

## اصول طراحی روسازی نفوذپذیر در حذف آلاینده از رواناب سطحی

مهدی کتابچی<sup>۱</sup>، مسعود تجریشی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد عمران-محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

mehdi\_ketabchy@yahoo.com

### خلاصه

توسعه شهری سبب کاهش سطوح نفوذپذیر و جایگزینی آنان با سطوح نفوذناپذیر میشود، لذا این امر سبب ازدیاد تولید رواناب و در نتیجه خسارات زیست محیطی و مادی فراوان میگردد. یکی از راهکارهای مقابله با این پدیده استفاده از سطوح روسازی نفوذپذیر با هدف کاهش حجم رواناب و همچنین تقلیل آلاینده های موجود در رواناب میباشد. مقاله حاضر ضمن معرفی انواع سطوح با استفاده از ادبیات موجود در جهان و نرم افزار توسعه داده شده که شامل مدول های سازه ای، هیدرولوژیکی، اقتصادی و کیفی می باشد؛ و با استفاده از دستورالعمل های طراحی موجود، امکان طراحی برای شرایط ایران و گزینه های مختلف پیش رو برای طراحی را بنابر انتخاب کاربر، ارائه میدهد.

**کلمات کلیدی:** روسازی نفوذپذیر، BMP، نرم افزار طراحی، رواناب شهری

### ۱. مقدمه

توسعه شهری باعث حذف پوشش گیاهی و جایگذاری سطوح نفوذناپذیر با نفوذپذیر و همچنین سبب تغییر در خصوصیات هیدروگراف رواناب سطحی و نهایتاً باعث افزایش حجم رواناب و دبی اوج رواناب می گردد. فعالیت های انسانی در سطوح شهری باعث تولید دورریز (زباله) و آلاینده می شود که در حین بارندگی به سمت منابع آب، جاری و شسته می شوند [۱]. همچنین افزایش رواناب و عدم نفوذ آن در داخل زمین، باعث محروم شدن آب های زیرزمینی از منابع آب های سطحی می شود. یکی از مهمترین راهکارهای مناسب جهت مقابله با پدیده افزایش سطوح نفوذناپذیر در محیط شهری، استفاده از انواع سطوح نفوذپذیر جهت مقابله با افزایش حجم رواناب و آلاینده های موجود در آن میباشد.

با هدف مدیریت رواناب، مفاهیم جدید مانند بهترین راهکارهای مدیریتی (BMPs<sup>۳</sup>) و توسعه کم اثر (LIDS<sup>۴</sup>) توسعه داده شده اند [۱]. از جمله سیستم های نوین مدیریت رواناب ها می توان به جوی باغچه<sup>۵</sup>، فیلتر نوری<sup>۶</sup>، آبگیر<sup>۷</sup>، تالاب<sup>۸</sup>، سطح نگهدارنده گیاهی<sup>۹</sup>، روسازی متخلخل<sup>۱۰</sup> و روسازی نفوذپذیر اشاره نمود. از جمله مزایای روسازیهای نفوذپذیر کاهش نفوذناپذیری در مناطق توسعه یافته است. این روسازی رواناب را کاهش و بار آلودگی را حذف می نماید. روسازی نفوذپذیر هنگامی که بر روی سطح زمین قرار میگیرد، یک فضای خالی در آنها به وضوح قابل رویت است که آب می تواند از میان آنها نفوذ کند. ژپو در سال ۲۰۰۱ طی مروری بر مدل های مختلف رواناب و سیلاب شهری، اقدام به جمع آوری اطلاعاتی در رابطه با انواع آلاینده های مختلف، منابع آنها، حدود غلظت میانگین آنها در ادبیات و کاربری های مختلف آن بر اساس تنزل کیفی کرد. ایشان آلاینده ها را به چهار دسته کلیدی ذرات، مواد مغذی، فلزات سنگین و اسیدها تقسیم و سپس منابع آنها را بر اساس نقش در تولید به عنوان عامل جزئی و یا اصلی بیان نمود [۲].

بین و همکاران در سال ۲۰۰۷ بر روی روسازی نفوذپذیر آزمایشاتی را انجام دادند. این روسازی توانست مس، روی، جامدات معلق، اورتوفسفات و فسفر کل را به ترتیب تا ۶۳، ۸۸، ۷۲، ۵۸ و ۶۵ درصد حذف نماید [۳]. جوشا در سال ۲۰۰۶ بر روی حذف فلزات سنگین از آسفالت متخلخل کار کرد و به این نتیجه رسید که آسفالت متخلخل قابلیت بالایی در حذف فلزات روی (۷۴ درصد) و جامدات معلق (۸۷ درصد) را دارد.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد عمران- محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

<sup>۳</sup> Best Management Practices

<sup>۴</sup> Low Impact Development

<sup>۵</sup> Swale

<sup>۶</sup> Filter strip

<sup>۷</sup> Stormwater pond

<sup>۸</sup> Stormwater Wetland

<sup>۹</sup> Bioretention Area

<sup>۱۰</sup> Porous Pavement

همچنین حذف نیترات منفی گزارش شد و راندمان حذف فسفر کل در طی ۹ رخداده بارش نمونه گیری به مقدار ناچیزی بدست آمد [۴]. دیرکس و هولت در سال ۱۹۹۹ در کشور آلمان، بر روی حذف فلزات سنگین در میان ساختار یک روسازی متخلخل بتنی کار کردند. در لایه ذخیره این روسازی نفوذپذیر چهار نوع ماده بازالت، ماسه سنگ و سنگ آهک (با اندازه دانه های ۱ الی ۴۵ میلیمتر) که در کشور آلمان بسیار مورد استفاده قرار میگیرند و شن (با اندازه دانه های ۹ الی ۳۲ میلیمتر) به منظور حذف آلاینده مورد استفاده قرار گرفت. بالاترین درصد حذف سرب، کادمیوم، مس و روی در جنس لایه ذخیره بازالتی با حدود ۹۸ درصد و کمترین مقدار حذف آلاینده های ذکر شده در جنس لایه ذخیره از سنگ آهک با حدود میانگین ۷۰ درصد مشاهده شد [۵]. در مطالعه پیش رو به روش های طراحی روسازی نفوذپذیر با استفاده از مدول های سازه ای، هیدرولوژیکی، اقتصادی و کیفی اشاره، و نرم افزار طراحی روسازی نفوذپذیر توسعه داده شده، ارائه خواهد گردید؛ همچنین در انتها یک مثال طراحی همراه با تحلیل نتایج ذکر میگردد.

