‌شود که اثر اسید سولفوریک بر نمونه‌ها موجب افزایش جزئی نفوذپذیری نسبت به شرایط نرمال شده است به طوری که برای این سه نمونه مقدار عمق نفوذ آب تحت فشار به ترتیب ۲۶/۵، ۲۸/۸ و ۳۳/۹ میلیمتر بدست آمده است. اثرات محیط سولفاته بر بتن هم به صورت شیمیایی (واکنش با مواد حاصل از هیدراسیون) و هم به صورت فیزیکی است (کریستاله شدن سولفات درون حفرات) که در روش موجب ایجاد خسارت در بتن می‌شود [۳۰].



شکل ۹: اثر درصد خرده تایر و شرایط عمل‌آوری بر نفوذپذیری نمونه‌ها در سن ۲۸ روز.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر قرارگیری بتن حاوی خرده تایر در معرض شرایط اسیدی (اسید سولفوریک) بر وزن، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن مورد ارزیابی قرار گرفت و به صورت کلی نتایج زیر حاصل گردید:

۱- قرارگیری در محیط اسید سولفوریک برای نمونه فاقد خرده تایر تا ۲۲ درصد موجب کاهش وزن نمونه‌ها گردیده است و افزایش خرده تایر تا ۱۵ درصد نیز دارای این مقدار کاهش در وزن بوده است. مقدار کاهش وزن ناشی از خوردگی برای نمونه‌های حاوی خرده تایر در سن ۲۸ روزه کمتر از نمونه فاقد خرده تایر بوده است.

۲- مقدار کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز برای نمونه‌های حاوی خرده تایر عمل‌آوری شده در محیط اسید نسبت به عمل‌آوری در شرایط استاندارد برابر با ۲۷ درصد بوده است. مقدار این کاهش برای سن ۹۰ روز برابر با ۴۵ درصد بدست آمده است. این درصدهای کاهش تقریباً برابر با درصد کاهش نمونه شاهد بوده است؛ ازاینرو درصد کاهش مقاومت به دلیل تغییر شرایط عمل‌آوری برای نمونه‌های حاوی تا ۱۵ درصد خرده تایر و نمونه شاهد یکسان می‌باشد.

۳- نمونه‌های حاوی خرده تایر دارای نفوذپذیری بیشتری نسبت به بتن معمولی هستند و با افزایش درصد خرده تایر این نفوذپذیری افزایش می‌یابد به طوری که نفوذپذیری نمونه‌ی حاوی ۱۵ درصد خرده تایر تا ۳۵ درصد بیشتر از نمونه‌ی فاقد خرده تایر می‌باشد. افزایش نفوذپذیری در نمونه‌های تا ۵ درصد خرده تایر قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

