Iranian Concrete Society

A Review of the Components of Sponge Cities Based on Pervious Concrete for Sustainable Development

Kianoosh Samimi*
Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran,
k_samimi@sbu.ac.ir

Mahyar Pakan
Ph.D. Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

Yahya Sinaei
BSc Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

Research paper

Abstract
Increased population and urbanization, on the one hand, and global warming and climate change, on the other hand, have resulted in urban hydrological problems. Seasonal floods, as well as a lack of urban water supplies in specific seasons, inflict significant harm to numerous countries every year. Following the happening of frequent floods and resource scarcity, Chinese researchers introduced a new concept of sponge cities in 2014 to progress toward sustainable development. The development of the sponge cities program will be the responsibility of government agencies due to the broad-scale coverage of the areas and the necessity for substantial coordination and licensing across the country. Pervious concrete is considered as a new technology in the development of urban spaces in order to control urban runoff in recent years in many developed countries as sponge cities. In the past, this technology was associated with technical challenges such as limited mechanical resistance, durability, clogging which were solved with the development of technology. This technology, along with other components of sponge cities introduces a new concept of sustainable development. In this study, the components of Sponge City are introduced and by reviewing previous studies, the challenges of realizing this concept are studied.
Keywords: Sustainable Development, Runoff, Drainage, Sponge City, Water Resources Management.

Corresponding Auther:Kianoosh Samimi
samimi, K., Pakan, M., sinaei, Y. A Review of the Components of Sponge Cities based onPervious Concrete for Sustainable Development. Journal of Concrete Structures and Materials, 2022; 7(1): 45-64. http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.344918.1270
2538-5828/ *© 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society*
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

دریافت مقاله: ۰۸-۰۴-۱۴۰۱
پذیرش مقاله: ۲۹-۰۵-۱۴۰۱

مروری بر اجزای شهرهای اسفنجی ساخته شده از بتن متخلخل در راستای توسعه پایدار

کیانوش صمیمی
استادیار، دانشکده مهندسی عمران آب و محیطزیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
(نویسنده مسئول)

مهیار پاکان
دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران آب و محیطزیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

یحیی سینایی
دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران آب و محیطزیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

افزایش جمعیت و توسعه فضای شهری از یک سو و از سوی دیگر گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی سبب ایجاد بحران‌های هیدرولوژیکی در نواحی شهری شده است. سیلاب‌های فصلی فراوان در سراسر دنیا و از طرفی معضل کمبود منابع آب شهری در برخی از فصول، سالانه خسارات زیادی را برای بسیاری از کشورها به همراه دارد. به دنبال وقوع سیلاب‌های متعدد و کمبود منابع، پژوهشگران چینی در سال ۲۰۱۴ مفهوم جدید شهرهای اسفنجی را به‌منظور حرکت در راستای توسعهٔ پایدار، ارائه نمودند. پیشبرد برنامهٔ ایجاد شهرهای اسفنجی به دلیل در بر گرفتن مقیاسی گسترده از مناطق و همچنین به دلیل نیاز به هماهنگی‌ها و مجوزهای فراوان در سطح کشور، بر عهدهٔ ارگان‌های دولتی خواهد بود. بتن متخلخل به‌عنوان فناوری نوین در توسعه فضاهای شهری به‌منظور کنترل رواناب‌های شهری در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورهای پیشرفته تحت عنوان شهرهای اسفنجی مورد توجه بوده است. در گذشته این فناوری با چالش های فنی به مانند مقاومت مکانیکی محدود، دوام، گرفتگی درون حفره همراه بود که البته با توسعه فناوری مشکلات مرتفع گردید. این فناوری در کنار سایر اجزای تشکیل شهرهای اسفنجی مفهومی جدیدی از توسعه پایدار را معرفی می‌کند. در حال حاضر چالش‌های فراوانی در رسیدن به این مفهوم وجود دارد که اصلی‌ترین آن عدم وجود مدلی جامع و یکپارچه، با توجه به وجود ویژگی‌های اقلیمی و نیازهای متفاوت در مناطق مختلف یک کشور می‌باشد. این مطالعه به معرفی اجزای شهر اسفنجی پرداخته و با بررسی مطالعات گذشته، چالش‌های تحقق این مفهوم مورد بررسی قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی: توسعه پایدار، رواناب، زهکشی، شهر اسفنجی، مدیریت منابع آب.

