

## بهبود کیفیت رواناب شهری با استفاده از بهترین راهکارهای مدیریتی با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی در تهران

سکینه توکلی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف

sakineh.tavakoli@gmail.com

مسعود تجریشی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

tajrishy@sharif.edu

### چکیده

گسترش شهرنشینی منجر به زوال درازمدت کیفیت محیط زیست شده است. در طول دهه‌های اخیر، برنامه‌های تحقیقاتی یکی از دلایل اصلی آلودگی آب در بیشتر مناطق شهری را ورود رواناب شهری به درون منابع آب ذکر کرده‌اند. برای حل مشکلات رواناب شهری و آلودگی همراه با آن، باید از اقدامات اصلاحی استفاده کرد. این امر با کاربرد بهترین راهکارهای مدیریتی (BMPها)، امکان پذیر می‌باشد. در این مقاله سه نوع از انواع BMP مورد بحث قرار گرفته‌اند. جوی‌باغچه، سیستم ماند بیولوژیکی و برکه. هدف این تحقیق، پیدا کردن کم‌هزینه‌ترین ترکیب این سه نوع تکنولوژی با تمرکز بر کاهش غلظت کل جامدات معلق، فسفر و نیتروژن کل جهت برآورد استانداردهای کیفی آب‌های سطحی درون شهری در حوضه آبریز مقصودیگک واقع در شمال تهران است. بدین منظور از دو مدل اصلی استفاده شده است: مدل کیفی و مدل اقتصادی. مدل کیفی (MUSIC) توانایی شبیه‌سازی کمیت و کیفیت رواناب خروجی از یک حوضه و تاثیر تسهیلات تصفیه بر روی کیفیت پایین دست رواناب را دارد. مدل اقتصادی (GAMS) با در نظر گرفتن هزینه‌های دوره عمر BMPها، بهینه‌سازی با کمترین هزینه را انجام می‌دهد. برای سه BMP مورد مطالعه، با صرف نظر از هزینه زمین، جوی-باغچه کم‌هزینه‌ترین گزینه جهت اجرا و بکارگیری در این منطقه است.

واژه‌های کلیدی: رواناب شهری، BMPها، تهران، حوضه مقصودیگک، هزینه‌های دوره عمر، MUSIC، GAMS

## ۱- مقدمه

### ۱-۲- مدیریت رواناب شهری

مدیریت رواناب شهری در مقایسه با مدیریت فاضلاب یا مدیریت منابع آب مورد توجه کمتری قرار گرفته است. نگرش‌های سنتی نسبت به رواناب شهری، تنها به خروج سریع رواناب از مراکز شهری توجه داشتند. برای یک مدت زمان طولانی تصور می‌شد آلودگی رواناب کمتر از فاضلاب است. کنترل تدریجی فاضلاب در اروپا توسط برنامه‌های تصفیه فاضلاب<sup>۱</sup> آلودگی رواناب را به عنوان نتیجه تخریب شدید بدنه‌های آبی بعد از رویدادهای بارندگی آشکار ساخت. مطالعات متعددی ثابت کرده اند که رواناب شهری به شدت آلوده بوده و میزان آلودگی آن کاملاً با آلودگی فاضلاب قابل مقایسه است. [۱]

بهترین راهکارهای مدیریتی (BMPها) بهترین روش برای مدیریت، جلوگیری، کنترل، حذف، کاهش یا تصفیه رواناب شهری و آلودگی رواناب قبل از ورود آلاینده‌ها به آب‌های دریافت کننده هستند. BMPها شامل برنامه‌ها، روش‌ها یا راهکارهای عملکردی، سیستم‌های مهندسی، تکنولوژی‌ها، فرآیندها و معیارهای مکان‌یابی هستند. BMPها می‌توانند غیرسازه‌ای باشند از جمله: کاهش عرض جاده و حذف پیاده‌روها یا می‌توانند سازه‌ای باشند که از راهکارهای کوچک مختص یک مکان تا راهکارهای منطقه‌ای بزرگ مقیاس را شامل می‌شوند.

### ۱-۲- رواناب در تهران

با توجه به قرار داشتن تهران در زمره مناطق خشک جهان (متوسط سالانه میزان بارندگی در تهران حدود ۲۳۰ میلی‌متر با دامنه تغییرات ۴۰۰-۲۰۰ میلی‌متر و میزان متوسط بارندگی سالانه در دنیا ۸۶۰ میلی‌متر گزارش شده است) و نقش حیاتی آب به عنوان مهم‌ترین عامل توسعه در حال حاضر و آینده، ضرورت مدیریت جامع آب با نگرش کمی و کیفی روز به روز بیشتر احساس می‌شود. تا کنون منابع آلودگی نقطه‌ای آب مانند فاضلاب‌های شهری و صنعتی مورد توجه و کنترل بیشتری نسبت به رواناب‌های سطحی قرار گرفته‌اند. کمبود آب شیرین و افزایش جمعیت، روند افزایشی مصرف آب را نمایان ساخته است. علاوه بر موارد فوق، زوال کیفیت منابع آب در دسترس نیز مشکلات عدیده‌ای را ایجاد نموده است. [۲]