## ۲. اصول طراحی روسازی نفوذپذیر و تولید نرم افزار

اصول طراحی روسازی نفوذپذیر بر مبنای چهار مدول سازه ای، هیدرولوژیکی، اقتصادی و کیفی میباشد. مبانی هر یک از مدول ها، روش منتخب در هر مدول و تولید مدول مربوطه در نرم افزار طراحی در ادامه اشاره میگردد. نرم افزار طراحی در قالب Microsoft Excel تولید گردیده است.

۲-۱. **مدول سازه ای:** طراحی نهایی سیستم روسازی نفوذپذیر، به تعیین ضخامت روسازی از ابتدای خاک بستر تا روی روسازی نیاز دارد. در این قسمت پارامترهای سازه ای و مقاومتی روسازی بر اساس دستورالعملهای مختلف مورد بررسی و ضخامت کمینه لایه های روسازی تعیین میگردد. انواع دستور العمل مطابق جدول ۱ میباشد. از بین تمام این مدلها، روش اشوتو که در مطالعه هین وهماکاران [۶] آمده است، به دلیل کاربرد گسترده در جهان در نرم افزار به کار گرفته شده است. در این بخش، هدف بدست آوردن ضخامت سازه ای و مقاومتی کمینه لایه رویه و لایه ذخیره روسازی نفوذپذیر بنابر کاربریهای مختلف میباشد. شکل ۱ نیز نمایی از این مدول در مدل طراحی روسازی را نشان میدهد.

جدول ۱: دستورالعملهای مختلف محاسبات سازه ای

نام مدول / مطالعه	روش مدول / مطالعه	مزیت	ملاحظات
EPA	بر مبنای عدد CBR <sup>۱</sup> و ترافیک	-	تقسیم بندی خاک به گروه های مختلف بر اساس عدد CBR
Iowa	بر مبنای پارامترهای ترافیک، سازه ای و نقطه شبنم	-	-
اشوتو	تخمین ضخامت با طرح پارامتری تحت عنوان "عدد سازه ای"	گسترده ترین و پر کاربردترین طرح روسازی در دنیا	ضخامتها توسط نمودار و بصورت غیر مستقیم با روش ویتیل و همکاران بدست می آید.

اطلاعات ورودی و خروجی	مقدار / مشخصه	واحد	ملاحظات
اطلاعات ورودی: انتخاب نوع کاربری مسیر روسازی نفوذپذیر	خیابان	-	این آیتم از میان خیابان و پیاده رو انتخاب میشود. در خیابان به دلیل وجود حرکت اتومبیل ها باید ملاحظات مقاومتی و سازه ای روسازی و زیرسازی (تعیین حداقل ضخامت لایه ها) مد نظر قرار گیرد اما در پیاده رو نیاز به لحاظ کردن چنین ملاحظاتی نمیشود.
"اطلاعات ورودی" و "اطلاعات خروجی"	نوع ضریب خیابان ۱- پیاده رو ۲-	-	انتخاب "خیابان" به عنوان کاربری مسیر روسازی نفوذپذیر
اطلاعات ورودی: مقدار کل محور ساده ۸.۲ تنی هم ارز (W) در طول عمر مفید روسازی	۵۰۰۰۰	محور ساده ۸.۲ تنی هم ارز	-
اطلاعات ورودی: عدد مقاومت خاک بستر (بر حسب CBR)	۱۵	CBR	انتخاب این پارامتر با هدف تعیین ضریب باربری خاک بستر (S) میباشد.
اطلاعات ورودی: عدد مقاومت لایه ذخیره (بر حسب CBR)	۸۰	CBR	انتخاب این پارامتر با هدف تعیین ضریب باربری لایه ذخیره (S) میباشد.

شکل ۱: نمایی از بخشی از مدول سازه ای در مدل طراحی روسازی نفوذپذیر

۲-۲. **مدول هیدرولوژیکی:** جدول ۲ برخی از مهمترین دستورالعملهای طراحی هیدرولوژیکی روسازی را ارائه میدهد. در این مدول از الگوهای توزیع بارش NRCS<sup>۱</sup> استفاده میگردد. دلیل استفاده از الگوهای NRCS گستردگی توزیع بارندگی به المانهای زمانی کوچک (مانند ۱۰ دقیقه و ۶ دقیقه) و همچنین گستره وسیع الگوهای بارش در NRCS از لحاظ آب و هوایی میباشد، که تحلیل و ارزیابی را سهولت میبخشد. همچنین بر مبنای روش مطالعه لمینگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ باران طرح ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ ساله به کار گرفته میشود [۷]. در مدول هیدرولوژیکی نرم افزار طراحی

<sup>۱</sup> بنا به تعریف بار استفاده شده برای فرو رفتن و نفوذ یک سنبه استاندارد به میزان معین در یک نمونه مورد آزمایش به مقدار بار استاندارد برای همان نفوذ است. در راهسازی مقدار ضریب مزبور در انعکاس مقاومت برشی خاک و تحمل آن در برابر بارهای ترافیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است.

