

ارزیابی راهکارهای اصلاح شبکه زهکشی آب‌های سطحی شهری بر اساس معیارهای مبتنی بر ریسک

مهسا سلیمانی^۱، کورش بهزادیان^۲، عبدالله اردشیر^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- منابع آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲- استادیار، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (نویسنده مسئول) bezadian@aut.ac.ir
۳- دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست و رئیس پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت ۹۳/۱/۲۵ پذیرش ۹۳/۶/۱۰)

چکیده

اصلاح مناسب شبکه‌های موجود زهکشی آب‌های سطحی شهری سبب کاهش ریسک آب گرفتگی و حمل بار آلودگی توسط سیلاب می‌شود. بنابراین اتخاذ راهکارهای اصلاح سازگار با توسعه پایدار شهری نیازمند تحلیل ریسک‌های موجود کمی و کیفی آب در سیلاب شهری است. در این مقاله سه راهکار اصلاح این شبکه‌ها شامل یک راهکار سنتی (افزایش ابعاد کانال) و دو راهکار نوین (جوی باغچه و سیستم‌های ماند بیولوژیکی)، با استفاده از سه معیار شامل ریسک آب گرفتگی نقاط مختلف شبکه و ریسک آلاینده‌های سیلاب و هزینه اقتصادی بازسازی شبکه ارزیابی شدند. در نهایت این راهکارها با استفاده از روش تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره اولویت بندی شدند. روش پیشنهادی برای مطالعه موردی سیستم زهکشی آب‌های سطحی شهر گلستان در استان تهران که مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی آن با استفاده از نرم‌افزار SWMM ساخته شده است، تشریح شد. نتایج نشان می‌دهد که سیستم جوی باغچه می‌تواند به‌عنوان بهترین راهکار با هزینه تقریبی ۲۰ میلیارد ریال معرفی شود که قادر به کاهش ۵۹ درصدی ریسک کمی سیلاب (آب گرفتگی) و ۲۶ درصدی ریسک کیفی (آلاینده‌ها) نسبت به شرایط موجود است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی ریسک، سیلاب شهری، منابع آلودگی رواناب، تصمیم‌گیری چندمعیاره، SWMM

۱- مقدمه

تغییرات کاربری زمین در نتیجه توسعه شهری در حوضه‌های آبریز معمولاً به‌صورت حذف پوشش گیاهی و جایگزینی آنها با سطوح غیر قابل نفوذ است. این وضعیت علاوه بر تغییر در ویژگی هیدروگراف رواناب سطحی، اثرات معکوسی بر محیط زیست نیز خواهد داشت. از آن جمله می‌توان به کاهش کیفیت منابع آب، تخریب و حذف پوشش گیاهی، سکونت در مسیل‌ها و از همه مهم‌تر کاهش نفوذپذیری خاک اشاره کرد که خود از یک طرف موجب کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی منطقه و از سوی دیگر افزایش دبی پیک سیلاب و کاهش زمان رسیدن به آن و در نتیجه ایجاد سیلاب‌های شدید و خسارات چشمگیر می‌شود [۱].

از جنبه تحلیل کیفی رواناب بارندگی، سیستم‌های زهکشی شهری با عنوان "منبع آلودگی غیرنقطه‌ای"^۱ شناخته می‌شود. سطوح نفوذناپذیر شهری که از حذف سطوح نفوذپذیر ایجاد شده‌اند، آلاینده‌های محلول یا معلق نظیر فلزات سنگین، رسوبات و روغن را جمع می‌کنند، می‌شویند و به آب‌های پذیرنده منتقل می‌نمایند

[۲]. پژوهش‌های اخیر در اروپا نشان داده است که آلودگی رواناب بعد از رخداد بارندگی عامل تخریب شدید پیکره آب‌های پذیرنده است [۳]. به‌علاوه بیشتر آلودگی‌های تجمیع یافته در طول دوره‌های خشک بر اثر بارش‌های اولیه شسته می‌شوند و غلظت‌های آلاینده‌های بالایی را ایجاد می‌نمایند. طبق گزارش سازمان زمین‌شناسی آمریکا، منابع نقطه‌ای آلودگی ورودی به رود تنسی تنها مربوط به حدود ۶ درصد است و بقیه ۹۴ درصد را منابع غیرنقطه‌ای آلودگی تشکیل می‌دهند [۴].

به‌طور کلی اهداف یک سیستم زهکشی شهری، کاهش احتمال خطر سیلاب در مناطق شهری و رفع یا کاهش مزاحمت ناشی از آبگرفتگی در خیابان‌ها و کاهش احتمال مخاطرات محیط زیستی و سلامت به‌واسطه آلودگی آب‌های سطحی شهری است. به‌صورت سنتی، توسعه و طراحی سیستم زهکشی بر اساس گسترش زیرساخت‌ها، بدون در نظر گرفتن اثر آلاینده‌های تخلیه آب زهکش شده بر آب‌های پذیرنده انجام شده است. در حالی که سیستم مطلوب زهکشی شهری باید به هر دو جنبه کنترل و کاهش کمیت سیلاب (میزان آبگرفتگی) و کیفیت رواناب تخلیه شده در آب‌های

¹ Non-Point Source

پذیرنده (میزان آلاینده‌ها) بپردازد، به نحوی که هم احتمال وقوع سیلاب کاهش یابد و هم احتمال تخلیه آلودگی‌ها در آب‌های پذیرنده کمتر شود.

در حالی که رویکرد سنتی مبتنی بر روش‌های سازه‌ای پرهزینه قادر به دفع سریع و افزایش توان تخلیه سیلاب از مناطق شهری است، دیدگاه نوین علاوه بر کاهش جاری شدن سیلاب، بر بهبود وضعیت کیفی رواناب تکیه و توجه خاصی دارد [۵]. روش‌های نوین با استفاده از روش‌های جدید مانند ابزارهای ذخیره و نفوذ رواناب، چرخه هیدرولوژیک را در مناطق شهری به نحوی مناسب تعدیل نموده که اولاً از ایجاد سیلاب‌های مکرر جلوگیری شود، ثانیاً از رواناب موجود به صورت مناسبی استفاده شود. با این وجود با توجه به محدودیت توسعه ظرفیت‌های موجود سیستم‌های زهکشی و همچنین ریسک‌های کمی و کیفی سیلاب در حال حاضر، چالش فراوانی بین اجرای هر یک از این دو رویکرد بین مجریان وجود دارد [۶].

در این پژوهش برای اصلاح و طراحی مجدد شبکه‌های موجود زهکشی شهری، تقابل راهکارهای متداول نظیر گسترش ابعاد کانال، با راهکارهای نوین کنترل سیلاب نظیر سیستم‌های ماند بیولوژیکی و جوی‌باغچه برای کنترل کیفی رواناب، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. دیدگاه‌های مختلف نوین در حال توسعه با جزئیات بیشتری بررسی شد. نحوه مدل‌سازی این راهکارها و ارزیابی آنها بر اساس روش پیشنهادی مقاله ارائه شد. به منظور شبیه‌سازی کمی و کیفی سیستم زهکشی شهری از مدل هیدرولیکی و هیدرولوژیکی SWMM^۱ استفاده شد. راهکارهای منتخب با استفاده از معیارهای اقتصادی، مبتنی بر ریسک کمی و کیفی سیلاب مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین معیار شاخص‌های ریسک سیلاب و آلودگی و شاخص اقتصادی، ارزیابی شد. سپس روش پیشنهادی روی یک مطالعه موردی واقعی تشریح شد. همچنین راهکارهای مورد بررسی با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره مقایسه و اولویت بندی شدند.

۲- مروری بر ادبیات موضوع

رویکردهای کنترل سیلاب در مبدأ از دهه گذشته شروع به رشد و توسعه نمود و بیشتر مورد توجه قرار گرفت. با توجه به نوع رویکرد و کشوری که برای اولین بار آن را توسعه داده است، مفاهیم جدید مرتبط با این رویکردها دارای طبقه‌بندی‌های مختلف است. برخی از رایج‌ترین آنها عبارت‌اند از: "بهترین راهکارهای مدیریتی"^۲ و توسعه با تأثیر کم^۳ در آمریکا، "طراحی شهری حساس آب"^۴ در

استرالیا، "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری"^۵ در انگلستان، "مدیریت نوآورانه سیلاب در کانادا"، و "روش‌های جایگزین در فرانسه"^[۷]. روش‌های نوین، بهترین رویکرد برای مدیریت، جلوگیری، کنترل، حذف، کاهش یا تصفیه رواناب شهری و آلودگی رواناب قبل از ورود به آب‌های پذیرنده هستند. این راهکارها ممکن است توانایی کافی برای تصفیه آلاینده‌های شیمیایی موجود در رواناب را نداشته باشند، اما به طور غیر مستقیم از طریق متوقف نمودن آلاینده‌های همراه رسوب، مسیر جابجایی آلودگی را قبل از رسیدن به آب‌های پذیرنده حذف می‌کنند [۷]. لیود و چستر فیلد در سال ۲۰۰۲ در پژوهش‌های خود نشان دادند با اجرای تالاب و سیستم ماند بیولوژیکی در یک منطقه مسکونی در ملبورن می‌توان به ۶۰ درصد کاهش در جامدات کل معلق، ۴۷ درصد در فسفر کل، ۶۶ درصد در فسفر محلول و ۲۹ درصد در نیتروژن محلول دست یافت. همچنین حجم جریان تخلیه شده از واحد سطح آبریز، از سیستم بیوفیلتری بین ۵۱ درصد تا ۱۰۰ درصد کمتر از سیستم سنتی شده است [۸]. فرومای در سال ۲۰۰۶ نشان داد که ساخت تأسیسات نفوذ دهنده از قبیل شیارها و روسازی نفوذپذیر در توکیو سبب کاهش ۸۰ درصدی رواناب شهری و ۶۸ درصدی در ورود سرریز رواناب به شبکه لوله‌های فاضلاب در بارندگی‌های کم و متوسط خواهد شد [۹]. داده‌های جمع‌آوری شده توسط هورنر و همکاران، درصدهای حذف زیر را برای جوی‌باغچه‌ها می‌دهد: ۸۳ درصد برای TSS و ۲۹ درصد برای TP [۱۰].

