

بکارگیری روسازی نفوذپذیر در مدیریت رواناب شهری

میثم کمالی^۱، کارشناس ارشد عمران-محیط زیست، دفتر مطالعات آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف

meisamkamali_63@yahoo.com

مسعود تجریشی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دفتر مطالعات آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف

tajrishy@sharif.edu

چکیده

گسترش شهرنشینی سبب افزایش سطوح نفوذناپذیر و در نهایت تولید رواناب بیشتر از سطوح شهری می شود. این روانابها در سطوح و معابر شهری حرکت کرده و ضمن جمع آوری آلاینده‌ها از سطح شهر، آنها را به داخل مسیله‌ها و آبراهه‌ها انتقال می‌دهد. یکی از مهمترین عوامل انتقال جهت انتقال آلاینده‌ها در رواناب، رسوبات موجود در آن می‌باشد. در صورت حذف رسوبات از رواناب، کیفیت رواناب بهبود می‌یابد. یکی از سیستم‌های موثر جهت کاهش رسوبات از رواناب سطحی، استفاده از روسازی نفوذپذیر می‌باشد. در این مقاله برای آشنایی بیشتر با این سیستم، ابتدا به معرفی انواع مختلف روسازی متخلخل، مزایا و معایب و سپس به کاربرد آنها خواهیم پرداخت. در ادامه بر روی روسازی نفوذپذیر متمرکز و به دستاوردهای تحقیقاتی در این زمینه و مکانهای مناسب ایجاد این روسازی، مشخصات لایه‌های زیرسازی و نحوه نگهداری آن خواهیم پرداخت. در انتها به تنها تجربه آزمایشگاهی در کشور که به عنوان یک پایان نامه‌ای در دانشگاه صنعتی شریف انجام شده، اشاره خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: روسازی نفوذپذیر، عملکرد هیدرولیکی، حذف آلاینده، گرفتگی، رواناب سطحی

۱- مقدمه

شهرنشینی با افزایش تمرکز روسازیه‌ها، ساختمانها و دیگر سطحهای نفوذناپذیر با تولید رواناب مازاد همراه است. رواناب تولید شده آلودگیهای مسیر جریان را با خود جمع و باعث آلودگی رودها و نهرها، آلودگی دریاچه‌ها و منابع آب آشامیدنی می‌شود. افزایش رواناب و عدم نفوذ آن در داخل زمین، باعث محروم شدن آبهای زیر زمینی از منابع آبهای سطحی می‌شود. روانابهای سطحی آلودگیها را به صورت غیر متمرکز وارد منابع آب می‌نماید، بنابراین از آنها به عنوان یک منبع غیر نقطه‌ای نام برده می‌شود [1]. سیستمهای متفاوتی جهت مهار این روانابها و کاهش رسوبات از آنها وجود دارد. یکی از این روشهای مدیریتی، روسازی نفوذپذیر است. در این مقاله ضمن بررسی عملکرد هیدرولیکی و نحوه حذف آلاینده‌ها، با مزایا و معایب و نحوه نگهداری این نوع روسازی آشنا می‌شویم.

۲- معرفی سیستم روسازی نفوذپذیر

روسازیهای نفوذپذیر در شکلها و اندازه‌های گوناگون در معابر اجرا می‌گردند. این نوع روسازیه‌ها هنگامی که بر روی سطح زمین قرار می‌گیرند، یک فضای خالی میان آنها به وضوح قابل رویت می‌باشد که آب می‌تواند از میان آنها نفوذ کند. این فضاهای باز در حدود ۸ تا ۲۰ درصد از مساحت کل سطح هستند که معمولا با شن پر می‌شود؛ ولی می‌تواند توسط خاک طبیعی و چمن نیز پر شود. برای طراحی این روسازیه‌ها آیین نامه ASTM C936، مشخص می‌کند که روسازی باید حداقل ۶۰ میلیمتر ضخامت با مقاومت تراکمی ۵۵ مگاپاسکال یا بزرگتر داشته باشد. کل روسازی از یک لایه فیلتر ۳۸ تا ۷۶ میلیمتری و یک لایه ذخیره و یک لایه سنگ فرش تشکیل شده است. سرعت نفوذپذیری در خاک زیر لایه ذخیره باید به گونه‌ای باشد تا اینکه تمام رواناب جمع شده در لایه ذخیره بعد از ۲۴ تا ۴۸ ساعت تخلیه گردد. در طول ساخت از تراکم کردن خاک زیر لایه باید جلوگیری شود، زیرا تحکیم می‌تواند ظرفیت نفوذپذیری خاک را تحت تاثیر قرار دهد [2].

