2018, Vol.4, No.2, Pages 81 to 94
Journal of Water and Sustainable Development

سال چهارم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۶، صفحات ۸۱ تا ۹۴
نشریه آب و توسعه پایدار

A Review of Sustainable Urban Drainage Systems in Adaptation to Climate Change Impacts

N. Binesh[1], M.H. Niksokhan[2*], A. Sarang[3]

1,2 ,3- PhD. Student in Environment Engineering, Associate Professor & Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: niksokhan@ut.ac.ir)

Received: 17-05-2016
Accepted: 16-05-2017

Abstract

The two factors of the trend of climate change and urban development pose a challenge to urban drainage infrastructures due to the adverse impacts on precipitation extremes and urban environment. Nowadays, Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) have become quite popular as a result of their positive effects on the water quality, quantity, amenity, and recreational affairs in urban landscapes. Today, the majority of the world agrees that a sustainable drainage approach has an influence in reducing global climate change and adapting to this phenomenon (which has already started). The current paper reviews recent progress in the development of sustainable drainage, based on interdisciplinary studies. First, the reasons behind moving towards a sustainable urban drainage system are mentioned and then, existing models and decision-aid tools to assess different types of SUDS are compared and discussed. This paper also explains some limitations and challenges related to applying SUDS in practice and finally, the results and conclusions are presented.

Keywords: Sustainable drainage, city, runoff, climate change.

مروری بر سیستم‌های زهکشی پایدار شهری در تطبیق با اثرات تغییر اقلیم

نگین بینش[۱]، محمدحسین نیک‌سخن[۲*]، امین سارنگ[۳]

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست، دانشیار و استادیار گروه مهندسی عمران-محیط زیست، دانشگاه تهران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: niksokhan@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۲۸
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۲۶

چکیده

دو عامل روند تغییرات اقلیمی و توسعه شهری به دلیل اثرات نامطلوب بر بارش‌های حدّی و محیط‌زیست شهری، زیرساخت‌های زهکشی شهرها را به چالش می‌کشند. سیستم‌های زهکشی پایدار، امروزه به دلیل اثرات مثبتی که بر کنترل کمیت و کیفیت آب و نیز خدمات رفاهی و تفریحی مرتبط با آب در مناظر و چشم‌اندازهای شهری دارند، توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند. امروزه توافق بر سر این مسئله نیز ایجاد شده که استفاده از رویکرد زهکشی پایدار، در کاهش اثرات تغییر اقلیم جهانی و تطبیق با این پدیده که هم‌اکنون نیز آغاز شده است، مؤثر است. این مقاله به مرور پیشرفت‌های اخیر در توسعه زهکشی پایدار بر اساس تحقیقات میان‌رشته‌ای صورت گرفته، می‌پردازد. بدین‌صورت که دلایل نیاز حرکت به‌سوی سیستم‌های پایدار زهکشی شهری ذکر گردیده و مدل‌های موجود و رویکردهای شبیه‌سازی و ابزارهای تصمیم‌یار برای ارزیابی گزینه‌های زهکشی پایدار نیز مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرند. این مقاله همچنین به بررسی برخی محدودیت‌ها و چالش‌های موجود در رابطه با کاربرد تکنیک‌های زهکشی پایدار پرداخته و نهایتاً به بحث و نتیجه‌گیری از مباحث مذکور می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: زهکشی پایدار، شهر، رواناب، تغییر اقلیم.

DOI: 10.22067/jwsd.v4i2.55958

مقدمه

از زمان‌های دور تاکنون، سیستم زهکشی شهری به‌عنوان یک زیرساخت حیاتی، به‌منظور جمع‌آوری و انتقال رواناب به خارج از مناطق شهری وجود داشته است (Larsen و Gujer، ۱۹۹۷؛ Chocat و همکاران، ۲۰۰۷). علی‌رغم توسعه‌هایی که در سال‌های اخیر صورت گرفته، طراحی یک سیستم زهکشی کارا و با عملکرد مناسب، همچنان به‌عنوان چالشی قابل توجه برجا مانده است. به ویژه اثرات ناشی از تغییر اقلیم و توسعه شهری مورد تأکید بسیاری از محققین قرار گرفته، چراکه می‌توانند افزایشی قابل‌توجه در فراوانی و بزرگی سیل شهری در بسیاری از مناطق جهان ایجاد نمایند (Zhou، ۲۰۱۴). سیستم‌های زهکشی سنتی عمدتاً طراحی تک هدفی دارند که تمرکز آن‌ها بر کنترل کمیت رواناب است. درحالی‌که روش‌های زهکشی امروزی در سطح جهان، به سمت پایداری حرکت نموده و به دیگر ابعاد مهم مدیریت آب شهری- مانند کیفیت رواناب، زیباسازی محیط، امور تفریحی، حفاظت محیط‌زیست، و استفاده مجدد از آب- نیز در کنار کنترل کمّیِ رواناب، توجه دارند (Ferguson، ۱۹۹۱؛ France، ۲۰۰۲؛ Chocat و همکاران، ۲۰۰۷؛ Echols، ۲۰۰۷). در سال‌های اخیر، مسائل مربوط به کیفیت آب، به دلیل شناخت عمیق‌تر از مفهوم پایداری، به‌طور قابل ملاحظه‌ای در طراحی سیستم زهکشی شهری مورد توجه قرار گرفته است. از دیگر دلایل این امر، مشکلات فعلی در کیفیت محیط‌زیست آبی و احساس نیاز فوری به توسعه راهبردهایی برای مقابله با آلاینده‌های ورودی به پیکره‌های آبی دریافت کننده است (European Commission، ۲۰۰۰؛ Ellis و همکاران، ۲۰۰۲). علاوه بر دغدغه‌های زیست‌محیطی، انتقاد فزاینده‌ای نیز به ظرفیت محدود و عدم انعطاف‌پذیری سیستم‌های سنتی جمع‌آوری آب‌های سطحی در تطبیق با تغییرات اقلیمی و توسعه شهری در آینده وارد است (Krebs و Larsen، ۱۹۹۷).

طراحی سیستم زهکشی پایدار، نیازمند پژوهش‌های میان‌رشته‌ای بوده و همکاری متخصصین از حوزه‌های مختلف را می‌طلبد. رایج‌ترین تکنیک‌های "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری که امروزه به کار گرفته می‌شوند، عبارت‌اند از: ترانشه‌های نفوذ، روسازی‌های نفوذپذیر، مخازن ذخیره آب باران، جوی‌باغچه‌ها، حوضچه‌های نگهداشت موقت، تالاب‌ها و برکه‌ها (Elliott و Trowsdale، ۲۰۰۷). هدف از مقاله حاضر، مروری کلی بر لزوم به‌کارگیری تکنیک‌های زهکشی پایدار و وضعیت مطالعات رو به رشد در رابطه با این سیستم‌ها، محدودیت‌های موجود و شبیه‌سازی آن‌ها، با تأکید بر اثرات تغییر اقلیم، و با تأکید بر نتایج تحقیقات صورت گرفته در این رابطه است که از جنبه‌های مختلف، توسط پژوهشگران از رشته‌ها و تخصص‌های گوناگون، به آن پرداخته شده است.

دلایل حرکت به‌سوی سیستم زهکشی پایدار

۱- اثرات تغییر اقلیم و توسعه شهری

متوسط دمای جهان طی ۱۰۰ سال گذشته، تا ۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد افزایش نشان داده است (Scibel و Guerrieri، ۲۰۰۶). با توجه به افزایش گازهای گلخانه‌ای، و به ویژه دی‌اکسید کربن، پیش‌بینی می‌شود که دمای هوا از ۲/۲ تا ۶/۸ درجه سانتی‌گراد تا دهه ۲۰۸۰ افزایش یابد. این در حالی است که احتمال مقدار اندکی کاهش در بارش متوسط سالانه، و تغییر در توزیع زمانی آن نیز وجود دارد. بنابراین اقدامات تطبیق و کاهش خطر در این زمینه، باید با تمرکز بر سه حوزه اصلی: کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش دما، و اقدامات بازگشت‌پذیری نسبت به سیل صورت گیرد (Charlesworth، ۲۰۱۰).

پدیده تغییر اقلیم می‌تواند سبب افزایش فراوانی وقوع و شدت سیلاب‌ها شود. این پدیده به دلیل اثرات پیش‌بینی شده آن بر چرخه آب شهری- و به ویژه رواناب و سیل شهری- به‌عنوان یک دغدغه جهانی، به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (Ranger و همکاران، ۲۰۱۱؛ Hallegatte و همکاران، ۲۰۱۱؛ Willems و همکاران، ۲۰۱۲). بسیاری از پژوهشگران در تحقیقات خود عنوان نموده‌اند که افزایش در شدت اعمال معیارهای طراحی به دلیل تغییر اقلیم، بسته به نوع منطقه موردنظر می‌تواند به ۲۰ تا ۸۰ درصد برسد (Ekström و همکاران، ۲۰۰۵؛ Willems و همکاران، ۲۰۱۲؛ Arnbjerg-Nielsen، ۲۰۱۲). این مسئله سیستم‌های زهکشی فعلی را که بر اساس یک دوره بازگشت مشخص طراحی شده‌اند، با چالش عظیمی مواجه می‌کند. چراکه این سیستم‌ها در مقابله با مقدار رواناب افزایش یافته ناشی از اثرات تغییر اقلیم، با کمبود ظرفیت مواجه می‌شوند. به‌علاوه، طراحی سیستم زهکشی آینده نیازمند در نظر گرفتن افزایش شدت و فراوانی بارش می‌باشند تا تعداد دفعات اضافه‌بار سیستم، در سطح قابل قبولی حفظ شود (Burrell و همکاران، ۲۰۰۷؛ Mailhot و Duchesne، ۲۰۱۰).