اسکولز و همکاران در سال ۲۰۰۷ بازدهی ۸۰ درصدی برای جوی‌باغچه در حذف TSS را به دست آوردند [۱۱]. فلچر و همکاران در سال ۲۰۰۴ درصدهای حذف زیر را برای آلاینده‌های مختلف در سیستم‌های ماند بیولوژیکی پیش‌بینی کرده‌اند: ۱۰۰ درصد برای مواد آلی، ۹۹-۶۵ درصد (میانگین ۸۵ درصد) برای TSS، ۷۰-۵۰ درصد (میانگین ۶۵ درصد) برای TN و ۸۰-۴۰ درصد (میانگین ۷۰ درصد) برای TP [۱۲]. هانت و همکاران در سال ۲۰۰۶ در یک مطالعه میدانی بر روی سه سیستم ماند بیولوژیکی در کارولینای شمالی در آمریکا، قابلیت‌های حذف آلاینده و عملکرد هیدرولوژیکی را مورد بررسی قرار داده و میزان بالای حذف جرم نیتروژن کل سالانه در دو نمونه را که به شکل سنتی زهکشی می‌شدند، مورد تأیید قرار دادند (هر کدام ۴۰ درصد حذف)، حذف نترات-نیتروژن بین ۱۳ تا ۷۵ درصد متغیر بود و حذف فسفر بین ۶۵ تا ۲۴۰ درصد افزایش نشان داد [۱۳]. اسکولز در سال ۲۰۰۵ در پژوهش خود نشان داد که سیستم‌های ماند بیولوژیکی با نگهداری موقت رواناب ذخیره شده و آزاد کردن آن

^۱ Storm Water Modelling and Management

^۲ Best Management Practices (BMPs)

^۳ Low Impact Development (LID)

^۴ Water Sensitive Urban Design (WSUD)

^۵ Sustainable Urban Drainage System (SUDS)

ریسک‌پذیری مشخص شد. در این مرحله، ارزیابی هزینه‌های هر راهکار نیز صورت گرفت. در گام نهایی برای انتخاب و معرفی بهترین راهکار کنترل سیلاب از تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد.

۳-۱- مدل SWMM^۱

در این پژوهش از مدل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی SWMM که توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا توسعه یافته است، به‌عنوان یکی از کامل‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای تحلیل رواناب سطحی برای شبیه‌سازی جریان و بارهای آلاینده رواناب شهری استفاده شد [۱۶]. مدل SWMM گزینه‌های متعددی را برای شبیه‌سازی تجمع و شستشوی آلاینده‌ها در سیستم رواناب شهری در اختیار قرار می‌دهد. نظر به این که مدل SWMM قابلیت مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌های شهری و همچنین مدل‌سازی کیفی رواناب را دارد و با توجه به این که اخیراً قابلیت مدل‌سازی رویکردهای نوین کنترل در مبدأ نظیر LID ها نیز در این مدل اضافه شده است، در این پژوهش این مدل به‌عنوان ابزار مفیدی برای ارزیابی راهکارهای مختلف اصلاح شبکه زهکشی شهری مورد استفاده قرار گرفت. شبیه‌سازی از طریق معرفی مجموعه‌ای از زیرحوضه‌ها و تعیین میزان بارش و آلودگی در هر زیرحوضه و انتخاب روش تلفات متناسب با طرح صورت گرفت [۱۶].

۳-۲- ارزیابی ریسک‌های کمی و کیفی سیلاب

برای ارزیابی و طبقه‌بندی ریسک‌ها از ماتریس ارزیابی ریسک^۳ RAM استفاده شد. در حالی که روش‌های ریسک بر پایه ماتریس، روش‌های کاملاً شناخته شده‌ای هستند، کاربرد شیوه‌کونی برای ارزیابی و مدیریت سیلاب نوپا است. در اینجا ماتریس ارزیابی ریسک‌ها در دو بخش کمیت و کیفیت رواناب تقسیم و بررسی شد. دو محور این ماتریس عبارت است از احتمال وقوع رخداد (P) و پیامد شدت اثر (C) آن. برای کمی نمودن ریسک لازم است احتمال وقوع حادثه و نیز پیامدهای بالقوه آن تعیین شود. به این ترتیب مبنای محاسبه شاخص ریسک بر اساس حاصل ضرب این دو عامل به‌صورت زیر ارائه می‌شود [۱۷]

(۱)

$$RF = P \times C$$

^۱ Storm Water Management Model

^۲ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)

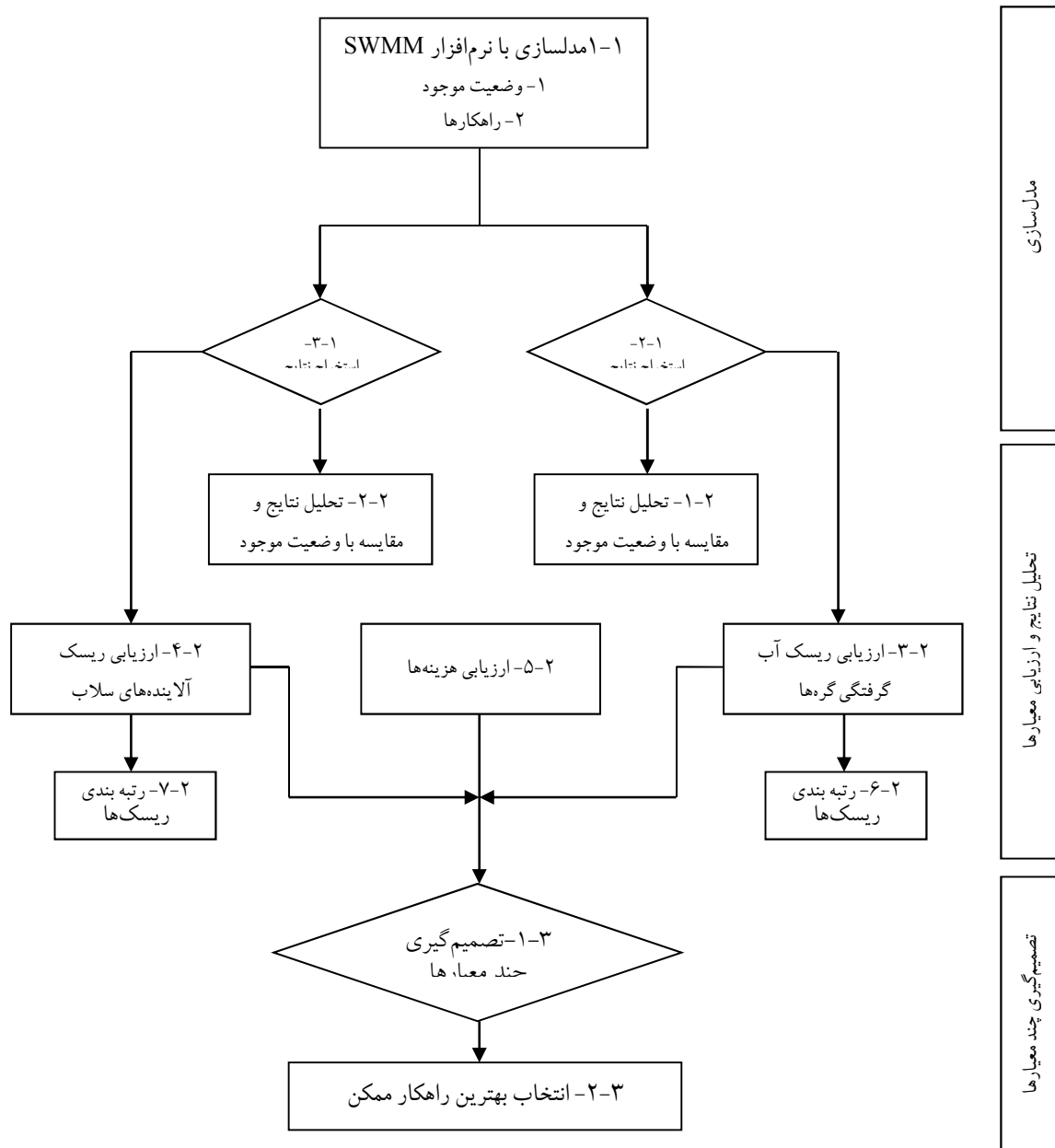
^۳ Risk Assessment Matrix

در طول یک دوره چند روزه، تصفیه رواناب را تسهیل کرده و کیفیت منابع آب پایین دست را بهبود می‌بخشد. حجم رواناب را ۳۵ تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد و در صورت وجود بستر صافی عمیق‌تر و خاک نفوذپذیرتر، کاهش حجم رواناب به ۹۰ درصد می‌رسد. با کاهش قابل توجه نرخ رواناب، کانال‌های پایین دست در برابر فرسایش حفاظت می‌شوند. به دلیل نفوذ آب به خاک، امکان تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی فراهم می‌شود [۱۴].