افزایش جمعیت و توسعه کشاورزی از یک سو و محدود بودن منابع آب تجدیدپذیر قابل دسترس در سطح جهان از سوی دیگر، سبب شده است تا سرانه آب قابل دسترس مرتباً کاهش یافته و در بعضی از نقاط جهان، با تنش آبی مواجه شوند. در چنین وضعیتی، اهمیت منابع آب تجدیدپذیر، پس از فاضلاب شهر، رواناب‌های سطحی می‌باشد که بسته به کاربرد مورد نظر و خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی رواناب، نیازمند صدور برخی مجوزها از سوی سازمان‌های ذیربط از جمله سازمان محیط زیست می‌باشد. حذف منابع آلاینده از طریق تصفیه رواناب‌های سطحی، امکان استفاده از این منبع برای نیازهای آبی مختلف و حتی بهداشتی را نیز فراهم می‌سازد. [۳]

### ۱-۳- اهداف تحقیق

در این تحقیق سه تکنولوژی BMP جوی‌باغچه، سیستم ماند بیولوژیکی و برکه برای شبیه‌سازی کاهش غلظت کل جامدات معلق، فسفر کل و نیتروژن کل ناشی از گسترش شهرها استفاده شده است. هر BMP، ملزومات اجرا، هزینه و بازدهی حذف آلاینده متفاوتی دارد. هدف این مقاله یافتن کم‌هزینه‌ترین ترکیب تکنولوژی‌های BMP برای کاهش غلظت آلاینده‌ها تا یک سطح قابل قبول بر اساس استانداردهای متداول کیفیت آب است. با توجه به آنکه BMPهای اعمال شده باید بتوانند استانداردهای مزبور را ارضا کنند، هزینه‌های اجرای BMPها محاسبه و با توجه به این هزینه‌ها تصمیم‌گیری برای انتخاب گزینه برتر صورت گرفت.

<sup>۱</sup> WWTP: Waste Water Treatment Plants

BMPها تکنولوژی‌های مهندسی اکولوژیکی هستند. برخلاف رویکردهای مهندسی محیط زیستی معمول، BMPها خواص منحصر به فرد و توانایی‌های طبیعت برای تصفیه آب را با هم تلفیق می‌کنند. مطالعات کمی روی چگونگی استفاده از این تکنولوژی‌های جدید برای حل مسائل مرتبط با توسعه شهری و تغییرات کاربری زمین وجود دارد. در این تحقیق ابتدا کیفیت رواناب شهری شبیه‌سازی و سپس فهم کاملی از هزینه‌ها و بازدهی حذف BMPها ارائه خواهد شد. سپس پایه‌ای برای تصمیم‌گیری با توجه به توازن بین توسعه شهری و حفاظت محیط زیست ارائه و از اصول اقتصادی برای انتخاب گزینه‌ها برای رسیدن به استانداردهای کیفی آب‌های سطحی استفاده خواهد شد.

برای برآوردن این اهداف از دو مدل کیفی و اقتصادی استفاده شده است. مدل کیفی بر روی میزان تولید آلاینده‌ها و کارایی BMPها در حذف این آلاینده‌ها و مدل اقتصادی با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی کم‌هزینه‌ترین ترکیب BMPها را که استانداردهای کیفی آب را برآورده می‌کند، جستجو می‌کند. این نتایج می‌تواند پایه‌ای برای تصمیم‌سازی و اجرای سیاست‌های زیست‌محیطی مناسب برای بهبود کیفیت رواناب‌ها باشد.

#### ۱-۴- بهترین راهکارهای مدیریتی [۴]

همان‌طور که گفته شد، در این مطالعه سه BMP جوی‌باغچه، سیستم ماند بیولوژیکی و برکه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه توضیحاتی مختصر برای این سه راهکار مدیریتی ارائه گردیده است.

#### ۱-۴-۱- جوی باغچه<sup>۱</sup>

جوی باغچه‌ها، سیستم‌های کانال باز هستند که از پوشش گیاهی برای کمک به حذف رسوبات و جامدات معلق استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها در معرض بارگذاری‌های هیدرولیکی هستند و بازده حذف آنها به تراکم، ارتفاع و پوشش گیاهی در کانال بستگی دارد. (شکل ۱) در این مطالعه منظور از جوی‌باغچه، باغچه‌های حادثی در کنار جوی‌ها هستند.



