

## ارزیابی مقاومت بتن متخلخل ساخته شده با استفاده از خرده لاستیک ضایعات

محسن صالحی زاده \*

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، موسسه آموزش عالی هاتف زاهدان، ایران.

بابک دیزنگیان

دکتری مهندسی عمران-سازه، استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران.

### چکیده

بتن متخلخل یکی از انواع پوشش‌های مورد استفاده در روسازی‌های صلب جاده‌ها می‌باشد. تخلخل بالا و قابلیت زهکشی مناسب، کاربرد این نوع بتن را در مدیریت سیلاب‌ها و رواناب‌های مناطق شهری به‌طور موثری افزایش داده است. از سویی، سالانه در جهان مقدار زیادی لاستیک فرسوده تولید می‌شود که به دلیل سرعت بسیار کم تجزیه و آلودگی‌های ناشی از آن، امکان دفن این لاستیک‌ها در محیط زیست وجود ندارد. استفاده از این لاستیک‌های فرسوده در بتن، به عنوان یک گزینه مناسب جهت دفع این ضایعات مطرح می‌باشد. با توجه به این موارد، در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر استفاده از خرده لاستیک‌های ضایعاتی بر خواص بتن متخلخل، آزمایشاتی انجام شده و ۵ حالت جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی بتن با خرده لاستیک، شامل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد، مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی ۱۰٪ خرده لاستیک و سنگدانه در طرح اختلاط بتن متخلخل، باعث افزایش مقاومت فشاری در شرایط عادی و در محیط سولفاتی شده است. همچنین نتایج مربوط به تغییرات مقاومت کششی نشان داد که افزودن ۱۰٪ خرده لاستیک، تأثیر چندانی بر مقاومت کششی نمونه در مقایسه با طرح شاهد نداشته است. از سوی دیگر این نتیجه حاصل شد که با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک و سنگدانه در بتن متخلخل، درصد تخلخل و نفوذپذیری هر دو افزایش یافته‌اند. به عبارت دیگر با افزایش ترک‌های بین خمیر سیمان و خرده لاستیک، مسیرهای مناسبی برای نفوذ و خروج آب از درون ماتریس بتن فراهم شده است. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که افزودن خرده لاستیک ضایعاتی به جای سنگدانه‌ها در بهبود خواص بتن متخلخل مثرتر بوده است. به‌طوریکه تولید نمونه بتن متخلخل با جایگزینی خرده لاستیک به جای سنگدانه و ایجاد بتنی با همان خصوصیات طرح شاهد از نظر مقاومت فشاری و کششی و همچنین تفاوت معنادار ایجادشده در راستای افزایش تخلخل و نفوذپذیری، نشان از برتری آن دارد. از سوی دیگر با توجه به مسائل زیست محیطی ناشی از خرده لاستیک‌های ضایعاتی، بهره‌گیری از این مواد در تولید بتن متخلخل مورد نیاز در روسازی راه‌ها بسیار اتربخش خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، مقاومت فشاری، نفوذپذیری بتن، مقاومت کششی بتن، خرده لاستیک.

\* نویسنده مسئول: trainersalehizadeh@yahoo.com

## ۱- مقدمه

مقدار مورد استفاده در طرح اختلاط، می‌تواند سبب افزایش یا کاهش نفوذپذیری بتن متخلخل شوند [۲].

Zaetang و همکاران مقاومت سایشی بتن متخلخل ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتن و بلوک بتنی را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در حالت استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی حاصل از بتن به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در بتن متخلخل، در تمام نسبت‌های جای‌گزینی، مقدار مقاومت سایش سطحی بتن متخلخل افزایش می‌یابد. این درحالی است که در صورت استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی از بلوک بتنی، تنها تا نسبت جای‌گزینی ۲۰ درصد، افزایش مقاومت مشهود می‌باشد [۶]. Lian و همکاران، براساس نتایج آزمایشات انجام شده و براساس تئوری گریفیث<sup>۱</sup>، مدلی جهت تخمین رابطه بین مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل و درصد تخلخل آنها ارائه نموده و با انجام آزمایشاتی دقت رابطه پیشنهادی را به اثبات رساندند [۷].

نتایج آزمایشات Park و Tia نشان داد، در حالتی که سنگ‌دانه‌های استفاده شده در بتن متخلخل، دارای دانه‌بندی ریزتری بوده و نسبت سیمان به سنگ‌دانه بیشتر باشد، مقاومت فشاری بتن متخلخل بیشتر می‌باشد. همچنین در حالتی که از دوده سیلیس در طرح اختلاط بتن استفاده می‌گردد، مقاومت فشاری بتن متخلخل افزایش می‌یابد. علاوه بر مقاومت فشاری، بتن متخلخل با سنگ‌دانه‌های ریزتر و تخلخل بیشتر، دارای قابلیت تسویه آب بیشتری نیز می‌باشد [۸]. همچنین نتایج مطالعات مختلف انجام شده نشان داده است که بتن‌های متخلخل حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی خصوصیات مقاومتی کمتری دارند. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داده است که دلیل این مقاومت کمتر ناشی از مسیر شکست این بتن‌ها می‌باشد [۹ و ۱۰].

در زمینه استفاده از خرده لاستیک در ساخت بتن نیز مطالعات متعددی صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، نتایج حاصل از آزمایشات Al-Akhras و Smadi نشان داد که با جایگزینی ریزدانه تا ۱۰ درصد با خرده لاستیک، مقدار مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد [۱۱]. با این وجود براساس بسیاری از مطالعات انجام شده، این نتیجه حاصل شده است که استفاده از خرده لاستیک، سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد [۱۲-۱۴].

بتن متخلخل، ماده‌ای است با اسلامپ صفر، که اجازه می‌دهد آب از آن عبور کند. مواد تشکیل‌دهنده بتن متخلخل شامل سیمان پرتلند، سنگ‌دانه درشت، مقدار کم یا فاقد ریزدانه، آب و مواد افزودنی می‌باشد [۱]. امروزه اکثر رویه‌های ساخته شده برای راه‌ها در ایران از نوع آسفالتی است. از دلایل اصلی این امر می‌توان به وجود منابع غنی نفت و قیر در ایران اشاره نمود. اما با توجه به مشکلات و خرابی‌های متداول در روسازی‌های آسفالتی (همچون ناهمواری‌ها، ترک و اضمحلال زود هنگام)، استفاده از دال‌های بتنی بسیار گسترش یافته است. استفاده از این نوع دال‌ها به عنوان روسازی‌های بادوام، سبب رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات می‌گردند [۳]. یکی از معضلات جامعه بشری که سبب نگرانی‌های زیست محیطی زیادی نیز می‌باشد، وجود ضایعات لاستیکی بسیار زیاد است که با توجه به عدم تجزیه آن‌ها در طبیعت، باعث به وجود آمدن خطرات زیست محیطی زیادی هستند. سوزاندن این مواد، سبب وارد کردن مقدار زیادی گازهای سمی به اتمسفر و رها کردن آن‌ها نیز سبب آلودگی زمین و از بین رفتن خاک‌ها می‌گردد [۴]. یکی از راهکارهایی که جهت بازیافت ضایعات لاستیکی پیشنهاد شده و در چند دهه گذشته مورد استقبال زیادی قرار گرفته است، استفاده از خرده لاستیک‌های ضایعاتی در بتن به‌عنوان مصالح درشت‌دانه می‌باشد. از این رو با توجه به مزایای ذکر شده برای بتن متخلخل و همچنین معایب زیست محیطی لاستیک‌های ضایعاتی، لازم است تا استفاده از این مواد در بتن متخلخل جهت ساخت روسازی‌های بتنی مورد بررسی قرار بگردد [۵]. این موضوع در سال‌های اخیر مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته و تحقیقات متعددی در این خصوص به انجام رسیده است. به‌عنوان نمونه، Ariffin و همکاران تأثیر استفاده از پلیمر مایع و پودر پلیمر در اصلاح خصوصیات مکانیکی بتن‌های متخلخل را مورد آزمایش قرار دادند. مطابق نتایج بدست آمده، مشاهده شد که با افزودن پلیمر به بتن از مقدار تخلخل بتن کاسته شده و مقاومت فشاری و خمشی آن افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر پلیمر-های پودری در افزایش مقاومت، بیش از پلیمرهای مایع می‌باشد. با وجود تأثیر مثبت پلیمرها در افزایش مقاومت، پلیمرها، برحسب