۴- عمل‌آوری و قرارگیری در معرض اسید سولفوریک موجب افزایش نفوذپذیری بتن می‌گردد به طوری که نفوذپذیری بتن بدون خرده تایر با تغییر محیط عمل‌آوری به اسید سولفوریک تا ۱۳ درصد افزایش یافته است. نمونه‌های حاوی خرده تایر که در محیط اسید سولفوریک نگهداری می‌شوند نیز تقریباً این مقدار کاهش را داشته‌اند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همکاری شرکت ساوانا بتن شیراز جهت فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی لازم برای انجام این تحقیق کمال تشکر و سپاسگزاری را دارند. همچنین از زحمات مهندس سید علی حسین موسوی‌نژاد که بخشی از آزمایشات با همت و همکاری ایشان انجام پذیرفته است کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] Huo, R., Li, S., & Ding, Y. (2018). Experimental study on physicochemical and mechanical properties of mortar subjected to acid corrosion. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- [2] Lavigne, M. P., Bertron, A., Botanch, C., Auer, L., Hernandez-Raquet, G., Cockx, A., Paul, E. (2016). Innovative approach to simulating the bio deterioration of industrial cementitious products in sewer environment. Part II: Validation on CAC and BFSC linings. *Cement and Concrete Research*, 79, 409-418.
- [3] Huber, B., Hilbig, H., Mago, M. M., Drewes, J. E., & Müller, E. (2016). Comparative analysis of biogenic and chemical sulfuric acid attack on hardened cement paste using laser ablation-ICP-MS. *Cement and Concrete Research*, 87, 14-21.
- [4] Mehta, P. K. (1991). Durability of concrete--fifty years of progress. *Special Publication*, 126, 1-32.
- [5] Yang, Y., Ji, T., Lin, X., Chen, C., & Yang, Z. (2018). Biogenic sulfuric acid corrosion resistance of new artificial reef concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 33-41.
- [6] Grandclerc, A., Dangla, P., Gueguen-Minerbe, M., & Chaussadent, T. (2018). Modelling of the sulfuric acid attack on different types of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 105, 126-133.
- [7] O'Connell, M., McNally, C., & Richardson, M. G. (2012). Performance of concrete incorporating GGBS in aggressive wastewater environments. *Construction and building materials*, 27(1), 368-374.
- [8] Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., ... & Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction—A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105745.
- [9] Amiandamhen, S. O., Adamopoulos, S., Adl-Zarrabi, B., Yin, H., & Norén, J. (2021). Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, 297, 123781.
- [10] Marques, A. C., Akasaki, J. L., Trigo, A. M., & Marques, M. L. (2008). Influence of the surface treatment of tire rubber residues added in mortars. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 1, 113-120.
- [11] Al-Tayeb, M. M., Bakar, B. A., Ismail, H., & Akil, H. M. (2013). Effect of partial replacement of sand by fine crumb rubber on impact load behavior of concrete beam: experiment and nonlinear dynamic analysis. *Materials and structures*, 46(8), 1299-1307.
- [12] Holmes, N., Dunne, K., & O'Donnell, J. (2014). Longitudinal shear resistance of composite slabs containing crumb rubber in concrete toppings. *Construction and Building Materials*, 55, 365-378.
- [13] Pham, T. M., Zhang, X., Elchalakani, M., Karrech, A., Hao, H., & Ryan, A. (2018). Dynamic response of rubberized concrete columns with and without FRP confinement subjected to lateral impact. *Construction and Building Materials*, 186, 207-218.
- [14] Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2019). Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies. *Construction and Building Materials*, 204, 740-753.
- [15] Hassanli, R., Youssf, O., & Mills, J. E. (2017). Experimental investigations of reinforced rubberized concrete structural members. *Journal of Building Engineering*, 10, 149-165.
- [16] Ling, T. C. (2012). Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 28(1), 164-175.
- [17] Yung, W. H., Yung, L. C., & Hua, L. H. (2013). A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 665-672.
- [18] Ganesan, N., Raj, J. B., & Shashikala, A. P. (2013). Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 7-14.
- [19] Shahini, A., Sarsakhti, M. Y., & Araghi, H. J. (2018). Sulfuric Acid Effect on the Mechanical Properties of Concrete Containing Crumb Tires and PET. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(1), 111-120.
- [20] Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., De Aguiar, J. B., & Camões, A. F. (2012). Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes. *Construction and building materials*, 34, 186-191.
- [21] Pedro, D., De Brito, J., & Veiga, R. (2013). Mortars made with fine granulate from shredded tires. *Journal of*

- Materials in Civil Engineering*, 25(4), 519-529.
- [22] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S. (2014). Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206-213.
- [23] Hilal, A. A. (2011). Effect of crumb tyres rubber on some properties of foamed concrete. *Anbar Journal for Engineering Sciences*, 4(2), 1-17.
- [24] ASTM, (2018). *ASTM C33 / C33M, Standard specification for concrete aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [25] ASTM, (2019). *ASTM C125: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [26] ASTM, (2018). *ASTM C1602/C1602M-12: Standard specific cation for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [27] ACI, (2009). *ACI 211.1-91: Standard Practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*. American concrete Institute, Farming Hills, MI, USA.
- [28] ASTM, (2018). *ASTM, ASTM C192/C192m: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [29] Hosseini, S. A., Moosavinezhad, S. A. H., & Behshad, A. (2020). Effect of Curing in Acidic Environments on the Strength and Permeability of Concrete Containing Nano-silica and Rubber. *Asas Journal*, 21(57), 72-81.
- [30] Huang, Q., Zhu, X., Zhao, L., Zhao, M., Liu, Y., & Zeng, X. (2020). Effect of nanosilica on sulfate resistance of cement mortar under partial immersion. *Construction and Building Materials*, 231, 117180.