شکل (۱). نمونه‌ای از جوی‌باغچه

#### ۱-۴-۲- سیستم‌های ماند بیولوژیکی<sup>۲</sup>

این سیستم‌ها با عبور رواناب از یک بستر فیلتر، حذف ذرات و آلاینده‌های محلول را بهبود می‌بخشند. نوع بستر فیلتر کارآیی حذف آلاینده را تعیین می‌کند. در این سیستم‌ها محیط متخلخل با هدایت هیدرولیکی پایین تر کارآیی حذف آلاینده بیشتری دارند. (به علت زمان ماند و مساحت سطح بیشتر). این فیلترها از شن (حدود 10mm) تا ماسه ریزدانه (حدود 0.1mm) تشکیل می‌شوند. (شکل ۲)

<sup>۱</sup> Vegetated Swale

<sup>۲</sup> Bio-retention Systems



شکل (۲). نمونه‌ای از سیستم ماند بیولوژیکی

#### ۱-۴-۳- برکه<sup>۱</sup>

شامل روش‌های تصفیه رواناب از جمله بدنه‌های باز آبی (بدون نواحی عمده با پوشش گیاهی کم عمق در مسیرهای جریان) و برکه‌های با آرایش گیاهی می‌باشند. تصفیه رواناب عموماً با ماند موقت برای تسهیل ته‌نشینی جامدات معلق صورت می‌گیرد. دیگر فرآیندهای تصفیه شامل جذب مواد مغذی محلول توسط گیاهان شناور و گندزدایی توسط طول موج ماورای بنفش خورشید می‌باشد. (شکل ۳)



شکل (۳). نمونه‌ای از برکه

#### ۱-۵- مطالعات پیشین

چون در سال ۲۰۰۶ چهار نوع BMP (برکه، تالاب، سیستم‌های نفوذ و سیستم‌های فیلتراسیون) را مورد بررسی قرار داد و به یافتن کم‌هزینه‌ترین ترکیب این چهار نوع تکنولوژی با تمرکز بر رسوبات معلق جهت برآوردن استانداردهای TMDL<sup>۲</sup> و EQS<sup>۳</sup> پرداخت. وی در کار خود از سه مدل مکانی، حوضه‌ای و اقتصادی استفاده کرد. این مدل‌ها تحلیل‌های لازم را برای معرفی توسعه مسکونی موجود، استقرار تکنولوژی‌های BMP موجود، شبیه‌سازی آلاینده‌ها و رواناب و بهینه‌سازی به منظور یافتن کم‌هزینه‌ترین استراتژی انجام می‌دهند. نتایج این تحقیق به عنوان یک مرجع عملی برای تصمیم‌گیری و با توجه به سناریوهای مختلفی که بررسی شدند؛ اطلاعاتی در ارتباط با ارزیابی اقتصادی استانداردهای TMDL و EQS را در اختیار قرار می‌دهد. [۵]

هم‌چنین ویس و همکاران در سال ۲۰۰۷، شش BMP کنترل رواناب را برای تصفیه رواناب شهری مورد مطالعه و هزینه و کارایی آنها را در حذف رسوبات معلق و فسفر کل مورد ارزیابی قرار دادند. برای شش BMP حوضچه مبسوط خشک، حوضچه مرطوب، فیلتر ماسه‌ای، تالاب، فیلترهای ماند بیولوژیکی و ترانسه‌های نفوذ؛ هزینه ساخت و هزینه نگهداری سالانه با استفاده از اطلاعات BMP‌های موجود در آمریکا جمع‌آوری شد. بعد از در نظر گرفتن مقادیر نرخ بهره و تورم، هزینه عملیات و نگهداری سالانه با در نظر گرفتن

<sup>1</sup> Pond

<sup>2</sup> Total Maximum Daily Load

<sup>3</sup> Environmental Quality

دوره عمر ۲۰ ساله به ارزش حاضر تبدیل و با هزینه ساخت جمع شد. سپس جرم کل جامدات معلق و جرم فسفر حذف شده به صورت تابعی از حجم آب تصفیه شده توسط BMPها تخمین زده شد. نتایج نشان داد که برای شش BMPی مورد مطالعه، با صرف نظر کردن از هزینه زمین، تالاب کم هزینه ترین BMP است (اگر زمین کافی وجود داشته باشد). ولی از آنجا که تالاب زمین زیادی نیاز دارد، هزینه زمین مورد نیاز برای تالاب نسبت به هزینه زمین مورد نیاز برای سایر BMPها که زمین کمتری نیاز دارند، بیشتر است. نتایج کار مطالعه آنها می تواند به برنامه ریزان و طراحان برای تخمین هزینه نصب BMPها و کل جامدات معلق و فسفر کل حذف شده توسط BMPها مورد استفاده قرار گیرد. [۶]