از طرفی توسعه شهری نیز در کنار تغییر اقلیم، بر افزایش کمیت و کاهش کیفیت رواناب اثرگذار است. در مناطق شهری، به دلیل مشخصاتی چون گستره مناطق نفوذناپذیر، وجود سازه‌های جمع‌آوری و انتقال آب، فعالیت‌های متمرکز صنعتی و آلودگی‌ها، شدت بیشتر فعالیت‌های بشری، محدودیت منابع باکیفیت مطلوب موردنیاز و تمرکز جمعیتی، اثرات ناشی از تغییر اقلیم و پیامدهای آن بر عناصر گوناگون چرخه منابع آب شدیدتر بوده، و واکنش به تغییرات ایجاد شده در رواناب سطحی در اثر تغییر اقلیم خطرزاتر و سریع‌تر است. توسعه شهری منجر به کاهش سطوح نفوذناپذیر و کاهش زمان حرکت آب روی سطوح شهری، و به تبع آن سبب افزایش در حجم و اوج دبی رواناب می‌گردد. همچنین افزایش تماس با آلاینده‌های ناشی از کاربری‌های ویژه مناطق شهری نیز، کاهش

کیفیت آب و ایجاد مخاطراتی برای منابع آب موجود را به دنبال دارد (نظیف، ۱۳۸۹).

۲- چالش‌های پیش روی سیستم زهکشی سنتی

بسیاری از پژوهشگران با بررسی اثرات منفی روش‌های زهکشی سنتی بر محیط‌زیست شهری، دغدغه خود را در رابطه با پایداری بلندمدت این سیستم‌ها اعلام نموده‌اند (Wong و Eadie، ۲۰۰۰؛ Roy و همکاران، ۲۰۰۸؛ Zevenbergen و همکاران، ۲۰۰۸). به‌عنوان نمونه Stewart و Hytiris (۲۰۰۸) در رابطه با آلودگی ورودی به نهرها به دلیل سرریز جریان از سیستم فاضلاب ترکیبی (در ترکیب با سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی) (CSO)[1] بحث نموده‌اند. اختلالات زیست‌محیطی متعدد ایجاد شده توسط زهکشی سنتی نیز در تحقیقات متعددی مورد انتقاد قرار گرفته است (Hellström و همکاران، ۲۰۰۰). مسئله‌ی مهم‌تر اینکه سیستم سنتی جمع‌آوری آب‌های سطحی، از تعداد زیادی اجزای سازه‌ای (مانند لوله‌های بتنی و مخازن زیرزمینی) تشکیل شده و هزینه و زمان موردنیاز برای ترمیم و نصب شبکه زهکشی بسیار زیاد است (Wilderer، ۲۰۰۴). این بدان معناست که سیستم‌های سنتی در بسیاری از موارد، لازم است با استفاده از قطعات و بخش‌های متعددی توسعه داده شوند و بنابراین انعطاف‌پذیری لازم و کافی را برای افزایش ظرفیت و تطبیق با شرایط بحرانی ندارند (Krebs و Larsen، ۱۹۹۷؛ Sieker و همکاران، ۲۰۰۸). در مواجهه با تغییر اقلیم و توسعه شهری، گسترش سیستم لوله‌های زیرزمینی به شیوه‌ای که در حال حاضر در برخی مناطق معمول است، برای تأمین معیارهای کلی پایداری کافی به نظر نمی‌رسد (Hellström و همکاران، ۲۰۰۰؛ Chocat و همکاران، ۲۰۰۴). جدول (۱) مقایسه‌ای کلی میان رویکرد سنتی و پایدار در زهکشی رواناب شهری را ارائه می‌دهد.

سابقه‌تحقیقات

۱- تحقیقات مرتبط با اثرات تغییر اقلیم بر رواناب شهری

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در رابطه با اثرات تغییرات اقلیمی و توسعه شهری بر رواناب شهری و مدیریت آن صورت گرفته است. جداول (۲) تا (۵) برخی از این تحقیقات را به اختصار ارائه می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه دو رویکرد سنتی و پایدار در مدیریت رواناب سطحی در شهرها

زهکشی سنتی	زهکشی پایدار
ظرفیت محدود در مواجهه با نیازهای زمان آینده (تغییر اقلیم و گسترش شهرها) و درنتیجه نیاز به توسعه در بازه‌های زمانی مشخص با هزینه زیاد	به دلیل استفاده از مکانیزم‌هایی چون نفوذ و استفاده مجدد از رواناب در بخش‌های مختلف، با مشکل کمبود ظرفیت مواجه نیست.
تمرکز بر کنترل کمیت رواناب و توجه ناچیز به مسائل رفاهی و اجتماعی در شهرها	توجه نسبتاً یکسان یا با نسبت منطقی به کمیت، کیفیت، و مسائل رفاهی-اجتماعی در محیط شهری
سیستم متمرکز و تک‌هدفه و تک ابزاره با تأکید بر راه حل‌های انتهای فرایند[2]	سیستم چند هدفه همراه با استفاده از تکنیک‌ها و ابزار مختلف با تأکید بر کنترل رواناب در منشأ
در نظر گرفتن رواناب به‌عنوان عنصری آلوده و مزاحم در شهر که باید هر چه سریع‌تر خارج شود	تلاش برای مهار و استفاده مجدد از رواناب در محیط شهری
آلوده ساختن پیکره‌های آبی دریافت‌کننده و عدم توجه کافی به مسائل کیفی و زیست‌محیطی	بهبود کیفیت رواناب و کمک به حفاظت محیط‌زیست
عدم توجه به مسائل رفاهی و زیباسازی محیط، و تنوع زیستی در محیط شهری	کمک به زیباسازی محیط شهر و رفاه شهروندان، کمک به بهبود تنوع زیستی در محیط‌زیست شهری، در کنار بهبود اثرات نامطلوب تغییر اقلیم، تغذیه آب‌های زیرزمینی، و کمک به بازسازی و احیای شرایط طبیعی پیش از توسعه شهری
عدم تأمین معیارهای توسعه پایدار	لحاظ نمودن معیارهای پایداری در محیط‌زیست شهری

جدول ۵- مطالعات مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر مدیریت منابع آب (Praskievicz و Chang، ۲۰۰۹)

نام محققین	منطقه مورد مطالعه	مدل گردش عمومی مورد استفاده	دوره زمانی مورد بررسی	مدل هیدرولوژیکی	نتایج
Waters و همکاران (۲۰۰۳)	اونتاریو	CGCM2	دهه ۲۰۹۰	SWMM	سیل می‌تواند با ابزار زهکشی غیرمتمرکز مانند جوی‌های زیستی[24] و خیابان‌های سبز[25] کاهش داده شود،
Payne و همکاران (۲۰۰۴)	حوضه رودخانه کلمبیا[26]	مدل اقلیمی موازی (PCM)	۲۰۷۰-۲۰۹۸	ظرفیت نفوذ متغیر (VIC)	کاهش ۹ تا ۳۵ درصدی تولید نیروی برق‌آبی
O'Hara و Georgakakos (۲۰۰۸)	کالیفرنیا	CGCM2, Had-CM3, ECHAM4	۲۰۰۶-۲۰۳۰	abcd	افزایش (مطابق انتظار) در هزینه‌های ذخیره آب ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلیون دلار آمریکا

جدول ۲- مطالعات مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی حوضه آبریز (Praskievicz و Chang، ۲۰۰۹)

نام محققین	منطقه مورد مطالعه	مدل گردش عمومی مورد استفاده	دوره زمانی مورد بررسی	مدل هیدرولوژیکی	نتایج
Frei و همکاران (۲۰۰۲)	نیویورک[۳] (۱۱۸۰ کیلومترمربع)	HadCM2; CGCMa1	دهه ۲۰۸۰	مدل مفهومی بیلان آب "تورنت وایت"	رواناب از ۱۰ درصد افزایش تا ۳۰ درصد کاهش نشان داد
Loukas و همکاران (۲۰۰۲)	بریتیش‌کلمبیا[۴] (۱۱۵۰-۱۱۹۴ کیلومترمربع)	CGCMa1	۲۰۸۰ -۲۱۰۰	مدل حوضه آبریز دانشگاه بریتیش‌کلمبیا	در زیرحوضه‌ای که نزولات جوی اغلب به‌صورت باران است: افزایش رواناب در پاییز و زمستان، و کاهش رواناب در بهار و تابستان در زیرحوضه‌ای که نزولات جوی اغلب به‌صورت برف است: افزایش حجم و کاهش زمان رسیدن به دبی اوج رواناب در زمستان
Eckhardt و Ulbrich (۲۰۰۳)	اروپای مرکزی (۶۹۳ کیلومترمربع)	Ensemble of 5	دهه ۲۰۹۰	SWAT	افزایش رواناب در زمستان، کاهش زمان رسیدن به دبی اوج در بهار، کاهش رواناب و تغذیه آب زیرزمینی در تابستان
Christensen و همکاران (۲۰۰۴)	حوضه رودخانه کلرادو[۵]	مدل اقلیمی موازی[۶] (PCM)	۲۰۷۰ -۲۰۹۸	ظرفیت نفوذ متغیر (VIC)[۷]	کاهش ۱۷ درصدی رواناب
Andreásson و همکاران (۲۰۰۴)	سوئد (۱۱۰۰ -۶۰۰۰ کیلومترمربع)	HadCM2, ECHAM4/ OPYC3, HadAM3H	دهه ۲۰۳۰	(HBV)[۸]	در جنوب سوئد: کاهش رواناب سالانه در شمال سوئد: افزایش رواناب سالانه
Graham (۲۰۰۴)	حوضه دریای بالتیک[۹] (۱۶۰۰۰۰۰ کیلومترمربع)	ECAM4/ OPYC3, HadAM3H	۲۰۷۱ -۲۱۰۰	HBV	از ۳۰ درصد کاهش تا ۴۰ درصد افزایش در رواناب
Thodsen (۲۰۰۷)	دانمارک (۲۳- ۸۱۴ کیلومترمربع)	HIRHAM RCM	۲۰۷۱ -۲۱۰۰	(NAM)[۱۰]	افزایش ۱۲ درصدی در میانگین سالانه رواناب، افزایش ۱۱ درصدی دبی اوج سیل ۱۰۰ ساله
Bae و همکاران (۲۰۰۸)	کره جنوبی (۴۳- ۲۲۹۳ کیلومترمربع)	ECHO-G, NCAR/ MM5	۱۹۶۰ -۲۱۰۰	سیستم مدل‌سازی بارش- رواناب (PRMS)[۱۱]	کاهش رواناب در بهار و تابستان، افزایش رواناب در پاییز و زمستان
Fujihara و همکاران (۲۰۰۸)	ترکیه (۲۱۷۰۰ کیلومترمربع)	MRI- CGCM2	دهه ۲۰۷۰	Hydro-BEAM	کاهش در رواناب سالانه به میزان ۵۲ تا ۶۱ درصد