۳- اقتصاد [3]

روسازی نفوذپذیر در شهرهایی با توسعه جدید، که قوانین محلی میزان پوشش نفوذناپذیر را محدود می‌کند نیز مناسب و پربازده است. این روسازی نسبت به روسازیهای بتنی و آسفالتی نیز گرانتر است. با این وجود باید توجه نمود که در صورت استفاده از این روسازی فضاهای شهری نیز افزایش می‌یابند و می‌توانند این افزایش هزینه را جبران نمایند. روسازی قفل و بست دار مخصوصا در توسعه فضاهای موجود، جایی که در آنجا نیاز به فضای پارکینگ گسترده وجود دارد، ولی مثلا قادر به ایجاد برکه‌های کوچک به دلیل کمبود فضا نیستیم، مناسب می‌باشد. بنابراین در این فضاها، می‌توان سه کاربری ایجاد پارکینگ، ذخیره و نفوذ آب سطحی را در یک مکان انجام و از این طریق در مصرف فضا صرفه جویی نمود. استفاده از روسازی نفوذپذیر از نظر اقتصادی در شهرهایی که دارای شبکه زهکشی به صورت لوله یا آبراهه است، پربازده می‌باشد. در صورت توسعه شهر، دیگر این لوله‌ها قادر به جوابگویی سیلابهایی با دوره بازگشت کم نمی‌باشند. در آن صورت استفاده از روسازی نفوذپذیر یک گزینه اقتصادی جهت کنترل سیلاب به شمار می‌رود.

۴- انواع سیستم های روسازی نفوذپذیر، مزایا و معایب و مشخصات لایه‌های مختلف آن

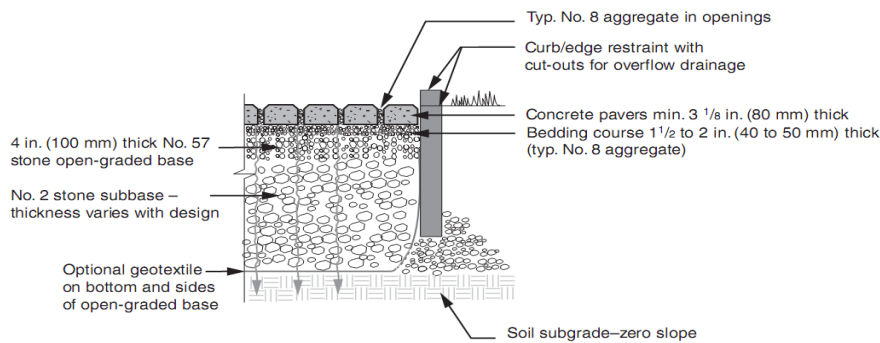
روسازی نفوذپذیر را می‌توان بر اساس نفوذپذیری خاک زیرین به سه دسته نفوذپذیری کامل، نفوذپذیری جزئی و نفوذناپذیر تقسیم نمود. در زیر به بیان مختصری در مورد هر کدام از آنها پرداخته می‌شود [3].

۴-۱- انواع سیستمهای روسازی نفوذپذیر

روسازیه‌ها را می‌توان بر اساس مشخصاتشان از نظر مشخصات نفوذپذیری خاک پایه، به سه مورد نفوذپذیری کامل، جزئی و نفوذناپذیر تقسیم نمود [3].

• نفوذپذیر کامل

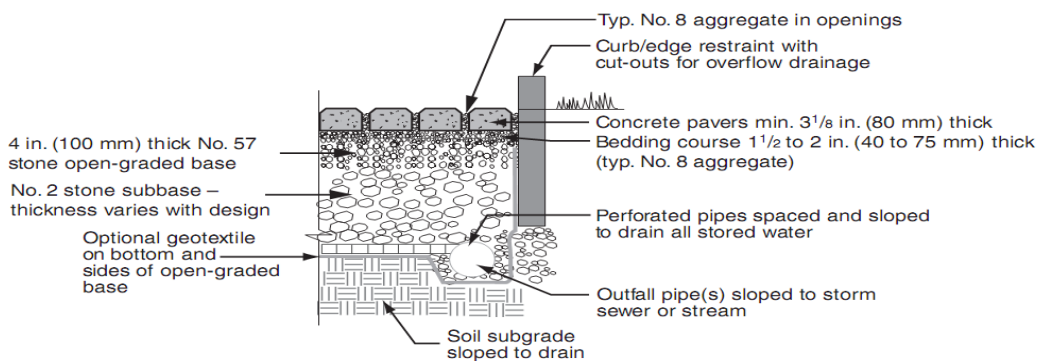
در این حالت تمام آب موجود در لایه ذخیره به لایه‌های پایینی روسازی نفوذ پیدا می‌کند و باعث تغذیه آبهای زیر زمینی می‌شود. در شکل ۱ نمایی از آن به نمایش گذاشته شده‌است.