## ۲- روش کار

### ۲-۱- خلاصه روش کار

فعالیت های مختلف اثرات متفاوتی روی محیط زیست می گذارند. نحوه بهینه کاهش این اثرات برای حفظ کیفیت محیط زیست که توسط استانداردهای مشخصی تعیین می شود، به موضوع مهمی برای برنامه ریزان، تصمیم گیرندگان و مدیران شهری تبدیل شده است. روش هزینه و بهره وری برای انتخاب خط مشی ها یا تکنولوژی هایی که کمترین هزینه را دارند و اثرات زیست محیطی را در محدوده استاندارد نگه می دارند، مورد استفاده قرار می گیرد. در این مطالعه روش برنامه ریزی خطی برای جستجوی کم هزینه ترین ترکیب BMPها که استانداردهای کیفی آب را برآورده می کند به کار گرفته شد. استاندارد کیفی آب های سطحی سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا مبنای این مدل سازی قرار گرفته است. (جدول ۱) GAMS یک سیستم مدل سازی سطح بالا برای برنامه ریزی و بهینه سازی ریاضی است و برای حل این برنامه ریزی خطی به کار گرفته شد. در ادامه ابتدا مدل اقتصادی که برای حل این مسئله در نظر گرفته شد، تشریح می شود و سپس داده های لازم برای حل این مدل و نحوه به دست آوردن آنها توضیح داده می شود.

جدول (۱). مقادیر استاندارد غلظت آلاینده ها در آب های سطحی، EPA [۷] و [۸]

آلاینده	مقدار استاندارد (mg/L)
TSS	۳۵
TP	۰٫۱
TN	۱٫۵

### ۲-۲- مدل اقتصادی

دو مسئله مهم که باید در مدل اقتصادی در نظر گرفته شود، حذف آلاینده و ترکیب BMPهاست. یک یا ترکیبی از BMPها می تواند برای کاهش بار آلودگی به کار رود. در هر حال، مکان های مختلف برای جایگذاری BMPهای متفاوتی مناسب هستند. هر BMP ملزومات فیزیکی متفاوتی از جمله شیب، مشخصات خاک، حداقل مساحت زهکشی، حداقل مساحت تعبیه و عمق آب زیرزمینی و هم چنین هزینه متفاوتی برای ساخت و نگهداری دارد. با توجه به این موارد مدل اقتصادی در ادامه تعریف می شود.

### ۲-۲-۱- هدف مدل

هدف تعیین کم هزینه ترین ترکیب BMPها بر اساس استانداردهای کیفی است. هزینه کل پروژه تابعی از هزینه هر یک از BMPهاست. تابع هدف در این تحقیق به صورت رابطه (۱) تعریف می شود.

$$Total\ Cost = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p C_{ijk} X_{ijk} \quad (1)$$

که در آن:

$C_{ijk}$ : هزینه کل (هزینه دوره عمر) ترکیب کتابی BMP ی  $i$ ام که در زیرحوضه  $j$ ام ساخته می شود،

$X_{ijk}$ : ترکیب کتابی BMP ی  $i$ ام که در زیرحوضه  $j$ ام ساخته می شود. این متغیر به صورت متغیر باینری (صفر و یک) تعریف می شود.

$i$ : نوع BMP،

$j$ : زیر حوضه،

$k$ : تعداد BMP (این تعداد به صورت ترکیب کتابی تعریف می شود)

رابطه (۱) هزینه کل دوره عمر BMPها را نشان می دهد. هزینه هر BMP محاسبه شده و به مدل داده می شود و تعداد هر BMP (به صورت صفر یا یک) متغیر مسئله است.

## ۲-۲-۲- محدودیت های مدل

### ۲-۲-۲-۱- هزینه BMP

هزینه هر BMP سازه ای کنترل و بهبود کیفیت رواناب شامل هزینه ساخت، طراحی، عملیات احتمالی و هزینه نگهداری می شود. در این مطالعه از هزینه زمین صرف نظر شده و هزینه نگهداری به صورت هزینه سالانه در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه هر BMP دوره عمر متفاوتی دارد، همه هزینه های دوره عمر یک BMP به ارزش حاضر تبدیل شدند.