کافمن و راشتون در سال ۲۰۰۵ به این نتیجه رسیدند که این سیستم‌ها با مشکلات و محدودیت‌هایی نظیر سیستم‌های ماند بیولوژیکی برای مناطق با شیب بیش از ۲۰ درصد توصیه نمی‌شود؛ به دلیل نرخ بالای حذف جامدات معلق (تا ۹۷ درصد)، احتمال گرفتگی منافذ و در نتیجه کاهش قابلیت حذف مواد مغذی محلول از طریق جذب باکتریایی وجود دارد. سیستم‌های ماند بیولوژیکی در مکان‌هایی که سفره آب زیرزمینی بالاتر از ۲ متری سطح زمین واقع شده یا طبقه خاک ناپایدار است، مفید نبوده و در مناطقی که نفوذپذیری خاک کم است، قابل استفاده نیستند. به دلیل وجود مواد آلی، آب کم عمق و گیاهان متراکم، سیستم‌های ماند بیولوژیکی قابلیت ایجاد یک زیستگاه بسیار مناسب برای حشرات و سایر عوامل بیماری‌زا را دارند. در مناطق سرد ممکن است خاک منجمد شده و از نفوذ آب به خاک گیاه کاری شده جلوگیری کند. سیستم جوی‌باغچه نیز با موانعی روبرو است. این سیستم‌ها ممکن است برای سایت‌های صنعتی مناسب نباشد، همچنین در مناطق با توپوگرافی تند غیر عملی هستند. در زمینی که شیب جریان تند باشد، مؤثر نیستند و در صورتی که پوشش چمن به خوبی نگهداری نشود، حتی ممکن است منجر به فرسایش شوند. جوی‌باغچه‌های چمنی نمی‌توانند مناطق بسیار بزرگ را زهکشی کنند، مناطق وسیع ممکن است از طریق چندین جوی‌باغچه تقسیم‌بندی و تصفیه شوند. یک پوشش گیاهی ضخیم لازم است تا این جوی‌باغچه‌ها به‌درستی عمل کنند. جوی‌باغچه‌ها در صورتی که به خوبی نگهداری نشوند، ممکن است نسبت به سایر راهکارهای مدیریتی، در معرض تخریب بیشتری قرار گیرند [۱۵].

۳- روش پژوهش

مراحل اصلی این پژوهش در سه گام اصلی مدل‌سازی، ارزیابی معیارها و انتخاب راهکار بهینه انجام شد (شکل ۱). در گام نخست وضعیت موجود و راهکارهای معرفی شده در نرم‌افزار SWMM مدل‌سازی شد و نتایج کمی و کیفی به‌دست آمده از خروجی‌های این مدل‌ها، به‌عنوان داده‌های مدل ریسک معرفی شدند. در گام بعدی، ضمن ارزیابی ریسک کمی و کیفی سیلاب با استفاده از روش ماتریسی، شاخص ریسک کلی برای هر معیار به‌دست آمد و سطوح



شکل ۱- مراحل گام به گام حل مسئله با استفاده از روش پیشنهادی

$$QRF = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i C_{ij} \quad (2)$$

که در آن

P_i احتمال وقوع سیلاب نام، C_{ij} شدت اثر آب گرفتگی رخداد گره نام در مقابل سیلاب نام، n تعداد کل گره‌ها در حوضه و m تعداد کل بارش‌ها با دوره بازگشت و تداوم‌های مختلف است. نحوه محاسبه این دو پارامتر در بخش‌های بعدی تشریح می‌شود. همچنین برای تعیین شاخص ریسک آلودگی^۲ هر گره، به منظور شناسایی

چنانچه این شاخص ریسک برای ارزیابی ریسک مرتبط با کمیت سیلاب برای هر نقطه (گره) تعریف شود، برای تعیین شاخص کلی ریسک کمی سیلاب^۱ کل حوضه لازم است در کلیه نقاط شبکه جمع‌آوری رواناب‌های سطحی میزان آب گرفتگی و شاخص ریسک مربوطه محاسبه و در نهایت با جمع آنها شاخص کلی ریسک کمی بر طبق رابطه ۲ تعیین شود [۱۸]

^۱ Quantitative Risk Factor (QRF)

^۲ Nodal Risk Factor (NRF)

نقاط پرخطر در نقشه منطقه لازم است کلیه پیامدها با احتمال وقوع آنها در هر نقطه آبگرفتگی در نظر گرفته شود که برای این منظور رابطه ۳ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۸]

$$NRF = \frac{\sum_{i=1}^m P_i C_{ij}}{m} \quad (3)$$

برای ارزیابی ریسک مرتبط با کیفیت سیلاب، به بررسی ریسک آلاینده‌های رواناب‌های سطحی در خروجی‌های حوضه به‌عنوان نقاط تخلیه به آب‌های پذیرنده پرداخته شده و به این ترتیب شاخص کلی ریسک آلاینده‌های سیلاب^۱ برای کل حوضه طبق رابطه ۴ تعریف می‌شود

$$PRF = \sum_{i=1}^m \sum_{o=1}^k P_i C_{io} \quad (4)$$

که در آن

C_{io} شدت اثر رخداد خروجی تخلیه گاه o به آب‌های پذیرنده در مقابل سیلاب m و k تعداد کل خروجی‌های تخلیه سیلاب به آب‌های پذیرنده حوضه است.

۳-۲-۱- ارزیابی احتمال وقوع رخداد سیلاب

در مقابل کنترل کمی رواناب‌های شهری که بر هیدرولوژی رخدادهای شدید متمرکز است، ارزیابی مفاهیم کیفی جریان‌های رواناب‌های شهری نیاز به بررسی رخدادهای سیلاب کوچک‌تر دارد [۱۷]: زیرا این رخدادها، فراوانی یا احتمال وقوع بیشتر و متناوب‌تر دارند و مسبب اصلی انتقال آلودگی در سیستم‌های زهکشی شهری هستند. برای در نظر گرفتن ریسک‌ها، هم از جنبه کمی و هم از جنبه کیفی، رخدادهای بارش با دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله در نظر گرفته شد و بارش‌های متناظر با آنها در

¹ Pollutant Risk Factor (PRF)

نرم‌افزار SWMM مدل‌سازی شدند. قابل ذکر است که احتمال وقوع هر رخداد (P) برابر با عکس دوره بازگشت تعریف می‌شود

$$P = \frac{1}{T} \quad (5)$$

۳-۲-۲- ارزیابی شدت اثر آبگرفتگی رخداد سیلاب

پیامد یا شدت اثر رخداد آبگرفتگی سیلاب که با میزان ارتفاع آبگرفتگی رابطه مستقیم دارد، در این پژوهش در مقیاس از ۱ به‌عنوان ضعیف‌ترین تا ۶ به‌عنوان شدیدترین ارزیابی شد. به این ترتیب مطابق جدول ۱ که از تجربیات پیشین و قضاوت کارشناسان گرفته شده است، شدت اثر سیلاب در هر نقطه بر اساس ارتفاع آبگرفتگی آن محل ارزیابی می‌شود. محاسبه میزان ارتفاع آبگرفتگی حاصل از سیلاب، با فرض در نظر گرفتن یک کانال عریض در مدل شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی در نرم‌افزار SWMM تعیین می‌شود. به این ترتیب که بر اساس عمق آبگرفتگی کانال در خروجی نرم‌افزار و کم کردن آن از ارتفاع کانال موجود واقعی، ارتفاع سیلاب یا آبگرفتگی به‌دست می‌آید.

میزان شدت اثر آلاینده‌های حاصل از سیلاب، در آب‌های دریافت‌کننده یا پذیرنده سیستم زهکشی شهری ارزیابی می‌شود. به این ترتیب که میزان افزایش غلظت آلاینده‌های حاصل از تخلیه رواناب‌های شهری نسبت به حد مجاز استانداردهای مربوطه به‌عنوان شدت اثر آلاینده‌ها معرفی می‌شود. به‌طور معمول، استانداردهای موجود شامل "غلظت مجاز بیشتر" و "غلظت متوسط سالانه" هستند. به‌کارگیری حد غلظت مجاز بیشینه^۲ برای محافظت رواناب از آلودگی‌های شدید و کوتاه‌مدت است، در حالی که غلظت متوسط سالانه^۳، رواناب را در مقابل اثرات بلندمدت و مزمن محافظت می‌کند [۲۰]. در این پژوهش، با بررسی داده‌های کیفی به‌دست آمده (میانگین غلظت رخداد) از خروجی‌های نرم‌افزار SWMM و با در نظر گرفتن این که میزان میانگین غلظت رخداد^۴

² Maximum Allowable Concentration (MAC)

³ Annual Average (AA)

⁴ Event Mean Concentration (EMC)