۱- مقدمه

از جمله دغدغه‌های بزرگ و عمدهٔ کشورهایی مانند ایران که از نظر جغرافیایی در منطقه‌ای خشک واقع شده‌اند، مقابله با کم‌آبی و مشکلات ناشی از آن است. علاوه بر آن، ضعف‌های حوزه مدیریت منابع آب در این مناطق می‌تواند تا حد زیادی بر این مشکلات بیافزاید [۱, ۲]. با توجه به‌سرعت بالای توسعه شهرنشینی در نقاط مختلف جهان، نگرانی‌هایی از بابت کاهش ذخایر آب شیرین و عرضهٔ آن وجود دارد. طبق آمار ارائه شده از سوی سازمان ملل متحد، تا سال ۲۰۳۰ حدود ۸۰ درصد جمعیت مردم جهان به شهرنشینی روی می‌آورند [۳]. از سوی دیگر دولت‌ها به دلیل روند رو به رشد شهرنشینی مجبور به تهیه مسکن برای این جمعیت بزرگ می‌گردند. همان‌طور که مشخص است این مصالح، نفوذپذیری بسیار پایینی دارند که در صورت وقوع بارندگی، سبب جریان رواناب شده و از نفوذ آن به داخل لایه‌های زمین جلوگیری می‌کنند. از دیگر دلایل عمدهٔ وقوع سیلاب‌ها در مناطق شهری، کاهش پوشش گیاهی ناشی از توسعه شهرنشینی و عدم زهکشی مناسب روسازی معابر و ضعف در سیستم هدایت رواناب است. با توجه به‌سرعت زیاد توسعه شهرنشینی و وقوع پدیده‌های گرمایش جهانی، مدیریت منابع آب در مناطق شهری با چالش‌های بیشتری از جمله وقوع سیل و طوفان، معضل بهره‌برداری بی‌رویه از سفره آب‌های زیرزمینی، کاهش بیش از حد ذخایر آب شیرین، عدم مدیریت مناسب و اتلاف آب حاصل از بارندگی‌ها و همچنین آلودگی منابع آب شهری مواجهه است [۴, ۵]. در سال‌های اخیر، شهرهای ایران نیز با این چالش مواجهه بوده‌اند، طی وقوع سیل‌های فروردین سال ۹۸، حدود ۵۰ نفر در شهرهای جنوب و غرب کشور جان خود را از دست دادند. همچنین خسارت وارده بین ۳۰ تا ۳۵ هزار میلیارد تومان برآورد شده و حدود ۲۵ استان و بیش از ۴۴۰۰ روستا در کشور درگیر سیل بودند[۶]. با توجه به دلایل مذکور، محققین در تلاش برای رسیدن به راهی جهت جلوگیری از این اتفاقات غیرمترقبه می‌باشند. به نظر می‌رسد در صورتی که بتوان رواناب جاری روی سطح زمین را به نحوی به داخل لایه‌های زمین هدایت کرده و آن را در اعماق لایه‌های خاک جذب کرد می‌تواند شاهد بهبود سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش اثرات گرمایش جهانی بود.

سیستم مدیریت منابع آب شهری در بسیاری از کشورهای در حال توسعه مانند چین که اغلب با افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی مواجهه هستند در تلاش برای **رسیدگی و غلبه بر موارد مذکور است**. از این رو از سال ۲۰۱۳ برنامهٔ طراحی و اجرای شهرهای اسفنجی به‌عنوان رویکردی جدید، در دستور کار مدیران عمرانی در کشور چین قرار گرفته است [۷, ۸]. شهرهای اسفنجی دارای مزایای بمانند **کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)**[1]، کاهش رواناب شهری، بهبود کیفیت آب و همچنین ذخیره‌سازی بهتر آب می‌باشند [۹]. در این راستا، دولت چین به‌واسطه سیستم‌های زهکشی نوین و افزایش سطوح نفوذپذیر موفق به بازیافت ۷۰ درصد از رواناب‌های شهری گردیده است [۸]. این رویکرد توسعه‌ای در بسیاری از شهرهایی کشور چین می‌تواند تا سال ۲۰۳۰ سبب بازیافت ۸۰ درصد رواناب شهری گردد [۹]. استفاده از بتن متخلخل در شهرهای اسفنجی رویکرد جدید در جهت مقابله با آسیب‌های سیلاب‌های فصلی و مدیریت آب تصفیه‌شده توسط بتن متخلخل در سطح شهر می‌باشد [۱۰]. در بسیاری از شهرهای جهان برای کاهش سروصدا، افزایش اصطکاک، کاهش دمای سطح شهرها و مدیریت رواناب شهری از بتن متخلخل استفاده می‌شود[۱۱]. با این حال، شکاف بزرگ بین زیرساخت‌های کنونی مناطق شهری و زیرساخت استاندارد مورد نیاز جهت ساخت شهرهای اسفنجی وجود دارد. هزینه ساخت شهرهای اسفنجی شامل تغییر زیرساخت‌های قدیمی به حدود ۱۵۰ تا ۲۲۰ میلیون دلار آمریکا (به ازای هر کیلومتر مربع) خواهد رسید [۱۲]. در این راستا به دلیل ناتوانی دولت‌ها در تأمین بودجه مورد نظر، به مدل PPP[2] برای مرتفع ساختن مسائل مالی روی