### ۲-۲-۲-۲- بازدهی حذف آلاینده BMPها

هر BMP بازدهی حذف آلاینده متفاوتی دارد. این بازدهی برای هر یک از BMPها در حذف هر یک از آلاینده ها با استفاده از مدل کیفی محاسبه می شود. روابط (۲) تا (۴) محدودیت برآوردن استانداردهای کیفی آب های سطحی را با توجه به بازدهی حذف آلاینده ها نشان می دهند.

$$I_{TP} \left( \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \prod_{k=1}^p (1 - a_{ijk})^{X_{ijk}} \right) \leq I_{s,TP} \quad (2)$$

$$I_{TN} \left( \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \prod_{k=1}^p (1 - b_{ijk})^{X_{ijk}} \right) \leq I_{s,TN} \quad (3)$$

$$I_{TSS} \left( \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \prod_{k=1}^p (1 - d_{ijk})^{X_{ijk}} \right) \leq I_{s,TSS} \quad (4)$$

که در آن:

- ITP: مقدار اولیه غلظت فسفر کل در حوضه (قبل از به کارگیری BMPها)  
 ITN: مقدار اولیه غلظت نیتروژن کل در حوضه (قبل از به کارگیری BMPها)  
 ITSS: مقدار اولیه غلظت کل جامدات معلق در حوضه (قبل از به کارگیری BMPها)  
 IS,TP: مقدار استاندارد غلظت فسفر کل در خروجی حوضه (بعد از به کارگیری BMPها)  
 IS,TN: مقدار استاندارد غلظت نیتروژن کل در خروجی حوضه (بعد از به کارگیری BMPها)  
 IS,TSS: مقدار استاندارد غلظت کل جامدات معلق در خروجی حوضه (بعد از به کارگیری BMPها)  
 a<sub>ik</sub>: میزان کاهش غلظت فسفر کل توسط ترکیب ktایی BMPی i ام (به صورت درصد)  
 b<sub>ik</sub>: میزان کاهش غلظت نیتروژن کل توسط ترکیب ktایی BMPی i ام (به صورت درصد)  
 d<sub>ik</sub>: میزان کاهش غلظت کل جامدات معلق توسط ترکیب ktایی BMPی i ام (به صورت درصد)

### ۲-۲-۳- مساحت مورد نیاز هر BMP

مساحت مورد نیاز هر BMP مشخص است. همچنین میزان مساحت موجود در هر زیرحوضه برای هر یک از انواع BMP با بازدید میدانی مشخص می‌گردد. در این محدودیت (رابطه ۵) مساحت نهایی یک نوع BMP در یک زیرحوضه نباید از میزان مساحت موجود برای آن نوع BMP تجاوز کند.

$$\sum_{k=1}^p X_{ijk} S_{ik} \leq A_{ij} \quad \forall i, j \quad (5)$$

که در آن:

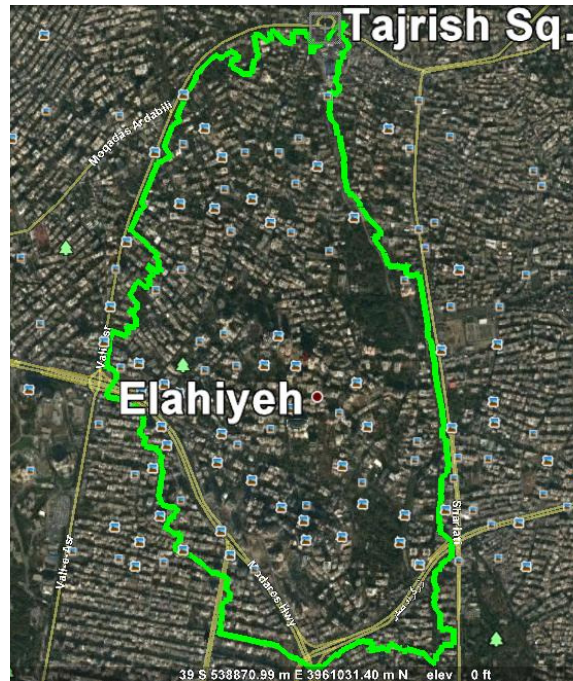
S<sub>ik</sub>: مساحت مورد نیاز برای ترکیب ktایی BMPی نوع i ام و j ام: مساحت موجود در زیرحوضه j ام برای BMP نوع i ام می‌باشد.

### ۳- داده‌ها

در این تحقیق، شهر تهران از میدان تجریش تا تقاطع بزرگراه‌های صدر و مدرس به عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. (شکل ۴) ابتدا امکان سنجی استفاده از انواع BMPها در منطقه همراه با بازدید میدانی تکنولوژی‌های BMP مناسب برای حوضه مورد مطالعه تعیین گردید. سپس با استفاده از مدل MUSIC، کمیت و کیفیت رواناب تولیدی در منطقه مورد مدلسازی قرار گرفت تا میزان حذف TSS، TP و TN توسط BMPهای مختلف مشخص و در نهایت با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی ترکیب بهینه BMPها از نظر اقتصادی (کم هزینه‌ترین استراتژی) که استانداردهای کیفیت آب را برآورده می‌کند، انتخاب گردید.