<sup>۲</sup> Natural Resources Conservation Service

موارد زیر اجراء می گردد: ۱- اندازه لایه ذخیره بر اساس آیین نامه مدیریت رواناب Iowa [۸]، ۲- تاثیر شیب بر ظرفیت ذخیره سازی روسازی بتن و آسفالت متخلخل و لایه ذخیره [۷]، ۳- پیش بینی هدایت هیدرولیکی لایه ذخیره مطابق مدل های ترزاقی<sup>۱</sup> و اسلیچر<sup>۲</sup> [۹]، ۴- محاسبه زمان تمرکز در مجموع سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر بر اساس روابط برانسی و ویلامز<sup>۳</sup> و کریپچ<sup>۴</sup> [۷] و ۵- توزیع بارش و هیدروگراف در پیوند با روسازی نفوذپذیر و اطلاعات قابل اخذ از آن در قالب یک جدول با ستون ۱۴ گانه. همچنین در نرم افزار از روش های منطقی و SCS برای تخمین رواناب استفاده میگردد.

### جدول ۲: دستورالعملهای طراحی هیدرولوژیکی روسازی نفوذپذیر

روش مدل / مطالعه	اسم مدل / مطالعه
تعیین ضخامت لایه ذخیره با استناد به روشهای WQv و NRCS	آیین نامه Iowa
با استفاده از حجمهای کنترل به هم پیوسته و تعیین ورودی و خروجی جریان	معادلات بقای جرم (EPA)
آنالیز هیدرولوژیکی با هدف ارزیابی باران و میزان رواناب و مقداری که میتواند توسط روسازی نگهداری و به ساختار زیرین یعنی خاک بستر منتقل گردد	مطالعه هین و همکاران، ۲۰۱۰ [۶]

این مدول در نرم افزار به چهار قسمت تقسیم میگردد. قسمت اول "اطلاعات ورودی" میباشد که توسط کاربر به مدول داده میشود. در قسمت دوم یک جدول با ستون های ۱۴ گانه توسط نرم افزار تشکیل میشود که نحوه توزیع بارش، مدل بارش-رواناب و دیگر اطلاعات را شرح میدهد. در قسمت سوم "اطلاعات خروجی" توسط معادلات طراحی و یکسری از پارامترها ارائه میگردد. در قسمت چهارم نیز مجموعه ای از نمودارها ارائه میگردد. شکل ۲ بیانگر بخشی از اطلاعات ورودی مدول میباشد. همچنین در رابطه با پیوند میان سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر و انتقال رواناب و بارش، دو فرض در این مدول در نظر گرفته شده است: ۱- تمام رواناب تولید شده در سطح نفوذناپذیر (با استناد به ضریب رواناب یا عدد منحنی) بصورت کامل به سطح نفوذپذیر منتقل میگردد و ۲- رواناب انتقال پیدا کرده از سطح نفوذناپذیر و همچنین بارش در سطح نفوذپذیر بصورت کامل و با توزیع یکسان در تمام سطح نفوذپذیر نفوذ پیدا میکند.

اطلاعات ورودی	مقدار / مشخصه	واحد	ملاحظات
بارش میانگین سالیانه منطقه	۲۴۰	میلیمتر	-
باران طرح منطقه	۳۰	میلیمتر	باران طرح از جنس ۲۴ ساعته و دوره بازگشت ۲ ساله میباشد.
الگوی توزیع بارش	II	-	الگوی توزیع بارش از میان I، II، III و IA که توسط NRCS ارائه شده است، انتخاب میگردد.
عدد منحنی منطقه (Curve Number)	۹	-	این عدد توسط کاربر و بنابر خصوصیات محل قابل تغییر میباشد. به عنوان مثال عدد ۸۱ مربوط به یک منطقه شهری با کاربری مسکونی و درصد نفوذناپذیری ۷۲ درصد (بر اساس SCS) میباشد.
ضریب رواناب در معادله روش منطقی (rational Method) برای سطح نفوذناپذیر	۰.۷۳	-	-

### شکل ۲: بخشی از اطلاعات ورودی در مدول هیدرولوژیکی روسازی نفوذپذیر

۳-۲. **مدول اقتصادی:** هزینه روسازی نفوذپذیر شامل هزینه ساخت، طراحی و عملیات احتمالی (بعد از ساخت روسازی)، هزینه نگهداری و هزینه دوره عمر میشود. در این مدول انواع هزینه های صرف شده برای یک روسازی نفوذپذیر ارائه و جمع آنها برابر هزینه کل میگردد.

۳-۲-۱. **هزینه سرمایه:** شامل هزینه تهیه زمین، ساخت و کارهای میدانی مربوطه میشود. سال مبنا در محاسبه این هزینه ها سال ۱۳۹۲ میباشد.  
۳-۲-۲. **هزینه طراحی، مجوز و عملیات احتمالی:** هزینه طراحی و مجوز شامل هزینه بررسی محل، ارزیابی و نقشه برداری، طراحی و برنامه ریزی کنترل رواناب است. هزینه عملیات احتمالی، هزینه های غیرقابل انتظاری هستند که در طول توسعه و ساخت یک اقدام کنترل رواناب به وجود می آیند. از پیشنهاد EPA و نیز نارایانان در سال ۲۰۰۵ در رابطه با این هزینه ها استفاده گردیده است [۱۰ و ۱۱].