<sup>1</sup> Griffith's theory

**سنگ‌دانه‌ها:** از آنجایی که حداقل سه چهارم حجم بتن متخلخل از سنگ‌دانه‌ها تشکیل شده است، لذا کیفیت این مواد در تهیه بتن متخلخل بسیار حائز اهمیت می‌باشد. چراکه وجود سنگدانه‌ها نه تنها بر محدوده‌ی مقاومت بتن تأثیرگذار است، بلکه خواص آنها به‌طور قابل توجهی بر نفوذپذیری و عملکرد بتن متخلخل موثر می‌باشد. از اینرو برای داشتن یک بتن متخلخل با مقاومت کافی و نفوذپذیری مناسب، نیاز به تجزیه و تحلیل دقیقی از خواص سنگ‌دانه می‌باشد [۱۹]. برای بهبود عملکرد نفوذپذیری بتن متخلخل، عمدتاً وجود ریزدانه‌ها در طرح اختلاط حذف می‌شود. بتن متخلخل مورد بررسی در این تحقیق دارای سه اندازه سنگدانه شامل دانه‌بندی‌های الک #۴ (ردشده از الک ۴/۷۵ میلیمتر و مانده بر روی الک ۹/۵ میلیمتر) ۳/۸" (ردشده از الک ۹/۵ میلیمتر و مانده بر روی الک ۱۲ میلیمتر) و ۱/۲" (ردشده از الک ۱۲/۵ میلیمتر و مانده بر روی الک ۱۹ میلیمتر) می‌باشند. مشخصات این سنگدانه‌ها در مصالح ریزدانه (ماسه) در ساخت نمونه‌های بتن متخلخل کاربرد چندانی ندارند. بر این اساس، سنگدانه‌های مورد استفاده در این تحقیق تنها شامل مصالح درشت‌دانه (شن) بوده و دارای دانه بندی یکنواخت و به‌صورت دانه‌های شکسته می‌باشند. سنگدانه‌های انتخاب شده دارای چگالی خشک میله‌خورده برابر با ۱۷۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و سایر اطلاعات آنها مطابق جدول ۲ می‌باشد.

قابل ذکر است که کلیه مصالح سنگی مصرفی پروژه پس از تهیه، به منظور افزایش دقت در نتایج و بهبود شرایط مقایسه و ثابت نگهداشتن دانه‌بندی سنگدانه‌ها در طول آزمایش، به‌صورت دقیق توسط الک‌های استاندارد، دانه‌بندی شده‌اند. همچنین به‌طور جداگانه درون کیسه‌های پلاستیکی و در فضایی بسته نگهداری شده و به‌صورت تفکیک شده و دقیقاً به میزان مورد نیاز در هر نوبت مورد استفاده قرار گرفتند. در آزمایش‌های اولیه‌ای که در این پژوهش برای بررسی اثر سنگ‌دانه صورت گرفت، عملکرد مطلوب این دانه‌بندی از نظر خواص مکانیکی و نفوذپذیری، مورد تأیید قرار گرفت. در جداول ۱ و ۲ وضعیت دانه‌بندی انتخاب شده برای مصالح سنگی مورد نیاز در ساخت بتن متخلخل در این تحقیق ارائه شده است.

همچنین با جای‌گزینی سنگ‌دانه‌های بتن تا ۳/۵ درصد با خرده لاستیک، تغییر قابل توجهی در مقدار مقاومت فشاری بتن ایجاد نمی‌گردد [۱۵]. در آزمایشات انجام شده توسط Su و همکاران، مقدار کاهش در مقاومت خمشی بتن، در حالتی که ۲۰ درصد از ریزدانه‌ها با خرده لاستیک جایگزین شده بودند، برابر با ۱۲/۸ درصد بدست آمد. همچنین در این آزمایش‌ها مشاهده شد که با کاهش اندازه خرده لاستیک، مقدار کاهش مقاومت کمتر می‌شود [۱۶]. علاوه بر کاهش مقاومت، استفاده از خرده لاستیک در طرح اختلاط بتن، سبب کاهش مدول الاستیسیته بتن نیز می‌گردد [۱۷]. با در نظر گرفتن مطالب فوق، می‌توان به اهمیت استفاده از مواد ضایعاتی همچون خرده لاستیک به‌عنوان جای‌گزین بخشی از بتن پی برد. به همین منظور در تحقیق حاضر تلاش شده است تا مقاومت بتن های متخلخل ساخته شده با استفاده از خرده لاستیک‌های ضایعاتی مورد مطالعه قرار بگیرد. بدین منظور، با ثابت نگه داشتن سایر مولفه های موثر بر مشخصات مکانیکی بتن متخلخل، تأثیر جای‌گزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی بتن با درصد‌های مختلف خرده لاستیک، بر مشخصات مکانیکی بتن متخلخل مانند مقاومت فشاری و کششی، نفوذپذیری و درصد تخلخل مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

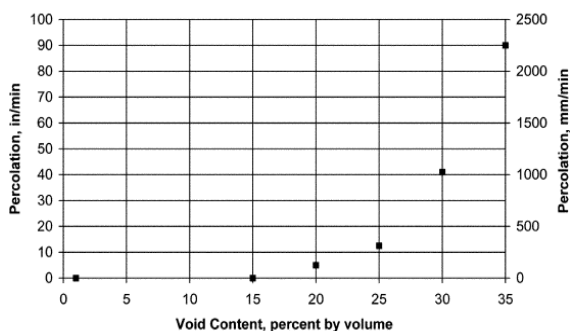
**سیمان:** سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۲ تولید شده در کارخانه سیمان زابل می‌باشد. شرایط تهیه و نگهداری سیمان مورد استفاده، مطابق الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران و ASTM C-150 می‌باشد [۱۸]. ترکیبات شیمیایی سیمان در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده در تحقیق

درصد	ترکیب
۲۱/۶۰	SiO <sub>2</sub>
۵/۰۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴/۰۲	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۶۲/۹۱	CaO
۱/۶۱	MgO
۲/۳۸	SO <sub>3</sub>
۰/۴۰	Na <sub>2</sub> O
۰/۸۱	K <sub>2</sub> O
۱/۱۷	L.O.I

## ۲-۲- طرح اختلاط بتن متخلخل

**نسبت آب به سیمان:** براساس تجربه، برای طرح اختلاط بتن‌های متخلخل، مقدار مناسب نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ می‌باشد [۲۰]. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در تخلخل کمتر از ۱۵ درصد، مقدار نفوذپذیری بتن تقریباً برابر با صفر می‌باشد. با افزایش درصد تخلخل بتن، مقدار نفوذپذیری آن افزایش یافته و از مقدار مقاومت فشاری آن کم می‌شود [۲۰]. در تحقیق حاضر، مقدار نسبت آب به سیمان در تمامی طرح اختلاط‌ها برابر مقدار ثابت ۰/۳۸ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- رابطه بین درصد تخلخل و نفوذپذیری بتن متخلخل [۲۰]

**مقدار درشت دانه بتن متخلخل:** در تهیه طرح اختلاط بتن متخلخل از چگالی خشک میله‌خورده که به صورت نسبت  $b/b_0$  تعریف می‌شود، برای محاسبه مقدار مورد نیاز سنگ‌دانه استفاده می‌شود. مطابق تعریف داریم:

$b/b_0$ : حجم خشک میله‌خورده درشت دانه در واحد حجم بتن.

$b$ : حجم جامد درشت دانه در واحد حجم بتن.

$b_0$ : حجم جامد درشت دانه در واحد حجم درشت دانه.

مقدار پارامتر  $b/b_0$  تأثیر مواردی مانند شکل ذرات درشت دانه، دانه بندی و چگالی ویژه را در نظر می‌گیرد. مقدار این پارامتر برای اندازه ذراتی (معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ میلیمتر) که در ساخت بتن متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرند، یکسان می‌باشد. در جدول ۴، مقدار پارامتر  $b/b_0$  برای درشت‌دانه‌های مختلف سنگدانه‌ها، در حالت استفاده از صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد ریزدانه در سنگدانه‌ها نشان داده شده است [۲۰].

