

# تأثیر تخلخل و شدت بارش بر راندمان تصفیه رواناب شهری توسط روسازی بتنی متخلخل

مهدی گل محمدی<sup>۱</sup>، حسین گنجی دوست<sup>۲</sup>، نادر مختارانی<sup>۳\*</sup>

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

[mokhtarani@modares.ac.ir](mailto:mokhtarani@modares.ac.ir)\*

تاریخ پذیرش: [۹۷/۰۳/۲۱]

تاریخ دریافت: [۹۶/۶/۱۹]

## چکیده

رواناب شهری شامل آلاینده‌هایی همچون مواد مغذی، فلزات سنگین و مواد آلی مانند هیدروکربن‌ها بوده که از سطح جاده شسته شده و منجر به آلوده شدن منابع آب و خاک می‌شود. در این میان روسازی بتنی متخلخل قادر به کاهش قابل توجه حجم رواناب‌های شهری و در نتیجه کاهش بار هیدرولیکی رواناب و آثار جانبی آن بر تاسیسات شهری است. همچنین این نوع روسازی شرایط لازم برای تصفیه و مدیریت آلودگی‌های منتشر شده شهری در نزدیکی و یا خود منبع را فراهم می‌کند. هدف از انجام این پژوهش بررسی کارایی سیستم روسازی بتنی متخلخل بر کمیت و کیفیت رواناب سنتزی بوده و آثار تغییر تخلخل و شدت بارش بر پارامترهای مختلف بررسی شده است. در این مطالعه بیشترین راندمان حذف TSS و COD به ترتیب برابر ۸۸٪ و ۱۵٪ به دست آمد. همچنین سیستم توانایی کمی در حذف TDS و EC از خود نشان داد. سیستم روسازی بررسی شده در این مطالعه توانایی قابل قبولی در حذف کدورت از رواناب سنتزی را داشته و بیشترین میزان حذف در شدت بارش ۳۷ میلی متر بر ساعت و تخلخل ۲۲/۹٪ به میزان ۷۰٪ حاصل شد. با مقایسه نتایج حاصل از بررسی پارامترهای فوق مشخص شد که تغییر تخلخل تأثیری بر کیفیت پساب خروجی ندارد. همچنین با افزایش شدت بارش میزان کارایی سیستم در حذف آلاینده‌ها هرچند با شیب بسیار کم، کاهش یافت. به طور کلی این روش توانایی خوبی در حذف TSS و کدورت از خود نشان داد ولی کارایی مناسبی در حذف بار آلی و جامدات محلول نداشت.

**واژگان کلیدی:** روسازی بتنی متخلخل، رواناب شهری، ذرات معلق، شدت بارش، درصد تخلخل

## ۱- مقدمه

مواد مغذی، فلزات سنگین، مواد آلی مانند هیدروکربن‌ها و هیدروکربن‌های آروماتیک (PAHs)<sup>۱</sup>، که از ترکیبات مضر کودهای استفاده شده برای فضای سبز، فضولات حیوانات و پرندگان، فلزات سنگین و ترکیبات مختلف ناشی از عبور و مرور

رواناب شهری یکی از نگرانی‌های اصلی زیست محیطی برای جلوگیری از کاهش کیفیت منابع آب بوده و کنترل جریان ناشی از آن جزء دغدغه‌های مدیریت شهری محسوب می‌شود [1]. در هنگام بارش و یا پس از ذوب شدن برف، آلاینده‌هایی همچون

1 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

زهکشی طبیعی توصیف کرد [9].

جدول ۱. کیفیت آلاینده‌های رواناب شهری

Parameter	Quantity (mg/L)		
	Tehran 2010	Tehran 2014	Shiraz 2008
PO <sub>4</sub> -P	5.5	3.36-8.03	-
NO <sub>3</sub>	31.7	18.90-26.70	-
Zn	0.053	0.033-1.394	0.001-2.67
Cu	0.028	0.017-0.232	0.001-0.016
COD	781	246-1170	-
TDS	491	450-850	30-760
TSS	609	400-1050	10-2100

Table 1. Urban runoff characteristics

سیستم روسازی متخلخل بتنی (PCPS)<sup>۱</sup> نوعی از روسازی نفوذپذیر است که علاوه بر تحمل بارهای ترافیکی اعم از وسایل نقلیه و عابر پیاده به رواناب‌ها و فاضلاب‌های سطحی اجازه عبور و نفوذ به لایه‌های زیرین روسازی و یا خاک بستر را می‌دهد. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص استفاده از روسازی‌های متخلخل بتنی و عوامل موثر بر ویژگی‌های آن انجام پذیرفته است [10, 11, 12]. این نوع روسازی عملکردی مانند فیلترهای شنی دارد که در آن آب پس از عبور از میان سنگدانه‌ها با ابعاد مختلف و ژئوتکستایل، فیلتر می‌شود و قابلیت استفاده برای طیف گسترده‌ای از مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی با بار ترافیکی سبک را دارد. اصل کلی در مهندسی روسازی نفوذپذیر، جمع‌آوری، نفوذ و تصفیه رواناب شهری برای حمایت از تغذیه آب‌های زیر زمینی و یا تصفیه رواناب‌ها برای تخلیه مستقیم به آب‌های پذیرنده است [13, 14].

روسازی نفوذپذیر عملکرد مناسبی در کاهش آثار آلودگی و همچنین بهبود کیفیت رواناب شهری دارد. اصلی‌ترین سازوکار آن در حذف آلودگی‌ها و بهبود کیفیت رواناب شهری فیلتراسیون بوده ولی عوامل دیگری همچون جذب، ته‌نشینی، تجزیه زیستی، و تبخیر نیز در این راستا موثر است. به طور کلی فرایندهای اصلی حذف آلودگی رواناب شهری توسط سیستم روسازی نفوذپذیر می‌تواند شامل موارد زیر باشد [15].

وسایل نقلیه، باقی مانده سموم دفع آفات، پاتوژن‌ها و ذرات مربوط به آلاینده‌های هوا ناشی می‌شوند را از سطح روسازی شسته و به آب‌های پذیرنده تخلیه و یا داخل خاک‌های کنار آنها نفوذ کرده و موجب آلوده شدن منابع آب و خاک می‌شود و ممکن است آثار زیست محیطی و اکولوژیکی پیچیده‌ای ایجاد کند. تخلیه مستقیم و بدون تصفیه رواناب سبب آلودگی خاک، آب‌های سطحی و زیرزمینی شده و قادر به تحت تاثیر قرار دادن کل اکوسیستم خواهد بود. همچنین آثار غیر قابل پیشبینی بر سلامت عمومی و زندگی انسان خواهد داشت [2].