۳-۲-۳. **هزینه عملیات و نگهداری:** عملیات و نگهداری فعالیت های بعد از ساخت هستند که مفید بودن یک اقدام کنترل رواناب نصب شده را تضمین میکنند. پارامترهای مرتبط با عملیات نگهداری روسازی های نفوذپذیر در نرم افزار مطابق با پیشنهاد نارایانان در سال ۲۰۰۶ انتخاب میگردد [۱۰].  
۳-۲-۴. **هزینه دوره عمر:** هزینه دوره عمر شامل کل هزینه های نگهداری است که در طول عمر یک سطح نفوذپذیر اتفاق می افتد. برای تبدیل هزینه سالانه به ارزش حاضر از روابط ۱ و ۲ استفاده می گردد [۱۲].

$$P_c = C_{OM}[E] \quad (1)$$

$$E = \frac{(1+r)^n - 1}{r-i} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Terzaghi

<sup>2</sup> Slitcher

<sup>3</sup> Branby Williams

<sup>4</sup> Kirpich

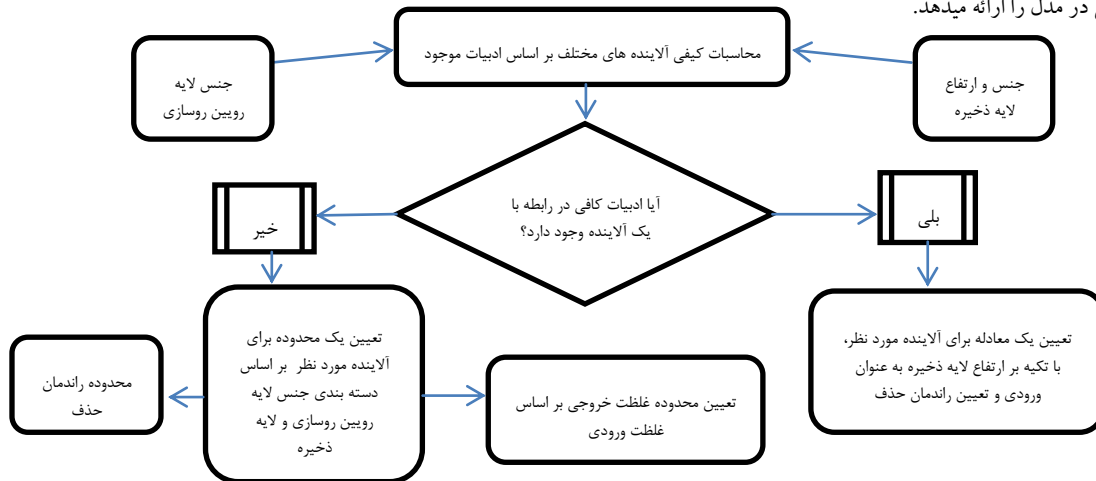
$C_{om}$  = هزینه سالانه نگهداری،  $P_c$  = ارزش حاضر،  $E$  = ضریب تبدیل هزینه سالانه به ارزش حاضر،  $i$  = نرخ بهره،  $r$  = نرخ تورم و  $n$  = دوره عمر روسازی (معمولا ۲۰ سال فرض میشود)

۲-۳-۵. **مدول اقتصادی در نرم افزار طراحی روسازی نفوذپذیر:** این مدول به دو بخش "اطلاعات ورودی" و "اطلاعات خروجی" تقسیم میگردد. شکل ۳ نمایی از بخشی از اطلاعات ورودی را نشان میدهد.

اطلاعات ورودی	مقدار	واحد	ملاحظات
دوره عمر روسازی ( $m$ )	۲۰	سال	در اکثر منابع، دوره عمر روسازی نفوذپذیر معمولا ۲۰ سال فرض شده است.
میانگین نرخ بهره سالانه در دوره عمر روسازی ( $i$ )	۱۲	درصد	مقدار این پارامتر برابر میانگین نرخ بهره پیش بینی شده در طول دوره عمر روسازی میباشد. عدد ۱۲ به عنوان یک عدد اولیه بنابر گزارش بانک مرکزی در سال ۱۳۹۱ میتواند فرض گردد و مقدار این پارامتر توسط کاربر قابل تغییر میباشد.
میانگین نرخ تورم سالانه در دوره عمر روسازی ( $r$ )	۲۸	درصد	مقدار این پارامتر برابر میانگین نرخ تورم پیش بینی شده در طول دوره عمر روسازی میباشد. عدد ۲۸ به عنوان یک عدد اولیه و بنابر نرخ تورم نقطه به نقطه در ابتدای سال ۱۳۹۲ (فروردین ماه) میتواند فرض گردد (همچنین نرخ تورم میانگین در ۲۰ سال گذشته از ابتدای سال ۹۲ بنابر گزارش بانک مرکزی مطلق نرخ مذکور میباشد) و مقدار این پارامتر توسط کاربر قابل تغییر میباشد.

شکل ۳: بخشی از اطلاعات ورودی در مدول اقتصادی

۲-۴. **مدول کیفی:** در این مدول با استفاده از ادبیات موجود در رابطه با توانایی انواع روسازی های نفوذپذیر در حذف آلاینده های مختلف از رواناب و همچنین توانایی مصالح نوین در حذف آلاینده که تا به حال به دلایل مختلف در روسازی و زیرسازی نفوذپذیر بکار نرفته است (مانند پامیس و اسکوریا)، به طراحی و پیش بینی کیفی روسازی نفوذپذیر با توجه به خصوصیات مربوطه پرداخته شده است. در این بخش از ۳ نوع روسازی (بتن متخلخل، آسفالت متخلخل، نفوذپذیر یکپارچه) و ۶ نوع جنس زیرسازی (شن، پامیس، اسکوریا، بازالت، سنگ آهک، ماسه سنگ) که در ادبیات آمده است، به منظور وارد کردن به مدول کیفی نرم افزار طراحی روسازی نفوذپذیر استفاده میشود. شکل ۴ نحوه محاسبات در مدول کیفی نرم افزار طراحی را شرح میدهد. همچنین آلاینده های مورد بررسی شامل TP، TSS، نیترات، ارتوفسفات، مس، روی و سرب میباشدند. شکل ۵ نیز یک شمای کلی از مدول کیفی در مدل را ارائه میدهد.