جدول ۴- مقدار  $b/b_0$  موثر سنگدانه‌ها [۲۰]

$b/b_0$			درصد ریزدانه
۱/۲"	۳/۸"	#۴	
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰
۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	۱۰
۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۵	۲۰

جدول ۲- مشخصات سنگدانه و خرده لاستیک ضایعاتی استفاده

شده در تحقیق

خرده	سنگدانه			آزمایش
	۱/۲"	۳/۸"	#۴	
لاستیک	۱/۷۵۷	۱/۷۰۷	۱/۶۵۷	درصد جذب
-	۲/۷۸	۲/۷۱	۲/۶۴	وزن مخصوص ظاهری
۱/۴۱	۱۷۴۲	۱۷۴۲	۱۷۴۲	چگالی خشک ( $kg/m^3$ )
۱۲۰۲				

جدول ۳- دانه بندی سنگدانه‌ها

اندازه الک، میلیمتر (اینچ)			
۱/۲"	۳/۸"	#۴	درصد عبوری (%)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵/۴ (۱)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹ (۳/۴)
۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۲/۵ (۱/۲")
۰	۰	۱۰۰	۹/۵ (۳/۸")
۰	۰	۰	۴/۷۵ (#۴)
۰	۰	۰	۲/۳۶ (#۸)

**خرده لاستیک ضایعاتی:** خرده لاستیک مورد استفاده در طرح اختلاط بتن‌های ساخته شده دارای ابعاد ۴/۷۵ تا ۹/۵ می‌باشد و از خرد کردن تایرهای فرسوده کامیون‌ها بدست آمده است (شکل ۱). وزن مخصوص خرده لاستیک مصرفی ۱/۲۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و در درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ به صورت حجمی جایگزین سنگدانه‌ها شده است.



شکل ۱- خرده لاستیک ضایعاتی مورد استفاده در ساخت بتن

متخلخل

**آب:** آب مناسب برای ساخت و عمل‌آوری بتن باید عاری از هرگونه ناخالصی باشد، یا به عبارت دیگر قابل شرب باشد. در این پژوهش آب استفاده شده دارای PH برابر با ۸/۱ می‌باشد.

## ۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

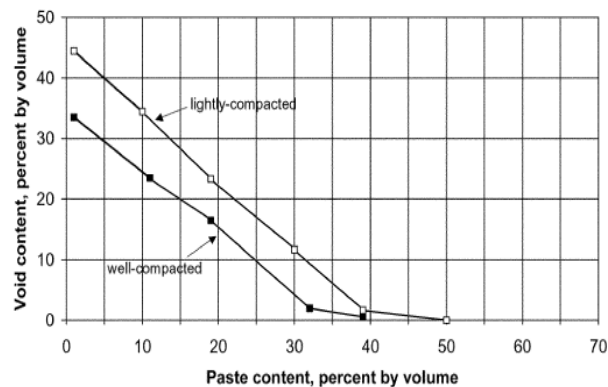
دستورالعمل تهیه طرح اختلاط برای بتن متخلخل، براساس حجم مورد نیاز خمیر سیمان برای چسباندن سنگ‌دانه‌ها به یکدیگر با حفظ فضای خالی مورد نیاز در بتن، استوار می‌باشد. رابطه بین خمیر سیمان و فضای خالی بتن در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار سنگدانه به مقدار  $b/b_0$  و چگالی خشک میله‌خورده سنگدانه‌ها بستگی دارد. پس از تعیین حجم خمیر سیمان از شکل ۳ و انتخاب مقدار دلخواه نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان و آب از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$V_p = \frac{c}{3150} + \frac{w}{1000} \quad (1)$$

که در آن  $c$  جرم سیمان و  $w$  جرم آب می‌باشد. در صورتی که نسبت آب به سیمان برابر با  $w/c$  باشد:

$$w = \left(\frac{w}{c}\right)c \quad (2)$$

$$V_p = \frac{c}{3150} + \left[\frac{\left(\frac{w}{c}\right)c}{1000}\right] \quad (3)$$



شکل ۳- رابطه بین خمیر سیمان و تخلخل [۲۰]

در نتیجه پس از تعیین حجم خمیر سیمان از شکل ۳ و انتخاب نسبت آب به سیمان، می‌توان مقدار جرم سیمان را محاسبه نمود. جهت محاسبه طرح اختلاط بتن به صورت زیر عمل می‌شود:

۱- اندازه سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه: رد شده و مانده از الک‌های مختلف (دانه‌بندی‌های بدست آمده از الک #۴، ۳/۸" و ۱/۲").

۲- چگالی خشک میله‌خورده سنگدانه‌ها: ۱۷۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب.

۳- وزن مخصوص اشباع با سطح خشک سنگدانه‌ها: ۲/۷۵.

۴- ضریب جذب سنگدانه‌ها: ۱/۲ درصد.

۵- درصد تخلخل در نظر گرفته شده: ۲۰ درصد.

۶- مقاومت فشاری هدف: ۱۴ مگاپاسکال.

۷- نسبت آب به سیمان: ۰/۳۸.

با توجه به اینکه در طرح اختلاط تنها از درشت دانه استفاده شده و ریزدانه‌ای موجود نیست، با توجه به جدول ۲ برای جرم سنگدانه‌ها داریم:

$$M_a = 1742 \times 0.99 \times 1.012 = 1745 \text{ kg}$$

از شکل ۳، درصد حجمی خمیر سیمان برای درصد تخلخل ۲۰ درصد، برابر با ۱۶/۵ درصد می‌باشد. در نتیجه حجم جامد خمیر سیمان برابر است با:

$$V_p = 0.165 \text{ m}^3$$

با توجه به رابطه ۳:

$$0.165 = \frac{c}{3150} + \frac{0.38c}{1000} \rightarrow c = 237 \text{ kg/m}^3,$$

$$w = 237 \times 0.38 = 90 \text{ kg/m}^3$$

در نتیجه حجم سیمان و آب برابر است با:

$$V_c = 237/3150 = 0.075 \text{ m}^3$$

$$V_w = 90/1000 = 0.090 \text{ m}^3$$

این طرح اختلاط به عنوان طرح اختلاط پایه در نظر گرفته شده و نمونه کنترلی با نام Ctrl از آن بدست آمده است. سپس برای ساخت نمونه‌های بتنی با خرده لاستیک، سنگدانه‌های طبیعی با مقدار خرده لاستیک مورد نظر جای‌گزین شده است. درصد جایگزینی خرده لاستیک با سنگدانه‌های طبیعی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد حجمی سنگدانه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که در تهیه طرح اختلاط‌های مختلف، میزان درصد تخلخل مد نظر نمونه، نسبت آب به سیمان، و همچنین وزن‌های حجمی سیمان و آب ثابت در نظر گرفته شده و تنها خرده لاستیک به صورت درصدی از حجم سنگ‌دانه‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به محاسبات فوق مقدار مصالح مورد نیاز برای ساخت هر مترمکعب بتن متخلخل با استفاده از سنگ‌دانه‌های طبیعی و همچنین بتن متخلخل ساخته شده با خرده لاستیک ضایعاتی مطابق جدول ۵ می‌باشد.