جدول ۱- مقادیر شدت اثر آبگرفتگی گره‌ها ناشی از سیلاب

سطح تاثیر	عمق آبگرفتگی (سانتی‌متر)	مقادیر عددی کمی اثر (پیامد) سیلاب	پیامد	
			حمل و نقل [۱۸]	اینه [۱۹]
بی‌اهمیت	کمتر از ۵ سانت	۱	بی‌تاثیر	ترک‌های موئی (کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر)
کم‌اثر	۵-۲۰	۲	ترافیک سبک	نشست جزئی فونداسیون
متوسط	۲۰-۴۰	۳	ترافیک متوسط	ترک‌های متوسط، انحراف دیوارهای از محور قائم
قابل ملاحظه	۴۰-۶۰	۴	ترافیک سنگین	کمانش سقف‌ها، ترک‌های عمیق
مخاطره‌آمیز	۶۰-۸۰	۵	قطع نسبی تردد	آسیب جدی به سازه، کجی‌های واضح، فروپاشی دیوارها، ترکیدگی لوله‌ها
بحرانی	بیش از ۸۰ سانت	۶	قطع کامل تردد	فروپاشی جزئی و یا کلی

جدول ۲- مقادیر شدت تاثیرات سیلاب بر کیفیت آب‌های پذیرنده [۱۷]

پیامد	مقادیر عددی مرتبط با پیامد	میزان رقیق‌سازی (EMC/EQS)	سطح تاثیر
بی تاثیر بر آب‌های پذیرنده و بی‌نیاز از تدابیر کاهش‌ی	۱	کمتر از ۲	بی‌تأثیر
تأثیرات کم بر آب‌های پذیرنده و نیاز به برخی تدابیر با هزینه کم	۲	۲-۵	کم‌اثر
تأثیرات متوسط که بر اثر تخلیه‌های تصادفی به وجود می‌آید، نیاز به برخی تدابیر با هزینه متوسط	۳	۵-۱۰	متوسط
تأثیرات قابل ملاحظه، قابلیت ایجاد نگرانی‌های عمومی و یا سیاسی، خطرات اکولوژیکی ملموس	۴	۱۱-۳۰	قابل ملاحظه
نابودی موقتی اکولوژی آب‌های پذیرنده	۵	۳۰-۵۰	مخاطره‌آمیز
نابودی کامل اکولوژی آب‌های پذیرنده	۶	بیشتر از ۵۰	بحرانی

جدول ۳- ماتریس ریسک برای محاسبه شاخص ریسک و رتبه‌بندی ریسک

	مقادیر شدت اثر					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مقادیر	۰/۵	۱/۰	۱/۵	۲/۰	۲/۵	۳/۰
احتمال وقوع	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶
	۰/۱-۰/۵	ریسک کم	۰/۵-۱/۰	ریسک متوسط	۱/۰-۳/۰	ریسک بالا

با چه میزان رقیق‌سازی به حد استاندارد می‌رسد، شدت اثرات رخداد مشخص شد. با مقایسه میانگین غلظت رخداد موجود آلاینده مورد نظر با میزان استاندارد، میزان مخاطرات محیط زیستی بر اساس تجربیات قبلی مشخص شد و بر اساس آن برای سطوح تأثیرات مختلف، پیامدهای سیلاب، عددی شد که مقادیر آن در جدول ۲ آمده است. مقادیر حد استاندارد در بخش مطالعه موردی برای آلاینده‌های مورد استفاده در این مقاله ارائه شد.

۳-۳- انتخاب راهکار مناسب بر اساس تصمیم‌گیری چند معیاره

برنامه‌ریزی تعاملی^۲ یک رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره^۳ است که توسط یو و زلنی در دهه هفتاد با بسیاری از الحاقات تئوری و با برنامه‌های کاربردی در چندین زمینه معرفی شد. ایده اولیه این رویکرد، تعیین مجموعه‌ای از راه‌حل‌های کارآمد به نام مجموعه توافقی^۴ است که نزدیک‌ترین حالت به یک نقطه ایده‌آل و دست‌نیافتنی به نام نقطه ایده‌آل، که تمام معیارها را بهینه کند، است. توابع فاصله مربوطه از طریق یک گروه ماتریس معرفی شده است. بدون از دست دادن کلیت، چنانچه ویژگی "بیشتر، بهتر است" (بیشینه کردن مورد) برای تمامی معیارها صادق باشد، بنابراین پایه ساختار یک مدل CP به شرح زیر است [۲۲]

۳-۲- رتبه‌بندی ریسک

برای دسته‌بندی ریسک در هر نقطه سیلابی روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۷، ۱۸، ۲۱]. در اینجا از روش ماتریس ارزیابی ریسک برای رتبه‌بندی ریسک بر اساس حاصل ضرب دو پارامتر ریسک (میزان احتمال و شدت تأثیر حاصله) با تقسیم‌بندی‌های مختلف استفاده شد [۲۱]. بر این اساس، با در نظر گرفتن شش حالت تقسیم‌بندی شدت اثر ریسک (۱-۶) و ۳ حالت تقسیم‌بندی احتمال وقوع ریسک (۰/۱، ۰/۲، ۰/۵) که در بخش‌های پیش تشریح شد، ماتریس ارزیابی ریسک مطابق جدول ۳ تشکیل شد. مطابق نظر کارشناسان خبره، ریسک رخداد سیلاب در سه سطح ریسک کم، متوسط و بالا، طبقه‌بندی شده، به نحوی که شاخص ریسک ۰/۱-۰/۵ در محدوده ریسک کم،

² Compromise Programming (CP)

³ Multiple Criteria Decision Making (MCDM)

⁴ Compromise Set

¹ Environmental Quality Standard (EQS)

شهری به نحوی مناسب تعدیل می‌کنند که اولاً از ایجاد سیلاب‌های مکرر جلوگیری شود، ثانیاً از رواناب موجود به‌صورت مناسبی استفاده شود. در این مقاله تقابل هر دو راهکار سنتی و نوین برای مدیریت و کنترل سیلاب شهری مورد بررسی قرار گرفت. در روش نوین از سیستم‌های ماند بیولوژیکی و جوی باغچه به‌عنوان بهترین راهکارهای مدیریتی استفاده شد و در روش سنتی از کانال بتنی استفاده شد که در ادامه، فرضیات مربوط به هر یک تشریح می‌شود.

۴-۱- گسترش ابعاد کانال‌ها

دیدگاه متداول اصلاح شبکه‌های زهکشی که به‌صورت غالب بین کارفرمایان و برخی مشاوران وجود دارد، عبارت است از گسترش ابعاد کانال‌های سیستم زهکشی با پوشش سخت نظیر بتن، با هدف افزایش توان تخلیه سیلاب از منطقه شهری به خارج از شهر و مناطق بی‌خطر. عقیده فوق که در حال حاضر نیز در بسیاری از کشورها از جمله ایران به آن عمل می‌شود، دارای معایبی از جمله احتمال سیل‌گرفتگی اراضی پایین‌دست، کوچک بودن ابعاد طراحی با توجه به گسترش سریع شهرنشینی در آینده و انتقال حجم بالایی از آلاینده‌ها به آب‌های پذیرنده است.

۴-۲- سیستم‌های ماند بیولوژیکی^۱

سیستم‌های ماند بیولوژیکی به‌عنوان یک روش مبتنی بر صافی خاکی و گیاهی عمل می‌کنند که آلاینده‌ها را از طریق فرایندهای تصفیه فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی متعددی حذف می‌کنند. این سیستم‌ها در حذف جامدات از رواناب شهری بسیار مؤثر هستند. سیستم‌های ماند بیولوژیکی با نگهداری موقت رواناب ذخیره شده و آزاد کردن آن در طول یک دوره چند روزه، تصفیه رواناب را تسهیل کرده و کیفیت منابع آب پایین‌دست را بهبود می‌بخشد [۱۵]. سیستم‌های ماند بیولوژیکی معمولاً از یک نوار حائل چمنی، بستر ماسه‌ای، مخزن/برکه آب، لایه آلی یا لایه کود گیاهی، خاک قابل کشت و گیاهان با عمق ذخیره ۴۰ سانتی‌متر و عمق صافی ۱/۲ متر تشکیل می‌شوند (شکل ۳ج).

۴-۳- جوی باغچه

جوی باغچه‌های گیاه‌کاری شده^۲، کانال‌های کم عمق با پوشش گیاهی در شیب‌های کناره و بستر هستند که انتقال، کاهش، نفوذ و تصفیه رواناب حاصل از بارش را فراهم می‌کنند و به حذف آلاینده‌های سیلاب کمک می‌کنند. این سیستم می‌تواند جایگزین یا مکمل

$$\min L_p \equiv \left[\sum_{i=1}^q \left(w_i (f_i^* - f_i(x)) / (f_i^* - f_{i*}) \right)^p \right]^{1/p} \equiv \left[\sum_{i=1}^q (w_i d_i)^p \right]^{1/p},$$

s.t. $x \in X$,

که در آن

x بردار متغیرهای تصمیم، X نشان‌دهنده مجموعه‌های شدنی و ممکن، $f_i(x)$ نمایشگر تابع ریاضی برای معیار i ام از مجموع q معیار است. $f^* \equiv f_1^*(x), \dots, f_i^*(x), \dots, f_q^*(x)$ نشان‌دهنده بردار مقادیر لنگر یا نقطه ایده‌آل است، مانند مقدار بیشینه برای هر معیار، بدون آن که دستیابی به ویژگی‌های دیگر در نظر گرفته شود. $f_{i*} \equiv f_{i*}(x), \dots, f_{i*}(x), \dots, f_{i*}(x)$ نشان‌دهنده بردار مقادیر افت یا نقطه غیر ایده‌آل است، به‌طور مثال، کمترین مقدار برای هر معیار بیشتر از مجموعه کارآمد، $d_i \equiv (f_i^* - f_i(x)) / (f_i^* - f_{i*})$ درجه اختلاف را برای معیار i ام نشان می‌دهد (اختلاف نرمال شده مابین مقدار لنگر و مقدار واقعی به‌دست آمده از معیار i ام)؛ w_i وزن یا اهمیت نسبی وابسته به معیار i ام است؛ p یک معیار مکانی است که یک عدد حقیقی متعلق به بازه بسته $[1, \infty)$ است [۲۲]. در اینجا مقدار پارامتر p برابر ۲ فرض شد که در واقع بر اساس آن رابطه ۶ معرف حداقل فاصله هندسی اهداف مختلف از نقاط ایده‌آل خود است.