مطالعات حاکی از بالا بودن میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، جامدات معلق (TSS)، کدورت، مواد مغذی و فلزات سنگین در رواناب‌های جاری شده در جاده‌ها و خیابان‌ها پس از بارش باران است. رواناب دارای زیست تخریب پذیری نسبتاً پایینی بوده بطوریکه نسبت BOD<sub>5</sub> به COD در این رواناب‌ها کمتر از ۰/۳ است [3].

کیفیت رواناب‌های جاده‌ها و خیابان به نوع سطحی که آب باران با آن تماس پیدا می‌کند، کیفیت هوای محیط، کاربری نواحی از جمله صنعتی، تجاری یا مسکونی و همچنین فعالیت‌های انسانی مانند شدت ترافیک وابسته است [4, 5]. نمونه‌ای از آنالیز رواناب شهری در جدول (۱) ارائه شده است [6, 7, 8].

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نوسان زیادی در پارامترهای کیفی رواناب شهری وجود داشته که علت آنرا می‌توان به زمان و فصل بارش، شدت و میزان بارش و مکان نمونه‌برداری مرتبط دانست.

سیستم‌های سستی رایج، رواناب ناشی از نزولات جوی همچون بارش باران و ذوب شدن برف را جمع‌آوری کرده و به نزدیکترین نهر و یا شبکه فاضلاب هدایت می‌کنند. این نوع سیستم‌ها ضمن دارا بودن هزینه ساخت، بهره‌برداری و نگهداری نسبتاً بالا، باعث افزایش سطوح نفوذ ناپذیر روی سطح زمین شده‌اند. در دهه‌های اخیر برای پاسخ‌گویی به این چالش استفاده از سیستم زهکشی پایدار شهری که پاسخ طبیعی حوضه آبی به رواناب یعنی نفوذ به زمین، تبخیر، تضعیف و سپس جاری شدن روی سطح، پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که این سیستم زهکشی را می‌توان به عنوان روشی برای مدیریت سیلاب‌های شهری با عملکردی مشابه

1 Previous Concrete Pavement System

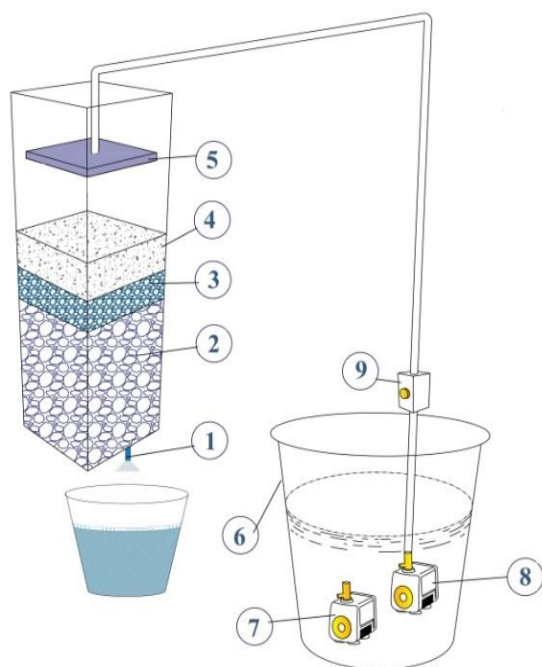
با توجه به تغییر شدت بارش و به تبع آن تغییر کمیت و کیفیت رواناب جاری شده روی سطح روسازی PCPS، در این مطالعه تاثیر هم زمان میزان تخلخل و شدت بارش باران بر کمیت و کیفیت رواناب به عنوان هدف اصلی پژوهش انتخاب شد. در این پژوهش کارایی سیستم روسازی متخلخل بتنی در حذف جامدات معلق و محلول، میزان اکسیژن خواهی شیمیایی، کدورت و هدایت الکتریکی از رواناب شهری بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی و به صورت ناپیوسته انجام گرفته است. در این پژوهش از مواد و تجهیزات مختلفی با توجه به ضرورت و کاربرد آنها استفاده شده که در ادامه شرح داده شده است.

شکل ۱، پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده:

۱- خروجی پساب ۲- لایه اساس ۳- لایه فیلتر ۴- رویه بتن متخلخل ۵- صفحه بارش ۶- مخزن تغذیه ۷- پمپ اختلاط ۸- پمپ تزریق ۹- شیر کنترلی



**Fig. 1.** Schematic of the used system  
1-System effluent 2-Base layer 3-Filter layer 4-previous concrete 5-rainfall shower 6-System feed tank 7-Mixing pumpe 8-Feed pumpe 9-Control valve

- بدام انداختن آب توسط ساختار روسازی نفوذپذیر برای دفع ثانویه توسط تبخیر، نفوذ به لایه‌های زیرین خاک و یا پمپاژ و استفاده مجدد؛
- فیلتراسیون توسط لایه‌های روسازی، جذب بوسیله سنگدانه‌های بستر و ته نشینی؛
- جذب بیولوژیکی و تجزیه زیستی آلاینده‌ها توسط فعالیت‌های میکروبی موجود در محیط متخلخل؛
- تبخیر و انتقال توسط جریان آب.