جدول ۵- طرح اختلاط بتن متخلخل

نمونه	وزن حجمی سیمان ( $kg/m^3$ )	وزن حجمی آب ( $kg/m^3$ )	نسبت آب به سیمان (w/c)	درصد حجمی خرده لاستیک جایگزین شده	وزن حجمی خرده لاستیک ( $kg/m^3$ )	وزن حجمی سنگدانه ( $kg/m^3$ )
Ctrl	۲۳۷	۹۰	۰/۳۸	۰	۰	۱۷۴۵
PCL5	۲۳۷	۹۰	۰/۳۸	۵	۸۷/۲۵	۱۶۵۷/۷۵
PCL10	۲۳۷	۹۰	۰/۳۸	۱۰	۱۷۴/۵	۱۵۷۰/۵
PCL15	۲۳۷	۹۰	۰/۳۸	۱۵	۲۶۱/۷۵	۱۴۸۳/۲۵
PCL20	۲۳۷	۹۰	۰/۳۸	۲۰	۳۴۹	۱۳۹۶
PCL25	۲۳۷	۹۰	۰/۳۸	۲۵	۴۳۶/۲۵	۱۳۰۸/۷۵

روش اختلاط برای ساخت مخلوط‌های بتنی در مخلوط کن ۳۰۰ لیتری موجود در آزمایشگاه بتن، به این صورت بود که ابتدا سنگدانه‌ها به صورت خشک به مدت یک دقیقه مخلوط شده، پس از آن ۱/۳ آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. سپس سیمان به همراه ۲/۳ کل آب به مدت ۳ دقیقه مخلوط می‌گردند. با توجه به انجام آزمایش‌های مختلف بر روی بتن سخت شده، نمونه‌هایی با ابعاد مختلف و متناسب با هر آزمایش تهیه شد. همچنین برای انجام هر آزمایش، تعداد سه نمونه ساخته شد و پس از میانگین‌گیری از نتایج بدست آمده، مقدار نهایی در هر آزمایش حاصل شد. پس از ساخت بتن مطابق الگوی فوق، عملیات نمونه‌گیری جهت بررسی خواص مکانیکی انجام شد. پس از پر کردن قالب‌ها، نمونه‌ها در دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتیگراد در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد.



شکل ۴- نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتیمتر جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری

### ۲-۳- آزمایش مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش غیرمستقیم با روش برزیلی طبق استاندارد ASTM C496-02 استفاده شده است روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه به ابعاد  $20 \times 10$  سانتیمتر به صورت افقی در زیر جک قرار می‌گیرد، به طوری که هیچ انحرافی در راستای خود نداشته باشد [۲۱]. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیرو، منجر به شکست نمونه می‌شود. جک هیدرولیک مورد استفاده دارای ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن بوده و با سرعت ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بار را اعمال می‌کند.

روش اختلاط برای ساخت مخلوط‌های بتنی در مخلوط کن ۳۰۰ لیتری موجود در آزمایشگاه بتن، به این صورت بود که ابتدا سنگدانه‌ها به صورت خشک به مدت یک دقیقه مخلوط شده، پس از آن ۱/۳ آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. سپس سیمان به همراه ۲/۳ کل آب به مدت ۳ دقیقه مخلوط می‌گردند. با توجه به انجام آزمایش‌های مختلف بر روی بتن سخت شده، نمونه‌هایی با ابعاد مختلف و متناسب با هر آزمایش تهیه شد. همچنین برای انجام هر آزمایش، تعداد سه نمونه ساخته شد و پس از میانگین‌گیری از نتایج بدست آمده، مقدار نهایی در هر آزمایش حاصل شد. پس از ساخت بتن مطابق الگوی فوق، عملیات نمونه‌گیری جهت بررسی خواص مکانیکی انجام شد. پس از پر کردن قالب‌ها، نمونه‌ها در دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتیگراد در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. بعد از گذشت این زمان و باز کردن قالب‌ها، نمونه‌ها تا زمان آزمایش تحت عمل‌آوری مرطوب در دمای آزمایشگاه قرار گرفت. پس از عملیات ریختن بتن، قالب‌ها با گونی مرطوب و یک لایه پلاستیک پوشیده و به مدت ۲۰ تا ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری شد. طی این مدت نمونه‌ها قالب‌برداری شده و در آب قرار گرفت. لازم به ذکر است که نمونه‌ها تا زمان آزمایش تحت عمل‌آوری مرطوب در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند.

### ۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

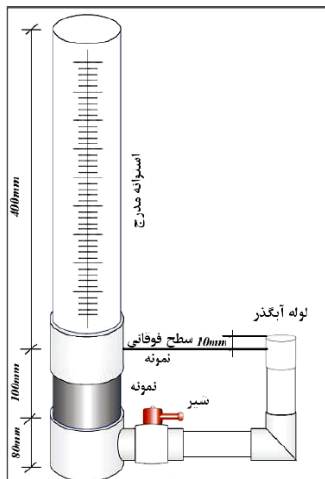
به منظور بررسی مقاومت فشاری، نمونه‌های بتن مکعبی با ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  سانتیمتر مکعب ساخته شده و نمونه‌ها تا سن آزمایش

### ۳-۴- تعیین ضریب نفوذپذیری

نفوذ هیدرولیکی یک ماده نشان‌دهنده چگونگی ارتباط میان منافذ آن است. برای مشخص کردن نفوذپذیری یک جسم، باید ضریب نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی) آن تعیین شود، که عبارت است از میزان جریان مایع یا گاز عبوری در واحد زمان از واحد سطح مقطع، تحت یک گرادیان هیدرولیکی واحد. برای انجام این آزمایش سطوح جانبی آزمون بنی پوشانده شده و هد آب افتان بر سطح فوقانی نمونه اعمال می‌گردد [۱۴]. برای محاسبه ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل از رابطه ۶ براساس قانون داری و فرض جریان لایه‌ای استفاده می‌گردد.

$$k = \frac{a.L}{A.t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (6)$$

که در آن،  $k$  ضریب نفوذپذیری بر حسب میلی‌متر بر ثانیه،  $a$  سطح مقطع لوله آب بر حسب میلی‌مترمربع،  $L$  طول آزمون بر حسب میلی‌متر،  $A$  سطح مقطع آزمون بر حسب میلی‌مترمربع،  $t$  زمان لازم برای رسیدن ارتفاع آب از تراز  $h_1$  به تراز  $h_2$  بر حسب ثانیه،  $h_1$  ارتفاع اولیه آب در لوله بر حسب میلی‌متر و  $h_2$  ارتفاع نهایی آب در لوله بر حسب میلی‌متر، می‌باشد. این آزمایش در سن ۲۸ روزه انجام می‌گردد. شکل ۶، شماتیک دستگاه مورد استفاده برای تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های بتن متخلخل را نشان می‌دهد.



شکل ۶- دستگاه تعیین ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل [۱۴]

### ۴- بررسی و تفسیر نتایج آزمایشات

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی مشخصات مکانیکی و دوام بتن متخلخل، حاوی

کند. مقاومت کششی بتن بر حسب نیوتن بر میلی‌مترمربع طبق رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (4)$$

که در آن  $P$  برابر با مقدار بار وارده بر حسب نیوتن،  $D$  قطر نمونه استوانه‌ای و  $L$  طول نمونه استوانه‌ای می‌باشد.



شکل ۵- نمونه استوانه‌ای آزمایش مقاومت کششی

### ۳-۳- تعیین درصد تخلخل

تخلخل مقدار منافذ و فضای خالی داخل بتن است که به صورت درصدی از مجموع حجم ماده نشان داده می‌شود. میزان تخلخل بتن متخلخل به روش اختلاف بین وزن غوطه‌وری و وزن خشک نمونه بتن مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌گردد. برای انجام این آزمایش ابتدا آزمون به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه در حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد خشک شده و سپس وزن خشک و وزن غوطه‌وری آن در آب اندازه‌گیری می‌گردد.

$$P = \left[ 1 - \left( \frac{W_2 - W_1}{\rho_w V_s} \right) \right] \quad (5)$$

که در این رابطه  $P$  نسبت تخلخل نمونه بر حسب درصد،  $W_1$  وزن آزمون داخل آب بر حسب کیلوگرم،  $W_2$  وزن آزمون در حالت خشک بر حسب کیلوگرم،  $V_s$  حجم نمونه بر حسب سانتی‌مترمکعب و  $\rho_w$  دانسیته آب در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب می‌باشد. آزمایش تعیین درصد تخلخل بر روی آزمون‌ها در سن ۲۸ روزه انجام می‌شود.

یافته است. با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک و سنگدانه در بتن متخلخل به بیش از ۱۰٪، اختلاف مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد افزایش یافته است؛ به طوریکه مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد خرده لاستیک، نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۱۲/۵٪، ۲۲/۱٪ و ۳۴/۲٪ کاهش یافته است. حمله سولفاتی یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در کاهش دوام بتن است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده از بتن متخلخل حاوی خرده لاستیک، پس از قرارگیری در محیط سولفاته در جدول ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تفاوت چندانی میان مقاومت فشاری محیط سولفاته نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰٪ خرده لاستیک و نمونه شاهد وجود ندارد. مقاومت فشاری پس از قرارگیری در محیط سولفاتی تمامی نمونه‌های حاوی خرده لاستیک، نسبت به مقاومت فشاری سولفاته طرح شاهد کمتر است. بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به نمونه PCL25 حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک می‌باشد.