۴-۴- راهکارهای کنترل کمیت و کیفیت سیلاب شهری

به‌طور کلی امروزه دو دیدگاه برای دفع آب‌های سطحی و کنترل سیلاب در شهرها مطرح است. دیدگاه سنتی یا متداول و دیدگاه نوین. هدف در دیدگاه سنتی انتقال و دفع هرچه سریع‌تر سیلاب از سطح شهر و نواحی غیر مسکونی است. در این راستا سیستم‌های زهکشی و شبکه‌های آب سطحی با پوشش سخت با این هدف احداث می‌شود تا سرعت جریان را زیادتر کند و توان تخلیه سیلاب را افزایش دهد. برخلاف این دیدگاه در نگرش نوین، هدف از کنترل سیلاب به تأخیر انداختن خروج سیلاب از سطح شهر از طریق مخازن و نگهداشت‌های موقت و نفوذ هرچه بیشتر رواناب سطحی به داخل آب‌های زیرسطحی و آبخوان زیرزمینی منطقه است. در تقابل با روش سنتی، با تأکید تنها بر دفع رواناب، روش نوین با استفاده از راهکارها علاوه بر تلاش برای کاهش جاری شدن سیلاب، در تلاش برای بهبود وضعیت کیفی رواناب نیز است. روش‌های نوین با استفاده از فناوری‌های جدید مانند ابزارهای ذخیره و نفوذ رواناب، چرخه هیدرولوژیک را در مناطق

¹ Bio-Retention Systems

² Vegetated Swales

میزان بارش ورودی حوضه با استفاده از داده‌های حاصل از منحنی شدت-مدت-فراوانی ایستگاه سینوپتیک مهرآباد به‌علت نزدیکی ایستگاه به حوضه مورد مطالعاتی، برای بارندگی‌های با دوره بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله محاسبه شده است. ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع در نزدیک‌ترین نقطه به ناحیه مورد مطالعه برابر ۱۰/۵۸ متر در روز (تقریباً ۴۴ میلی‌متر در ساعت) است. در محاسبه تلفات از روش هورتون استفاده شد. ضرایب معادله نفوذ بر اساس مشخصات منطقه، طبق مقادیر توصیه شده در راهنمای نرم‌افزار SWMM، در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- پارامترهای معادله نفوذ هورتون

مقدار	مشخصات منطقه	پارامترهای معادله نفوذ هورتون
۷۵ (میلی‌متر در ساعت)	خاک خشک لومی با پوشش گیاهی اندک	سرعت نفوذ حداکثر*
۴۴ (میلی‌متر در ساعت)	پتانسیل رواناب کم	سرعت نفوذ حداقل
۷ (روز)		زمان خشک شدن خاک اشباع
۴ (لیتر در ساعت)		ثابت کاهش سرعت نفوذ

* معادل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در نظر گرفته می‌شود.

شبیه‌سازی کیفی آلاینده‌ها در این پژوهش بر اساس سه آلاینده شامل مجموع جامدات معلق، مجموع نیتروژن و مجموع فسفر انجام شد که در مدل‌سازی همه آنها برای شبیه‌سازی تجمع آلاینده^۱ از روش تابع اشباع که در رابطه ۷ آمده است، استفاده شد.

$$B = C_1 t / (C_2 + t) \quad (7)$$

که در آن

C_1 حداکثر تجمع ممکن بر حسب کیلوگرم در هکتار و C_2 ثابت نیمه اشباع بر حسب روز است. برای شبیه‌سازی شستشوی آلاینده^۲ از روش تابع نمایی استفاده شد

$$W = C_1 q^{C_2} B \quad (8)$$

که در آن

C_1 ضریب شستشو، C_2 توان شستشو، q بارندگی بر حسب میلی‌متر در ساعت و B تجمع آلاینده بر حسب کیلوگرم در هکتار است.

¹ Build-up
² Wash-off

کانال‌های روسازی شده یا سیستم‌های سنتی جدول/آبرو شده و تأثیرات منفی بارش و کیفیت آب مناطق توسعه یافته را کاهش دهند. جوی‌باغچه‌ها به‌جای هدایت مستقیم رواناب به نهرها و سیستم فاضلاب ترکیبی، محیط لازم برای رسوخ آن به زمین را فراهم می‌کنند. در حین عبور رواناب از میان کانال‌های چمن‌کاری شده و جوی‌باغچه‌ها، سرعت آب کاهش یافته و به آن فرصت می‌دهد که در خاک ذخیره و توسط گیاهان مصرف شده و یا به اعماق خاک نفوذ یابد. آلاینده‌ها از طریق ته‌نشینی، برداشت توسط گیاهان، نفوذ، تراوایی و جذب توسط ذرات خاک از رواناب حذف می‌شوند [۲۵].

۵- مطالعه موردی

مدل پیشنهادی ارائه شده در این پژوهش برای مطالعه موردی واقعی حوضه زهکشی شهر گلستان واقع در استان تهران از بخش‌های شهرستان رباط کریم است. برای اهداف شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی و طراحی BMPها لازم است حوضه مورد مطالعه به زیرحوضه‌هایی تقسیم شود. با تهیه نقشه رقومی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مطالعاتی از سازمان نقشه‌برداری کشور (تهیه شده در سال ۱۳۸۰)، حوضه‌های آبریز بخش گلستان بر اساس توپوگرافی، مشخصات کاربری زمین و سرشاخه‌ها، شبکه جمع‌آوری و محل خروجی رواناب، به ۳۳ زیرحوضه تقسیم شد که رواناب حاصل از این زیرحوضه‌ها به دو نهر سیاه آب و شادچای و به ترتیب در شمال و جنوب شهر تخلیه می‌شود. شکل ۲ مرز حوضه و زیرحوضه‌بندی انجام شده که در نرم‌افزار SWMM مدل‌سازی شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۲- موقعیت زیرحوضه‌ها و مسیرهای زهکشی

همچنین مقادیر غلظت استاندارد کیفی آب‌های سطحی مورد استفاده در جدول ۲ برای آلاینده‌های مجموع جامدات معلق، مجموع نیتروژن و مجموع فسفر مطابق استاندارد سازمان محیط زیست آمریکا^۱ به ترتیب برابر با ۲۵، ۱/۵ و ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شده است [۲۳]. سلطانی در سال ۱۳۸۸ نشان داد که

¹ Environmental Protection Agency (EPA)

ضرایب پیشنهادی ارائه شده توسط ژانگ و هم‌ت در سال ۲۰۰۶ برای معادلات توابع تجمع و شستشوی آلاینده‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در تهران با تقریب نسبتاً خوبی مطابقت دارد [۲۶]. در این راستا از این ضرایب در این مقاله نیز استفاده شد [۲۴] (جدول‌های ۵ و ۶).

جدول ۵- پارامترهای معادله تجمع آلاینده

کاربری زمین								پارامتر تجمع Build-up
توسعه نیافته		صنعتی		مسکونی با تراکم بالا		مسکونی با تراکم پایین		
C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	
۱/۳۳	۴۰	۶/۱۵	۱۳۰	۲/۰۶	۵۰	۰/۶۶	۲۰	TSS
۰/۰۰۰۴۵	۱/۵	۰/۰۰۲۶۴	۲	۰/۰۰۱۱۳	۱/۲	۰/۰۰۰۳	۱/۴	TN
۰/۰۰۰۰۲	۰/۴	۰/۰۰۰۱۶	۱	۰/۰۰۰۱۲	۰/۷	۰/۰۰۰۰۳	۰/۵	TP

جدول ۶- پارامترهای معادله شستشوی آلاینده

کاربری زمین								پارامتر شستشو Wash-off
توسعه نیافته		صنعتی		مسکونی با تراکم بالا		مسکونی با تراکم پایین		
C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₁	
۱/۷	۰/۱	۲/۵	۰/۳	۲/۲	۰/۷	۲	۰/۴	TSS
۰/۳	۰/۰۲	۰/۸	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۷	۰/۱	TN

جدول ۷- مساحت کل سیستم‌های ماند بیولوژیکی اجرا شده و درصد فضای اشغال شده توسط آنها

درصد مساحت اشغال شده توسط BMP (%)	مساحت کل BMP (مترمربع)	مساحت کل زیرحوضه (هکتار)	
۰/۱۱	۳۱۵۰	۲۷۸/۴۴	سیاه‌آب
۰/۰۷	۱۹۰۰	۲۷۱/۸۱	شادچای

نیستند، جوی‌باغچه‌هایی با جزئیات اجرایی مطابق شکل ۳-ب، با عمق ذخیره ۵۰ سانتی‌متر و ضریب زبری ۰/۲۴ به طول ۱۱۹۹۲ متر برای مطالعه موردی این مقاله پیشنهاد می‌شود.