با توجه به دستورالعمل‌های طراحی BMPها، ویژگی‌هایی از جمله حداقل ابعاد مورد نیاز، نسبت طول به عرض، شیب جانبی و ... برای عملکرد مناسب BMPها باید رعایت شود. با توجه به این ملاحظات و با توجه به فضای موجود در منطقه، دو اندازه تیپ برای طراحی و اجرای جوی باغچه، یک تیپ برای سیستم‌های ماند بیولوژیکی و هم‌چنین برکه در نظر گرفته شد. جدول (۲) ابعاد تیپ‌های BMPهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

داده‌های ورودی به مدل اقتصادی که در بخش‌های قبل تعریف شد، شامل هزینه‌های اجرا و نگهداری، نرخ حذف آلاینده‌ها، محدودیت نصب BMPها، غلظت‌های اولیه آلاینده‌ها و استانداردهای کیفی می‌شوند که هر یک از این موارد در ادامه تشریح می‌شوند.



شکل (۴). محدوده منطقه مطالعاتی

جدول (۲). ابعاد تیب BMPهای مورد استفاده در این مطالعه

BMP	طول (متر)	عرض (متر)
جوی باغچه چمنی	۱۰۰	۳
جوی باغچه چمنی	۱۰۰	۱٫۵
سیستم ماند بیولوژیکی	۱۰	۵
برکه	۱۵	۴

### ۳-۱-۱- هزینه‌ها

#### ۳-۱-۱-۱- هزینه خرید زمین

روش‌های مدیریت و تصفیه رواناب شامل تکنولوژی‌های وسیعی هستند که برای اجرا نیاز به زمین دارند. هزینه اجرای یک BMP شامل هزینه خرید به عنوان هزینه واقعی خرید یا هزینه فرصت (وقتی زمین به طور واقعی خریداری نمی‌شود) می‌باشد. در این مطالعه با توجه به اینکه BMPهای مورد نظر در حاشیه خیابان‌ها یا در محل پارک‌ها و فضاهای سبزی که متعلق به شهرداری بوده، احداث می‌شوند و هزینه‌ای بابت تصرف آنها نباید پرداخت شود، از این هزینه در محاسبه هزینه دوره عمر BMPها صرف نظر شده است.

#### ۳-۱-۲- هزینه اجرا

همان‌گونه که قبلاً گفته شد، چهار BMP در این مطالعه مورد بررسی قرار خواهند گرفت که هر یک هزینه اجرای مخصوص به خود را دارند. هزینه اجرا شامل مجموع هزینه‌های ساخت و طراحی است. هزینه ساخت هر BMP از مولفه‌های مختلفی تشکیل شده است. با



توجه به بررسی‌های انجام شده بر روی دستورالعمل‌های فعالیت‌های عمرانی مشابه در کشور و با مطالعه‌ی ادبیات موجود، این مولفه‌ها برای BMP‌های مورد مطالعه تعیین شدند. جدول (۳) نمونه‌ی این هزینه‌ها را برای یک جوی‌باغچه نمونه نشان می‌دهد.

### جدول (۳). هزینه ساخت و طراحی جوی‌باغچه چمنی به عرض سطح ۳متر

جوی باغچه چمنی (grass swale) به عمق ۰,۵ متر، عرض کف ۰,۵ متر، عرض سطح ۳متر و طول ۱۰۰ متر			
اجزا	واحد	مقدار	بهای واحد (ریال)
آماده سازی محل			
پاکسازی و تسطیح اولیه	متر مربع	۳۲۰	۴۸۰۰۰۰
ریشه کنی گیاهان در زمین	متر مربع	۳۰۰	۶۰۰۰۰۰
خاکبرداری کلی و حمل تا محل تخلیه	متر مکعب	۸۷,۵	۱۱۳۷۵۰۰۰
توسعه محل، استفاده از روخاک (خاک سطحی)			
تسطیح نهایی، بذرپاشی و کود دهی، پوشش چمنی	متر مربع	۳۲۰	۲۱۷۶۰۰۰
<b>جمع جزیی</b>			
عملیات احتمالی (۵/جمع جزیی)	جوی باغچه		۱۹۸۰۷۵۰
هزینه طراحی	متر مربع	۳۰۰	۴۵۰۰۰۰
<b>کل</b>			
			۴۶۰۹۵۷۵۰

### ۳-۱-۳- هزینه بهره‌برداری و نگهداری

بهره‌برداری و نگهداری فعالیت‌های بعد از ساخت هستند که مفید بودن یک اقدام کنترل رواناب اجرا شده را تضمین می‌کنند و شامل نیروی کار، مواد، انرژی و تجهیزات مورد نیاز برای نگهداری منظره، نگهداری سازه‌ای، حذف رسوب از دستگاه‌های کنترل رسوب و دفع آنها و حذف آشغال می‌شوند. در بیشتر مطالعات، هزینه بهره‌برداری و نگهداری (O&M) به صورت درصدی از هزینه ساخت اولیه تخمین زده می‌شود. در حالی که بعضی از BMPها به نگهداری‌های با تکرار کم ولی پرهزینه؛ و برخی دیگر به نگهداری‌های مکرر ولی کم‌هزینه‌تر نیاز دارند. در این تحقیق هزینه بهره‌برداری و نگهداری به صورت درصدی از هزینه اجرا که توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا اعلام شده، در نظر گرفته شد. به علت عدم وجود این نوع داده‌ها در کشور، این هزینه برای جوی‌باغچه و سیستم ماند بیولوژیکی ۶٪ و برای برکه ۴,۵٪ هزینه ساخت فرض شده است. [۹]