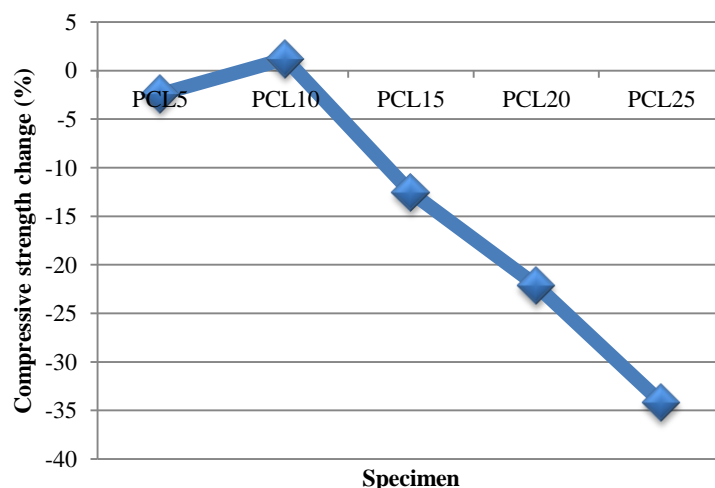
جدول ۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

کد طرح	درصد جایگزینی سنگدانه با خرده لاستیک	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
Ctrl	۰	۱۴/۸۳
PCL5	۵	۱۴/۴۷
PCL10	۱۰	۱۵/۰۱
PCL15	۱۵	۱۲/۹۷
PCL20	۲۰	۱۱/۵۵
PCL25	۲۵	۹/۷۶

درصدهای حجمی مختلف (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) خرده لاستیک ضایعاتی به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه مصرفی، پرداخته می‌شود. آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در سن ۲۸ روز انجام شده است. همچنین برای نمونه‌های ساخته شده، آزمایش‌های تعیین درصد تخلخل و تعیین ضریب نفوذپذیری انجام شده است. با هدف بررسی دوام نمونه‌های ساخته شده از بتن متخلخل حاوی خرده لاستیک در محیط سولفاتی، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی، پس از قرارگیری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز، در محیط سولفاتی نیز انجام شده است.

#### ۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر در سن ۲۸ روز انجام شده است. نتایج مربوط به این آزمایش برای نمونه‌های ساخته شده از بتن متخلخل حاوی مقادیر مختلف خرده لاستیک و طرح شاهد (بدون خرده لاستیک) در جدول ۶ ارائه شده است. بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مربوط به نمونه حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک می‌باشد. مقدار درصد تغییر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی خرده لاستیک، نسبت به نمونه شاهد، در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با جایگزینی ۱۰٪ از سنگدانه بتن متخلخل با خرده لاستیک، تغییر زیادی در مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به طرح شاهد ایجاد نمی‌شود. به طوریکه مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک نسبت به نمونه شاهد ۱/۲٪ افزایش یافته و مقاومت فشاری نمونه حاوی ۵٪ خرده لاستیک نسبت به نمونه شاهد ۲/۴٪ کاهش



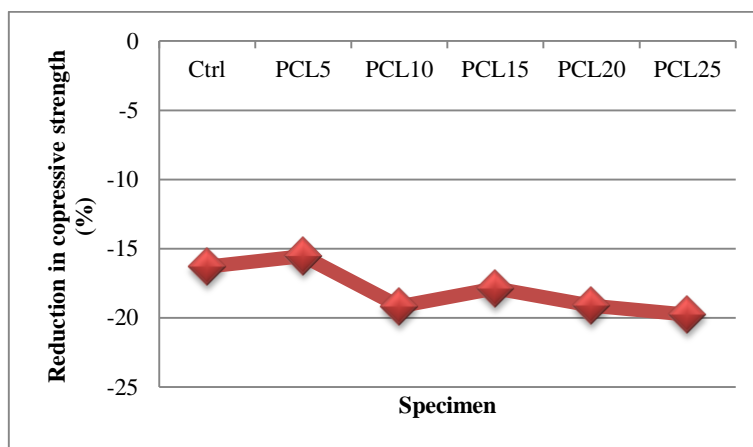
شکل ۷- درصد تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خرده لاستیک نسبت به نمونه شاهد



جدول ۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری پس از قرارگیری در محیط سولفات

کد طرح	درصد جایگزینی سنگدانه با خرده لاستیک	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
Ctrl	۰	۱۲/۴۱
PCL5	۵	۱۲/۲۲
PCL10	۱۰	۱۲/۱۳
PCL15	۱۵	۱۰/۶۵
PCL20	۲۰	۹/۳۴
PCL25	۲۵	۷/۸۳

در شکل ۸ درصد تفاوت مقاومت فشاری نمونه‌های در معرض محیط سولفاتی و نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده در آب، ارائه شده است. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهند که کمترین کاهش مقاومت فشاری پس از قرارگیری در محیط سولفاتی، مربوط به نمونه شاهد و نمونه حاوی ۵٪ خرده لاستیک می‌باشد. این کاهش در نمونه شاهد، ۱۶/۳٪ و در نمونه حاوی ۵٪ خرده لاستیک، ۱۵/۵٪ می‌باشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک و برابر با ۱۹/۸٪ است.



شکل ۸- درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در محیط سولفاتی

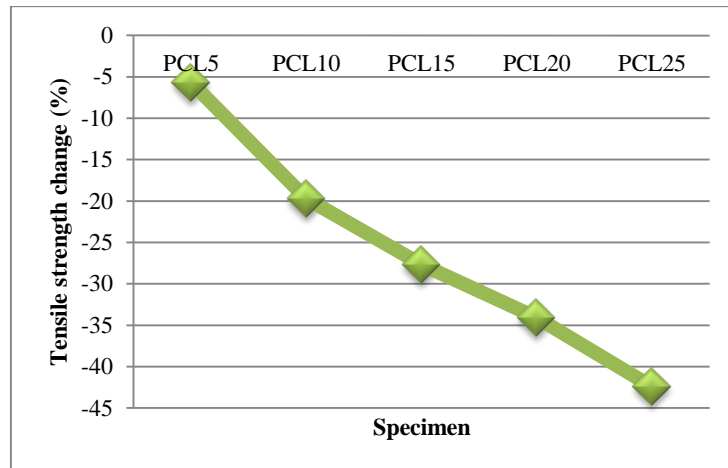
#### ۴-۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی

متخلخل، میزان کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم، نسبت به طرح شاهد افزایش یافته است. به طوریکه مقاومت کششی طرح PCL25 حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک، نسبت به طرح شاهد ۴۲٪ کمتر است. در هر مرحله از افزایش ۵ درصدی خرده لاستیک در طرح اختلاط بتن متخلخل، مقاومت کششی کاهش یافته است؛ بیشترین کاهش مقاومت کششی در اثر افزایش خرده لاستیک از ۵ به ۱۰ درصد می‌باشد.