شکل ۱- روسازی نفوذپذیر کامل [3]

• نفوذپذیر جزئی

در این حالت خاک قادر به زهکشی تمام آب موجود در لایه ذخیره نیست، پس بنابراین آنرا به طور جزئی نفوذ می‌دهد و مابقی آب از طریق یک لوله زهکش موجود در لایه ذخیره به یک جوب باغچه یا یک سیستم دیگر هدایت می‌شود. در شکل ۲ نمایی از این نوع به نمایش گذاشته شده‌است.



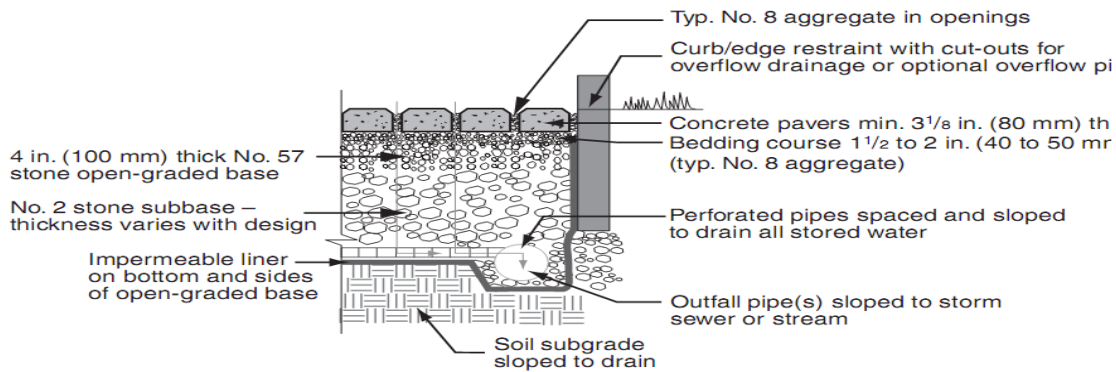
شکل ۲- روسازی نفوذپذیر جزئی [3]

• بدون نفوذپذیری

اگر خاک دارای نفوذپذیری بسیار پایین باشد، بهتر است از یک لوله زهکش استفاده شود و تمام آب از طریق لوله زهکش نیز تخلیه گردد. در شکل ۳ نمایی از آن به نمایش گذاشته شده‌است. در حالت کلی شرایطی وجود دارد که مجبور به نفوذناپذیر کردن کف لایه ذخیره خود هستیم، مثلاً

۱. حالتیکه فاصله بین کف لایه ذخیره تا بالاترین سطح سفره آب زیر زمینی کمتر از ۶۰ سانتیمتر باشد،
۲. اگر لایه ذخیره به طور مستقیم بر روی لایه سنگ بستر قرار گیرد، و

۳. در مکانهایی که برای ذوب برف در زمستان از نمک استفاده می شود و جهت جلوگیری از آلودگی آب زیر زمینی باید از یک لایه نفوذناپذیر استفاده نمود.



شکل ۳- روسازی نفوذپذیر بدون نفوذپذیری [3]

۴-۲- مزایای استفاده از این سیستم [3]

۱. کاهش سطوح نفوذناپذیر
۲. کاهش رواناب
۳. افزایش بقای درختان به وسیله فراهم کردن هوا و آب برای ریشه ها
۴. کاهش آلودگیها و بهبود کیفیت رواناب
۵. کاهش دمای آب
۶. کاهش ماکزیمم خروجی و فشارها روی فاضلابروهای جریان
۷. افزایش تغذیه آب زیر زمینی
۸. کاهش جریانهای پایین دست و سایش مسیرهای پایین دست به علت کاهش ماکزیمم خروجی و حجم جریان
۹. حذف کردن دریاچه های پارکینگها
۱۰. کاهش هزینه های جمع کردن برف به علت زهکشی سریع برف ذوب شده
۱۱. موثر بودن در کاهش گرمای شهری
۱۲. قابل بارگذاری به طور فوری پس از ساخت

۴-۳- معایب استفاده از این سیستم [3]

۱. هزینه کلی بالا نسبت به سایر سیستمهای مدیریت رواناب
۲. مشکلات در طراحی آنها
۳. نیاز به مهارت خاص در طراحی و بازرسی
۴. نگهداری سطح جهت کاهش گرفتگی

۴-۴- معیار انتخاب سایت [3]

۱. شیب سطح روسازی نفوذپذیر حداقل ۱٪ و حداکثر ۵٪ باشد.
۲. زمینهای اطراف آن، نباید دارای شیب بیشتر از ۲۰٪ باشد.

۳. زمینهای اطراف نباید به داخل آن زهکش شوند، مگر اینکه در محاسبات ضخامت لایه ذخیره، نقش آن دیده شده باشد.