### ۳-۱-۴- هزینه نهایی

هزینه نهایی شامل مجموع هزینه ساخت، طراحی و نگهداری است. هزینه ساخت و طراحی به صورت یک هزینه اولیه در ابتدای عمر تسهیلات وارد می‌شود، در صورتی که هزینه نگهداری به صورت یک هزینه سالانه در کل دوره عمر این اقدامات باید در نظر گرفته شود. لذا برای محاسبه هزینه نهایی که مجموع این دو هزینه است باید از ارزش حاضر هزینه‌ها استفاده شود و هزینه نگهداری را به صورت یک هزینه واحد در ابتدای دوره عمر تسهیلات وارد کرد. برای تبدیل هزینه سالانه به ارزش حاضر از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$P = A * E$$

(6)

$$E = \left[ \frac{\left( \frac{1+r}{1+i} \right)^n - 1}{r-i} \right] \quad (7)$$

که در آن:

A: هزینه سالانه، P: ارزش حاضر، E: ضریب تبدیل هزینه سالانه به ارزش حاضر، i: نرخ بهره، r: نرخ تورم و n دوره عمر مفید می-باشد.

با مراجعه به سامانه بانک مرکزی نرخ بهره برابر با ۱۲٪ و نرخ تورم با میانگین گیری از شاخص تورم طی سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۷ برابر با ۲۰٪ در نظر گرفته شد. جدول (۴) هزینه نهایی BMPها را نشان می‌دهد.

جدول (۴). هزینه نهایی BMPهای مورد مطالعه

هزینه سالانه (میلیون تومان)	دوره عمر (سال)	هزینه نگهداری سالانه (میلیون تومان)	هزینه ساخت و طراحی (میلیون تومان)	BMP
۱۳,۴۵	۲۰	۰,۲۴	۴,۶۱	جوی باغچه با عرض ۳متر
۵,۴۹	۲۰	۰,۱۰	۱,۹۱	جوی باغچه با عرض ۱,۵متر
۱۱,۰۸	۲۰	۰,۲۰	۳,۶۰	سیستم ماند بیولوژیکی
۷,۴۲	۲۰	۰,۱۲	۲,۹۲	برکه

### ۳-۲- نرخ حذف آلاینده‌ها

مدل مفهومی بهبود کیفیت رواناب (MUSIC) برای تخمین میزان حذف آلاینده‌ها در حوضه مورد نظر مورد استفاده و سپس خروجی‌های مدل MUSIC به عنوان ورودی‌های مدل اقتصادی مورد استفاده قرار گرفت. MUSIC یک مدل مفهومی برای بهبود رواناب شهری است که توسط مرکز تحقیقات مشترک هیدرولوژی حوضه (CRC)<sup>۱</sup> در استرالیا توسعه یافته است. MUSIC یک ابزار برنامه ریزی و طراحی مفهومی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی کمی و کیفیت رواناب خروجی از یک حوضه، تخمین بار آلودگی که در یک حوضه تولید می‌شود، پیش بینی عملکرد روش‌های تصفیه رواناب، توسعه استراتژی مدیریت رواناب برای یک حوضه و تخمین هزینه‌های دوره عمر سیستم‌های تصفیه رواناب به کار رود.

MUSIC برای کمک به تصمیم‌گیری به کار می‌رود و کاربران را قادر می‌سازد تا طراحی مفهومی سیستم‌های مدیریت رواناب را ارزیابی کنند تا مطمئن شوند که برای حوضه آبریز مورد نظرشان مناسب است. با شبیه‌سازی عملکرد روش‌های بهبود کیفیت رواناب، MUSIC تعیین می‌کند که آیا سیستم‌های پیشنهادی می‌توانند اهداف مشخص کیفیت آب را برآورده کنند یا خیر.

مدل MUSIC برای به دست آوردن توانایی BMPها در حذف آلاینده‌ها به کار گرفته شد. این حذف به صورت درصد حذف آلاینده‌های مختلف توسط BMPها محاسبه شد. یعنی با توجه به مدل‌سازی انجام شده، غلظت ورودی و خروجی یک آلاینده به BMPهای مشخص محاسبه گردید و این درصد حذف به عنوان ورودی به مدل بهینه سازی داده شد. این مدل‌سازی با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر ایستگاه باران‌سنجی تجریش (شمال تهران) در دوره آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ میلادی انجام شد.