1 Green-House Gases
2 Public-Private-Partnership

می‌آورند. در این مدل، نهادهای دولتی به همراه نهادهای خصوصی، به‌صورت مشترک در پروژه‌هایی که مستلزم خرج هزینه‌های بسیار زیاد هستند، مشارکت می‌کنند. این مدل معمولاً نقش پررنگی در مدیریت پروژه‌های زیرساختی عظیم که از نظر مالی فشار زیادی بر نهادهای دولتی وارد می‌کنند داشته [۱۳] و از این بابت نزد دولت‌ها محبوبیت زیادی دارد [۱۴]. در اجرای این طرح از فناوری‌هایی **بام‌های سبز، فضاهای سبز، تالاب‌ها و دریاچه‌های مصنوعی، حوضچه‌ها و تأسیسات نگهدارنده و تصفیه‌کننده بیولوژیکی و روسازی‌های نفوذپذیر** بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند که به‌صورت شماتیک در شکل ۱ قابل مشاهده‌اند[۱۵].

شکل۱) شماتیک نحوهٔ عملکرد فناوری‌های مورد استفاده در شهرهای اسفنجی

اولین و مهم‌ترین هدف ایجاد شهر اسفنجی، جلوگیری از جریان سیلاب‌های ناشی از بارندگی‌ها و کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی در مناطق شهری است که یکی از معضلات مهم دولت‌ها می‌باشد. در شهرهای اسفنجی با استفاده از مکانیسم‌هایی مانند ایجاد بام‌های سبز در ساختمان‌های شهری، ایجاد فضاهای سبز و پارک‌ها و همچنین ایجاد روسازی نفوذپذیر در معابری که برای انجام این کار مناسب هستند، رواناب جاری روی سطح زمین در لایه‌های خاک جذب شده و از وقوع سیلاب جلوگیری می‌گردد. افزایش حجم پساب تولیدی در شهرها از عمده‌ترین مشکلاتی است که به سبب افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی در حوزه مدیریت منابع آب شهری وجود دارد که منجر به آلودگی شدید آب مصرفی در این مناطق شده و سلامتی و رفاه مردم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی دیگر از اهداف مهم شهرهای اسفنجی، افزایش کیفیت آب به‌وسیله ایجاد سیستم‌های خود تصفیه‌کنندهٔ آب و همچنین تأسیسات حذف آلاینده‌ها از رواناب می‌باشد. علاوه بر اهداف مذکور ، بازیافت رواناب جاری و تبدیل آن به یکی از منابع تأمین آب شهری به‌ویژه در دوران خشکسالی در مناطق شهری یکی دیگر از هدف‌های شهرهای اسفنجی است [۱۵]. به‌منظور نیل به اهداف فوق، طی چهار مرحله می‌توان اقدام به طراحی و اجرای شهرهای اسفنجی نمود: مرحله اول مربوط به بررسی، تجزیه و تحلیل اطلاعات و ویژگی‌های منطقه‌ای در حوزه مدیریت منابع آب و شناسایی تقاضا برای ایجاد شهر اسفنجی در مناطق مختلف است. در مرحلهٔ دوم سناریوهایی برای برنامهٔ شهر اسفنجی بر مبنای مؤلفه‌های افزایش جمعیت، تغییرات اقلیمی و تقاضای آب، ایجاد نمود. مرحلهٔ سوم، شامل انتخاب و توسعهٔ نرم‌افزار مناسب جهت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری میزان کارایی شهر اسفنجی می‌باشد. در مرحلهٔ نهایی نیز شامل انجام برنامه‌ریزی‌های لازم و در نهایت اجرای این شهر می‌باشد [۱۶].

۲- روش تحقیق

در این مقاله جهت جمع‌آوری مطالب و اطلاعات مورد نیاز از تحقیقات صورت گرفته که طی سال‌های ۱۹۸۴ الی ۲۰۲۲ در سراسر جهان منتشر شده‌اند، استفاده شده است. سپس تهیه و تدوین این پژوهش مروری بر مبنای اطلاعات و داده‌های موجود در پیشینه تحقیق صورت گرفت.