۴-۵- توجیهات طراحی و اجرا

۴-۵-۱- سرعت نفوذپذیری روسازی قفل و بست دار [3]

سرعت نفوذپذیری طراحی، ۷.۵ سانتیمتر بر ساعت به عنوان پایه طراحی برای عمر مفید ۲۰ ساله روسازی در نظر گرفته می شود.

۴-۵-۲- سرعت نفوذپذیری خاک پایه [3]

هنگامیکه برای نفوذپذیری کامل در کاربردهای تحت وسایل نقلیه طراحی می شود، مینیمم سرعت نفوذپذیری ۱.۳ سانتیمتر بر ساعت مورد نیاز است. خاکهایی با سرعت نفوذپذیری ۱.۳ سانتیمتر بر ساعت و بالاتر معمولاً شن، ماسه، ماسه لوم دار، لوم و لوم لای دار هستند. آنها خاکهایی هستند که میزان عبوری از الک ۲۰۰ آنها کمتر از ۱۰ تا ۱۲٪ است. این خاکها جزء گروه هیدرولوژیکی *A* و *B* هستند. برای آب و هوای سرد کمترین سرعت نفوذپذیری طراحی توصیه شده می تواند دارای نفوذپذیری کمتری هم باشد. در کاربردهای پیاده رو نیاز به تحکیم لایه زیرین نمی باشد.

۴-۵-۳- لایه ژئوتکستایل [3]

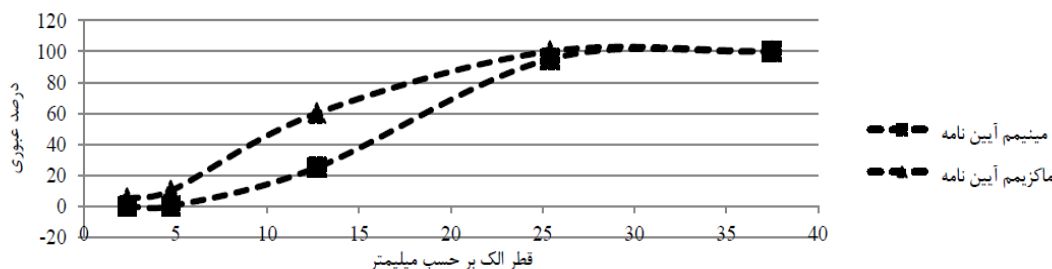
ذرات معلق در هنگامی که آب به طور آهسته حرکت می کند در حفره های لایه های مختلف روسازی رسوب خواهد کرد. از لایه ژئوتکستایل می توان به عنوان جدا کننده لایه های مختلف روسازی هم استفاده نمود. در صورتیکه دانه بندی دو لایه بگونه ای باشد که احتمال ورود مصالح لایه بالادست به لایه پایین دست وجود داشته باشد، مجبور به استفاده از لایه ژئوتکستایل می باشیم. می توان به جای ژئوتکستایل از یک لایه ماسه ای استفاده نمود. یکی از دلایل استفاده از لایه ژئوتکستایل میان خاک پایه و لایه ذخیره عدم حرکت ذرات ریزدانه به سمت بالا و عدم کاهش لایه ذخیره توسط آنها است.

۴-۵-۴- مواد لایه زیراساس و فیلتر

این لایه باید دارای حداقل تخلخل ۰.۳۲ باشد. میزان ذخیره لایه ی زیر اساس با درصد فضای حفره ای بین آنها تغییر می کند [3]. دانه بندی پیشنهادی برای لایه ذخیره در جدول ۱ و شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است.

جدول ۱: دانه بندی پیشنهادی لایه ذخیره [3]

اندازه الک	درصد عبوری
37.5 mm(1.5 inch)	۱۰۰
25 mm(1 inch)	۹۵ تا ۱۰۰
12.5 mm(0.5 inch)	۲۵ تا ۶۰
4.75mm(No.4)	۱۰ تا ۱۰
2.36mm(No.8)	۵ تا ۰



شکل ۴: دانه بندی پیشنهادی لایه ذخیره [3]

دانه بندی لایه فیلتر بین ۲ تا ۵ میلیمتر توصیه شده است [4]. اگر احتمال در هم فرو رفتن لایه فیلتر و لایه ذخیره در هم وجود دارد، باید از یک لایه ژئوتکستایل استفاده نمود [3].

۴-۵-۵- فضای بین سنگ فرشها [3]

توصیه شده است که در فضای بین سنگ فرشها از مصالح با دانه بندی لایه فیلتر استفاده شود. اگر بخواهیم از موادی با دانه بندی متفاوت از لایه فیلتر در این فضاها استفاده شود، حتما باید از یک لایه ژئوتکستایل جهت جداسازی استفاده نمود.

۴-۵-۶- مشخصات بلوکهای روسازی نفوذپذیر [3]

حداقل ضخامت این بلوکها اگر تحت اثر بار وسایل نقلیه باشد ۸۰ میلیمتر است. اگر این روسازیهها جهت پیاده رو استفاده شود، مینیمم ضخامت آن به ۶۰ میلیمتر کاهش می یابد.