در پژوهشی کیفیت رواناب خروجی از روسازی بتنی متخلخل با روسازی آسفالتی مرسوم مقایسه شده که نتایج حاکی از کاهش ۲۷٪ تا ۸۴٪ فسفر کل (TP)، ۴۳٪ نیتروژن کل (TN)، ۸۱٪ جامدات معلق کل (TSS) و ۸۶٪ نیتروژن آمونیاکی دارد [16]. در پژوهشی دیگر کیفیت رواناب خروجی از سیستم روسازی بتنی متخلخل و رواناب ناشی از روسازی آسفالتی مرسوم با یکدیگر مقایسه و مشخص شده است که روسازی بتنی متخلخل تاثیر زیادی در حذف COD ندارد [17]. کویایی و همکاران میزان حذف کدورت، COD و TSS از رواناب سنتزی بوسیله بتن متخلخل را به ترتیب برابر ۳۸٪، ۱۱٪، ۷۳٪ گزارش نموده‌اند. در این پژوهش همچنین تاثیر استفاده از بتن متخلخل در کاهش هدایت الکتریکی (EC) ناچیز گزارش شده است [18]. در مطالعه دیگری میزان ازت کل و نیترات حاصل از خروجی روسازی متخلخل بتنی با رواناب ناشی از روسازی آسفالتی مرسوم مقایسه شده است [19]. بر اساس نتایج این پژوهش روسازی متخلخل بتنی تاثیر قابل توجهی در حذف ترکیبات ازت از رواناب ندارد. در مطالعه‌ای تاثیر ضخامت لایه فیلتر و اساس همچنین نقش قسمت‌های مختلف روسازی نفوذپذیر در بهبود کیفیت رواناب سنتزی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج گزارش شده حاکی از عملکرد مناسب تمام لایه‌ها و ضخامت‌ها و میزان حذف جامدات معلق (SS) بین ۷۹/۸٪ تا ۹۸/۶٪ است. همچنین لایه فیلتر با ضخامت ۵ سانتی‌متر بهترین عملکرد را در حذف COD و نیتروژن آمونیاکی به ترتیب به میزان ۹٪ و ۳۲/۵٪ داشته است [20]. در مطالعه‌ای روی کارایی بتن متخلخل در حذف فلزات سنگین از رواناب میزان Zn و Cu در خروجی نسبت به رواناب به ترتیب ۹۰٪ و ۸۷٪ کاهش داشته است [21].

۱-۲- پایلوت آزمایشگاهی

پایلوت ساخته شده برای انجام این پژوهش که شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده است متشکل از یک مخزن از جنس فولاد گالوانیزه، صفحه بارش، مخزن رواناب ستزی، پمپ مستغرق و شیر کنترلی برای تنظیم دبی بود. مخزن از ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر، ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و مقطع مربعی به ضلع ۳۰ سانتی‌متر که در قسمت کف آن یک سوراخ برای خروج رواناب در نظر گرفته شده بود، ساخته شد.

داخل مخزن یک ستون از روسازی بتنی متخلخل شبیه سازی شد که از قسمت پایین شامل یک لایه اساس ۴۵ سانتی‌متری، یک لایه فیلتر ۱۰ سانتی‌متری و در نهایت یک لایه بتن متخلخل به ضخامت ۱۲/۵ سانتی‌متر بود. لایه اساس در ضخامت‌های ۱۵ سانتی‌متری ریخته شده و توسط وزنه به روش دینامیکی تراکم یافت. پس از تراکم لایه اساس، لایه فیلتر نیز با همان روش متراکم شد و در نهایت نیز توسط تراز دستی شیب آن کنترل و لایه بتنی متخلخل بر روی آن نصب شد. صفحه بارش شامل یک سردوش مربعی به ضلع ۲۴/۵ سانتی‌متر بوده که برای استفاده با فشار کم آب طراحی شده بود.

۲-۲- رویه بتنی متخلخل

برای برآورد ضخامت رویه بتنی متخلخل استفاده شده در این پژوهش از نرم‌افزار PerviousPave version 1.0 و برای محاسبه طرح اختلاط و دانه بندی مصالح از راهنمای ACI 522R-10 استفاده شده است [22].

۱-۲-۲- طرح اختلاط بتن

در این پژوهش برای مقایسه تاثیر میزان تخلخل بر کیفیت رواناب خروجی، چهار درصد تخلخل ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ مورد آزمایش قرار گرفت. برای محاسبه طرح اختلاط نیز از راهنمای ACI 522R-10 استفاده شد. همچنین برای اختلاط بتن از سیمان تپ ۲ تهران استفاده و آب مورد نیاز نیز از طریق آب شهری تامین شد. جدول (۲) جزئیات طرح‌های اختلاط بتن را نشان می‌دهد.

جدول ۲. طرح اختلاط مربوط به درصد‌های تخلخل

تخلخل مورد نظر (%)	سیمان (Kg/m <sup>3</sup> )	مصالح سنگ دانه‌ای (Kg/m <sup>3</sup> )	آب (Kg/m <sup>3</sup> )
۱۵	۴۳۹/۰۲۴	۱۷۴۱/۹۰۵	۱۳۱/۷۰۷
۲۰	۳۵۷/۷۲۴	۱۷۴۱/۹۰۵	۱۰۷/۳۱۷
۲۵	۲۸۴/۵۵۰	۱۷۴۱/۹۰۵	۸۵/۳۶۵
۳۰	۲۲۴/۱۵۰	۱۷۴۱/۹۰۵	۶۷/۲۴۵

Table 2. Concrete mixtures

لازم به ذکر است برای تغییر در میزان تخلخل مقدار خمیر سیمان مربوط به هر یک از تخلخل‌ها تغییر کرده و میزان سنگدانه‌ها و نسبت‌های آنها در کلیه آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۲- اندازه گیری میزان تخلخل و نفوذپذیری

پس از محاسبه طرح اختلاط و قبل از ساخت دال‌ها، میزان تخلخل و نفوذپذیری برای هر یک از طرح‌های اختلاط اندازه گیری شد. برای اندازه گیری نفوذپذیری از دستگاه موجود در آزمایشگاه مطابق شکل (۲) که اساس کار آن منطبق بر روش هد افتان<sup>۱</sup> است استفاده شد.

شکل ۲. دستگاه اندازه گیری نفوذپذیری به روش هد افتان

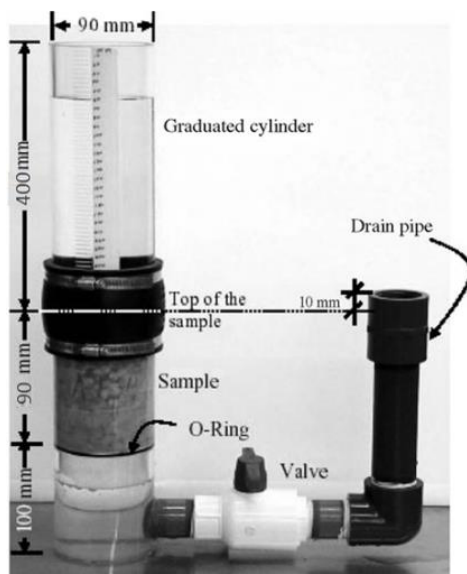


Fig. 2. Falling head hydraulic conductivity measurement device

<sup>1</sup> Falling-Head

## ۲-۳- مواد و تجهیزات

در این پژوهش برای اندازه‌گیری جامدات معلق (TSS) و جامدات محلول (TDS) از آون ۵۵ لیتری دیجیتالی ساخت شرکت آرا طب فن استفاده شد (مطابق روش شماره 2540 کتاب استاندارد متد). از دستگاه اسپکتوفتومتر مدل DR4000 و COD راکور مدل ۲۰۰ DRB محصول شرکت Hach به منظور آماده سازی و تعیین میزان COD استفاده شد. از دستگاه‌های هدایت سنج الکتریکی مدل Mi 805 ساخت شرکت Martini و کدورت سنج مدل P2100 ساخت شرکت Hach نیز به ترتیب برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و کدورت استفاده شد. برای توزین مواد مصرفی از ترازوی دیجیتالی Mettler PJ 300 ساخت شرکت Kern با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن متخلخل نیز مطابق استاندارد BS EN 12390-3:2009 و با استفاده از دستگاه Compression Machine Automatic محصول شرکت ELE اندازه‌گیری شد. کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده نیز از نوع آزمایشگاهی و از شرکت‌های معتبر تهیه شد.