جدول ۳- مطالعات مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر کیفیت رواناب (Praskievicz و Chang، ۲۰۰۹)

نام محققین	منطقه مورد مطالعه	مدل گردش عمومی مورد استفاده	دوره زمانی مورد بررسی	مدل هیدرولوژیکی	نتایج
Mimikou و همکاران (۲۰۰۰)	یونان (۹۴۵۰ کیلومترمربع)	HadCM2, UKHI	دهه ۲۰۵۰	بودجه آبی (WBUDG)[۱۲]	کاهش در رواناب و اکسیژن محلول، افزایش اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) و آمونیوم
Varanou و همکاران (۲۰۰۲)	یونان (۲۷۹۶ کیلومترمربع)	HadCM2, ECHAM, CSIRO, CGCM	دهه ۲۰۸۰	SWAT	کاهش در رواناب و انتقال مواد مغذی
Bouraoui و همکاران (۲۰۰۴)	فنلاند (۱۶۸۲ کیلومترمربع)	فاقد مدل (تحلیل داده‌های تاریخی)	۱۹۶۵ -۱۹۹۸	SWAT	افزایش در رواناب زمستان، افزایش انتقال مواد مغذی در فصل زمستان و نیز سالانه
Arheimer و همکاران (۲۰۰۵)	سوئد (۱۹۰۰ کیلومترمربع)	HadAM3H, HadCM2, ECHAM4, OPYC3	۲۰۷۱ -۲۱۰۰	HBV	افزایش ۱۰ تا ۳۳ درصدی بارگذاری مواد مغذی
Imhoff و همکاران (۲۰۰۷)	مریلند[۱۳] (۱۹۰۰ کیلومترمربع)	ECHAM4	۲۰۱۰ -۲۰۳۹	ابزار ارزیابی اقلیم (CAT)[۱۴]	افزایش ۱۰ درصدی بارگذاری مواد مغذی
شمشیرساز و نظریها (۱۳۹۳)	ایران (منطقه۳ تهران- مسیل زرگنده)	HAD-CM3	۲۰۸۰-۲۰۹۹	SWMM	پارامترهای کیفی و آلاینده‌ها همچنان بیش از مقادیر استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان محیط‌زیست ایران بوده و لازم است راهکارها مدیریتی در این زمینه اتخاذ گردد.

جدول ۴- مطالعات مدل‌سازی اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و توسعه شهری بر منابع آب (Praskievicz و Chang، ۲۰۰۹)

نام محققین	منطقه مورد مطالعه	مدل گردش عمومی مورد استفاده	دوره زمانی مورد بررسی	مدل هیدرولوژیکی	نتایج
Herron و همکاران (۲۰۰۲)	استرالیا	ECHAM4/ OPYC3, CSIRO DAR-LAM, HadCM3	۱۸۶۰- ۲۱۰۰	مدل یکپارچه کمّی- کیفی (IQQM)[۱۵]	کاهش ۱۷ درصدی رواناب ناشی از افزایش پوشش جنگلی، کاهش ۵ درصدی رواناب ناشی از تغییر اقلیم
Chang (۲۰۰۳)	پنسیلوانیا[۱۶]	HadCM2, CGMa1	۱۹۹۰- ۲۱۰۰	تابع عمومی بارگذاری حوضه مربوط به نرم‌افزار Arc View (AVGWLF)[۱۷]	افزایش ۱۱ درصدی میانگین رواناب سالانه به دلیل تغییر اقلیم، افزایش ۲ درصدی میانگین رواناب سالانه ناشی از توسعه شهری
Maximov (۲۰۰۳)	اوهایو[۱۸]	HadCM2	دهه ۲۱۰۰	علوم ارزیابی بهتر تجمیع کننده منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای (BASINS)[۱۹]	تا میزان ۷۰ درصد افزایش در رواناب سالانه، ۴۰ تا ۵۰ درصد افزایش غلظت فسفات
Chen و همکاران (۲۰۰۵)	چین	فاقد مدل (تحلیل داده‌های تاریخی)	۱۹۷۰- ۱۹۹۹	مدل رواناب حساس به فعالیت‌های بشر و اقلیم (CHARM)[۲۰] , SWAT	تغییر اقلیم سبب ۶۰ تا ۸۰ درصد تغییر در میزان رواناب می‌شود، تغییر در کاربری و پوشش زمین نیز سبب ۲۰ درصد تغییر در رواناب می‌شود.
Samaniego و Bárdossy (۲۰۰۶)	آلمان	CGCMa1, HadCM2	دهه ۲۱۰۰	معادلات غیرخطی	افزایش به میزان ۱۷ تا ۴۴ درصد در رواناب فصل زمستان.
Davis Todd و همکاران (۲۰۰۷)	ایندیانا[۲۱]	فاقد مدل (تحلیل داده‌های تاریخی)	۱۹۴۰- ۲۰۰۵	ظرفیت نفوذ متغیر (VIC)[۲۲]	افزایش جریان پایه و جریان رودخانه؛ هیچ روندی در تغییرات بارش مشاهده نشد. اثر تغییر کاربری و پوشش زمین در اثر توسعه شهری، بیشتر از اثر تغییر اقلیم بود.
Ducharne و همکاران (۲۰۰۷)	فرانسه	ARPEGE-IFS	۲۰۷۰- ۲۰۹۹	RIVERSTRAHLER	تغییر اقلیم سبب افزایش غلظت مواد مغذی گردید. اقداماتی که در رابطه با مدیریت و بهبود پوشش زمین صورت می‌گیرد، می‌تواند در کاهش اثرات تغییر اقلیم مؤثر باشد.
Beighley و همکاران (۲۰۰۸)	کالیفرنیا	فاقد مدل (بررسی تغییرات اقلیمی)	۱۹۲۹- ۲۰۵۰	HEC-HMS	در سال‌های ال‌نینو[۲۳]، احتمال ایجاد رواناب‌های بزرگ، ۵ برابر بیشتر از سایر اوقات بوده؛ و افزایش غلظت نیترات و فسفات نیز ۵ تا ۱۰ برابر بیش از سطوح پایه است.

۲- تحقیقات صورت گرفته در رابطه با سیستم‌های زهکشی پایدار

زهکشی پایدار نیز مانند تغییر اقلیم، موضوع نسبتاً نوینی در تحقیقات مربوط به مدیریت رواناب شهری بوده و به‌ویژه در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. Wilderer (۲۰۰۴) به بحث راجع به چگونگی به‌کارگیری مفاهیم مدیریت پایدار آب در مناطق روستایی و شهری با ابزارهای گوناگون می‌پردازد. وی در مقاله خود، بر ضرورت در نظر گرفتن ابعاد مختلف مهندسی، اقتصادی، اداری، و فرهنگی در پژوهش‌ها به منظور کاربرد مؤثر این قبیل تحقیقات در حوزه‌های مختلف، تأکید می‌نماید. Ashley و همکاران (۲۰۰۷) مروری بر انواعی از "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری" که امروزه بیشتر مرسوم می‌باشند، داشته و قابلیت یکپارچه‌سازی این سیستم‌ها با سیستم‌های سنتی جمع‌آوری و انتقال رواناب را در مدیریت هم‌زمان کمّی و کیفی سیلاب نشان دادند. Charlesworth (۲۰۱۰) در مطالعه خود، به‌طور ویژه بر فناوری‌های دارای پوشش گیاهی و نیز سازه‌های مهندسی به کارگیری شده در کاهش خطر و تطبیق با تغییر اقلیم تمرکز نمود. وی در این مقاله، بر نیاز به توسعه فناوری‌های مقاوم‌سازیِ ساختمان‌های موجود در طراحی "سیستم‌های توسعه پایدار" تأکید داشت. برخی تحقیقات نیز نگاه فنی‌تری به ماجرا داشتند، که از آن جمله می‌توان به مطالعه صورت گرفته توسط Elliott و Trowsdale (۲۰۰۷) اشاره نمود که ۱۰ مدل را با توجه به قابلیت‌ها و ارتباط آن‌ها با "سیستم‌های زهکشی پایدار" مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه مزایا و معایب این مدل‌ها را در پاسخ به نیازهای مختلف تکنولوژی‌های "سیستم زهکشی پایدار شهری" مورد بررسی قرار دادند. از دیدگاه مدیریتی، Brown و Farrelly (۲۰۰۹) انتقال از رویکردهای زهکشی سنتی به روش‌های پایدار امروزی را در موارد مختلف، مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که موانع موجود، بیشتر از نوع اجتماعی- سازمانی هستند و نه فنی و تکنیکی. Butler و Parkinson (۱۹۹۷) نیز مؤلفه‌های نوین در طراحی زهکشی پایدار، و راهبردهایی به منظور تسهیلِ گذار از اقدامات فعلی به یک الگوی جدید را مورد بحث و بررسی قرار دادند. Lai و همکاران (۲۰۰۸) به تحلیل و بررسی یک ابزار تصمیم‌یار چند معیاره مربوط به ارزیابی جامع و یکپارچه پایداری، مورد استفاده برای کمک به تصمیم‌گیری در حوزه "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری"، پرداخته و آن را با سه ابزار