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی به روش غیرمستقیم (شکافت برزیلی) در جدول ۸ نشان داده شده است. این آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم ۲۸ روزه مربوط به طرح شاهد می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش درصد خرده لاستیک ضایعاتی در طرح اختلاط بتن

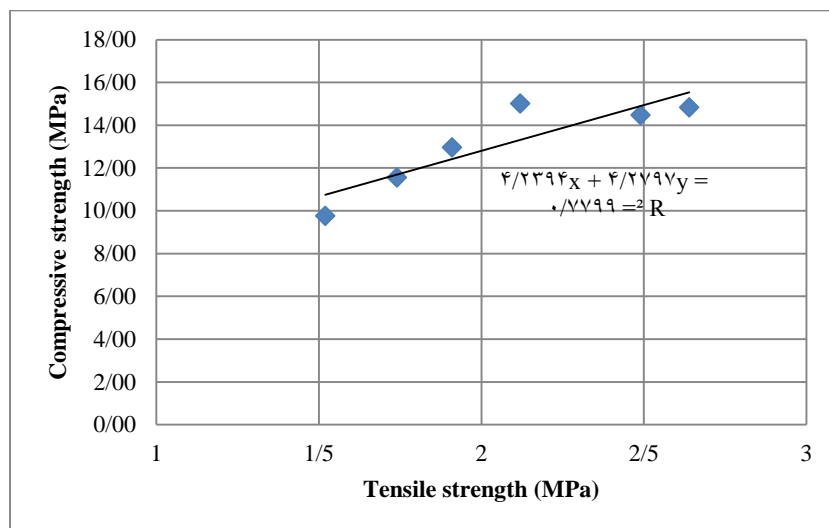
جدول ۸- نتایج آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

کد طرح	درصد جایگزینی سنگدانه با خرده لاستیک	مقاومت کششی ۲۸ روزه (MPa)
Ctrl	۰	۲/۶۴
PCL5	۵	۲/۴۹
PCL10	۱۰	۲/۱۲
PCL15	۱۵	۱/۹۱
PCL20	۲۰	۱/۷۴
PCL25	۲۵	۱/۵۲



شکل ۹- درصد تغییر مقاومت کششی نمونه‌های حاوی خرده لاستیک نسبت به نمونه شاهد

مقایسه نتایج آزمایش مقاومت کششی و فشاری برای نمونه‌های حاوی خرده لاستیک نشان می‌دهد که اثر حضور خرده لاستیک در طرح اختلاط بتن متخلخل، بر کاهش مقاومت کششی بیشتر از اثر آن بر کاهش مقاومت فشاری می‌باشد. ارتباط میان نتایج آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، برای نمونه‌های بتن متخلخل حاوی خرده لاستیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، همبستگی مناسبی بین مقادیر به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی وجود دارد.



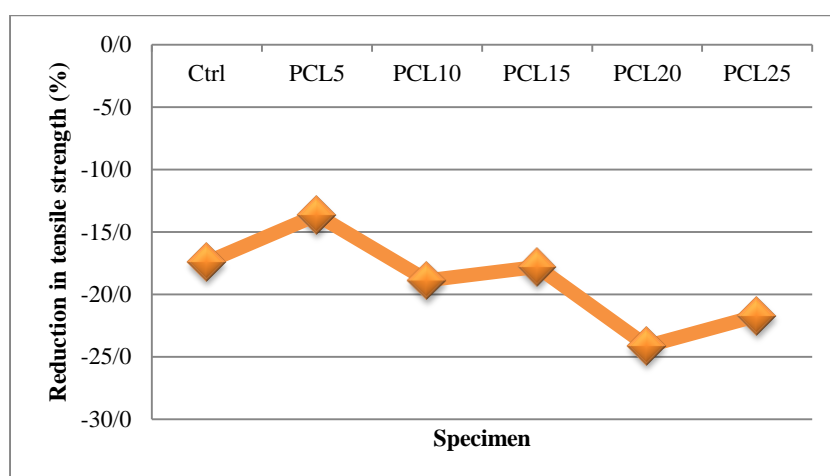
شکل ۱۰- همبستگی میان مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی خرده لاستیک

نتایج آزمایش مقاومت کششی به روش غیرمستقیم برای نمونه شاهد و سایر نمونه‌های حاوی خرده لاستیک، پس از قرارگیری در محیط سولفاتی در جدول ۹ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در بین نمونه‌های حاوی خرده لاستیک، بیشترین مقاومت کششی پس از قرارگیری در محیط سولفاتی، مربوط به نمونه حاوی ۵٪ خرده لاستیک می‌باشد. مقاومت کششی محیط سولفاتی تمامی نمونه‌های حاوی خرده لاستیک، نسبت به مقاومت کششی سولفاتی طرح شاهد کمتر است و با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک و سنگدانه، این کاهش مقاومت کششی روندی صعودی دارد. به طوریکه مقاومت کششی محیط سولفاتی نمونه‌های حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک از مقاومت کششی محیط سولفاتی طرح شاهد حدود ۴۵٪ کمتر است. با مقایسه نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که تأثیر جایگزینی خرده لاستیک بر کاهش مقاومت کششی محیط سولفاتی، نسبت به کاهش مقاومت فشاری محیط سولفاتی، بیشتر می‌باشد. مقدار کاهش مقاومت کششی پس از قرارگیری در محیط سولفاتی برای هر طرح در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش

مقاومت کششی پس از قرارگیری در محیط سولفاتی مربوط به افزایش خرده لاستیک به بیش از ۵٪، میزان کاهش مقاومت نمونه حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک می‌باشد. در حالت کلی با کششی در اثر قرارگیری در محیط سولفاتی، افزایش یافته است.

جدول ۹- نتایج آزمایش مقاومت کششی (برزیلی) پس از قرارگیری در محیط سولفاته

کد طرح	درصد جایگزینی سنگدانه با خرده لاستیک	مقاومت کششی ۲۸ روزه (MPa)
Ctrl	۰	۲/۱۸
PCL5	۵	۲/۱۵
PCL10	۱۰	۱/۷۲
PCL15	۱۵	۱/۵۷
PCL20	۲۰	۱/۳۲
PCL25	۲۵	۱/۱۹



شکل ۱۱- درصد کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها پس از قرارگیری در محیط سولفاتی

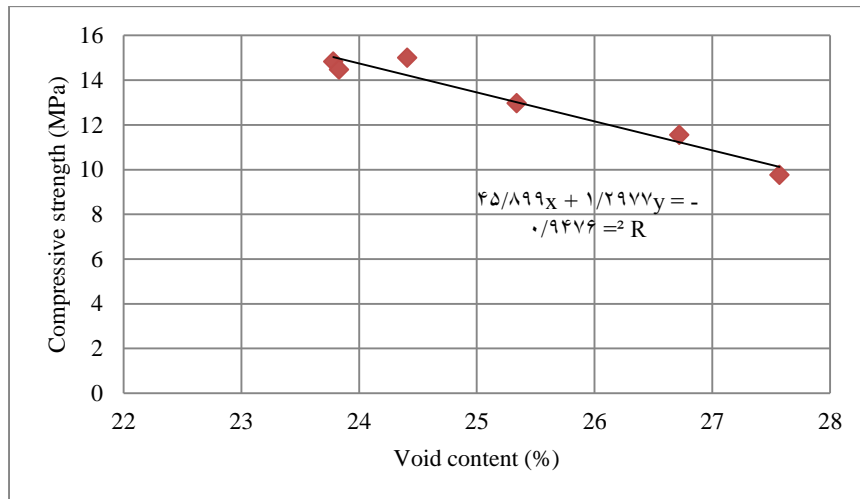
### ۳-۴- آزمایش تعیین درصد تخلخل

جایگزینی خرده لاستیک این اختلاف، افزایش یافته است. به‌طوری‌که مقدار تخلخل نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۵٪ خرده لاستیک، به‌ترتیب در حدود ۳ و ۱۵/۹٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. ارتباط میان مقاومت فشاری و درصد تخلخل، برای بتن متخلخل حاوی خرده لاستیک، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، ارتباط میان این دو پارامتر برای بتن متخلخل حاوی خرده لاستیک، از ضریب همبستگی مناسبی (۰/۹۴) برخوردار است.