## ۲-۴- رواناب سنتزی

مشخصات رواناب سنتزی استفاده شده در این پژوهش در جدول (۳) آورده شده است. برای تهیه رواناب از مواد جامد جمع آوری شده از سطح یکی از بزرگراه‌های تهران استفاده شد. بدین منظور ابتدا مواد جمع آوری شده از سطح بزرگراه در داخل آزمایشگاه دانه‌بندی شده و سپس مواد عبوری از الک ۲۰۰ بدین منظور مورد استفاده قرار گرفت. برای تامین بار آلی رواناب نیز از شکر و نفتالین استفاده شد.

برای آماده سازی رواناب سنتزی مقدار مورد نیاز از هر یک از مواد به یک بالون ۱ لیتری منتقل شده و برای حل شدن تمام ترکیبات در آب به مدت ۱ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. سپس محلول حاصل با ۴۹ لیتر آب شهری مخلوط و با استفاده از دو عدد پمپ شناور که در کف مخزن تعبیه شده بودند به مدت ۱ ساعت هم زده و پس از آن رواناب به سیستم تزریق شد. لازم به ذکر است که محدوده پارامترهای رواناب سنتزی مورد استفاده بر اساس مطالعات کیفیت رواناب شهر تهران انتخاب شده است [7].

بدین منظور پس از خروج حباب‌های هوا از نمونه استوانه‌ای و تنظیم هد آب بالای سطح بتن، مدت زمانی که طول می‌کشد تا پس از باز کردن شیر خروجی هد آب در دوطرف نمونه مساوی شود ثبت و توسط رابطه (۱) میزان نفوذپذیری محاسبه شد.

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

در این رابطه:

k: ضریب نفوذپذیری (cm/S)

a: مساحت مقطع لوله آب (cm<sup>2</sup>)

L: طول نمونه (cm)

A: سطح مقطع نمونه (cm<sup>2</sup>)

t: مدت زمان لازم برای رسیدن آب از h<sub>1</sub> به h<sub>2</sub> (S)

h<sub>1</sub>: ارتفاع اولیه آب در لوله (cm)

h<sub>2</sub>: ارتفاع ثانویه آب در لوله (cm)

برای اندازه‌گیری میزان تخلخل ابتدا نمونه‌های با حجم مشخص مانند شکل (۳) به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس داخل آون قرار داده و وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس برای خروج هوای محبوس در تخلخل بتن، آن را به مدت کافی داخل محفظه پر از آب متصل به پمپ خلا قرار داده و بدون خارج کردن از آب توسط ترازوی ارشمیدسی وزن غوطه‌وری آن اندازه‌گیری و میزان تخلخل با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\text{Void Content} = \left(1 - \frac{V_s}{V_T}\right) \times 100 \quad (2)$$

در رابطه فوق V<sub>s</sub> حجم قسمت جامد بتن و V<sub>T</sub> حجم کل نمونه بتنی است. همچنین V<sub>s</sub> از رابطه (۳) محاسبه شده که در آن W<sub>d</sub> وزن خشک نمونه بتنی و W<sub>f</sub> وزن غوطه‌وری که برابر وزن آب هم حجم قسمت جامد بتن است، می‌باشد.

$$V_s = W_d - W_f \quad (3)$$

شکل ۳. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۹ سانتیمتر برای اندازه‌گیری تخلخل و نفوذپذیری



Fig. 3. Previous concrete sampels for porosity and hydrolic conductivity measurement

نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری پارامترها در داخل یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری تخلخل نمونه‌های بتنی استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۹ سانتی‌متر در جدول (۴) آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که میزان تخلخل بدست آمده با تخلخل مفروض برای محاسبه طرح اختلاط ناچیزی دارد که نشان دهنده مناسب بودن طرح اختلاط محاسبه شده است. پس از اطمینان از درستی طرح‌های اختلاط محاسبه شده، میزان نفوذپذیری هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. شکل (۴) تغییرات میزان نفوذپذیری با افزایش میزان تخلخل هر یک از نمونه‌های بتن را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مشخصات بتن برای اندازه‌گیری میزان تخلخل و نفوذپذیری

میزان تخلخل مورد نظر (%)	وزن خشک (g)	وزن غوطه‌وری (g)	حجم نمونه (cm <sup>3</sup> )	تخلخل محاسبه شده (%)
۱۵	۱۲۳۲/۳۴	۷۴۳/۳۴	۵۷۲/۵۵۵	۱۴/۶
۲۰	۱۱۳۸/۴۰	۶۹۷/۰۳	۵۷۲/۵۵۵	۲۲/۹
۲۵	۱۱۰۱/۳۵	۶۸۰/۰۶	۵۷۲/۵۵۵	۲۶/۴
۳۰	۱۰۰۱/۲۶	۶۱۱/۳۰	۵۷۲/۵۵۵	۳۱/۹

Table 4. Pervious concrete samples characteristic

همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان نفوذپذیری با افزایش تخلخل افزایش یافته که میزان این افزایش بعد از تخلخل ۲۲/۹٪ با شیب بیشتری همراه بوده است. از لحاظ هیدرولیکی هرچه میزان نفوذپذیری بالاتر باشد رواناب با سرعت بیشتری به لایه‌های زیرین نفوذ کرده و سریعتر از سطح روسازی حذف شده و تجمع کمتر رواناب روی سطح روسازی را در پی خواهد داشت. در یک کار پژوهشی در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در بتن متخلخل مشاهده شد که با افزایش درصد تخلخل بتن میزان نفوذپذیری افزایش می‌یابد که نتایج آن از لحاظ کیفی با نتایج مطالعه حاضر هماهنگی دارد [24].