پرکاربرد تصمیم‌یار دیگر مورد مقایسه قرار دادند. این‌گونه تحقیقات اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با مفاهیم، ویژگی‌ها، اهداف، تکنیک‌ها، و ابزار "طراحی زهکشی پایدار"، با تمرکز ویژه بر یکی از موارد مذکور ارائه می‌دهند.از طرفی دیگر مطالعات صورت گرفته در رابطه با کاربرد تکنیک‌های زهکشی پایدار، می‌توان به چارچوب ارائه شده توسط Cerqueira و Da Silva (۲۰۱۶) اشاره کرد که جهت بازطراحی سکونت‌گاه‌های غیررسمی بر اساس اقدامات توسعه کم‌اثر پیشنهاد شده و بر محله‌ای فقیرنشین و باتلاقی واقع در پیرامون شهر ریو دو ژانریو[۱۷] در برزیل اعمال گردید. این محققین عقیده دارند که این چارچوب، می‌تواند در راستای نیل به هدف توسعه پایدار، در بازطراحی سایر محلات مشابه در محیط‌های شهری به کار گرفته شود. Carvallo Aceves و Fuamba (۲۰۱۶) نیز در مطالعه‌ای، یک روشی را برای انتخاب اولویت‌بندی در انتخاب ابزارهای زهکشی پایدار بر اساس روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه می‌دهند.

همان‌طور که اشاره گردید، از جمله مزایای جانبی به‌کارگیری تکنیک‌های زهکشی پایدار، قابلیت این سیستم‌ها در ایجاد اثرات مثبت بر چشم‌انداز شهری است (Zhou و همکاران، ۲۰۱۳). به طوری‌که برخی محققین پیشنهاد داده‌اند که از این نوع سیستم‌ها در ایجاد مکان‌های تفریحی جدید در مناظر شهری استفاده شود (Ferguson، ۱۹۹۱؛France، ۲۰۰۲). در مقالات مختلفی به این نکته اشاره شده که دسترسی به فضای سبز در یک منطقه شهری متراکم، تأثیر مثبتی بر رفاه و سلامت روحی شهروندان دارد (de Vries و همکاران، ۲۰۰۳؛ Maas و همکاران، ۲۰۰۶؛ Groenewegen و همکاران، ۲۰۰۶). مطالعه صورت گرفته توسط Lafortezza و همکاران (۲۰۰۹)، وجود چنین تأثیری را در هنگام وقوع تنش‌های شدید گرمایی در انگلستان نشان می‌دهد، به طوری‌که این محققین نتیجه گرفتند که فضای سبز شهری با ایجاد سایه و دسترسی به آب، راهکار مناسبی برای تطبیق با اثرات نامطلوب تغییر اقلیم است و می‌بایست به‌عنوان یک راهبرد مهم در دستور کار قرار گیرد. Gill و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای در محدوده منچستر انگلستان[۲۸] نشان دادند که در صورتی که شهرها پوشش گیاهی و فضای سبز خود را به میزان حداقل ۱۰ درصد افزایش دهند، دمای سطحی، حتی با وجود تغییر اقلیم، ثابت باقی می‌ماند. تکنیک‌های زهکشی پایدار، در خنک شدن هوای شهرها و کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری کمک‌کننده هستند و بدین‌وسیله در مقابله با اثرات تغییر اقلیم نقش مهمی داشته و می‌توانند اثرات مثبتی بر سلامت انسان نیز داشته باشند (Charlesworth، ۲۰۱۰).

در راستای افزایش سطح پایداری، چندین طرح پژوهشی مهم در نقاط مختلف جهان آغاز گردیده است. در کشور دانمارک، برنامه‌های پژوهشی وسیع ملی ایجاد گردید، که از آن جمله می‌توان طرح "آب در مناطق شهری" که بر روی تبدیل زیرساخت‌های آب شهری به سیستم‌های پایدار در مواجه با اقلیم کار می‌کند (Vand i byer، ۲۰۱۴)، و پروژه "سیاه، آبی، و سبز" به‌منظور یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها برای سیستم‌های پایدار آب شهری (Fryd، ۲۰۰۹) را نام برد. این پروژه شامل مطالعات موردی در رابطه با طراحی زهکشی پایدار شهری اجرا شده در کشورهای دانمارک و هلند است. رویکرد زهکشی پایدار هم‌اکنون در بسیاری از شهرهای جهان (هنگ‌کنگ، لندن، شیکاگو، نیویورک، لس‌آنجلس، فیلادلفیا، ملبورن، سئول، توکیو، مکزیکوسیتی، سائوپائولو، سیدنی، و غیره) به‌عنوان راهبردی مؤثر در تطبیق با تغییر اقلیم و کاهش اثرات آن به کار گرفته می‌شود (Charlesworth، ۲۰۱۰). با وجود اینکه ترمینولوژی[۲۹] و اصطلاحات مرتبط با سیستم‌های زهکشی پایدار در مناطق مختلف جهان متفاوت است، اما فلسفه طراحی آن‌ها مشابه می‌باشد. عبارت "سیستم زهکشی پایدار شهری" (SUDS)[۳۰] اغلب در اروپا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در استرالیا، اصطلاح "طراحی شهری حساس به آب" (WSUD)[۳۱]، به‌عنوان رویکردی در سطح حوضه آبریز مطرح شده، به طوری‌که "سیستم زهکشی پایدار شهری" بخشی از آن محسوب می‌شود. این سیستم‌ها در ایالات‌متحده و کانادا به‌عنوان "اقدامات توسعه کم‌اثر" (LID)[۳۲] یا "بهترین اقدامات مدیریتی" (BMPs)[۳۳] شناخته می‌شود. نام‌گذاری‌های دیگری نیز در سایر نقاط جهان در رابطه با این تکنیک‌ها صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به "توسعه و طراحی شهری کم‌اثر" (LIUDD)[۳۴] در زلاندنو اشاره نمود. Fletcher و همکاران (۲۰۱۵) به لزوم دقت در استفاده از ترمینولوژی‌های موجود برای نقاط مختلف جهان تأکید می‌نمایند. در اینجا جهت هماهنگی و یکپارچگی بیشتر در تحقیق حاضر، در تمامی موارد از اصطلاح "سیستم زهکشی پایدار شهری" استفاده گردیده است.

چالش‌های موجود در رابطه با سیستم‌های زهکشی پایدار

علیرغم بسیاری از مزایای "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری" برای مدیریت کیفیت و کمیت رواناب، سؤالات و عدم اطمینان‌هایی در رابطه با عملکرد و امکان پذیری اجرای آن‌ها وجود دارد. برای مثال، Bergman و همکاران (۲۰۱۱) عملکرد دو ترانشه نفوذ را که در اواخر دهه ۱۹۹۰ در بخش مرکزی کوپنهاک در کشور دانمارک نصب شده بود، مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که طول عمر ترانشه‌های نفوذ، به دلیل گرفتگی‌ها و مسدود شدگی‌های ناشی از شن و ماسه، بسیار کوتاه‌تر از مدت مورد انتظار است. همچنین دغدغه‌های مشابهی در تحقیق صورت گرفته توسط Achleitner و همکاران (۲۰۰۷) در رابطه با نفوذپذیری هیدرولیکی یک جوی‌باغچه، مشاهده گردید. Zhou و همکاران (۲۰۱۳) به بحث در رابطه با یک نمونه موردی پرداختند که از ترانشه‌های نفوذ و برکه‌های نگهداشت موقت رواناب به منظور کاهش خطر سیل تحت اثرات تغییر اقلیم استفاده نموده بود. آن‌ها در مقاله خود، پتانسیل قابل توجه برکه‌های مصنوعی

و حوضچه‌های نگهداشت موقت را در کاهش رواناب ناشی از وقایع حدی، و نیز فراهم آوردن امکانات تفریحی در مناظر و چشم‌اندازهای شهری نشان دادند. با این حال نتیجه گرفتند که به دلیل محدودیت در تأمین قید و بندهای زمین‌شناختی و نیز فضا و مکان مورد نیاز برای احداث این نوع تکنیک‌ها و سایر مسائل ویژه مربوط به نگهداری و تنظیم شرایط آن‌ها، نگرانی‌هایی به لحاظ بهره‌برداری عملی از این تأسیسات وجود دارد. به‌علاوه، مطالعات متعدد دیگری نیز در رابطه با محدودیت تکنیک‌های "زهکشی پایدار شهری" در پاسخ به بارگذاری فزاینده هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تحت اثرات تغییر اقلیم

ابزار ارزیابی سیستم‌های زهکشی پایدار

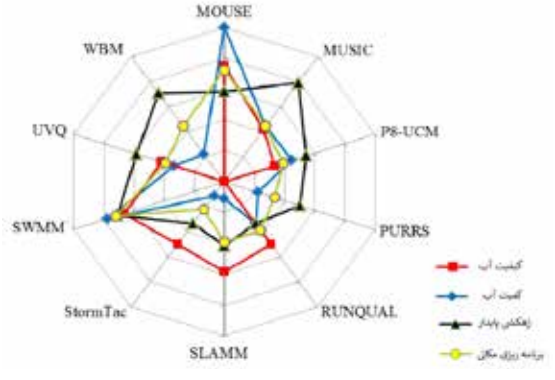
۱- مدل‌ها

امروزه ده‌ها بسته نرم‌افزاری تجاری و متن باز[۳۵] برای مدل‌سازی ابزار و تکنیک‌های زهکشی پایدار و انجام شبیه‌سازی‌های کیفی و کمی مربوطه وجود دارد (Zoppou، ۲۰۰۱؛ Elliott و Trowsdale، ۲۰۰۷). اگرچه روش‌های مدل‌سازی زهکشی رواناب به دلیل پیشرفت‌های رخ داده در زمینه مباحث محاسباتی و اندازه‌گیری، یک جهش رو به جلو داشته است، اما این روش‌ها هنوز تنها می‌توانند تقریبی از واقعیت یک پدیده پیچیده را ارائه دهند. با این حال، این مدل‌سازی‌ها در درک عملکرد "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری"- به لحاظ مکانیزم جریان، منابع آلودگی، و علت وقوع سیل- رو به پیشرفت و ارتقاء هستند و انجام چنین شبیه‌سازی‌هایی در تسهیل کاربرد این قبیل سیستم‌ها کمک‌کننده است (Knapp و همکاران، ۱۹۹۱؛ Hamby، ۱۹۹۴).