۶- نتایج و بحث

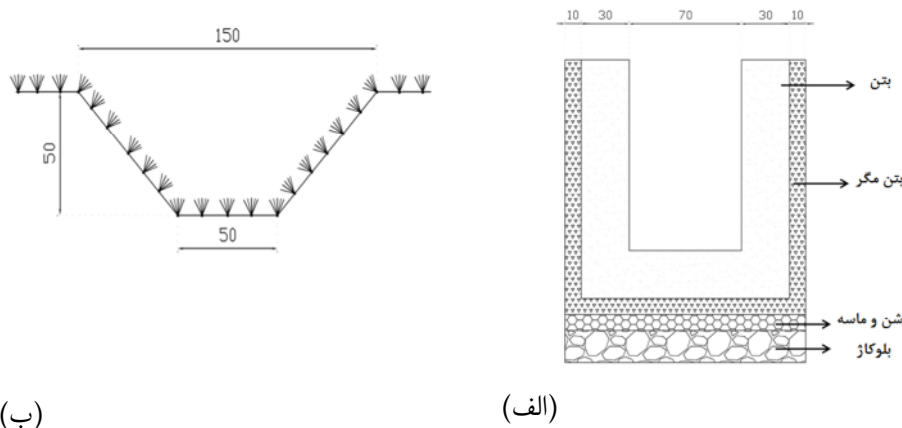
با مدل‌سازی وضعیت موجود و هر یک از سه راهکار پیشنهادی، ابتدا ارزیابی ریسک کمی آب‌گرفتگی سیلاب در گره‌ها و در کل سیستم زهکشی شهری انجام شد. شکل ۴ به صورت خلاصه تعداد گره‌های آب‌گرفته در سطوح مختلف ریسک آب‌گرفتگی کم، متوسط و زیاد را در ازای اجرای راهکارهای پیشنهادی و وضعیت موجود نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۸ میزان هر یک از آلاینده‌ها، حجم رواناب و شاخص کلی ریسک‌های کمی و کیفی سیلاب به تفکیک

مدل‌سازی حوضه، در ابتدا برای وضعیت موجود که در آن هیچ‌گونه اصلاحی در سیستم زهکشی شهری در افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته نشده بود، انجام شد و به‌عنوان مبنای مقایسه با راهکارهای پیشنهادی قرار گرفت. در این پژوهش از سه راهکار نامبرده به شرح زیر استفاده شد:

۱- با در نظر گرفتن گسترش ابعاد کانال به‌عنوان یکی از راهکارها، جوی‌ها یا کانال‌های اصلی موجود جمع‌آوری آبهای سطحی که در شکل ۲ نشان داده شده است به کانال‌های با ابعاد بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند. جزئیات اجرایی کانال‌های طراحی جدید مطابق شکل ۳-الف به طول ۱۱۹۹۲ متر بر اساس طرح مشاوره‌ای برای مطالعه موردی پیشنهاد شد.

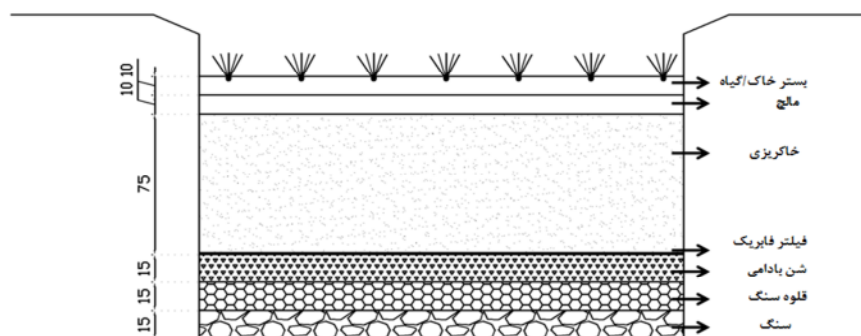
۲- چنانچه سیستم‌های ماند بیولوژیکی پیشنهادی مطابق شکل ۳-ج فرض شود، با توجه به این که این سیستم‌ها تنها در زمین‌های تحت مالکیت شهرداری مانند پارک‌ها و میادین قابل اجرا است، میزان کل مساحت تقریبی در منطقه مورد مطالعه برابر ۵۰۵۰ مترمربع پیشنهاد می‌شود که نحوه توزیع آن برای دو خروجی حوضه در جدول ۷ آمده است.

۳- با فرض این که جوی‌های موجود به جوی‌باغچه تبدیل شوند و با توجه به ابعاد کوچک جوی‌ها که قادر به انتقال رواناب تمام حوضه



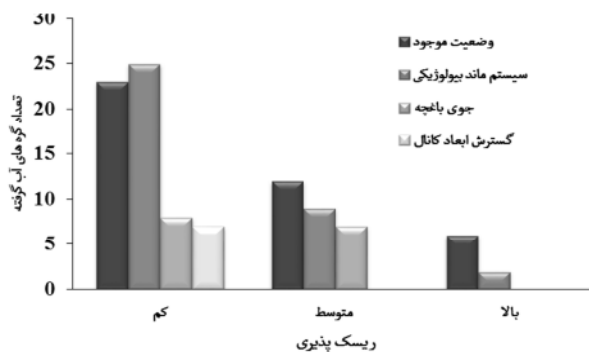
(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۳- شماتیک اجرایی راهکارهای پیشنهادی (الف) کانال اصلاح شده؛ (ب) جوی باغچه و (ج) سیستم ماند بیولوژیکی



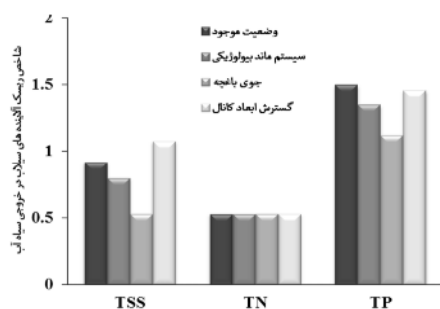
شکل ۴- وضعیت ریسک کمی آب‌گرفتگی سطوح مختلف ریسک پذیری برای گره‌های آب‌گرفته

همچنین مطابق جدول ۸ شاخص ریسک کمی سیلاب برای راهکار گسترش ابعاد کانال ۹۷ درصد کاهش را نشان می‌دهد (از ۱۷۹ به ۵/۲) که دلیل اصلی آن افزایش ظرفیت انتقال در کانال‌ها (جوی‌ها) با بزرگ‌تر بودن ابعاد آن‌ها و در نتیجه کاهش سیلابی شدن شبکه زهکش خواهد بود. دومین راهکار مؤثر برای کاهش ریسک کمی سیلاب مربوط به راهکار جوی باغچه است که کاهش ۵۹ درصدی را نشان می‌دهد (از ۱۷۹ به ۷۳/۴) که دلایل آن می‌تواند به بزرگ شدن ابعاد جوی باغچه‌ها نسبت به ابعاد موجود و

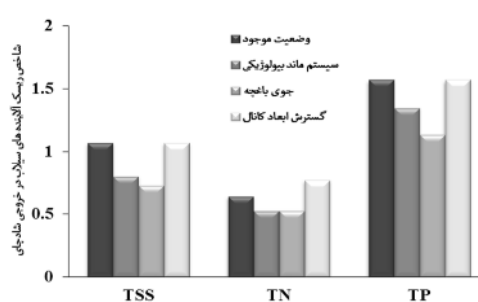
دو زیرحوضه زهکش اصلی ارائه شده است. از آنجایی که دیدگاه سنتی برای برطرف کردن مشکل کمی سیلاب طراحی می‌شود، بنابراین همان‌گونه که انتظار می‌رود، گسترش ابعاد کانال به عنوان مؤثرترین روش کاهش ریسک کمی سیلاب (آب-گرفتگی) است. به بیان دقیق‌تر، نسبت به وضعیت موجود که در آن تعداد بیشترین گره‌های با ریسک متوسط و بالا وجود دارد، در حالت گسترش ابعاد کانال، ریسک بالای سیلاب به‌کلی از بین رفته و تنها تعداد معدودی گره با ریسک پذیری کم باقی‌مانده است (شکل ۴).

جدول ۸- نتایج تحلیل کمی و کیفی سیلاب به ازای راهکارهای مختلف

ریسک کلی آلاینده‌ها سیلاب	ریسک آب- گرفتگی گره‌ها	حجم رواناب (10^6 لیتر)	TN (میلی‌گرم در لیتر)	TP (میلی‌گرم در لیتر)	TSS (میلی‌گرم در لیتر)	خروجی حوضه	وضعیت
۵۶/۱	۱۷۹	۱/۶۷ ۱/۲۳	۵/۱۷ ۵/۹۸	۵/۴۵ ۷/۰۵	۲۱۱/۳ ۳۸۱	شادچای (مقدار) سیاه‌آب (مقدار)	وضعیت موجود
۵۲/۷	۱۳۱	-۳ -۱۱	-۲۶ -۵۷	-۱۶ -۳۹	-۱۹ -۵۰	شادچای (% تغییرات) سیاه‌آب (% تغییرات)	سیستم ماند بیولوژیکی
۴۱/۴	۷۳/۴	-۶۲ -۷۱	-۵۷ -۶۱	-۳۱ -۳۷	-۵۹ -۶۲	شادچای (% تغییرات) سیاه‌آب (% تغییرات)	جوی باغچه
۵۸/۶	۵/۲۰	+۵۲ +۴۲	۰ +۳	+۱۴ +۱۱	+۳۸ +۲۶	شادچای (% تغییرات) سیاه‌آب (% تغییرات)	افزایش ابعاد کانال



(ب)



(ف)

شکل ۵- شاخص ریسک کلی آلاینده‌های رواناب به ازای راهکارهای مختلف در خروجی (الف) سیاه‌آب و (ب) شادچای

همچنین جایگزین شدن سطوح بتنی با سطوح شیب‌دار خاکی با پوشش گیاهی جوی باغچه‌ها و در نتیجه افزایش نفوذپذیری سیلاب نسبت داده شود. در این راهکار مطابق شکل ۴ ریسک‌پذیری زیاد آب‌گرفتگی در گره‌های شبکه به صورت کامل رفع شده اما برای تعداد معدودی از گره‌ها همچنان ریسک‌پذیری متوسط وجود دارد. اجرای سیستم‌های ماند بیولوژیکی منجر به کمترین بهبود (۲۷ درصد) در میزان ریسک کلی آب‌گرفتگی گره‌ها می‌شود که با میزان حجم ذخیره این سیستم و میزان نفوذپذیری آن ارتباط دارد. البته علت بهبود نه چندان زیاد ریسک آب‌گرفتگی سیلاب را می‌توان به کمبود فضاهای ممکن برای احداث سیستم‌های ماند بیولوژیکی در منطقه مورد مطالعه نسبت داد؛ به نحوی که مطابق شکل ۴، ریسک‌پذیری بالا همچنان برای تعدادی از گره‌های شبکه دیده می‌شود.