جدول ۳. مشخصات رواناب سنتزی مورد استفاده

پارامتر	مقدار
(mg/L) TSS	۶۴۰-۶۶۰
(mg/L) TDS	۷۶۰-۷۸۰
(mg/L) COD	۲۴۰-۳۰۰
(μS/cm) EC	۶۵۰-۶۹۰
(NTU) Turbidity	۳۶/۵-۴۱/۸
pH	۵/۵ - ۶

Table 3. Syntetic runoff characteristics

#### ۲-۵- شدت بارش

برای تعیین محدوده شدت بارش‌ها برای انجام آزمایش‌ها ابتدا داده‌های موجود بین سال‌های ۱۹۵۱ تا سال ۲۰۱۰ میلادی برای بیشینه بارش روزانه برای هر یک از دوازده ماه سال (مربوط به ایستگاه سینوپتیک مهرآباد) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در محاسبه بیشینه شدت بارش محتمل برای پروژه‌های شهری و موارد مشابه، مقدار شدت بارش برای دو ایستگاه مهرآباد و شمال تهران به ترتیب برابر ۱۹۷/۴۱ و ۲۲۳/۵۰ میلی‌متر بر ساعت گزارش شده است [23]. در نتیجه محدوده بین ۲۵ تا ۲۵۰ میلی‌متر بر ساعت به عنوان شدت بارش در تحقیق حاضر انتخاب شد.

#### ۲-۶- روش کار

پس از آماده سازی پایلوت و پر کردن آن توسط لایه اساس و فیلتر، رویه بتنی با درصد تخلخل مشخص در داخل آن نصب شد. قبل از راه اندازی و نمونه‌گیری از پساب، ابتدا ستون شبیه‌سازی شده از روسازی نفوذپذیر با استفاده از آب شهری (توسط بیشینه دبی پمپ مستغرق) به مدت ۳۰ دقیقه شستشو داده و پس از آن به سیستم ۳۰ دقیقه زمان داده شد تا آب موجود در داخل آن به صورت کامل خارج شود. در ادامه بمدت ۶۰ دقیقه رواناب سنتزی با دبی مشخص به سیستم تزریق شد (لازم به ذکر است که در بیشینه شدت بارش مورد آزمایش در این پژوهش میزان آب عبوری از سطح بتن متخلخل تقریباً معادل بارش سالانه شهر تهران بوده است). در این مطالعه هر ۱۰ دقیقه، ۱۰۰ میلی لیتر از پساب خروجی برداشت و به یک ظرف ۵۰۰ میلی لیتری منتقل شده تا حجم آن در ۵ بار برداشت به ۵۰۰ میلی لیتر برسد. در نهایت نیز در صورت نیاز

## ۳-۳- حذف جامدات معلق

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان TSS برای چهار تخلخل مورد بررسی در این پژوهش نشان از کارایی مناسب همه نمونه‌ها در حذف جامدات معلق دارد. شکل (۶) تاثیر همزمان تغییر میزان تخلخل و شدت بارش بر میزان حذف جامدات معلق را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تغییرات میزان تخلخل تاثیری بر کاهش یا افزایش کارایی سیستم در حذف TSS ندارد. همچنین تغییرات شدت بارش نیز تاثیر به‌سزایی بر کارایی سیستم در حذف TSS ندارد. با این حال شیب کلی منحنی‌ها نشان از کاهش اندک راندمان حذف با افزایش شدت بارش دارد. همانطور که در شکل (۶) قابل مشاهده است کارایی سیستم برای همه تخلخل‌ها بسیار بالا بوده و میزان حذف TSS در آنها بین ۸۴٪ تا ۸۹٪ در تغییر بوده است. در پژوهشی مشابه راندمان حذف TSS از رواناب توسط Niu و همکاران در محدوده ۷۹/۸٪ تا ۹۸/۶٪ ذکر شده است [20].

شکل ۶. تاثیر تغییر تخلخل و شدت بارش بر میزان حذف TSS

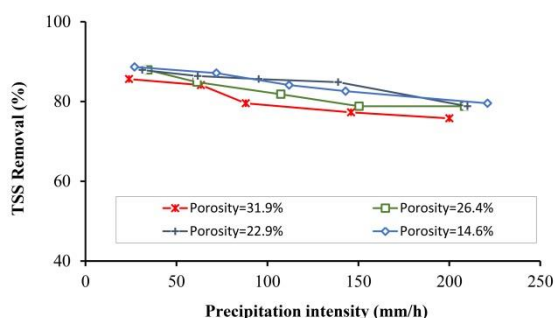


Fig. 6. Effect of porosity and rainfall intensity on TSS removal

سازوکار حذف جامدات معلق موجود در رواناب، به دام افتادن ذرات در خلل و فرج بستر بوده که در این سیستم اندازه منافذ از اهمیت زیادی برخوردار است. دلیل عدم تغییر میزان حذف TSS با تغییر تخلخل، احتمالاً به عدم تغییر اندازه منافذ با تغییر میزان تخلخل باز می‌گردد. در پژوهش انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی تخلخل بتن نتیجه گرفته شد که اندازه منافذ فقط با تغییر دانه‌بندی سنگدانه‌ها میسر بوده و تغییر تخلخل با تغییر میزان خمیر سیمان تاثیری بر اندازه منافذ ندارد [26]. بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری نمود که با تغییر میزان خمیر سیمان تنها تعداد منافذ تغییر می‌کند و تغییر در قطر منافذ