شکل ۴: نمودار جریان مدول کیفی در مدل طراحی روسازی نفوذپذیر

۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
محدوده غلظت خروجی (mg/L)	محدوده راندمان حذف (درصد)	محدوده راندمان حذف با استفاده از معادله تعیین شده، با تکیه بر ارتفاع لایه ذخیره	محدوده غلظت ورودی (mg/L)	ارتفاع لایه ذخیره (میلیمتر)	جنس لایه ذخیره	نوع روسازی
<b>۱- آلاینده جامدات معلق کل (TSS)</b>						
—	—	—	—	—	شن	بتن متخلخل
—	—	—	—	—	شن	آسفالت متخلخل
—	—	—	—	—	شن	نفوذپذیر یکپارچه

شکل ۵: نمایی از بخشی از مدول کیفی در مدل طراحی روسازی نفوذپذیر

۳. **مثال طراحی و تحلیل نتایج:** در این بند یک مثال با هدف فهم بهتر طراحی توسط نرم افزار ارائه خواهد شد. بدین صورت که اطلاعات ورودی مطابق با یک شرایط آب و هوایی و یک مکان مشخص به نرم افزار ارائه و اطلاعات خروجی به همراه جداول طراحی و نمودارهایی با هدف تحلیل حساسیت پارامترها، توسط نرم افزار کسب میگردد؛ بدین معنا که توانایی نرم افزار در طراحی روسازی نفوذپذیر در قالب یک مثال طراحی ارائه میشود.

۳-۱. **اطلاعات ورودی:** اطلاعات ورودی سازه ای، مشخصات عمومی روسازی نفوذپذیر، هیدرولوژیکی و اقتصادی مطابق با یک سایت با اندازه و مشخصات معین در تهران در جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ ارائه میگردد.

**جدول ۳: اطلاعات ورودی سازه ای**

نوع مسیر	تعداد محور ساده ۸،۲ تنی هم ارز در طول عمر مفید روسازی	عدد مقاومت خاک بستر	عدد مقاومت خاک بستر لایه ذخیره	شرایط خاک بستر	نوع خیابان
خیابان	۵۰۰۰۰۰	CBR ۱۵	CBR ۸۰	خاک خشک (تابستان و پاییز)	فرعی

**جدول ۴: اطلاعات ورودی مشخصات عمومی روسازی**

جنس لایه رویه	* ضخامت لایه رویه روسازی	طول روسازی	پهنای روسازی	شیب سطح روسازی	جنس لایه ذخیره	جنس ضحامت لایه فیلتر	اندازه موثر دانه های لایه ذخیره	نسبت سطح نفوذناپذیر به نفوذپذیر
بتن متخلخل	۱۵۰ میلیمتر	۲۰ متر	۳ متر	۱ درصد	پامیس	۵ سانتیمتر	۴،۷۵ میلیمتر	۳

\* میبایستی حداقل برابر با ضخامت که توسط محاسبات سازه ای بدست می آید، باشد.

**جدول ۵: اطلاعات ورودی هیدرولوژیکی**

بارش میانگین منطقه	باران طرح منطقه	الگوی توزیع بارش	عدد منحنی منطقه	ضریب رواناب سطح نفوذناپذیر	جنس خاک بستر
* ۲۴۰ میلیمتر	۳۰ میلیمتر	II	۹۸	۰،۹۸	ماسه، ماسه لومی یا لوم ماسه ای

\* به مانند ایستگاه مهرآباد

**جدول ۶: اطلاعات ورودی اقتصادی**

دوره عمر روسازی	میانگین نرخ بهره سالانه در دوره عمر روسازی	میانگین نرخ تورم سالانه در دوره عمر روسازی	نرخ دلار	تاریخ شروع به ساخت روسازی	میانگین نرخ تورم سالانه از سال ۱۳۹۲ تا سال شروع به ساخت روسازی
۲۰ سال	* ۱۲ درصد	** ۲۸ درصد	۲۵۰۰ تومان	سال ۱۳۹۲	۲۸ درصد

\* عدد ۱۲ به عنوان یک عدد اولیه بنا بر گزارش بانک مرکزی در سال ۱۳۹۱ میتواند فرض گردد. مقدار این پارامتر برابر میانگین نرخ بهره پیش بینی شده در طول دوره عمر روسازی میباشد.  
\*\* عدد ۲۸ به عنوان یک عدد اولیه و بنا بر نرخ تورم نقطه به نقطه در ابتدای سال ۱۳۹۲ (فروردین ماه) میتواند فرض گردد (همچنین نرخ تورم میانگین در ۲۰ سال گذشته بنا بر گزارش بانک مرکزی مطابق نرخ مذکور میباشد). مقدار این پارامتر برابر میانگین نرخ تورم پیش بینی شده در طول دوره عمر روسازی میباشد.

۳-۲. **اطلاعات خروجی:** اطلاعات خروجی کسب شده از نرم افزار طراحی روسازی در قالب اطلاعات خروجی سازه ای، مشخصات عمومی، اقتصادی و کیفی به ترتیب در جداول ۷، ۸، ۹ و ۱۰ قابل مشاهده است. همچنین اطلاعات خروجی هیدرولوژیکی در قالب ۶ بخش در جداول ۱۱ الی ۱۵ و در بند ۴-۱-۲ ذکر گردیده است.

**جدول ۷: اطلاعات خروجی سازه ای**

ضریب باربری خاک بستر	ضریب باربری لایه ذخیره	ضریب باربری منطقه ای	نشانه خدمت نهایی	عدد سازه ای لایه ذخیره	عدد سازه ای خاک بستر	ضخامت سازه ای لایه رویه روسازی	ضخامت سازه ای لایه ذخیره
۵،۶	۹،۸	۰،۹	۲	۱،۴	۲،۴	۸ سانتیمتر	۱۸ سانتیمتر

**جدول ۸: اطلاعات خروجی مشخصات عمومی روسازی نفوذپذیر**

اندازه سطح روسازی نفوذپذیر	تخلخل لایه رویه روسازی	تخلخل موثر لایه رویه روسازی	اندازه سطح نفوذناپذیر
۶۰ متر	۰،۲	۰،۱۵	۱۸۰ متر