۴-۵-۷- فضای باز میان سنگ فرشها

میزان فضای باز میان سنگ فرشها نباید بیش از ۱۵ میلیمتر باشد. اگر این روسازی برای کاربردهای پیاده رو استفاده شود، باید توجه نمود که فضای بین آنها برای افراد با کفشهای پاشنه دار ایجاد مشکل نکند [3]. منابع دیگری نیز درصد فضای باز را بین ۵ تا ۱۵٪ از کل سطح روسازی توصیه نموده اند [4]. همچنین توصیه گردیده عرض اتصالات نباید بزرگتر از D95 به اضافه ۳ میلیمتر باشد [4].

۴-۵-۸- حفاظت در مقابل سیلاب در جریانهای سنگین [3]

در بارانهای سنگین سازه روسازی به طور کامل اشباع می شود. برای برون رفت از این شرایط دو راهکار پیشنهاد می شود. اولین راهکار استفاده از لوله های زهکش در لایه ذخیره و دومین راهکار استفاده از جوب باغچه در مجاورت روسازی نفوذپذیر می باشد تا اینکه آب مازاد روی روسازی به داخل آن هدایت شود.

۴-۵-۹- طراحی برای کنترل کیفی رواناب

این روسازی یک سیستم نفوذپذیر می باشد، بنابراین مکانیزمهای حذف آلاینده در آن مکانیزمهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می باشد [3]. روسازی باید به گونه ای طراحی شود تا منطقه را به شرایط پیش از توسعه نزدیک کند [3]. بر اساس دستورالعمل NCDENR روسازی نفوذپذیر نمی تواند کاهشی در میزان مواد جامد معلق داشته باشد. اما این سیستم باعث کاهش حجم رواناب، که از این طریق سبب کاهش مواد جامد معلق می شود [5]. در طراحی روسازی باید توجه نمود که روسازی باید قادر به حذف تمام رسوبات بزرگتر از ۱۰۰ میکرومتر باشد. این روسازی باید اجازه دهد ذرات تا حد ۲۰ میکرومتر توسط آن به دام بیفتند [4]. در تحقیقات

گذشته بیان شده است که ذرات بزرگتر از ۷۵ میکرومتر در لایه سطحی روسازی حذف شده و وارد لایه‌های پایینی نمی‌شود. در جریانهایی با شدت بالاتر رسوبات با قطر کمتر از ۷۵ میکرومتر هم ته نشین می‌شوند. قرار گیری این ذرات بر روی سطح روسازی باعث ایجاد یک لایه کیک مانند بر روی سطح روسازی می‌نماید [6].

۴-۵-۱۰- نسبت مساحت نفوذپذیر به مساحت نفوذناپذیر

بر اساس دستورالعمل ایالت آیووا مقدار نسبت نفوذناپذیر به مساحت روسازی نفوذپذیر نباید بالاتر از ۳ باشد [7]. دلیل آنرا می‌توان به حمل رسوبات بیش از حد به روسازی نفوذپذیر و گرفتن زود هنگام آن نسبت داد [1].

۴-۵-۱۱- سایر موارد که باید در طراحی مورد توجه قرار گیرد

اگر رواناب از سطحهای اطراف روسازی به داخل آن جریان دارد، باید سطوح اطراف آن کاملاً تثبیت شده باشد تا از گرفتگی روسازی جلوگیری شود. روسازی متخلخل باید حدود ۳ متر دورتر از ساختمانها و ۳۰ متر دورتر از چاههای تامین کننده آب آشامیدنی قرار گیرد. یک روسازی متخلخل باید مطابق با دستورالعملهای اجرائی طراحی و ساخته شود. اگر قرار است که روسازی باری را تحمل کند، روسازی به گونه‌ای باید طراحی شود که بتواند از عهده آن بار برآید [1].

۴-۵-۱۲- نحوه و مراحل بازرسی از روسازی قفل و بست دار [7]

در جدول ۲ به بیان نحوه نگهداری و بازرسی روسازی نفوذپذیر اشاره شده است.