همچنین با مقایسه درصد تغییرات میانگین غلظت آلاینده‌های مجموع جامدات معلق، مجموع نیتروژن و مجموع فسفر پس از اجرای روش‌های پیشنهادی نسبت به وضعیت موجود (جدول ۸)، با میزان مجاز استاندارد آن و همچنین در نظر گرفتن احتمال وقوع بارش مربوطه، شاخص ریسک کیفی آب در سیلاب بر اساس رابطه ۴ به دست می‌آید که مقادیر این شاخص در ازای راهکارهای

پیشنهادی برای دو خروجی حوضه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین بهبود کاهش ریسک کیفی آب در سیلاب مربوط به اجرای سیستم جوی باغچه است که در آن شاخص ریسک غلظت مجموع جامدات معلق، مجموع نیتروژن و مجموع فسفر، به ترتیب برای دو خروجی شادچای و سیاه‌آب برابر ۴۲ و ۳۱ درصد، ۰ و ۱۷ درصد و ۲۵ و ۲۷ درصد نسبت به وضعیت موجود (بدون تغییر) کاهش یافته است. پس از این راهکار، سیستم‌های ماند بیولوژیکی در کاهش غلظت و در نتیجه کاهش ریسک کیفی آب در سیلاب رتبه دوم را دارد. علت عمده کاهش کمتر غلظت آلاینده در راهکار پیشنهادی ماند بیولوژیکی می‌تواند به دلیل مساحت کم این سیستم نسبت به جوی باغچه در یک شبکه زهکشی شهری و کمتر شدن شانس بهبود کیفیت آب در سیلاب باشد. همچنین عملکرد جوی باغچه نسبت به سیستم‌های ماند بیولوژیکی در حذف کارا تر است؛ علت آن ممکن است در این مدل‌سازی نقش جوی باغچه در سیستم انتقال سیلاب باشد که تمامی رواناب ناشی از سیلاب از جوی باغچه عبور می‌کند و امکان تصفیه حجم بیشتر سیلاب به وجود می‌آید؛ این در حالی است که تنها بخشی از این سیلاب وارد سیستم‌های ماند بیولوژیکی می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش ابعاد کانال نه تنها باعث

با احتساب ۵ درصد برای هزینه عملیات احتمالی و ۲ تا ۶ درصد برای هزینه سالانه بهره‌برداری و نگهداری با دوره عمر ۲۰ ساله، هزینه کل هر راهکار برای ارزش حاضر محاسبه می‌شود. جزئیات هزینه‌های محاسبه شده بر اساس هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری برای سه راهکار در جدول ۹ ارائه شده است.

۶-۲- رتبه‌بندی راهکارها بر اساس تصمیم‌گیری چندمعیاره

پس از تحلیل و ارزیابی ریسک در وضعیت موجود و همچنین در حالت استفاده از رویکردهای نوین کنترل در مبدأ، برای شناسایی بهترین راهکار کنترل و اصلاح سیستم زهکشی شهری برای مقابله با سیلاب، عملکرد راهکارهای معرفی شده نسبت به معیارهای ارزیابی با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مقایسه و اولویت‌بندی می‌شوند. در این پژوهش از سه معیار برای ارزیابی راهکارها استفاده می‌شود که عبارت‌اند از ۱- ریسک کمی سیلاب؛ ۲- ریسک کیفی سیلاب و ۳- معیار اقتصادی. برای اولویت‌بندی و رتبه‌بندی راهکارهای مختلف، از روش برنامه‌ریزی توافقی استفاده شد که بر اساس فاصله و نزدیکی به نقطه ایده‌آل برای تمام معیارهای بهینه‌سازی شده عمل می‌نماید. از آنجایی که ویژگی کمتر، بهتر است (کمینه کردن) در مورد تمام معیارها صادق است، نقطه ایده‌آل صفر در نظر گرفته می‌شود. با فرض در نظر گرفتن وزن مساوی برای همه معیارها، رتبه‌بندی نهایی راهکارهای مختلف با توجه به مقدار کمی شده معیارهای هزینه، ریسک‌های آب‌گرفتگی و کیفی آب در سیلاب در آخرین ستون جدول ۵ داده شده است. همان‌طور که جدول ۱۰ نشان می‌دهد نتیجه رتبه‌بندی راهکارها بر اساس فاصله به دست آمده در روش برنامه‌ریزی توافقی، سیستم جوی باغچه به عنوان بهترین راهکار معرفی می‌شود. همان‌گونه که در

کاهش ریسک کیفی آب نمی‌شود، بلکه در بیشتر موارد منجر به افزایش غلظت آلاینده‌ها و در نتیجه افزایش ریسک کیفی آب در آب‌های پذیرنده در زمان سیلاب می‌شود. علت افزایش غلظت آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده در این راهکار نسبت به وضعیت موجود (بدون تغییر) می‌تواند به کاهش پس‌زدگی (سیلابی شدن) در گره‌های شبکه زهکشی و در نتیجه هدایت بیشتر رواناب در سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری به سمت آب‌های پذیرنده در خروجی‌های حوضه زهکش شهری نسبت داده شود. این در حالی است که در وضعیت موجود، بخش زیادی از آلاینده‌ها به صورت پس‌زدگی در گره‌های با ریسک‌پذیری بالا در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی خارج می‌شوند و به شبکه بر نمی‌گردند و در نتیجه به آب‌های پذیرنده واقع در خروجی‌های زهکش منتقل نمی‌شوند.

۶-۱- ارزیابی هزینه‌ها

هزینه کل هر یک از راهکارها عبارت است از مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری ساخت و زمین، هزینه طراحی، مجوز و عملیات احتمالی و هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالانه. هزینه سرمایه‌گذاری در زمانی که راهکار کنترل رواناب اجرا و نصب می‌شود و در ابتدای پروژه انجام می‌شود. هزینه‌های سرمایه‌گذاری همچنین منوط به هزینه‌های تأمین مالی هستند و در طول عمر پروژه، مستهلک می‌شوند. هزینه عملیات و نگهداری به صورت دوره‌ای در مدت عمر تسهیلات کنترل رواناب در نظر گرفته می‌شوند [۲۵]. با توجه به این که راهکارهای مورد نظر در محل‌های عمومی انجام می‌شود، هزینه زمین در نظر گرفته نمی‌شود. بقیه هزینه‌های ساخت و اجرا با استناد به فهرست بهای واحد پایه ابنیه سال ۱۳۹۲ بر اساس شماتیک اجرایی هر راهکار محاسبه می‌شود.

جدول ۹- هزینه نهایی راهکارهای مورد مطالعه

راهکار پیشنهادی	هزینه طراحی و ساخت (هزار ریال)	هزینه سالانه بهره‌برداری (هزار ریال)	مجموع هزینه‌ها در واحد طراحی (هزار ریال)	مقدار طراحی مورد نیاز	هزینه کل (میلیون ریال)
سیستم ماند بیولوژیکی	۹۵۳	۲۱۲۶	۳۰۸۰	۵۰۵۰ مترمربع	۱۵۵۵۰
جوی باغچه	۵۳۸	۱۲۰۰	۱۷۴۰	۱۱۹۹۲ متر	۲۰۸۶۰
گسترش ابعاد کانال	۱۱۹۰	۸۸۵	۲۰۸۰	۱۱۹۹۲ متر	۲۴۹۴۰

جدول ۱۰- رتبه‌بندی راهکارها بر اساس روش برنامه‌ریزی توافقی

راهکار	هزینه کل (میلیون ریال)	ریسک کمی سیلاب	ریسک آلودگی سیلاب	فاصله در روش CP	رتبه‌بندی
وضعیت موجود	۰	۱۷۸/۶	۵۶/۱۰	۰/۲۳۱	۳
سیستم ماند بیولوژیکی	۱۵۵۵۰	۱۳۰/۸	۵۲/۷۰	۰/۲۱۹	۲
جوی باغچه	۲۰۸۶۰	۷۳/۴	۴۱/۴۰	۰/۱۹۵	۱
گسترش ابعاد کانال	۲۴۹۴۰	۵/۲۰	۵۸/۶۰	۰/۲۳۸	۴