**جدول ۹: اطلاعات خروجی اقتصادی**

هزینه ساخت اولیه	هزینه طراحی روسازی، گرفتن مجوز و عملیات احتمالی	هزینه نگهداری روسازی در سال اول	هزینه در دوره عمر روسازی
۳ میلیون و ۳۱۵ هزار تومان	۸۲۰ هزار تومان	۱۹۰ هزار تومان	۱۱۱۰۶۱ میلیون تومان

**جدول ۱۰: اطلاعات خروجی کیفی**

آلاینده مورد نظر	جامدات معلق کل (TSS)	مس (Cu)
محدوده راندمان حذف (درصد)	۸۸ < Removal < ۹۸	۸۰

- ۳-۲-۱. همانگونه که در ابتدای این بخش ذکر گردید اطلاعات خروجی هیدرولوژیکی در قالب ۶ بخش ارائه میگردد.  
۳-۲-۱-۱. نرخ نفوذ خاک بستر: مطابق طبقه بندی HSG<sup>۱</sup> و دسته بندی خاک در نوع A، برابر ۷٫۵ میلیمتر بر ساعت میباشد.  
۳-۲-۱-۲. مشخصات رواناب که در جدول ۱۱ مشخص است.

جدول ۱۱: مشخصات رواناب در حوضه

پارامتر S (ظرفیت نگهداشت) در رابطه NRCS	ارتفاع رواناب با استفاده از روش NRCS	ارتفاع رواناب با استفاده از روش منطقی
۰٫۵۲	۲۹ میلیمتر در طول ۲۴ ساعت بارش	۲۹ میلیمتر در طول ۲۴ ساعت بارش

- ۳-۲-۳. مشخصات لایه ذخیره که در جدول ۱۲ قابل مشاهده میباشد.

جدول ۱۲: مشخصات لایه ذخیره در اطلاعات خروجی هیدرولوژیکی

تخلخل لایه ذخیره	زمان پر شدن (Fill Time)	ضخامت لایه ذخیره
۰٫۷۷	مطابق آیین نامه مدیریت رواناب Iowa برابر ۲ ساعت فرض میگردد.	۱۸۰* میلیمتر

\* ۱۲۶ میلیمتر مطابق طراحی هیدرولوژیکی بدست می آید، اما از آنجا که کمینه ارتفاع لایه ذخیره برابر ارتفاع بدست آمده از مدول سازه ای میباشد، لذا ارتفاع برابر ۱۸۰ میلیمتر فرض میشود.

- ۳-۲-۴. محاسبات مختلف منبعث از توزیع بارش و هیدروگراف شکل گرفته در محل روسازی نفوذپذیر؛ در جدول ۱۳ مشخص است.

جدول ۱۳: اطلاعات خروجی حاصل از توزیع بارش

حداکثر شدت بارش	حداکثر نرخ جریان ورودی به روسازی	حداکثر نرخ جریان خروجی توسط نفوذ	مقداری که تبدیل به رواناب میشود (در هر یازده ۱۰ دقیقه ای)	ظرفیت کل لایه ذخیره	آیا ارتفاع جریان خروجی بیشینه در کف لایه ذخیره از ارتفاع لایه ذخیره کمتر میباشد؟
۹٫۷۲ میلیمتر	۲٫۲۸۶ متر مکعب در ساعت	۰٫۲۵ متر مکعب در ساعت	۰ متر مکعب	۸٫۲۵ متر مکعب	صحیح است

- ۳-۲-۵. پیش بینی هدایت هیدرولیکی لایه ذخیره به همراه فرضیات محاسبه که در جدول ۱۴ نمایان است.

جدول ۱۴: فرضیات و مقادیر پیش بینی شده هدایت هیدرولیکی برای لایه ذخیره

فرضیات در نظر گرفته شده	$d_e = ۴٫۷۵$ (mm)	$\rho = ۱۰۰۰$ (kg/m <sup>۳</sup> )	$g = ۹٫۸۱$ (m/s <sup>۲</sup> )	$\mu = ۰٫۰۱۰۰۳$ (kg.s/m)
مقدار هدایت هیدرولیکی	توسط مدل ترزاقی: ۲٫۰۳۳ متر بر ثانیه	توسط مدل اسلیجر: ۰٫۹۳۵ متر بر ثانیه		

- ۳-۲-۶. محاسبات آب ماندگی (Ponding) در لایه ذخیره که در جدول ۱۵ نمایان میباشد.

جدول ۱۵: محاسبات آب ماندگی در لایه ذخیره

ماکزیمم ارتفاع پوندینگ در لایه ذخیره در طول بارش	جریان پایه در لایه ذخیره در طول ۲۴ ساعت بارش	مقدار آب باقیمانده در لایه ذخیره بعد از ۳۰ ساعت	اندازه باران بعدی که میتواند در لایه ذخیره نگهداشت شود	آیا لایه ذخیره در طول ۳۰ ساعت خالی میشود؟	آیا لایه ذخیره در طول ۷۲ ساعت خالی میشود؟	*بیان جریان رواناب در لایه ذخیره در طول ۷۲ ساعت بررسی روسازی	*بیان جریان رواناب در لایه ذخیره در طول ۲۴ ساعت بارش
۰٫۱۹ متر	۰ متر	۰ متر	۱۳۷٫۵ میلیمتر	صحیح است	صحیح است	۲۶٫۱۰ متر مکعب	۳٫۷۵ متر مکعب

\* برابر است با (Inflow - Outflow) در لایه ذخیره؛ منفی بودن این پارامتر نشان دهنده نفوذ تمام رواناب به خاک بستر و خالی بودن لایه ذخیره در انتهای ۲۴ ساعت / ۷۲ ساعت میباشد.