جدول ۲: نحوه نگهداری و بازرسی روسازی قفل و بست دار [7]

زمان بندی	فعالیت
ماهانه	بازرسی جهت اطمینان از عدم وجود رسوب در روسازی
	بازرسی جهت اطمینان از اینکه روسازی به خوبی آب را زهکشی می‌نماید
اگر لازم گردد، مبنی بر بازرسی پایه ریزی می‌شود	اطمینان از اینکه سطح روسازی فاقد آشغال می‌باشد
	اطمینان از اینکه ناحیه‌های مجاور روسازی تثبیت شده و تولید رسوب نمی‌نمایند
۲ بار در سال	تمیز کردن سطح روسازی به همراه جاروب و مکش
۱ بار در سال	بازدید از سطح روسازی جهت شناسایی خرابیهای آن

۴-۵-۱۳- عملکرد روسازی در زمینه حذف آلاینده از رواناب سطحی

در زمینه حذف آلاینده از رواناب سطحی، تحقیقات گسترده‌ای در خارج از کشور صورت گرفته است. در زمینه حذف آلاینده از روسازی نفوذپذیر، در ابتدا به کار فش و جیگر در سال ۲۰۰۵ اشاره می‌شود [8]. او نقش جنس لایه‌های مختلف فیلتر را در حذف فلزات سنگین مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که استفاده از سنگدانه آجری به جای سنگدانه بازالتی دارای حذف بالاتری می‌باشد. ولی در مورد تحقیق آنها شرایط یکسان برای مقایسه میان این دو جنس مصالح فیلتر وجود ندارد. بر اساس کار دایکرس در سال ۲۰۰۵، نشان داد که مصالح سنگدانه‌ها که فضای بین سنگ فرشها را پر نموده، نقش بسیار کمی در حذف فلزات سنگین دارد [9]. کولین و همکاران در سال ۲۰۰۷، بر روی حذف آلاینده بین دو روسازی نفوذپذیر با تخلخل سطحی متفاوت کار کردند [2]. نتایج کار آنها نشان داد که روسازی با تخلخل سطحی کمتر بازده بیشتری در حذف روی از رواناب سطحی دارد و اورتوفسفات در حالت با تخلخل سطحی کمتر، دو برابر حالت قبل حذف می‌گردد. بین و همکاران بر روی روسازی نفوذپذیر آزمایشاتی را انجام دادند [10].

روسازی آنان توانست مس، روی، مواد جامد معلق، اورتو فسفات و فسفر کل را به ترتیب با ۶۳٪، ۸۸٪، ۷۲٪، ۵۸٪ و ۶۵٪ حذف نماید. ماهاراج و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی بازده حذف آلاینده از این نوع روسازی پرداختند [11]. آنها نتیجه گرفتند که در صورت وجود ژئوتکستایل در سیستم، مواد معلق، کدورت، آمونیاک و اورتو فسفات به ترتیب به اندازه ۹۱، ۸۲، ۸۵ و ۷۸ درصد حذف می-شوند. آنها گاهی در سیستم خود مشاهده نمودند که حذف نیترات منفی است که دلیل آنرا ثابت بودن اکسیژن در سیستم، سرعت بالای تبدیل آمونیا به نیترات و سرعت نسبتا کم دنیتریفیکاسیون می دانستند.

۴-۵-۱۴- روسازی و ارتباط آن با در زمینه شماره منحنی، ضریب رواناب و گرفتگی

بین و همکاران در سال ۲۰۰۵ بر روی روسازی نفوذپذیر کار کردند [10]. آنها ضریب رواناب و شماره منحنی را برای این روسازی به ترتیب صفر و ۴۴ به دست آوردند. ایگن و همکاران در سال ۲۰۰۷، به بررسی نقش تغییرات شدت بارش، درصد گرفتگی، شیب روسازی و اتصالات عرضی و باریک در تولید رواناب پرداختند [12]. آنها روسازی را با استفاده از پودر سیلیکا و در چهار حالت کم تا زیاد شبیه سازی نمودند. نتایج کار آنها نشان داد که شیب سطحی روسازی ارتباط کمتری با تشکیل رواناب، مخصوصا برای روسازیهای با سرعت نفوذپذیری بالا و درجه پایینی تری از گرفتگی دارند. سرعت نفوذپذیری از یک روسازی در طول چند دقیقه اول اکثرا کاهش می یابد و بعد از آن بیشتر یا کمتر ثابت می ماند. در سال ۲۰۰۷، برون بر روی حذف جامدات از روسازی نفوذپذیر کار کرد [13]. روسازی استفاده شده در تحقیقات آنها قادر به حذف ۷۵ تا ۸۵٪ از مواد جامد معلق کل بود. این روسازی در حالت پایلوت قادر بود میزان ذرات بزرگتر از ۷۵ میکرومتر را به اندازه ۹۹٪ حذف نماید. آنها متوجه شدند که لایه ژئوتکستایل باعث بالا رفتن بازده حذف رسوبات از رواناب سطحی می شود. کاسترو در سال ۲۰۰۷، در زمینه نقش شکل بلوک روسازی در ظرفیت نفوذپذیر روسازی کار کرد [14]. او روسازی را در ۳ حالت عدم گرفتگی، نیمه گرفته و گرفتگی کامل شبیه سازی و مشاهده نمود که در حالت بدون گرفتگی با افزایش شیب، میزان آب نفوذ یافته، کاهش و به رواناب اضافه می شود؛ اما در حالت بدون گرفتگی ۹۰٪ آب ورودی به روسازی نفوذ پیدامی کند. در حالت عدم گرفتگی، تفاوت شکل بلوکها تاثیری بر نتایج نداشت. در حالت نیمه گرفته، روسازیهای با شکافهای طولانی تر به عنوان روسازیهای نفوذپذیر مناسب انتخاب شدند. بالاترین میزان رواناب در حالتی با شیب ۱۰٪ و کاملا گرفته است. در این حالت با افزایش شیب مسیر زهکشی افزایش می یابد. در سال ۲۰۰۸، یانگ و همکاران بر روی گرفتگی روسازی نفوذپذیر کار کردند [15]. آنها نتیجه گرفتند که روسازی نفوذپذیر پس از ۵.۵ سال، دچار گرفتگی می شود. میزان حذف مواد جامد معلق از سایر سیستمها بالاتر و به اندازه ۸۵٪ است. پزائیتی و همکاران در سال ۲۰۰۹، به بررسی عملکرد روسازی نفوذپذیر با اعمال رسوبات در گرفتگی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که روسازی پس از ۳۵ سال دچار گرفتگی می شود [16]. آنها بیان نمودند که تمیز کردن روسازی تفاوت قابل توجهی در غلظت خروجی ایجاد نمی کند. روه و همکاران نقش لایه ژئوتکستایل را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از لایه ژئوتکستایل باعث افزایش ۳۰٪ در حذف مواد جامد معلق می شود [17]. آنها بیان نمودند که استفاده از ژئوتکستایل، باعث افزایش زمان زهکشی می شود.