بررسی‌های پیشین، شامل رویکردهای مدل‌سازی تفصیلی و متعددی است که برای ارزیابی "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری" در مطالعات موردی مختلف به کار گرفته شده است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین نیز اشاره گردید، Elliott و Trowsdale (۲۰۰۷) تعداد ۱۰ روش مدل‌سازی زهکشی پایدار را در رابطه با شبیه‌سازی‌های کمّی و کیفی آب، مدل‌سازی ابزار زهکشی پایدار، و برنامه‌ریزی مکانی مورد بررسی قرار دادند (شکل ۱). آن‌ها در این مقاله نشان دادند که بیشتر مدل‌های مورد بررسی، دارای کارکردهای مربوط به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی (تولید بارش و روندیابی رواناب) می‌باشند، اما تنها تعدادی از آن‌ها -از جمله SWMM و MOUSE (نسخه قدیمی Mike Urban)- توانایی شبیه‌سازی هیدرولیک شبکه زهکشی را دارند. تمامی مدل‌های مورد بررسی، مدل‌سازی رسوب، مواد مغذی، و فلزات سنگین را انجام می‌دهند. در رابطه با توانایی شبیه‌سازی ابزار زهکشی پایدار، اغلب مدل‌ها می‌توانند برای بررسی میزان نفوذناپذیری کاهش یافته، برکه‌ها و تالاب‌ها، ترانشه‌های نفوذ، و جوی‌باغچه‌ها مورد استفاده قرار گیرند، حتی با وجود اینکه برخی از این مدل‌ها، ابزار مربوطه را به‌صراحت و مستقیماً ارائه

ذکر گردیده است (Holman-Dodds و همکاران، ۲۰۰۳؛ Ashley و همکاران، ۲۰۰۷). نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که این تکنیک‌ها بر جریان رواناب تأثیرگذار هستند، اما حجم آب کاهش داده شده هنگام رخداد وقایع حدی بسیار محدود بوده و به شرایط محلی- از جمله بزرگی و مدت بارش، بافت و مواد تشکیل دهنده خاک- وابستگی زیادی دارد. بنابراین اقدام معقول آن است که "سیستم زهکشی پایدار شهری" را با سیستم سنتی جمع‌آوری رواناب در شهرها ترکیب و یکپارچه سازی نمود و در کنار یکدیگر مورد استفاده قرار داد تا در طراحی سیستم زهکشی هم‌افزایی ایجاد شود.

نمی‌دهند. مدل‌های MUSIC و WBM علاوه بر موارد فوق، شامل حوضچه‌های نگهداشت زیستی و باغچه‌های نگهداشت آب باران نیز هستند و از میان مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق، تنها WBM به‌طور ویژه به تحلیل پشت‌بام سبز می‌پردازد.



شکل ۱- قابلیت مدل‌های مختلف به لحاظ شبیه‌سازی کمّی، شبیه‌سازی کیفی، مدل‌سازی ابزار زهکشی پایدار و برنامه‌ریزی مکانی (Zhou، ۲۰۱۴)

تحقیق انجام شده توسط Sharma و همکاران (۲۰۰۸) یک نمونه اجرا شده در کانبرا[۳۶] را ارائه می‌دهد که در آن سه ابزار مدل‌سازی (Aquacycle، MUSIC و PURRS) به منظور پیش‌بینی اثرات سناریوهای جایگزین برای مدیریت یکپارچه آب، مورد استفاده قرار گرفت. این مطالعه به حصول دید بهتر در رابطه با عملکرد ابزارهای مدل‌سازی -با توجه به چگونگی انجام شبیه‌سازی مخازن ذخیره آب باران، استفاده از آب خاکستری، جوی‌باغچه‌ها و برکه‌ها، و مخازن نگهداشت موقت- کمک می‌کند. Mitchell و همکاران (۲۰۰۷) شش مدل یکپارچه آب شهری (UVQ، Hydro Planner، Krakatoa، Mike Urban، UrbanCycle و WaterCress) را مرور نموده و آن‌ها را از جنبه‌های مختلفی چون نمایش زمانی و مکانی، ورودی‌های اقلیمی، کیفیت آب، مقدار رواناب، آب زیرزمینی، و تصفیه پساب با یکدیگر مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که تمام این شش مدل، محدوده خوبی از مقیاس‌های مکانی را از قطعات کوچک

تا کل سطح منطقه پوشش می‌دهند. تنها دو مورد از این مدل‌ها (Mike Urban و UrbanCycle) توانایی مدل‌سازی در رزولوشن زمانی کمتر از ساعتی را دارند، و سایر مدل‌های مذکور، عمدتاً گام زمانی روزانه را مورد استفاده قرار می‌دهند، که این محدودیت بسیار شدیدی در رابطه با مدل‌سازی زهکشی شهری است. در میان تمامی این مدل‌ها، مدل Mike Urban (در مقایسه با Krakatoa، UVQ و Hydro Planner)، الگوریتم پیشرفته‌تری به لحاظ شبیه‌سازی کیفیت آب دارد. دو مدل UrbanCycle و WaterCress، شبیه‌سازی کیفی آب را در روش‌های خود چندان پوشش نمی‌دهند.

Knapp و همکاران (۱۹۹۱) براساس ورودهای مدل‌ها، اپلیکیشن‌ها، و روندهای مدل‌سازی، به‌مرور روش‌های موجود در مدل‌سازی بارش-رواناب برای مدیریت رواناب پرداختند. Obropta و Kardos (۲۰۰۷) سه رویکرد قطعی، استوکستیک، و ترکیبی را در مدل‌سازی کیفی رواناب مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که روش‌های ترکیبی در کاهش عدم قطعیت و خطای پیش‌بینی مدل، نتایج مطلوب‌تری به‌دست می‌دهد. Zoppou (۲۰۰۱) تعداد ۱۲ مدل شبیه‌سازی کیفی و کمی رواناب (HSPF، DR3 M-QUAL، MIKE-SWMM، QQS، STORM، SWMM، SWMM Lev-el 1، مدل Wallingford، BRASS، HEC-5Q، QUAL2E-UN- و CAS و WQRRS) را بررسی نموده و توانایی‌ها و محدودیت‌های آن‌ها را به لحاظ عملکرد، قابلیت دسترسی، و روش‌های مدل‌سازی اجزای کمی و کیفی آب، و در مقیاس‌های زمانی و مکانی به اختصار بیان نمودند (Zhou، ۲۰۱۴).

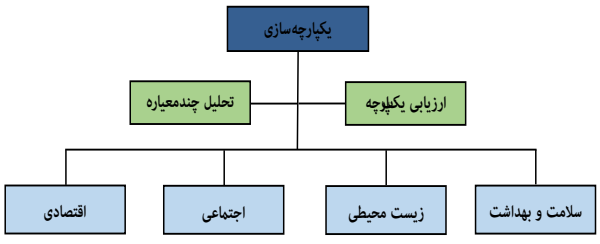
با وجود مدل‌های متعدد برای شبیه‌سازی "سیستم زهکشی پایدار شهری"، به دلیل پیچیدگی‌های فنیِ بسیاری از این مدل‌ها، استفاده از آن‌ها برای عموم مردم مشکل است و نرم‌افزار کاربردوست[۳۷] محسوب نمی‌شوند (Viavattene و همکاران، ۲۰۰۸). مدل‌های متن‌باز، نیازمند هزینه زیادی نیستند، اما حمایت فنی ناچیزی را برای کاربر فراهم می‌نمایند. در مقابل، مدل‌های تجاری، افراد تازه‌کار در زمینه مدل را به خوبی پشتیبانی می‌کنند، اما هزینه آن‌ها برای استفاده در سطح گسترده، اغلب بسیار زیاد است (Zoppou، ۲۰۰۱). همچنین دغدغه‌هایی نیز در رابطه با عدم وجود یک واسط[۳۸] یا پلت فرم مشترک برای مدل‌های مختلف وجود دارد. اغلب مدل‌ها کاربرد تخصصی و ویژه‌ای تنها برای یک یا چند جنبه از "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری" داشته و شبیه‌سازی از طریق آن‌ها اغلب به‌طور جدا از سایر فرایندها صورت می‌گیرد و تنها بخشی از اثرات این سیستم‌ها را آشکار می‌سازد. بنابراین شناسایی و انتخاب اینکه کدام مدل‌ها را برای تحلیل کامل و جامع "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری" به کار برده و چگونه آن‌ها را توسعه داده یا با یکدیگر ترکیب و یکپارچه نمایند، برای کاربر مشکل است. علاوه بر اینکه بعضی مدل‌ها به میزان ناچیزی قابلیت یکپارچه شدن با سایر مدل‌ها را دارند، فراهم نمودن حجم عظیمی از داده‌های ورودی برای هر زیر-مدل، کاری طاقت‌فرسا و زمان‌بر است (Hossain و Imteaz، ۲۰۱۳). همچنین یکپارچه سازی مدل‌ها نیز به دلیل مقیاس‌های زمان و مکانی ناهمگون، با مشکلات زیادی همراه است (Schmitt و Huber، ۲۰۰۵؛ Mitchell و همکاران، ۲۰۰۷). چراکه این عدم همگونی مقیاس‌های مکانی و زمانی سبب می‌شود که انتقال داده‌ها و استفاده از آن‌ها در میان مدل‌های یکپارچه شده با مشکل مواجه شود و بنابراین یکپارچه‌سازی، نیازمند کار بیشتری برای آماده‌سازی و پردازش داده‌هاست. به ویژه مدل‌های تجاری، بر اساس فایل‌های اجرایی، اجرا[۳۹] می‌شوند و تغییر در آن‌ها برای ایجاد واسط مشترک و نقطه اتصال با سایر نرم‌افزارها مشکل است (Zoppou، ۲۰۰۱). استفاده از سیستم‌های نمایش اطلاعات جغرافیایی مانند GIS در مدل‌سازی "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری" نیز با وجود مزایای بسیار، با محدودیت مواجه است. بیشتر "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری" به لحاظ جغرافیایی رفرنس دهی شده‌اند؛ از این رو یکپارچه‌سازی مدل‌های "سیستم زهکشی پایدار شهری" با GIS می‌تواند سبب کاهش حجم عظیمی از کارهای لازم در رابطه با فرمت کردن و پردازش داده‌ها شود، و امکان تفسیر آسان ورودی‌ها و خروجی‌های مدل را با نمایش یک نقشه کاربر دوست فراهم نماید (Sample و همکاران، ۲۰۰۱). اما قطعاً به این نکته نیز باید توجه نمود که استفاده از GIS نیازمند پایگاه داده‌ای زمانی و مکانی وسیعی است که یکپارچه‌سازی آن با مدل‌های موجود برای زهکشی پایدار، چالش برانگیز است.