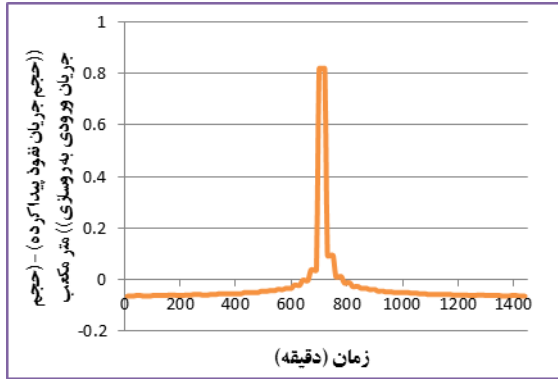
### ۳-۳. انواع نمودارهای قابل رسم و تحلیل آنها

۱- نمودار ((حجم جریان نفوذ پیدا کرده) - (حجم جریان ورودی به روسازی)) بر حسب زمان: این پارامتر تا زمانی که حجم جریان ورودی به روسازی از ظرفیت جریانی که میتواند توسط خاک نفوذ پیدا کند کمتر باشد، منفی است؛ این بدین معنا است که تمام رواناب که وارد ساختار روسازی میشود در طول یک بازه زمانی ۱۰ دقیقه ای نفوذ پیدا میکند. مطابق شکل ۶، در یک بازه زمانی تقریباً ۱۰۰ الی ۱۵۰ دقیقه ای با شدت گرفتن میزان بارندگی، نرخ جریان ورودی به روسازی از ظرفیت نفوذ خاک بستر در یک بازه ۱۰ دقیقه ای فراتر رفته و رواناب در لایه ذخیره، نگهداشت میشود. نمودار نشان میدهد که حداکثر مقدار نگهداشت جریان در لایه ذخیره در یک بازه زمانی ۱۰ دقیقه ای، ۰٫۸ متر مکعب و حدوداً ۷۲۰ دقیقه بعد از آغاز بارندگی میباشد.

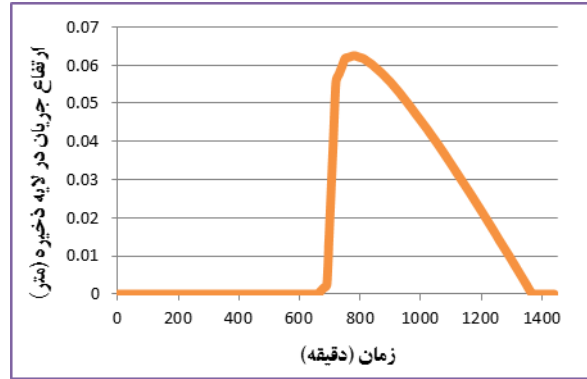
<sup>۱</sup> Hydrologic Soil Group

<sup>۲</sup> ویسکوزیته دینامیکی که در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد فرض میگردد.

۲- نمودار ارتفاع جریان در لایه ذخیره بر حسب زمان در طول بارش: این نمودار نشانگر ارتفاع جریان در لایه ذخیره در طول بارش است. همانطور که از شکل ۷ برمی آید، ارتفاع جریان ۰,۰۶۲ متر برابر حداکثر ارتفاع رواناب در لایه ذخیره در طول ۲۴ ساعت بارندگی می باشد.

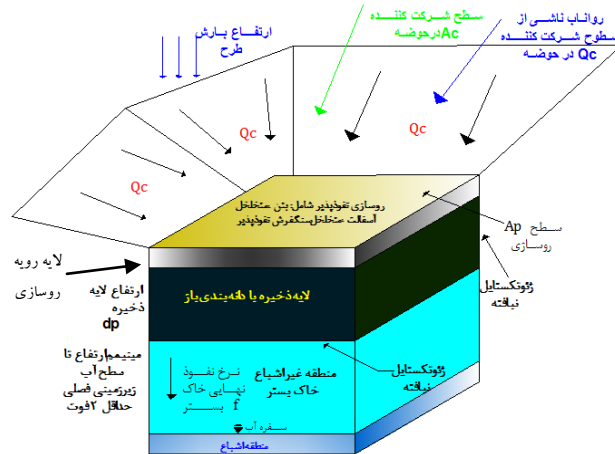


شکل ۶: نمودار ((حجم جریان نفوذ پیدا کرده)) - (حجم جریان ورودی به روسازی)) بر حسب زمان



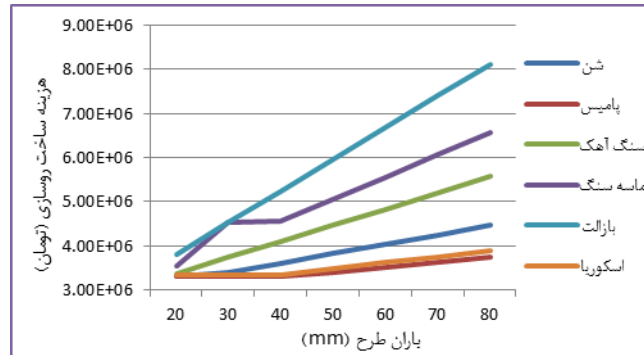
شکل ۷: نمودار ارتفاع جریان در لایه ذخیره بر حسب زمان

شکل ۸ شماتیک معنایی از اجزای طراحی روسازی نفوذپذیر از جمله لایه ذخیره، جریان وارده به سطح نفوذپذیر و ارتفاع بارش را نشان می دهد.