## شکل ۴. تغییرات میزان نفوذپذیری با افزایش میزان تخلخل

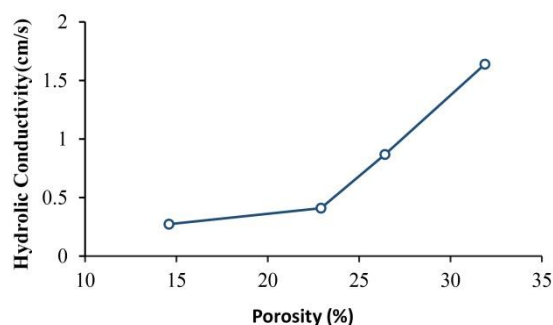


Fig. 4. Effect of porosity on hydrolic conductivity

## ۳-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری در بتن متخلخل به شدت متأثر از نسبت طرح اختلاط، درصد ریز دانه، نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، چگونگی تراکم، مدت زمان و میزان بار وارد شده برای تراکم و میزان تخلخل است. شکل (۵) تاثیر تغییرات تخلخل بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج حاکی از کاهش مقاومت فشاری با افزایش میزان تخلخل است. دلیل این امر را می‌توان به تغییرات میزان تخلخل با تغییر مقدار خمیر سیمان نسبت داد. در پژوهشی که نتایج آن به نتایج پژوهش حاضر نزدیک است، تاثیر ضخامت خمیر سیمان بر عملکرد بتن متخلخل مورد بررسی قرار گرفته و این نتیجه حاصل شده است که هرچه عیار سیمان بتن بیشتر باشد ضخامت خمیر سیمانی که دور سنگدانه‌ها را احاطه می‌کند بیشتر و در نهایت میزان تخلخل کمتر می‌شود. با کاهش میزان تخلخل دلیل افزایش میزان و اندازه قفل و بست سیمانی ناشی از خمیر سیمانی چسبیده به دور سنگدانه‌ها، بار بین این قفل و بست‌ها تقسیم و تنش فشاری کمتر شده و در نهایت مقاومت فشاری افزایش می‌یابد [25].

## شکل ۵. تغییرات میزان مقاومت فشاری با تغییر میزان تخلخل

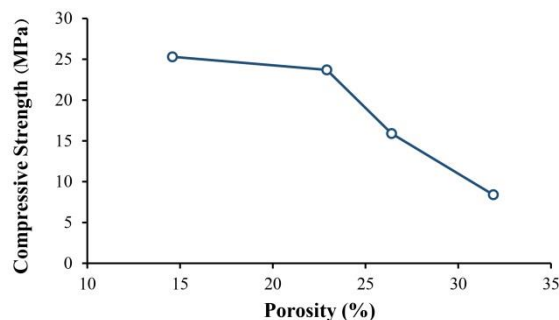


Fig. 5. Effect of porosity on compressive Strength

دارای تغییرات قابل توجهی نبوده است. بنابراین سیستم کارایی چندانی در حذف TDS و EC از رواناب ستری نیز نداشته است. شکل (۸) نتایج حاصل از حذف میزان جامدات محلول و شکل (۹) نتایج حاصل از حذف EC با در نظر گرفتن تغییر همزمان میزان تخلخل و شدت بارش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان حذف برای TDS برابر ۱۵/۶٪ و برای EC برابر ۲۰/۸٪ بوده که در تخلخل ۲۲/۹٪ حاصل شده است. در این خصوص نیز تخلخل تاثیر معنی داری بر راندمان حذف TDS و EC نداشته است.

شکل ۸. تاثیر تغییر تخلخل و شدت بارش بر میزان حذف TDS

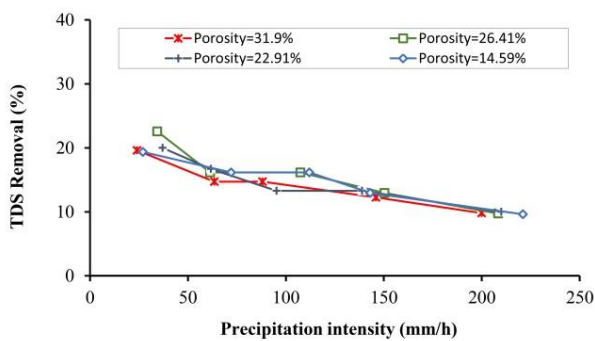


Fig. 8. Effect of porosity and rainfall intensity on TDS removal

در مطالعه‌ای در مقیاس واقعی میزان TDS و EC در پساب خروجی از سیستم روسازی نفوذپذیر در فصل بهار، تابستان و پاییز نسبت به رواناب ناشی از روسازی آسفالتی مرسوم افزایش داشته درحالیکه در فصل زمستان به دلیل نمک پاشی بر سطح روسازی آسفالتی، عکس این قضیه مشاهده شده است [16].

شکل ۹. تاثیر تغییر تخلخل و شدت بارش بر میزان حذف EC

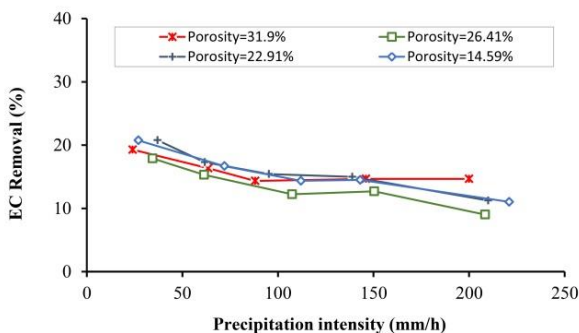


Fig. 9. Effect of porosity and rainfall intensity on EC removal

تاثیر تخلخل و شدت بارش بر راندمان تصفیه رواناب شهری توسط ...

بتن قابل صرف نظر کردن است. همچنین به مرور زمان منافذ بتن توسط ذرات معلق گرفته شده که باعث اختلال در کارایی سیستم می‌شود. بنابراین پارامترهایی چون تخلخل بتن و قطر منافذ آن باید متناسب با میزان جامدات معلق رواناب و همچنین عمر مفید روسازی انتخاب شود.

### ۳-۴- حذف COD

در این پژوهش تغییرات میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) بعنوان معیار تغییرات میزان بار آلی در نظر گرفته شد. شکل (۷) تاثیر همزمان تغییر میزان تخلخل و شدت بارش بر میزان حذف COD را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه فرایند موجود در سیستم مورد استفاده فقط فیلتراسیون و جذب توسط سنگدانه‌ها است، کارایی زیادی در حذف میزان COD مشاهده نشد.

شکل ۷. تاثیر تغییر تخلخل و شدت بارش بر میزان حذف COD

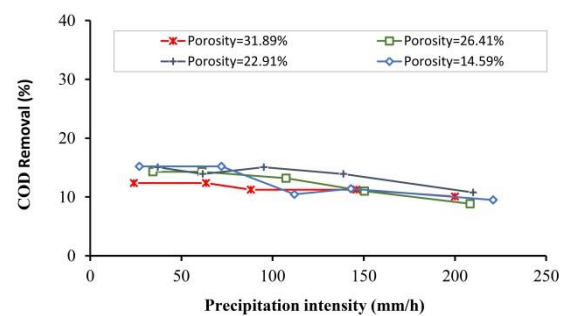


Fig. 7. Effect of porosity and rainfall intensity on COD removal

همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود در سیستم مورد مطالعه میزان حذف COD بین ۹٪ تا ۱۵٪ در تغییر بوده که بیشترین میزان حذف در تخلخل ۲۲/۹٪ حاصل شده است. این میزان حذف COD را می‌توان به مواد معلق حذف شده در طی فرایند ارتباط داد. در بیشتر مطالعات انجام شده در این راستا میزان حذف بار آلی در سیستم‌های روسازی نفوذپذیر با توجه به نوع مصالح استفاده شده در لایه‌های مختلف و همچنین وجود و یا عدم وجود جاذب در داخل سیستم متغیر گزارش گردیده است [18, 20, 27].