این جدول دیده می‌شود، این راهکار در دو معیار از سه معیار به‌عنوان بهترین راهکار بوده است. دومین راهکار انتخابی در این اولویت بندی، سیستم ماند بیولوژیکی با تابع ۰/۲۱۹ در رتبه دوم است. راهکار سنتی گسترش ابعاد کانال با توجه به تحمیل هزینه بسیار بالا، اگرچه منجر به بهبود ریسک کمی آب‌گرفتگی سیلاب در منطقه مورد مطالعه می‌شود، اما به دلیل بدتر بودن در دو معیار از سه معیار مورد بررسی به‌عنوان آخرین اولویت انتخابی مطرح است. نتایج حاصل از ارزیابی مقایسه راهکارهای نوین و سنتی بهبود سیستم جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان داد که جوی‌باغچه‌ها با هزینه تقریبی ۲۰ میلیارد ریال توانایی کاهش ۵۹ درصدی ریسک کمی سیلاب (آب‌گرفتگی) و ۲۶ درصدی ریسک کیفی آب (آلاینده‌ها) بهترین روش برای کنترل ریسک‌های کمی و کیفی سیلاب هستند. این امر به علت هزینه پایین‌تر نسبت به راهکارهای دیگر و توانایی بالا در کاهش میزان آب‌گرفتگی و حذف آلاینده‌ها توسط جوی‌باغچه‌هاست. سیستم‌های ماند بیولوژیکی با هزینه تقریبی ۱۵ میلیارد ریال توانایی کاهش ۲۷ درصدی ریسک کمی سیلاب (آب‌گرفتگی) و ۶ درصدی ریسک کیفی (آلاینده‌ها) در رتبه دوم قرار دارد. نکته قابل توجه در نتایج این است که راهکار گسترش ابعاد کانال با وجود آن که ۹۷ درصد معیار ریسک آب‌گرفتگی گره‌ها را کاهش می‌دهد، به دلیل عدم ارضای شرط کمینه کردن معیارهای دیگر (معیار ریسک کلی آلاینده‌های سیلاب و هزینه اقتصادی بسیار زیاد)، آخرین رتبه را حتی بعد از وضعیت موجود به خود اختصاص داده است.

۶- نتیجه‌گیری

ارزیابی استفاده از راهکارهای سنتی و نوین برای بهبود عملکرد

۵- مراجع

1. Goonetilleke, A., Thomas, E., Ginn, S., and Gilbert, D. (2005). "Understanding the role of land use in urban stormwater quality management." *Journal of Environmental Management*, 74, 31-42.
2. Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., and Nielsen, A.H. (2010). *Urban and Highway stormwater pollution*, Taylor and Francis Inc., USA.
3. Chouli, E., Aftias, E., and Deutsch, J. (2006). "Applying stormwater management in Greek cities: Learning from the European experience." *J. of Desalination*, 210, 61-68.
4. We-Bin Chen. (2006). "Optimal allocation of stormwater pollution control technologies in a watershed." Doctor of Philosophy Thesis, Ohio State University, Ohio.
5. Benzerra, A., Cherrared, M., Chocat, B., Cherqui, F., and Zekiouk, T. (2012) "Decision support for sustainable urban drainage system management: A case study of Jijel, Algeria." *J. of Environmental Management*, 101, 46-53.
6. Chouli, E., Aftias, E., and Deutsch, J. (2006) "Applying stormwater management in Greek cities: Learning

شبکه‌های زهکشی آب‌های سطحی شهری در این پژوهش انجام شد و در نهایت این راهکارها بر اساس تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از معیارهای اقتصادی و ریسک‌های کمی و کیفی مقایسه و رتبه‌بندی شد. نتایج نشان داد که هر یک از راهکارها به نحو خاصی منجر به بهبود ریسک کمی و کیفی آب در سیلاب نسبت به وضعیت موجود می‌شوند. در دیدگاه سنتی گسترش ابعاد کانال، ریسک‌پذیری بالا و متوسط گره‌های شبکه را کاملاً از بین می‌برد؛ اما نتایج نشان می‌دهد که روش‌های سنتی به تنهایی نمی‌توانند تمام مشکلات مربوط به سیلاب را برطرف کنند و نه تنها نمی‌توانند پاسخگوی مشکلات محیط زیستی ناشی از سیلاب باشند، حتی باعث شدت آن نیز می‌شوند در این پژوهش گسترش ابعاد کانال با بیشترین هزینه رتبه آخر را به خود اختصاص داد. این در حالی است که سیستم‌های جوی‌باغچه و ماند بیولوژیکی با هزینه کمتر هم منجر به کاهش ریسک کمیت سیلاب می‌شود و هم بهبود کیفیت آب در سیلاب‌ها را دارد. سیستم‌های ماند بیولوژیکی با هزینه تقریبی ۱۵ میلیارد ریال، توانایی کاهش ۲۷ درصدی ریسک کمی سیلاب (آب‌گرفتگی) و ۶ درصدی ریسک کیفی (آلاینده‌ها) در رتبه دوم قرار دارد. جوی‌باغچه‌ها با هزینه تقریبی ۲۰ میلیارد ریال و توانایی کاهش ۵۹ درصدی ریسک کمی سیلاب (آب‌گرفتگی) و ۲۶ درصدی ریسک کیفی آب (آلاینده‌ها) بهترین روش برای کنترل ریسک‌های کمی و کیفی سیلاب هستند. البته برای تصمیم‌گیری‌های عملی و جامع در پژوهش‌های آینده، ترکیب راهکارهای نوین و سنتی، تعیین میزان بهینه کاربرد هر یک از آن‌ها و در نظر گرفتن معیارهای تأثیرگذار منطقه‌ای، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. همچنین در نظر گرفتن وزن دهی متفاوت معیارها بر اساس نظرات کارشناسان مختلف و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای ورودی برای دستیابی به جواب‌های پایدار پیشنهاد می‌شود.

- from the European experience.” *J. of Desalination*, 210, 61-68.
7. Barbosa, A.E., Fernandes, J.N., and David, L.M. (2012). “Key issues for sustainable urban stormwater management.” *Water Research*, 46 (20), 6787-6798.
 8. Lioyd, S.D., and Chesterfield, C.J. (2002). *Water sensitive urban design- a stormwater management prospective*, CRC for Catchment Hydrology, Industry Report, Australia.
 9. Furumai, H. (2006). “Reclaimed water and wastewater and factors affecting their reuse.” *Cities of the future, Proceedings of an International Workshop*, Racine.
 10. Horner, R.R., Skupien, J.J., Linvingston, E.H., and Shaver, H.E. (1994). “Fundamentals of urban runoff management.” Cooperative Research Center for catchment Hydrology, Washington, D.C.
 11. Scholes, L., Revitt, D.M., and Ellis, J.B. (2007). “A systematic approach for the comparative assessment of the stormwater pollutant removal potentials.” *J. of Environmental Management*, 88 (3), 467-478.
 12. Fletcher, T., Duncan, H., Poelsma, P., and Lioyd, S. (2004). *Stormwater flow and quality, and the effectiveness on non-propriety stormwater treatment measures- A review and gap analysis*, Technical Report, Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, Monash University, Melborn.
 13. Hunt, W., Jarrett, A., Smith, J., and Sharkey, L. (2006). “Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in north carolina.” *J. of Irrigation and Drainage Engeering*, 132(6), 600-608.
 14. Schueler, T. (2005) “Urban subwatershed restoration manual series: Urban stormwater retrofit practices Appendices.” Center of Watershed Protection, Ellicott City, MD.
 15. Coffman, L., and Rushton, B. (2005). *Bioretention applications*, United States Environmental Protection Agency.
 16. Rossman, L.A. (2010). *Storm water management model, user's manual, version 5.0*, United States Environmental Protection Agency.
 17. Lundy, L., Ellis, J.B., and Revitt, D.M. (2012). “Risk prioritisation of stormwater pollutanat sources.” *Water Research*, 46, 6589-6600.
 18. Han, S.Q., Xie, Y.Y., Li, D.M., and Li, P.Y. (2006) “Risk analysis and management of urban rainstorm water LOGGING in TIANJIN.” *J. of Hydrodynamics*, 18(5), 552-558.
 19. Fedeski, M., and Gwilliam, J. (2007). “Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology.” *Landscape and Urban Planning*, 83, 50-61.
 20. EUEQS. (2008). “Directive 2008/105/EC of the European parliament and of the council on environmental quality standards in the field of water policy.” *Official J. of European Union*, 348, 84-97.
 21. Ugarellia, R., Almeida, M. C., Behzadian, K., Liserra, T., Smeets, P., Kapelan, Z., and Sagrov, S. (2014) “Risk based analysis for assessment of integrated urban water system Watermet2 model: A case study of Oslo.” *HIC2014 – 11th International Conference on Hydroinformatics*, New York, USA.
 22. Andre´, F.J., and Romero, C. (2008). “Computing compromise solutions: On the connections between compromise programming and composite programming.” *Applied Mathematics and Computation*, 195, 1-10.
 23. USEPA. (2010). *Economic analysis of final water quality standards for nutrients for lakes and flowing waters in Florida*, USA.
 24. Zhang, G., and Hamlett, J.M. (2006). *Development of a SWMM water quality model for the Fox Hollow Watershed*, Centre County, Penn State University.
 25. Narayanan, A., and Pitt, R. (2005). *Costs of urban stormwater control practices*, USEPA.
 26. Soltani, M. (2009). “Quality modeling of urban streams.” MSc Thesis, Dept. of Civil Eng., Sharif University of Tech., Tehran. (In Persian)