میزان تخلخل نمونه‌های ساخته شده از بتن متخلخل حاوی خرده لاستیک و نمونه شاهد، در جدول ۱۰ نشان داده شده است. کمترین تخلخل مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک و سنگ‌دانه در طرح اختلاط بتن متخلخل، درصد تخلخل افزایش یافته است. کمترین اختلاف تخلخل نسبت به نمونه شاهد، مربوط به نمونه حاوی ۵٪ خرده لاستیک می‌باشد؛ با افزایش درصد

جدول ۱۰- درصد تخلخل نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی خرده لاستیک

کد طرح	درصد جایگزینی سنگدانه با خرده لاستیک	تخلخل (%)
Ctrl	۰	۲۳/۷۸
PCL5	۵	۲۳/۸۳
PCL10	۱۰	۲۴/۴۱
PCL15	۱۵	۲۵/۳۴
PCL20	۲۰	۲۶/۷۲
PCL25	۲۵	۲۷/۵۷

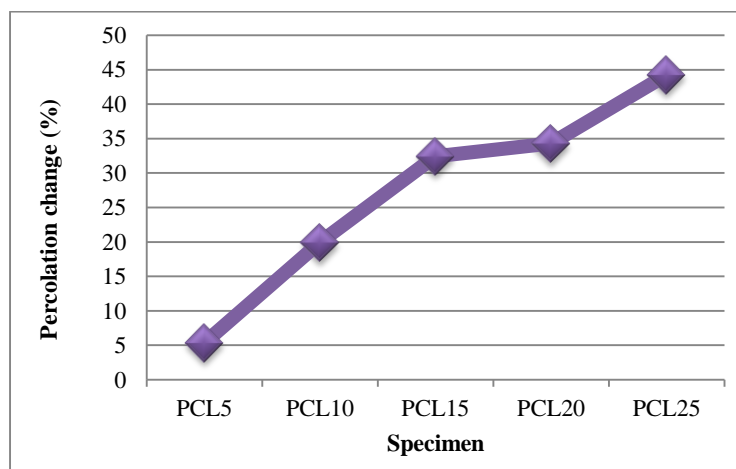


شکل ۱۲- رابطه بین مقاومت فشاری و تخلخل

نتایج آزمایش نفوذپذیری نمونه‌ها، در جدول ۱۱ ارائه شده است. نتایج به نتایج به دست آمده از آزمایش نفوذپذیری، مشاهده می‌شود که کمترین مقدار نفوذپذیری مربوط به نمونه شاهد بدون خرده لاستیک می‌باشد؛ همچنین با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک در طرح اختلاط، میزان نفوذپذیری بتن متخلخل افزایش یافته است. بیشترین افزایش در مقدار نفوذپذیری زمانی اتفاق افتاده است که درصد جایگزینی خرده لاستیک از ۱۰ به ۱۵ درصد افزایش یافته است. نمودار شکل ۱۳ نشان می‌دهد که نفوذپذیری نمونه‌های حاوی خرده لاستیک نسبت به نمونه شاهد بیشتر است؛ بیشترین افزایش نفوذپذیری نسبت به طرح شاهد، مربوط به نمونه PCL25 حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک می‌باشد. به طوریکه نفوذپذیری این نمونه نسبت به طرح شاهد، ۴۴٪ افزایش یافته است. همچنین، نمونه حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک، افزایش حدود ۱۱٪ در

جدول ۱۱- نتایج آزمایش نفوذپذیری

کد طرح	درصد جایگزینی سنگدانه با خرده لاستیک	ضریب نفوذپذیری (mm/s)
Ctrl	۰	۱۱/۶۰
PCL5	۵	۱۲/۲۲
PCL10	۱۰	۱۳/۱۷
PCL15	۱۵	۱۴/۳۶
PCL20	۲۰	۱۵/۵۸
PCL25	۲۵	۱۶/۷۳



شکل ۱۳- درصد تغییر نفوذپذیری نمونه‌های حاوی خرده لاستیک نسبت به طرح شاهد

## ۵- نتیجه گیری

خرده لاستیک جایگزین سنگدانه می‌شود، از حجم سنگدانه در بتن متخلخل کاسته می‌شود. از طرفی مقاومت فشاری بتن به خواص مکانیکی و فیزیکی سنگدانه (که نسبت به لاستیک جایگزین از نظر مقاومتی برتری دارند) بستگی دارد. همچنین نتایج حاصل از مقاومت فشاری بتن در محیط سولفات‌ها برای نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰٪ خرده لاستیک، تفاوت چندانی را با نمونه شاهد، نشان نداده است. این نتایج با توجه اثرات مثبت زیست محیطی ناشی از جایگزینی خرده لاستیک به جای بخشی از سنگدانه‌ها و کاهش نه‌چندان زیاد مقاومت فشاری بتن متخلخل، بسیار مفید می‌باشد.

با افزایش درصد خرده لاستیک در طرح اختلاط بتن متخلخل، میزان کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم، نسبت به طرح شاهد، افزایش یافته است. به طوری که مقاومت کششی طرح PCL25 حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک، نسبت به طرح شاهد، ۴۲٪ کمتر است. اثر حضور خرده لاستیک در طرح اختلاط بتن متخلخل بر کاهش مقاومت کششی بیشتر از اثر آن بر کاهش مقاومت فشاری می‌باشد. این امر می‌تواند به دلیل عدم چسبندگی مناسب خرده لاستیک و خمیر سیمان باشد که در کاهش مقاومت کششی اثرگذاری بیشتری در مقایسه با مقاومت فشاری داشته است. همچنین نتایج مقاومت کششی برای نمونه‌های مختلف، پس از قرارگیری در محیط سولفات‌ها نشان می‌دهد که در بین نمونه‌های حاوی خرده لاستیک، بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه حاوی ۵٪ خرده لاستیک می‌باشد. همچنین نتایج مقاومت کششی سایر نمونه‌ها نشان داد که تأثیر جایگزینی خرده لاستیک بر کاهش مقاومت کششی محیط سولفات‌ها، نسبت به کاهش مقاومت فشاری محیط سولفات‌ها، بیشتر می‌باشد.

کمترین تخلخل مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی خرده لاستیک و سنگدانه در طرح اختلاط بتن متخلخل، درصد تخلخل افزایش یافته است؛ به طوری که تمامی نمونه‌های حاوی خرده لاستیک نسبت به نمونه شاهد (بدون خرده لاستیک) تخلخل بیشتری دارند. به عنوان مثال، مقدار تخلخل نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۵٪ خرده لاستیک، به ترتیب در حدود ۳ و ۱۵/۹٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است که این موضوع منجر به بهبود

ساختار بتن متخلخل، ویژگی‌هایی خاصی را برای این نوع بتن به وجود آورده و آن را نسبت به سایر روسازی‌ها متمایز ساخته است. خلل و فرج موجود در این بتن و ارتباط این حفرات بام، سبب نفوذپذیری بالای این بتن شده و امکان نفوذ رواناب ناشی از آب باران را به لایه‌های زیرین روسازی فراهم می‌آورد. همچنین تخلخل موجود در این بتن، سبب کاهش چگالی آن در مقایسه با بتن‌های معمولی می‌گردد. کاهش چگالی و وجود درصد بالایی از حفرات منجر به کاهش مقاومت بتن متخلخل در قیاس با بتن معمولی می‌شود. از اینرو باید سعی نمود از طریق جایگزینی بخشی از اجزای تشکیل‌دهنده بتن متخلخل، تعادلی را بین تخلخل یا نفوذپذیری و مقاومت آن برقرار ساخت. مهم‌ترین عامل در برقراری این تعادل، سنگدانه‌های مصرفی، درصد خمیر سیمان و نسبت آب به سیمان است. از سوی دیگر، ازدیاد ضایعات ناشی از تاپرهای فرسوده در طبیعت، به یکی از مهمترین چالش‌های زیست محیطی در سال‌های اخیر بدل شده است. استفاده از این مواد ضایعاتی در بتن به جای بخشی از مصالح سنگدانه به شرط اینکه خصوصیات اولیه بتن را تا حدی حفظ نموده و از سوی دیگر، باعث افزایش خصوصیات آن شود، مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. بر این اساس در پژوهش حاضر تلاش شد تا اثر استفاده از ضایعات لاستیکی به صورت خرده لاستیک‌های به دست آمده از تاپرهای فرسوده، به صورت جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها برای ساخت بتن متخلخل مورد نیاز در روسازی‌های بتنی مورد بررسی قرار بگردد. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق، به شرح زیر می‌باشد:

- بررسی نتایج نشان می‌دهد جایگزینی خرده لاستیک با سنگدانه تا حدی ممکن است سبب بهبود مقاومت فشاری بتن متخلخل شود. به طوری که نمونه حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک، بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه را بین سایر نمونه‌ها و با افزایش ۱/۲٪ نسبت به نمونه شاهد ایجاد نموده است. بنابراین استفاده از درصد مشخصی از خرده لاستیک می‌تواند سبب توزیع مناسب آن‌ها شده و این امر سبب تأثیر مثبت بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری شود. همچنین این نتیجه حاصل شد که در حالت کلی جایگزینی خرده لاستیک و سنگدانه در طرح اختلاط بتن متخلخل باعث کاهش مقاومت فشاری خواهد شد. زمانی که