۴-۵-۱۴- تفاوت میان نتایج پایلوت و اجرا از نظر حذف آلاینده

در سال ۲۰۰۷، برون بر روی حذف جامدات معلق از روسازی نفوذپذیر در حالت پایلوت و آزمایشگاهی کار نمود [13]. او به این نتیجه رسید که در حالت پایلوت، در اولین بهره برداری یا خروجی میزان مواد جامد معلق خروجی از زیر روسازی بالاتر است. این را به دلیل عدم شستشوی مناسب مصالح در حجم بزرگ نسبت داد. از نظر حذف آلاینده، روسازی در حالت پایلوت دارای قابلیت حذف ۶۰ درصد و در حالت آزمایشگاهی دارای حذف ۹۶ درصد است.

۴-۵-۱۵- مقایسه هزینه میان روسازی نفوذپذیر و روسازی معمولی

بر اساس بررسیهای انجام شده توسط محققین این مقاله، در مقایسه هزینه میان روسازی نفوذپذیر و روسازی معمولی، به این نتیجه رسیدیم که این روسازی دارای هزینه کمتری در مقایسه با روسازی معمولی می باشد. این روسازی در حدود ۱۵٪ ارزاتر از روسازی معمولی است. البته در برآورد قیمت روسازی نفوذپذیر اینطور فرض گردیده که خاک دارای نفوذپذیری مناسب است، پس لزومی بر استفاده از لایه ژئوممبرین، لوله زهکش و منبع ذخیره وجود ندارد. در صورت تغییر سیستم از حالت نفوذپذیر به حالت نفوذناپذیر باعث افزایش قیمت سیستم، به اندازه ۶۰٪ خواهیم شد.

۴-۵-۱۶- تجربه آزمایشگاهی صورت گرفته در دانشگاه صنعتی شریف

کمالی و تجریشی در سال ۱۳۹۰، عملکرد هیدرولیکی و کیفی روسازی نفوذپذیر را مورد بررسی قرار دادند [18]. آنها جهت شبیه سازی از یک دستگاه بارانساز استفاده نمودند. روسازی دارای مساحت ۲ متر مربع و شیب ۲٪ بود. روسازی آنها از لایه های سنگ فرش، فیلتر، زیر اساس و ژئوتکستایل تشکیل شده بود. لایه زیر اساس دارای دانه بندی ۴.۷۵ تا ۲۰ میلیمتر و لایه فیلتر دارای دانه بندی ۲.۳۶ تا ۴.۷۵ میلیمتر بود. همچنین بین لایه های زیر اساس و اساس و بین لایه زیر اساس و کف دستگاه از لایه ژئوتکستایل استفاده شد. آنها از رسوبات مجاور خیابانها جهت گرفتگی استفاده نمودند. در طی انجام آزمایش، رسوبات مخلوط با آب از مجاورت روسازی به صورت رواناب به آن اعمال گردید. بارش از بالای سطح روسازی توام با رواناب به آن اعمال و در هر دوره از شبیه سازی معادل یکسال باران مهرآباد (۲۴۰ میلیمتر در مدت ۷ ساعت) بر آن وارد شد. روسازی در پایان هفتمین سال از شبیه سازی دارای ضریب رواناب ۰.۳۵ و از نظر حذف آلاینده روسازی توانست مواد جامد معلق را به طور کامل حذف نماید.