### ۳-۵- حذف TDS و EC

نتایج این پژوهش نشان داد که پارامترهای آلودگی ناشی از جامدات محلول، بدلیل قدرت جذب ناچیز سنگدانه‌ها مورد استفاده



۳-۶- حذف کدورت

وجود جامدات معلق، مواد آلی و همچنین غیر آلی از عوامل کدورت در رواناب شهری محسوب می‌شود. از آنجایی که فرایند اصلی در سیستم روسازی بتنی متخلخل، فیلتراسیون و جذب توسط سنگدانه‌ها است، بنابراین میزان حذف کدورت نیز همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، مقدار قابل قبولی بوده است. در این خصوص نیز تاثیر تخلخل بر میزان راندمان حذف کدورت ناچیز بوده است. همچنین افزایش شدت بارش منجر به کاهش راندمان حذف کدورت شده بطوریکه بیشترین مقدار حذف به میزان حدود ۷۰٪ در شدت بارش ۳۷ میلی متر بر ساعت و تخلخل ۲۲/۹٪ حاصل شده است.

مطالعات آزمایشگاهی نشان داد تاثیر تغییرات مقدار جریان ورودی و غلظت جامدات معلق رواناب بر میزان رسوب گذاری در سیستم روسازی بتنی متخلخل قابل توجه نیست [28].

شکل ۱۰. تاثیر تغییر تخلخل و شدت بارش بر حذف کدورت

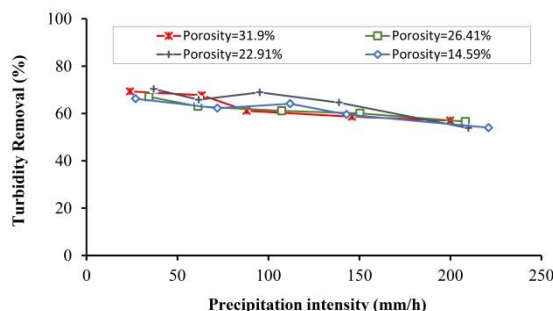


Fig. 10. Effect of porosity and rainfall intensity on turbidity removal

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر تغییرات تخلخل و شدت بارش بر کارایی سیستم روسازی بتنی متخلخل پرداخته شده و با سنجش میزان COD, TDS, EC, TSS و کدورت از پساب خروجی از سیستم نتایج زیر قابل استناد است.

- میزان تخلخل تاثیری بر کارایی سیستم در حذف پارامترهای ذکر شده ندارد و تغییرات شدت بارش که به عنوان بار هیدرولیکی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، تاثیر قابل اغماضی بر عملکرد PCPS در بهبود کیفیت رواناب می‌گذارد.

- PCPS قادر به کاهش مقدار قابل توجه جامدات معلق، کدورت و رسوبات از رواناب سنتزی بوده و تاثیر ناچیزی در حذف COD, TDS و هدایت الکتریکی از رواناب سنتزی دارد.

- با مقایسه نتایج حاصل از بررسی میزان کارایی PCPS در حذف TSS, COD, TDS، هدایت الکتریکی و کدورت این نتیجه حاصل می‌شود که فرآیند غالب در این سیستم فیلتراسیون بوده و سهم فرایند جذب در آن ناچیز است.

- با توجه به عدم توانایی PCPS در حذف آلاینده‌های محلول و کاهش بار آلی رواناب، باید از تلفیق این نوع روسازی با فرآیندهای دیگر بدین منظور بهره جست.

در پایان خاطر نشان می‌سازد که در مورد استفاده از سیستم‌های روسازی بتنی متخلخل علاوه بر مسائل محیط زیستی باید نکاتی چون مقاومت بتن، سهولت اجرای کار و همچنین هزینه‌های مربوطه نیز مد نظر قرار گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از اداره پژوهش دانشگاه تربیت مدرس و همچنین مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهرداری تهران برای حمایت مالی پیشبرد این پژوهش تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

References

۶- مراجع

[1] Lee B.H., Scholz, M. (2006) Application of the self-organization map (SOM) to assess the heavy metal removal performance in experimental constructed wetlands. *Water research*, **40**(18): 3367-3374.

[2] Li, C., Liu M., Hu Y., Gong J., Sun F., Xu, Y., (2014) Characterization and first flush analysis in road and roof runoff in Shenyang, China, *Water Science & Technology*, **70**(3): 397-406.

[3] Zhang M., Chen H., Wang J., Pan G. (2010) Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization, *Journal of Environmental Sciences*, **22**(1): 40-46.

[4] Davis B., Birch G. (2010) Comparison of heavy metal loads in stormwater runoff from major and minor urban roads using pollutant yield rating curves, *Environmental Pollution*, **158**(8): 2541-2545.

[5] Shorshani M. F., Bonhomme C., Petrucci G., André M., Seigneur C. (2014) Road traffic impact on urban

study, *Case Studies in Construction Materials*, **1**: 1-9.

[18] Koupai J.A., Nejad S.S., Mostafazadeh-Fard S., Behfarnia, K. (2015) Reduction of Urban Storm-Runoff Pollution Using Porous Concrete Containing Iron Slag Adsorbent, *Journal of Environmental Engineering*, **142**(2): 04015072.

[19] Brown A.R., Borst M. (2015) Nutrient infiltrate concentrations from three permeable pavement types, *Journal of Environmental Management*, **164**: 74-85

[20] Niu, Z.G., Lv, Z.W., Zhang, Y. and Cui, Z.Z., (2016) Stormwater infiltration and surface runoff pollution reduction performance of permeable pavement layers. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**(3), 2576-2587.

[21] Haselbach, L., Poor, C. and Tilson, J., 2014. Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete. *Construction and Building Materials*, **53**, 652-657.

[22] ACI, A., 522R-10. 2010. Report on pervious concrete. ACI Committee, 522, p.38.

[23] Daryabari, S.J., Mohammadi, H. and Rezaie, Gh., (2012) Spatial Analysis of probable maximum precipitation in Iran. *Quarterly Geographical Journal of Territory*, **9**(34): 113-124, (In Persian).