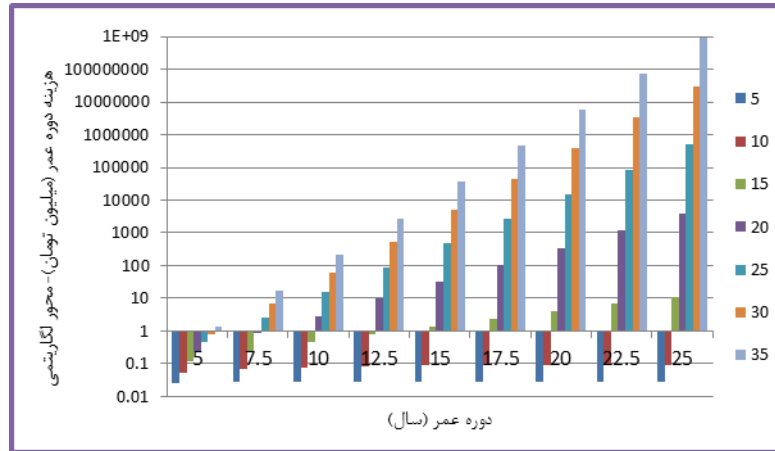
شکل ۸: شماتیکی از اجزای روسازی نفوذپذیر

۳- نمودار تغییرات هزینه ساخت روسازی برای مقادیر متفاوت باران طرح و زیرسازی های مختلف در مثال طراحی: در این گزینه با تغییر مقدار باران طرح (که معرف منطقه مورد مطالعه می باشد) و همچنین جنس لایه ذخیره، چه تغییری در هزینه ساخت روسازی ایجاد میشود. مطابق شکل ۹، روسازی با بستر اسکوریا و پامیس دارای کمترین هزینه ساخت و سنگ بازالت دارای بیشترین هزینه ساخت با مشخصات فوق الذکر می باشد. مطابق این نمودار، روسازی های نفوذپذیر با بستر سنگهای پامیس و اسکوریا از مقدار باران طرح حدودا ۳۵ میلیمتر و کمتر در هر مقدار باران طرحی دارای هزینه ساخت ثابتی خواهند بود، دلیل آن نیز ثابت بودن ضخامت لایه ذخیره بنا بر محاسبات سازه ای می باشد. در رابطه با استفاده از پامیس و اسکوریا به عنوان بستر روسازی نفوذپذیر در معابر ترافیک رو نیاز به مطالعاتی در آینده وجود دارد اما در بستر پیاده روها به راحتی میتوان از این مصالح نوین استفاده کرد. سنگ بازالت به دلیل هزینه تمام شده بالا (با وجود راندمان بالا در حذف فلزات سنگین) نمیتواند گزینه مناسبی برای استفاده در لایه ذخیره تلقی گردد.



شکل ۹: نمودار تغییرات هزینه ساخت روسازی برای مقادیر متفاوت باران طرح و زیرسازی های مختلف

۴- نمودار تغییرات هزینه دوره عمر برای مقادیر متفاوت دوره عمر و نرخ تورم در مثال طراحی: در مثال طراحی دوره عمر ۲۰ سال و نرخ تورم ۲۸ درصد فرض شده است. در شکل ۱۰ دیده میشود که با تغییر دو پارامتر مذکور چه تغییری در هزینه دوره عمر روسازی ایجاد میگردد.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات هزینه دوره عمر برای مقادیر متفاوت دوره عمر و نرخ تورم

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق با بررسی ادبیات موجود در رابطه با سطوح نفوذپذیر و مطالعه دستورالعملهای منتخب در قالب چهار مدل (سازه ای، هیدرولوژیکی، اقتصادی و کیفی) اقدام به توسعه ایجاد نرم افزار طراحی روسازی نفوذپذیر شده است. نرم افزار که تحت عنوان PDDM<sup>۱</sup> مطرح است، قادر میباشد بنابر بنابر انتخاب کاربر و یکسری از متغیرهای ورودی که توسط طراح در قالب مشخصات عمومی روسازی نفوذپذیر، سازه ای، هیدرولوژیکی و اقتصادی انتخاب میگردد، متغیرهای خروجی را در قالب سه مدل (هیدرولوژیکی، اقتصادی و کیفی) ارائه دهد. همچنین در این بررسی به ارائه نتایج یک مثال طراحی با وارد کردن یکسری اطلاعات ورودی به نرم افزار، و کسب اطلاعات خروجی و نمودارهایی از نرم افزار با هدف درک بهتر عملکرد روسازی نفوذپذیر و تحلیل حساسیت میان چندین پارامتر پرداخته شد.

#### ۵. مراجع

- 1- Barbosa, A.E., Fernandes, J.N. & David, L.M. (2012), "Key issues for sustainable urban stormwater management", Journal of Water Research, pp.1-12.
- 2- Zoppu, L. (2001), "Review of urban storm water models", Journal of Environmental Modelling & Software, 36, pp.195-231.
- 3- Bean, E.Z., Hunt, W.F. & Bidelspach, D.A. (2007), "Evaluation of Four Permeable Pavement Sites in Eastern North Carolina for Runoff Reduction and Water Quality Impacts". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 133(6), pp.583-92.
- 4- Josha, F.B. (2006), "Performance Assessment of Porous Asphalt for Stormwater Treatment". Thesis Master of Environmental Engineering, University of New Hampshire.
- 5- Diekres, D., Holte, A. & Geiger, F.W. (1999), "Heavy metal retention within a porous pavement structure".
- 6- Hein, D.K., Schaus, L. & Swan, D.J. (2010), "Structural and Hydrological Design of Permeable Pavements". In Paper prepared for presentation at the Pavements Session of the 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada/Halifax. Nova Scotia, 2010.
- 7- Leming, L.M., Malcom, H.R. & Tennis, P.D. (2007), "Hydrologic Design of Pervious Concrete"
- 8- Iowa Stormwater Management Manual, (2010).
- 9- Kuang, X., Sansalone, J., Ying, G. & Ranieri, V. (2011), "Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement". Journal of Hydrology, 399, pp.148-57.
- 10- Narayanan, A. & Pitt, R. (2005), "Costs of Urban Stormwater Control Practices", USEPA.
- 11- EPA, (1999), "Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices", Chapter 6: Costs and Benefits of Storm Water BMPs. Washington DC: U.S Environmental Protection Agency, Office of Water.
- 12- Weiss, P.T., Gulliver, J.S. & Erickson, A.J. (2007), "Cost and Pollutant Removal of Storm-Water Treatment Practices", Journal of Water Resources Planning and Management, 133(3), pp.218-229, 453-463.

<sup>1</sup> Permeable/Pervious Pavement Design Model