۵- نتیجه گیری:

روسازی نفوذپذیر پیشنهادی برای مناطق خشک و نیمه خشک به این شرح است. بالاترین قسمت این روسازی، از سنگ فرش با ضخامت ۵ سانتیمتر استفاده شود. فضای باز میان سنگ فرشها ۰.۵ سانتیمتر و توسط ماسه با دانه بندی ۲.۳۶ تا ۴.۷۵ میلیمتر پر گردد. لایه دوم (لایه فیلتر) از ماسه با دانه بندی ۲.۳۶ تا ۴.۷۵ میلیمتر پر شده و ضخامت این لایه ۵ سانتیمتر است. لایه سوم، لایه زیر اساس است و ضخامت آن با توجه به شرایط اقلیمی، میزان بارش محلی و نوع کاربری تعیین می شود. در بالا و پایین لایه ذخیره توصیه می شود تا از یک لایه ژئوتکستایل نفاخته استفاده شود تا میزان حذف مواد معلق افزایش یابد. در مکانهایی که نفوذپذیری خاک بسیار پایین است، بهتر است از روسازی نفوذپذیر با لایه نفوذناپذیر در کف استفاده شود. این روسازی از روسازی معمولی ارزاتر و قیمت این روسازی در صورتی که کف آن نفوذناپذیر گردد تا ۶۰٪ افزایش می یابد. توصیه می گردد تا دستورالعمل طراحی و اجرایی این نوع روسازها بر اساس پایلوت و انجام آزمایشات میدانی با توجه به کیفیت روانابهای تولیدی در محیط شهری کشور تهیه و ارائه گردد.

۶- مراجع:

- [1] "Permeable pavement guide to the design, construction and maintaince of concrete block permeable pavements." Interpave. (2010)
- [2] Collins, K. A (2007). " A field evaluation of four types of four types of permeable pavement with respect to water quality improvement and flood control"
- [3] Smith, D. R. (2006). "Permeable interlocking concrete pavements: selection, design, construction, maintenance"
- [4] Hartwell, S. (2004). *Permeable pavement design guidelines.*

- [5] (2009). "Va dcr stormwater design specifications no 7: permeable pavement virginia dCR stormwater "
- [6] Teng, Zh., and Sansalone, J. (2004). " *In situ partial exfiltration of rainfall runoff particle separation* ", Jouournal of Environmental Engineering, 130(9), 1008-1020
- [7] *Iowa stormwater management manual* ,(2009)
- [8] Fash, S., and Geiger, W,F. (2005) " *Effective pollutant retention capacity of permeable pavements for infiltrated road runoffs determined by laboratory tests* " Water Science and Technology, vol 51,No 2, pp 37-45
- [9] Diekres, D., Lohmann, M., Becker, M and Raasch, U.(2005) " *Pollution retention of different permeable pavements with reserviour structure at high hydraulic loads* " 10th International conference on urban drainage,Copenhagen/Denmark,21-26 August ,2005.
- [10] Bean, E. Z. (2005). " *A field study to evaluate permeable pavement surface infiltration rates, runoff quantity,runoff quality, and exfiltrate quality.* "
- [11] Tota-Maharaj, K., and Scholz, M. (2010). " *Efficiency of permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions.* " Environmental Progress and Sustainable Energy, 29(3), 358-369.
- [12] Illgen, M., Harting, K., Schmit, T. G., and Welker, A.(2007). " *Runoff and infiltration characteristics of pavement structure-review of an extensive monitoring program* " , Water Science and Technology, 133-140.
- [13] Brown, C. R. (2007). " *Characteristics of solids removal and clogging processes in two types of permeable pavements.* "
- [14] Castro, D., GonzÁlez-Angullo, N., RodrÁguez, J., and Calzada, M. A. (2007). " *The influence of paving-block shape on the infiltration capacity of permeable paving.* " Land Contamination and Reclamation, 15(3), 335-344.
- [15] Yong, C, F., Fletcher, T, D., and Grace, M, R. (2008). " *The clogging behaviour and treatment efficiency of a range of porous pavements.* " In: 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
- [16] Pezzaniti, D., Beecham, S., and Kandasamy, J. (2009). " *Influence of clogging on the effective life of permeable pavements* " Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management, 162(3), 211-220.
- [17] Rowe, A. A., Borst, M., O'Connor, T. P., and Stander, E. K. (Year). " *Pervious pavement system evaluation.* " Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009 - World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers, 1440-1447.

[۱۸] کمالی، میثم، و تجربی، مسعود، " بررسی عملکرد روسازی نفوذپذیر در حذف آلاینده از رواناب سطحی " چهارمین

کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، تهران، (۱۳۹۰)