۲- ابزار تصمیم‌یار

در کنار مدل‌های موجود برای شبیه‌سازی "زهکشی پایدار شهری"، ابزارهای تصمیم‌یار نیز مورد نیاز هستند تا بتوان نتایج و یافته‌های مدل را در یک روند ارزیابی، جهت تسهیل رتبه‌بندی و انتخاب گزینه‌های مناسب براساس معیارهای پایداری فوق‌الذکر به کار گرفت. در طول سال‌ها، ابزارهای تصمیم‌یار متعددی به منظور ارتقاء کارایی تصمیمات در این زمینه ایجاد گردیده است؛ این قبیل ابزارها به‌طور کامل و مفصل در منابع مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند (Hellström و همکاران، ۲۰۰۰؛ Ashley و همکاران، ۲۰۰۴؛ Lai و همکاران، ۲۰۰۸). شکل (۲) طبقه‌بندی ابزارهای تصمیم‌یار رایج در ارزیابی زهکشی پایدار شهری را نشان می‌دهد.

مرور ادبیات تخصصی و پیشینه به کارگیری سامانه‌های تصمیم‌یار، نشان می‌دهد که این ابزارها در بسیاری از تحقیقات اخیر، برای ارزیابی زهکشی پایدار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای مثال، Ellis و همکاران (۲۰۰۴) با به‌کارگیری یک تحلیل چند معیاره، سعی در تسهیل ارزیابی سازه‌های زهکشی پایدار در تصفیه رواناب شهری و آب‌های سطحی در بزرگراه‌ها داشتند. Carter و Keeler (۲۰۰۸) و Zhou و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش تحلیل سود-هزینه به بررسی عملکرد سیستم‌های پشت‌بام سبز و راهبردهای مختلف زهکشی شهری پرداختند و منافع قابل توجه اقتصادی- اجتماعی

ابزارهای "سیستم زهکشی پایدار شهری" را نشان دادند. Linkov و همکاران (۲۰۰۶) مروری بر توسعه‌های صورت گرفته و کاربردهای اخیر رویکرد تطبیقی ارزیابی ریسک و تحلیل چند معیاره اعمال شده بر پروژه‌های احیاء محیط‌زیست در ایالات‌متحده و اروپا داشتند. تحلیل هزینه چرخه عمر نیز در تحقیق Wong و همکاران (۲۰۰۳) به‌منظور ارزیابی منافع اقتصادی پشت‌بام سبز در مقایسه با پشت‌بام‌های معمولی انجام شد. Lai و همکاران (۲۰۰۸) نیز با بررسی ابزارهای متعدد، به اهمیت نقش رویکردهای یکپارچه در مدیریت پایدار آب شهری اشاره داشتند.



شکل ۲- طبقه‌بندی ابزارهای تصمیم‌یار رایج در ارزیابی زهکشی پایدار (Hellström و همکاران، ۲۰۰۰؛ Ashley و همکاران، ۲۰۰۴؛ Lai و همکاران، ۲۰۰۸؛ Zhou، ۲۰۱۴)

بحث و نتیجه‌گیری

این عبارت مصطلح که "جهانی فکر کنید، به‌طور محلی اقدام کنید" به فرهنگ توسعه پایدار نیز ورود پیدا کرده است، و مفهوم بسیار مناسبی در رابطه با اعمال رویکرد "سیستم زهکشی پایدار شهری" است؛ چراکه هر منطقه شهری راهبردهای منحصر به فردی را برای تطبیق با تغییر اقلیم جهانی و کاهش اثرات نامطلوب آن به‌طور کلی، و کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری به‌طور خاص، به کار می‌گیرد (Charlesworth، ۲۰۱۰). مناطق شهری، محیط‌های پیچیده‌ای هستند که دارای مؤلفه‌های متعددی هستند (Turner، ۱۹۹۲). اضافه شدن اثرات تغییر اقلیم جهانی بر شهرها، سبب افزایش عدم قطعیت در این محیط‌های پیچیده می‌شود، به ویژه هنگامی که شناسایی عواملی که بر یکدیگر اثرات متقابل داشته و سبب هم‌افزایی یا خنثی نمودن اثر یکدیگر می‌شوند، مشکل باشد. حال که ناگزیر بودن از پذیرش پدیده تغییر اقلیم جهانی مورد توافق همگان است، روش‌های تطبیق با این تغییر و نیز کاهش اثرات آن، بایستی اجرا گردد.

سیستم‌های زهکشی پایدار، به دلیل اثبات توانایی و اثرات مثبت آن‌ها بر طبیعت و محیط‌زیست، با گذشت زمان از اهمیت بیشتری برخوردار گردیده‌اند. در این مقاله مروری بر ادبیات تخصصی و پیشینه تحقیقات در رابطه با کاربردها و توسعه‌های اخیر سیستم‌های زهکشی پایدار در سراسر جهان صورت گرفت، و معیارهای طراحی و تکنیک‌های این سیستم‌ها و نیز رویکردهای مختلف در مدل‌سازی و ابزارهای تصمیم‌یار برای شبیه‌سازی و ارزیابی گزینه‌های پایدار طراحی سیستم زهکشی مطرح گردید. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، عواملی چون اقلیم در حال تغییر ، تغییر کاربری و توسعه شهری، در کنار چالش‌هایی که سیستم زهکشی سنتی به لحاظ تأمین معیارهای پایداری ایجاد می‌کند، استفاده از تکنیک‌های زهکشی پایدار رواناب را ایجاب می‌نماید. با وجود مزایای متعدد کاربرد چنین سامانه‌هایی در رابطه با کنترل رواناب، حصول نتیجه مطلوب از عملکرد این قبیل تکنیک‌ها نیازمند به‌کارگیری همکاری‌های بین‌رشته‌ای و نیز توجه به عملیات نگهداری این سازه‌ها در بلندمدت است.

گرچه رویکردهای موجود برای مدل‌سازی این تکنیک‌ها در طول سال‌ها تکامل یافته‌اند، هنوز در مرحله بررسی و شبیه‌سازی پاسخ کمّی و کیفی قرار دارند. بسیاری از "سیستم‌های زهکشی پایدار" اجرا شده در عمل، نسبت به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با استفاده از مدل‌ها، از پیچیدگی کمتری برخوردارند، بنابراین عملکرد نتیجه شده از آن‌ها به دلیل کمبود تجربه نگهداری و بهره‌برداری از این سیستم‌ها و نادیده گرفتن اثرات متقابل آن‌ها با دیگر منابع و پیکره‌های آبی، و نیز موانع اداری و سازمانی موجود در اجرای آن‌ها، اغلب رضایت‌بخش نیستند (Zhou، ۲۰۱۴).