[24] Montes, F. and Haselbach, L., 2006. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete. *Environmental Engineering Science*, **23**(6), 960-969.

[25] Torres A., Hu J., (2015) The Effect of the Cementitious Paste Thickness on the Performance of Pervious Concrete, *Construction and Building Materials*, **95**:850-859.

[26] umanasooriya M. S., Neithalath N. (2011) Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction, *Cement and Concrete Composites*, **33**(8): 778-787.

[27] Berbee R., Rijs G., De Brouwer R., Van Velzen L. (1999) Characterization and treatment of runoff from highways in the Netherlands paved with impervious and pervious asphalt, *Water Environment Research*, **1**: 183-190.

[28] Singhal, N., Elefsiniotis, T., Weeraratne, N. and Johnson, A., 2008. Sediment retention by alternative filtration media configurations in stormwater treatment. *Water, air, and soil pollution*, **187**(1-4), 173-180.

water quality: a step towards integrated traffic, air and stormwater modelling, *Environmental Science and Pollution Research*, **21**(8): 5297-5310.

[6] Kamali M., (2010) Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. *M.Sc. Thesis*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, (In Persian).

[7] Ghasemi Moghadam A., (2014) Impact of genus aggregate type in filter and base layers of permeable pavement on pollutants removal from surface runoff. *M.Sc. Thesis*, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (In Persian).

[8] Parvinnia M., Rakhshandehroo G., Monajemi P., (2008) Investigation of Quality and Reclamation of Urban Storm Runoff in City of Shiraz, *Journal of Water and Wastewater*, **19**(2): 46-55, (In Persian).

[9] Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. and Shaffer, P., 2007. The SUDS manual, no C697. *Construction Industry and Research Association (CIRIA)*. London, UK.

[10] Shirgir B., Hassani A., Alizadeh Goodarzi H. (2011) The Influence of Aggregate Gradation on the Permeability and Mechanical Properties of Porous Concrete, *Modares Civil Engineering Journal*, **11**(1): 49-60.

[11] Hesami S., Ahmadi S., (2015) Evaluation of Environment-Friendly Porous-Concrete Pavement Using Rice Husk Ash, *Journal of Transportation Infrastructure Engineering (JTIE)*, **1**(2): 63-76.

[12] Ghasemi Moghadam A., Mokhtarani N., Kavooosi A., (2017) The Application of Permeable Pavement Aggregate Layers in Runoff Water Treatments, *Modares Civil Engineering Journal*, **16**(20), 141-151, (In Persian).

[13] Barrett M., Kearfott. P., Malina, J. (2006) Stormwater Quality Benefits of a Porous Friction Course and Its Effect on Pollutant Removal by Roadside Shoulders, *Water Environment Research*; **78** (11): 2177-2185.

[14] Scholz M., Grabowiecki P. (2007) Review of permeable pavement systems, *Building and Environment*, **42** (11): 3830-3836.

[15] Scholz M., Grabowiecki P. (2009) Combined permeable pavement and ground source heat pump system to treat urban runoff, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **84**:405-413.

[16] Drake J., Bradfordb A., Setersc T.V. (2014) Stormwater quality of spring-summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement, *Journal of Environmental Management*, **139**: 69-79.

[17] Gupta R. (2014) Monitoring in situ performance of pervious concrete in British Columbia—A pilot

# The Effect of Porosity and Rainfall Intensity on Performance of Urban Runoff Treatment Via Previous Concrete Pavement

M. Golmohammadi<sup>1</sup>, H. Ganjidoust<sup>2</sup>, N. Mokhtarani<sup>3\*</sup>

1-M.Sc. of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2-Full Prof., Environmental Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

3- Associate Prof., Environmental Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

\*mokhtarani@modares.ac.ir

## Abstract:

Urban development is always associated with infrastructure surfaces increment such as road and building construction and other impermeable surfaces that lead to precipitation runoff. Urban runoff contains heavy contaminants such as nutrients, heavy metals and organic substances including hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). These pollutants can infect water and soil resources by road surface washing and discharging into the receiving waters or infiltrating into surrounding area soils. Stormwater management has recently shifted towards a focus on site level low impact development (LID) techniques that aim to reduce the total stormwater runoff volumes in addition to attenuating peak flows and removing pollutants at or near the source of runoff. Permeable pavement systems (PPS) are a subset of LID stormwater best management practices (BMPs) of particular interest in dense urban areas because they can be installed in parking lots and low traffic roadways where the availability of land space for more traditional BMPs is not available. Such information is necessary to improve the selection of BMP/LIDs for stormwater management. Previous concrete pavement are subset of PPS and able to reduce the volume of urban runoff significantly which leads to hydraulic differentia reduction and its specific side effects urban utilities in addition to providing requirements for treatment processes and in-situ urban pollution management. In this study, porous concrete pavement performance has been surveyed in terms of quantitative and qualitative reduction of synthetic runoff. The effect of porosity and rainfall intensity were investigated. To investigate the effect of concrete porosity, four levels including 15%, 20%, 25% and 30% have studied and for evaluating rainfall intensity effect, a range of precipitation between 25 to 250 mm/h considered according the recent studies considered. The pilot used for this study consisted of a tank made of galvanized steel that simulated PCP was replaced layer by layer at the bottom of tank. Synthetic runoff sprinkled on the previous concrete surface with specified flow rate. Effluent is collected from the orifice that embedded under the tank then effluent quality parameters were evaluated. Before run the pilot Previous concrete mixed designs calculated and porosity, percolation rate and Compressive strength were verified. The parameters examined in this study including COD, TDS, TSS, turbidity and EC of pervious concrete pavement system was compared to synthetic runoff. According to study outcomes, the system efficiency in TSS removal was between 75.7% to 88.6%, highest COD removal detected was 15% in case the porosity was 22.9%. Effluent quality analysis demonstrated that PCPS had little ability in TDS and EC removal. However PCPS was able to remove turbidity from synthetic runoff. The maximum efficiency of turbidity removal was detected 70.3% at rainfall intensity of 37 mm/h and the porosity of 22.9%. By comparing the results of the above parameters, it was determined that porosity has almost no effect on runoff quality. Results showed the rainfall intensity dose not have significant effect on PCPS efficiency although the systems overall removal efficiency was drastically decreased due to rainfall intensity increase even in cases with low emissions gradients.

**Keywords:** PCPS, urban runoff, suspended solids, precipitation intensity, porosity