## ۶- مراجع

- [1] Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. E. M. A., & Fawzy, A. M. (2018). Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 193, 105-127.
- [2] Ariffin, N. F., Jaafar, M. M., Lim, N. A. S., Bhutta, M. A. R., & Hussin, M. W. (2018, April). Mechanical properties of polymer-modified porous concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 342, No. 1, p. 012081). IOP Publishing.
- [3] Sun, Y., Gao, P., Geng, F., Li, H., Zhang, L., & Liu, H. (2017). Thermal conductivity and mechanical properties of porous concrete materials. *Materials Letters*, 209, 349-352.
- [4] Ganjian, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and building materials*, 23(5), 1828-1836.
- [5] Chindapasirt, P., Hatanaka, S., Mishima, N., Yuasa, Y., & Chareerat, T. (2009). Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete. *International journal of minerals, metallurgy and materials*, 16(6), 714-719.
- [6] Zaetang, Y., Sata, V., Wongsu, A., & Chindapasirt, P. (2016). Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 111, 15-21.
- [7] Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4294-4298.
- [8] Park, S. B., & Tia, M. (2004). An experimental study on the water-purification properties of porous concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 177-184.
- [9] Güneysi, E., Gesoğlu, M., Kareem, Q., & İpek, S. (2016). Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. *Materials and Structures*, 49(1-2), 521-536.
- [10] Yap, S. P., Chen, P. Z. C., Goh, Y., Ibrahim, H. A., Mo, K. H., & Yuen, C. W. (2018). Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. *Journal of cleaner production*, 181, 155-165.
- [11] Al-Akhras, N. M., & Smadi, M. M. (2004). Properties of tire rubber ash mortar. *Cement and concrete composites*, 26(7), 821-826.
- [12] Gesoğlu, M., Güneysi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S. (2014). Investigating properties of pervious

خصوصیات مورد نیاز در بتن متخلخل شده است. همچنین ارتباط میان مقاومت فشاری و درصد تخلخل، برای بتن متخلخل حاوی خرده لاستیک، نشان از ارتباط معنادار (با ضریب همبستگی مناسب ۰/۹۴) بین این دو پارامتر می‌باشد.

- کمترین مقدار نفوذپذیری مربوط به نمونه شاهد بدون خرده لاستیک می‌باشد. همچنین با افزایش درصد جای‌گزینی خرده لاستیک در طرح اختلاط میزان نفوذپذیری نمونه افزایش یافته است. به طوری که در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۵٪ خرده لاستیک، میزان نفوذپذیری، به ترتیب در حدود ۱۱ و ۴۴٪ نسبت به طرح شاهد افزایش یافته است. این موضوع اختلاف نفوذپذیری معناداری در راستای بهبود خصوصیات بتن متخلخل به شمار می‌رود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بیشترین افزایش در مقدار نفوذپذیری، با جای‌گزینی خرده لاستیک از ۱۰ به ۱۵ درصد اتفاق افتاده است.

براساس نتایج کلی حاصل از این تحقیق آزمایشگاهی مشاهده شد که افزودن ۱۰٪ خرده لاستیک ضایعاتی به جای بخشی از سنگ‌دانه‌ها در بتن متخلخل، موجب افزایش خصوصیات مقاومت فشاری آن در شرایط عادی و در محیط سولفاتی شده است. همچنین نتایج مربوط به تغییرات مقاومت کششی نشان داد که افزودن ۱۰٪ خرده لاستیک، تأثیر چندانی فاحشی بر مقاومت کششی نمونه در مقایسه با طرح شاهد نداشته است. از سوی دیگر این نتیجه حاصل شد که با افزایش درصد جای‌گزینی خرده لاستیک و سنگ‌دانه در بتن متخلخل، درصد تخلخل و نفوذپذیری هر دو افزایش یافته‌اند. به عبارت دیگر با افزایش ترک‌های بین خمیر سیمان و خرده لاستیک، مسیرهای مناسبی برای نفوذ و خروج آب از درون ماتریس بتن فراهم شده است. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که افزودن خرده لاستیک ضایعاتی تا حد معینی به جای سنگ‌دانه‌ها در بهبود خواص بتن متخلخل مثرتر بوده است. به طوری‌که تولید نمونه بتن متخلخل با جای‌گزینی خرده لاستیک به جای سنگ‌دانه و ایجاد بتنی با همان خصوصیات طرح شاهد از نظر مقاومت فشاری و کششی و همچنین تفاوت معنادار ایجاد شده در راستای افزایش تخلخل و نفوذپذیری، نشان از برتری آن دارد. از سوی دیگر با توجه به مسائل زیست محیطی ناشی از خرده لاستیک‌های ضایعاتی، بهره‌گیری از این مواد در تولید بتن متخلخل مورد نیاز در روسازی راه‌ها بسیار اثربخش خواهد بود.

- concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206-213.
- [13] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S. (2014). Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, 73, 19-24.
- [14] Holmes, N., Browne, A., & Montague, C. (2014). Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 73, 195-204.
- [15] Youssf, O., ElGawady, M. A., Mills, J. E., & Ma, X. (2014). An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. *Construction and Building Materials*, 53, 522-532.
- [16] Su, H., Yang, J., Ling, T. C., Ghataora, G. S., & Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296.
- [17] Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A., & Bernardin, A. M. (2011). Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 757-763.
- [18] A.J., Carpenter, S.M., Cramer, “Mitigation of ASR in Pavement Patch Concrete that Incorporates Highly Reactive Fine Aggregate”, *Transportation Research Record* 1668, Paper No. 1087-1099, (1999) 60-67.
- [19] ASTM, C33. (2003). *Standard specification for concrete aggregates*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- [20] ACI 211.3 R. (2009). *Guide for selecting proportions for No-slump concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- [21] ASTM C496-02, *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*, *Annual Book ASTM Standards*, 4(04.02), 2002.

## Evaluation of Strength of Pervious Concrete Made Using Waste Tyre Rubber Particles

Mohsen Salehi Zadeh \*

M.Sc. Student of Civil-Structural Engineering, Hatf Institute of Higher Education, Zahedan, Iran.

Babak Dizangian

Assistant Professor, Department of civil engineering, Velayat university, Iranshahr, Iran.

### Abstract

Pervious concrete is one of the types of coatings used in rigid pavements. High porosity and good drainage efficiency have increased the use of this type of concrete in urban floods and runoff management. On the one hand, there is a large amount of corroded rubber produced annually in the world, which is not possible to bury these tires in the environment due to the very slow rate of decomposition and contamination. The use of these worn-out tires in concrete is a good option to dispose of these wastes. In this regard, in this study, experiments were conducted to investigate the effect of using scrap rubber on the properties of pervious concrete. The five modes of replacing natural aggregates with scrap rubber, including 5, 10, 15, 20 and 25%, have been investigated. The results show that the replacement of 10% particulate rubber and aggregate in the porous concrete mixing design increases the compressive strength under normal conditions and in sulfate environment. Also, the results of tensile strength changes showed that the addition of 10% pumice rubber had no significant effect on the tensile strength of the specimen compared to the control design. On the other hand, it was found that by increasing the percentage of substitution of particulate rubber and aggregate in porous concrete, both porosity and permeability increased. In other words, by increasing the cracks between the cement paste and the crumb rubber, suitable paths have been provided for penetration and outflow of water through the concrete matrix. As a general conclusion, it can be said that the addition of scrap rubber instead of aggregates has been effective in improving the properties of porous concrete. The production of porous concrete specimen by substituting particle tires instead of aggregates and making concrete with the same characteristics of the control design in terms of compressive and tensile strength as well as significant difference in terms of increasing porosity and permeability, shows its superiority. On the other hand, due to the environmental issues caused by scrap tires, utilization of these materials in the production of porous concrete required for road paving will be very effective.

**Keywords:** Pervious Concrete, Compressive Strength, Concrete Percolation, Tensile Strength, Crumb Rubber.

---

\* Corresponding Author: [trainersalehizadeh@yahoo.com](mailto:trainersalehizadeh@yahoo.com)