از سوی دیگر، طراحی سیستم‌های زهکشی پایدار شهری شامل معیارهای چندبعدی و متشکل از تخصص‌های مختلف است (Fryd و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال، تجربیات جهانی نشان داده است که بیشتر متخصصین امر تمایل دارند که در فرایند تصمیم‌گیری، بر رشته تخصصی خود تمرکز نموده و به زمینه، ویژه کاری خود اولویت دهند (Brown و Farrelly، ۲۰۰۹). درنتیجه، اغلب اقدامات در ارتباط با یک تخصص ویژه اعمال می‌شود که درنتیجه آن، اثرات مهم دیگر زمینه‌ها و تخصص‌ها لحاظ نمی‌گردد. یک رویکرد یکپارچه و میان‌رشته‌ای برای تجمیع تخصص‌ها و زمینه‌های کاری متعدد در یک پلت‌فرم مشترک ضروری است تا بتوان انجام راه‌حل‌های پایدار و مبتکرانه را تسهیل نمود. لازم است که مسئولین اجرای چنین سیستم‌هایی، درک جامعی از محدوده اهداف وسیع طراحی پایدار سیستم زهکشی داشته باشند و کل چرخه آب شهری را در برنامه‌ریزی مدنظر قرار دهند. به‌علاوه لازم است تغییر اقلیم و توسعه شهری نیز به منظور تطبیق با شرایط آینده، در طراحی "سیستم‌های زهکشی پایدار شهری" دیده شود (Miguez و همکاران، ۲۰۱۲). به عقیده برخی محققین (Zhou، ۲۰۱۴)، آینده طراحی سیستم‌های زهکشی پایدار به احتمال قوی، ترکیبی از فناوری‌های سطح بالا[۴۰] و سطح پایین[۴۱] است تا تعادلی میان هزینه سرمایه‌گذاری شده و کارکرد و عملکرد سیستم ایجاد شود. ترکیبی از سیستم‌های متمرکز (سیستم سنتی جمع‌آوری آب‌های سطحی) و غیرمتمرکز (اقدامات توسعه کم اثر) نیز به منظور ایجاد هم‌افزایی در طراحی پایدار ضروری خواهد بود. به منظور نیل به این اهداف، ایجاد چارچوبی جهت طراحی این سیستم‌ها که جنبه‌های

فنی، اجتماعی، زیست‌محیطی، اقتصادی، قانونی، و اداری/سازمانی را با یکدیگر تجمیع و یکپارچه کند، مهم و حیاتی است. در دهه‌های اخیر، روند مدل‌سازی به سمت یکپارچه نمودن مدل‌های مختلف پیش می‌رود تا بتوان اثرات متقابل فرایندهای مختلف بر روی یکدیگر را مشاهده نمود. از طریق مدل‌سازی یکپارچه، می‌توان اثرات رواناب زیرحوضه‌های بالادست را بر زیرحوضه پایین‌دست لحاظ نمود و یا اثرات بخش‌های شهری و غیر شهری حوضه را بر روی یکدیگر دید. پلت‌فرم‌ها و چارچوب‌های مختلفی برای انجام هر چه آسان‌تر مدل‌سازی‌های یکپارچه ایجاد شده و روز به روز بر تعداد آن‌ها افزوده می‌شود، که می‌تواند در دستیابی هر چه بهتر به نتایج دقیق‌تری در ارزیابی سیستم‌های مربوط به منابع آب کمک‌کننده باشد.

پی‌نوشت

1- combined sewer overflows
2- End of pipe solutions
3- New York
4- British Columbia
5- Colorado
6- Parallel Climate Model
7- Variable Infiltration Capacity
8- Hydrologiska Byråns Vatten-balansavdelning
9- Baltic
10- Nedbor-Afstromings Model
11- Precipitation-Runoff Modeling System
12- Water Budget
13- Maryland
14- Climate Assessment Tool
15- Integrated Quality and Quantity
16- Pennsylvani
17- ArcView Generalized Watershed Loading Function
18- Ohio
19- Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Source
20- Climate and Human Activities-sensitive Runoff Model
21- Indiana
22- Variable Infiltration Capacity
23- El Niño
24- bioswales
25- green streets
26- Columbia
27- Rio de Janeiro
28- Manchester
29- Terminology
30- Sustainable Urban Drainage System
31- Water Sensitive Urban Design
32- Low-Impact Development
33- Best Management Practices
34- low impact urban design and development
35- open source
36- Canberra
37- user friendly
38- interface
39- RUN
40- High-tech
41- Low-tech

منابع

شمشیرساز، ش.ع. و نظریها، م. ۱۳۹۳. اثر تغییر اقلیم بر کیفیت رواناب شهری (مسیل زرگنده)؛ دومین همایش منطقه‌ای تغییر اقلیم و گرمایش زمین، پژوهشکده تغییر اقلیم و گرمایش زمین دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.

نظیف، س. ۱۳۸۹. تدوین الگوی ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر چرخه آب شهری، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تهران.

Achleitner S., Engelhard C., Stegner U. and Rauch W. 2007. Local infiltration devices at parking sites—Experimental assessment of temporal changes in hydraulic and contaminant removal capacity. Water Sci. Technol, 55: 193–200.

Andreásson J., Bergström S., Carlsson B., Graham, L.P. and Lindström, G. 2004. Hydro-logical change: climate change impact simulations for Sweden. Ambio, 33: 228–34.

Arheimer B., Andréasson J., Fogelberg S., Johnsson H., Pers C.B. and Perrson K. 2005. Climate change impact on water quality: model results from southern Swe-

Scibel K.L. and Guerrieri L. 2006. Adaptation and mitigation: an integrated climate policy approach (AMICA)-Report on the mitigation scan city of Venice. Climate Alliance. Accessed on March 2016, Available online at: http://www.amica-climate.net/fileadmin/amica/inhalte/dokumente/CS_AMICA_Ferrara_II.pdf.

Manag., 87: 350–363.

Carvallo Aceves M. and Fuamba M. 2016. Methodology for Selecting Best Management Practices Integrating Multiple Stakeholders and Criteria. Part 1: Methodology. Journal of Water, 8(55):14 pp.

Chang H. 2003. Basin hydrological response to changes in climate and land use: the Conestoga River Basin, Pennsylvania. Physical Geography, 24: 222–247.

Chen J., Li X. and Zhang M. 2005. Simulating the impacts of climate variation and land-cover changes on basin hydrology: a case study of the Suomo Basin. Science in China Series D: Earth Sciences, 48: 1501–509.

Cerqueira L.F.F. and Da Silva L.P. 2016. Methodological Proposal For Redesigning Informal Communities– Constructing Resilience in Hydrological Stress Conditions, Ambiente & Sociedad, São Paulo v. XIX, n., p. 43-62.

Chocat B., Ashley R., Marsalek J., Matos M.R., Rauch W., Schilling W. and Urbonas B. 2004. Urban Drainage-out-of-Sight-out-of-Mind? In Proceedings of 5th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, Lyon, France.

Chocat B., Ashley R., Marsalek J., Matos M.R., Rauch W., Schilling W., Urbonas B. 2007. Toward the sustainable management of urban storm-water. Indoor Built Environ., 16: 273–285.

Christensen N.S., Wood A.W., Voisin N., Lettenmeier D.P. and Palmer R.N. 2004. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin. Climatic Change, 62: 337–63.

Davis Todd C.E., Goss A.M., Tripathy D. and Harbor J.M. 2007. The effects of landscape transformation in a changing climate on local water resources. Physical Geography, 28: 21–36.

de Vries S., Verheij R. A., Groenewegen P. P. and Spreeuwenberg P. 2003. Natural environments—healthy environments? An exploratory analysis of the relationship between greenspace and health. Environ. Plann,. A35: 1717–1731.

Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N. et al. 2007. Long-term per-spective of the Seine River system: confronting climatic and direct anthropogenic changes. Science of the Total Enden. Ambio, 34: 559–66.

Arnbjerg-Nielsen K. 2012. Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. Urban Water J., 9: 57–65.

Ashley R., Blackwood D. and Butler D. 2004. Sustainable Water Services: A Procedural Guide; IWA Publishing: London, UK.

Ashley R., Garvin S., Pasche E., Vassilopoulos A. and Zevenbergen C. 2007. Advances in Urban Flood Management. Ashley, R., Garvin, S., Pasche, E., Vassilopoulos, A., Zevenbergen, C., Eds.; Taylor & Francis/Balkema: London, UK.

Bae D., Jung I.W. and Chang, H. 2008. Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation. Climate Research, 35: 213–26.

Beighley R.E., Dunne T. and Melack J.M. 2008. Impacts of climate variability and land use alterations on frequency distributions of terrestrial runoff loading to coastal waters in southern California. Journal of the American Water Resources Association, 44: 63–74.

Bergman M., Hedegaard M.R., Petersen M.F., Binning P., Mark O. and Mikkelsen P.S. 2011. Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central Copenhagen after 15 years of operation. Water Sci. Technol, 63: 2279–2286.

Bouraoui F., Grizzetti B., Granlund K., Rekolainen S. and Bidoglio G. 2004, Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish catchment. Climatic Change, 66: 109–26.

Brown R.R., Farrelly M.A. 2009. Delivering sustainable urban water anagement: A review of the hurdles we face. Water Sci. Technol, 59: 839–846.

Burrell B.C., Davar K. and Hughes R. 2007. A review of flood management considering the impacts of climate change. Water Int., 32: 342–359.

Butler D. and Parkinson J. 1997. Towards sustainable urban drainage. Water Sci. Technol, 35: 53–63.

Charlesworth S.M. 2010. A review of the adaptation and mitigation of global climate change using sustainable drainage in cities, Journal of Water and Climate Change, 1: 165–180.

Carter T. and Keeler A. 2008. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. J. Environ.

Annals of the Association of American Geographers, 92: 203–24.

Fryd O., Backhaus A., Jeppesen J., Ingvertsen S.T., Birch H., Bergman M., et al. 2009. Connected Disconnections: Conditions for Landscape-Based Disconnections of Stormwater from the Copenhagen Sewer System in the Catchment Area for River Harrestrup. The 2BG Project Working Report: River Harrestrup Case Study; Danish Centre for Forest, Landscape & Planning, University of Copenhagen: Copenhagen, Denmark.

Fryd O., Dam T. and Jensen M.B. 2012. A planning framework for sustainable urban drainage systems. Water Policy, 14: 865–886.

Fujihara Y., Tanaka K., Watanabe T., Nagano T. and Kojiri T. 2008. Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basin in Turkey: use of dynamically downscaled data for hydrological simulations. Journal of Hydrology, 353: 33–48.

Gill S. E., Handley J. F., Ennos A. R. and Pauleit S. 2007. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. Built Environ, 33(1): 115–133.

Graham L.P. 2004. Climate change effects on river flow to the Baltic Sea. Ambio, 33: 235–41.

Groenewegen P. P., van den Berg A. E., de Vries S. and Verheij R. A. 2006. Vitamin G: effects of green space on health, wellbeing and social safety. BMC Public Health6, 149.