روند مدل‌سازی در MUSIC به این صورت است که هر کدام از چهار BMPی مورد مطالعه به طور جداگانه در نرم‌افزار مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرند تا توان حذف آلاینده توسط آنها به دست آید. جدول (۵) نرخ حذف آلاینده‌ها را توسط چهار BMPی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Cooperative Research Center for Catchment Hydrology

جدول (۵). نتایج مدلسازی کیفی، نرخ حذف آلاینده‌ها توسط BMPهای مختلف

آلاینده			BMP
TN	TP	TSS	
٪۳۲	٪۵۴	٪۴۲	جوی باغچه با عرض ۳ متر
٪۳۰	٪۴۸	٪۲۸	جوی باغچه با عرض ۱٫۵ متر
٪۳۳	٪۴۶	٪۲۴	سیستم ماند بیولوژیکی
٪۲۵	٪۲۶	٪۷	برکه

۴- نتایج و بحث

به منظور ایجاد یک پایه اقتصادی برای ارزیابی استانداردهای کیفی آب‌های سطحی، آنالیز حساسیت برای بررسی تغییرات جواب بهینه در برابر تغییرات استاندارد به کار گرفته شد و نتایج برای دو حالت محاسبه شدند. ۱- شرایط موجود، یعنی همان شرایطی که استاندارد کیفی مطابق جدول (۱) باشد. ۲- شرایطی که استاندارد ۵۰٪ سخت گیرانه‌تر باشد. نتایج نشان داد که در هر دو حالت، ترکیب جوی-باغچه‌های با عرض ۱٫۵ و ۳ متر می‌تواند استانداردهای کیفی را در حوضه مورد مطالعه برآورده کنند. جداول (۶) و (۷) جواب بهینه و هزینه‌های مرتبط با آنها را برای این دو حالت نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در حالت دوم هزینه کل پروژه، ۱۳٫۴۵ میلیون تومان نسبت به حالت اول بیشتر است.

جدول (۶). نتایج نهایی مدلسازی، BMPهای انتخاب‌شده و هزینه‌های مرتبط با آنها برای شرایط موجود

BMP	مساحت (مترمربع)	هزینه (میلیون تومان)
جوی باغچه با عرض ۳ متر	۳۰۰	۱۳٫۴۵
جوی باغچه با عرض ۱٫۵ متر	۱۳۵۰	۴۹٫۴۱
سیستم ماند بیولوژیکی	۰	۰
برکه	۰	۰
کل	۱۶۵۰	۶۲٫۸۶

جدول (۷). نتایج نهایی مدلسازی در شرایطی که استاندارد ۵۰٪ سخت گیرانه‌تر باشد

BMP	مساحت (مترمربع)	هزینه (میلیون تومان)
جوی باغچه با عرض ۳ متر	۶۰۰	۲۶٫۹
جوی باغچه با عرض ۱٫۵ متر	۱۳۵۰	۴۹٫۴۱
سیستم ماند بیولوژیکی	۰	۰
برکه	۰	۰
کل	۱۹۵۰	۷۶٫۳۱

#### ۴- فهرست منابع و مآخذ

- [۱] Melbourne Water, 2004, *Guidelines for the use of music by Melbourne water*.
- [۲] وطن پرست، م.، ۱۳۸۹، "مدلسازی رواناب شهری و دریاچه های طبیعی پذیرنده رواناب با رویکرد اجرایی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
- [۳] شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، ۱۳۸۸، بازنگری طرح جامع آبهای سطحی تهران، جلد ششم-توسعه و بهبود شبکه و تشریح گزینه‌ها، قسمت پنجم- رویکردهای مدرن.
- [4].MUSIC Development Team, 2005, *Manual for MUSIC Version 3*, Cooperative Research Center for Catchment Hydrology.
- [5] We-Bin Chen, M.A., B.S., 2006, *Optimal allocation of stormwater pollution control technologies in a watershed*, Doctor of Philosophy thesis, Ohio State University.
- [6] Weiss P.T., Gulliver J.S., and Erickson A.J., 2007, *Cost and Pollutant Removal of Storm-Water Treatment Practices*, ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol 133, No 3, pages 218-229.
- [7] USEPA, 2010, "Economic Analysis of Final Water Quality Standards for Nutrients for Lakes and Flowing Waters in Florida".
- [8] Leib, A. S., Browne, F. X., 2002, "Water Quality Standards for the Great Swamp Watershed", Ten Towns Great Swamp Watershed Management Committee.
- [9] EPA, 1999, "Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices, Chapter 6: Costs and Benefits of Storm Water BMPs", U.S Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington DC, EPA-821-R-99-012.