Hallegatte S., Ranger N., Mestre O., Dumas P., Corfee-Morlot J.; Herweijer C. et al. 2011. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. Clim. Change, 104: 113–137.

Hamby D.M. 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. Environ. Monit Assess., 32: 135–154.

Hellström D., Jeppsson U. and Kärrman E. 2000. A framework for systems analysis of sustainable urban water management. Environ. Impact Assess. Rev., 20: 311–321.

Herron N., Davis R. and Jones R. 2002. The effects of large-scale afforestation and climate change on water allocation, 375: 292–311.

Echols S. 2007. Artful rainwater design in the urban landscape. J. Green Build, 2: 103–122.

Eckhardt K. and Ulbrich U. 2003. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. Journal of Hydrology, 284: 244–52.

Ekström M., Fowler H.J., Kilsby C.G. and Jones P.D. 2005. New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. J. Hydrol., 300: 234–251.

Elliott A.H. and Trowsdale S.A. 2007. A review of models for low impact urban stormwater drainage. Environ. Model. Softw., 22: 394–405.

Ellis J.B., D'Arcy B.J. and Chatfield P.R. 2002. Sustainable urban-drainage systems and catchment planning. Water Environ. J., 16: 286–291.

Ellis J.B., Deutsch J.C., Mouchel J.M., Scholes L., Revitt M.D. 2004. Multi-criteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. Sci. Total Environ., 334–335: 251–260.

European Commission. 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliamentand of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Off. J. Eur. Communities, 327: 1–72.

Ferguson B. 1991. The failure of detention and the future of stormwater design. Landsc. Archit, 81: 75–79.

Fletcher T.D., Shuster W., Hunt W.F., Ashley R., Butler D., Arthur S. et al. 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage, Urban Water Journal, 12(7): 525-542.

France R.L. 2002. Handbook of Water Sensitive Planning and Design. Integrative Studies in Water Management and Land Development. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.

Frei A., Armstrong R.L., Clark M.P. and Serreze M.C. 2002. Catskill Mountain water resources: vulnerability, hydroclimatology, and climate-change sensitivity.

Spreeuwenberg P. 2006. Green space, urbanity and health: how strong is the relation? J. Epidemiol. Commun. H, 60: 587–592.

Mailhot A. and Duchesne S. 2010. Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. J. Water Resour. Plan. Manag. Asce, 136: 201–208.

Maximov I.A. 2003. Integrated assessment of climate and land use change effects on hydrology and water quality of the Upper and Lower Great Miami River. PhD dissertation, Department of Geography, University of Cincinnati.

Miguez M.G., Veról A.P. and Carneiro P.R.F. 2012. Sustainable Drainage Systems: An Integrated Approach, Combining Hydraulic Engineering Design. Urban Land Control and River Revitalisation Aspects. In Drainage Systems; Javaid, M.S., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia.

Mimikou M.A., Baltas E., Varanou E. and Pantazis K. 2000. Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. Journal of Hydrology, 234: 95–109.

Mitchell V.G., Duncan H., Inma R.M. Stewart J., Vieritz A., Holt P. et al. 2007. State of the Art Review of Integrated Urban Water Models. Novatech: Lyon, France, pp.1–8.

Obropta C.C. and Kardos J.S. 2007. Review of urban stormwater quality models: Deterministic, stochastic, and hybrid approaches. JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc., 43: 1508–1523.

O'Hara J.K. and Georgakakos K.P. 2008. Quan-tifying the urban water supply impacts of climate change. Water Resource Management, 22: 1477–97.

Payne J.T., Wood A.W., Hamlet A.F., Palmer R.N. and Lettenmeier D.P. 2004. Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River Basin. Climatic Change, 62: 233–56.

Praskievicz S. and Chang H. 2009. A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. Progress in Physical Geography, 33(5): 650–671.

Ranger N., Hallegatte S., Bhattacharya S., Bachu M., Priya S., Dhore K. et al. 2011. An assessment of the potential impact of climate change on flood risk in Mumbai. Clim. Change, 104: 139–167.

tion on the Macquarie River catchment, NSW, Australia. Journal of Environmental Management, 65: 369–81.

Holman-Dodds J.K., Bradley A.A., Potter K.W. 2003. Evaluation of hydrologic benefits of infiltration based urban storm water management. J. Am. Water Resour. Assoc, 39: 205–215.

Hossain I. and Imteaz M.A. 2013. CatStream: An Integrated Catchment-Stream Water Quality Model. In Proceedings of 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia.

Imhoff J.C., Kittle J.L. Jr Gray, M.R. and Johnson T.E. 2007. Using the Climate Assess- ment Tool (CAT) in USA EPA BASINS integrated modelling system to assess watershed vulnerability to climate change. Water Science and Technology, 56: 49–56.

Knapp H.V., Durgunoglu A. and Ortel T.W. 1991. A Review of Rainfall-runoff Modeling for Stormwater Management. SWS Contract Report 516; Illinois State Water Survey, Hydrology Division: Champaign, IL, USA.

Krebs P. and Larsen T.A. 1997. Guiding the development of urban drainage systems by sustainability criteria. Water Sci. Technol, 35: 89–98.

Lafortezza R., Carrus G., Sanesi G. and Davies C. 2009. Benefits and well-being perceived by people visiting green spaces in periods of heat stress. Urban For. Urban Greening,8: 97–108.

Lai E., Lundie S. and Ashbolt N. J. 2008. Review of multi-criteria decision aid for integrated sustainability assessment of urban water systems. Urban Water J, 5: 315–327.

Larsen T.A. and Gujer W. 1997. The concept of sustainable urban water management. Water Sci. Technol, 35: 3–10.

Linkov I., Satterstrom F.K., Kiker G., Batchelor C., Bridges T. and Ferguson E. 2006. From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. Environ. Int, 32: 1072–1093.

Loukas A., Vasiliades L. and Dalezios N.R. 2002. Climatic impacts on the runoff generation processes in British Columbia, Canada. Hydrology and Earth System Sciences, 6: 211–227.

Maas J., Verheij R. A., Groenewegen P. P., de Vries S. and

Viavattene C., Scholes L., Revitt D.M. and Ellis J.B. 2008. A GIS based decision support system for the implementation of Stormwater Best Management Practices. In Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK.

Waters D., Watt W.E., Marsalek J. and Anderson B.C. 2003. Adaptation of a storm drainage system to accommodate increased rainfall resulting from climate change. Journal of Environ-mental Planning and Management, 46: 755–70.

Wilderer P.A. 2004. Applying sustainable water management concepts in rural and urban areas: Some thoughts about reasons, means and needs. Water Sci. Technol., 49: 8–16.

Willems P., Arnbjerg-Nielsen K., Olsson J. and Nguyen V.T.V. 2012. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. Atmos. Res., 103: 106–118.

Willems P., Olsson J., Arnbjerg-Nielsen K., Beecham S., Pathirana A., Gregersen I.B., Madsen H. and Nguyen V.-T.-V. 2012. Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage. IWA Publishing: London, UK, p. 252.

Wong T. and Eadie M. 2000. Water Sensitive Urban Design-A ParadigmShift in Urban Design. In Proceedings of the 10th World Water Congress, Melbourne, Australia.

Wong, N.H., Tay, S.F., Wong R., Ong C.L. and Sia A. 2003. Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. Build. Environ., 38: 499–509.

Zevenbergen C., Veerbeek W., Gersonius B. and van Herk S. 2008. Challenges in urban flood management: Travelling across spatial and temporal scales. J. Flood Risk Manag., 1: 81–88.

Zhou Q., Panduro T., Thorsen B. and Arnbjerg-Nielsen K. 2013. Adaption to extreme rainfall with open urban drainage system: An integrated hydrological cost-benefit analysis. Environ. Manag., 51: 586–601.

Zhou Q. 2014. A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. Water, 6: 976-992.

Zoppou C. 2001. Review of urban storm water models. Environ. Model Softw., 16: 195–231.

Roy A.H., Wenger S.J., Fletcher T.D., Walsh C.J., Ladson A.R., Shuster W.D. et al. 2008. Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: Lessons from Australia and the United States. Environ. Manag., 42: 344–359.

Samaniego L. and Bárdossy A. 2006. Simulation of the impacts of land use/cover and climatic changes on the runoff characteristics at the mesoscale. Ecological Modelling, 196: 45–61.

Schmitt T.G. and Huber W.C. 2005. The Scope of Integrated Modeling—System Boundaries, Sub-Systems, Scales and Disciplines. In Proceedings of 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark.

Sharma A.K., Gray S., Diaper C., Liston P. and Howe C. 2008. Assessing integrated water management options for urban developments—Canberra case study. Urban Water J., 5: 147–159.

Sample D., Heaney J., Wright L. and Koustas R. 2001. Geographic information systems, decision support systems, and urban storm-water management. J. Water Resour. Plan. Manag., 127: 155–161.

Sieker H., Helm B., Krebs P., Schlottmann P. and Tränkner J. 2008. Flexibility—A Planning Criterion for Stormwater Management. In Proceedingsof 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK.

Stewart R. and Hytiris N. 2008. The Role of Sustainable Urban Drainage Systems in Reducing the Flood Risk Associated with Infrastructure. In Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK.

Thodsen H. 2007. The influence of climate change on stream flow in Danish rivers. Journal of Hydrology, 333: 226–38.

Turner D.R. 1992. The chemistry of metal pollutants in water. In Pollution: Causes, Effects and Controls(ed. in R. M. Harrison), pp. 19–32. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

Vand i byer (Water in cities). Accessed on 15 January 2014. Available online: http://www.vandibyer.dk/

Varanou E., Gkouvatsou E., Baltas E. and Mimikou M. 2002. Quantity and quality integrated catchment modelling with use of soil and water assessment tool model. Journal of Hydrologic Engineering, 7: 228–244.