۳- اجزای شهر اسفنجی

۱-۳- بتن متخلخل

هدف عمدهٔ برنامهٔ شهرهای اسفنجی ایجاد راهی برای نفوذ رواناب به عمق سطوح خاک زمین است. همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، روسازی‌های متخلخل با قابلیت عبور دهی آب، این امر را محقق می‌سازد. از بتن متخلخل، به‌عنوان مصالح پایه مورد استفاده در ساختار روسازی‌های نفوذپذیر در مقابل آب در شهرهای اسفنجی یاد می‌شود که به سبب ویژگی‌های سازگار با محیطزیست طی یک دههٔ گذشته مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

شکل۲) نمونهٔ بتن متخلخل با قابلیت عبور دهی آب

۱-۱-۳- اجزای بتن متخلخل

بتن متخلخل معمولی، با دانه‌بندی گسسته (بتن عاری از مصالح سنگدانه‌ای ریزدانه) و با استفاده از مصالح سنگدانه‌ای درشت‌دانه با اندازه‌های یکنواخت و با نسبت آب به سیمان پایین تولید می‌شود. البته این بتن دارای روانی ضعیف بوده و باید از تجهیزات ارتعاشی جهت متراکم‌سازی و عمل‌آوری آن استفاده شود. این بتن دارای نفوذپذیری بسیار بالایی بوده و می‌تواند در حوزهٔ کنترل رواناب شهری، احیای سفره‌های آب زیرزمینی و همچنین کاهش آلودگی آب و خاک، مؤثر واقع شود. از بتن متخلخل می‌توان در معابر و پیاده‌روها، روسازی جاده‌ها، بوستان‌ها و همچنین در بسترهای گیاهی و تأسیسات نگهدارندهٔ بیولوژیکی بهره برد [۱۷, ۱۸]. با توجه به فقدان استانداردی معین برای طرح اختلاط بتن متخلخل، این بتن باید به چند طریق متفاوت در آزمایشات جداگانه و به‌صورت آزمون و خطا تولید و ارزیابی شود تا حالت بهینه حاصل شود. جدول ۱ نسبت‌های متداول در تهیه بتن متخلخل را نشان می‌دهد. در بسیاری از مناطق آمریکا، ژاپن، اروپا و چین فناوری بتن متخلخل در پارکینگ ها، معابر، مسیر های کم ترافیک مورد استفاده قرار گرفته است. این فناوری در کاهش رواناب، کاهش آلودگی صوتی جاده ای موثر بوده است با این حال در دوام به خصوص در شرایط ذوب و یخ عملکرد ضعیفی داشته است که به مرور زمان با توسعه تکنولوژی استفاده از افزودنی های مناسب این مشکل نیز بر طرف شده است[۱۹].

جدول۱: نسبت‌های معمول اجزا و محدودیت مؤلفه‌های بتن متخلخل

	اجزا و مؤلفه	محدوده عملیاتی
اجزای بتن متخلخل معمولی	سیمان (kg/m^3)	۲۸۰-۳۱۰
	مصالح درشت دانه (kg/m^3)	۱۴۴۰-۱۸۰۰
	مصالح ریزدانه (kg/m^3) (اختیاری)	۸۵-۲۰۵
	نسبت آب به سیمان (W/C)	۰/۲۶ -۰/۴۵
	نسبت سنگدانه به سیمان (A/C)	۴:۱ – ۴/۵:۱
	اندازه مصالح درشت دانه (mm)	۲/۳۸ -۱۹
خصوصیات مکانیکی	تخلخل (٪)	۱۵-۳۵
	مقاومت فشاری (Mpa)	۲۸ - ۲/۸
	نفوذپذیری (cm/s)	۱/۲۲ – ۰/۱۴

اخیراً استفاده از نانو مواد و جایگزینی آن با سیمان در ساخت بتن متخلخل مورد توجه بوده است. این مواد سطح مخصوص بسیار بالایی نسبت به حالت توده دارند و می‌توانند در اصلاح خواص بتن در حالت تازه و سخت شده مؤثر باشند. در این خصوص پر مصرف‌ترین نانو موادها، نانو سیلیس‌ها هستند، که علاوه بر قابلیت تراکم و پرکنندگی بالا، باعث اصلاح عملکرد واکنش پوزولانی در سیمان و بتن می‌شوند. نانو سیلیس همچنین با داشتن سطح مخصوص بالا، پتانسیل واکنش‌پذیری زیادی از خود بروز داده و به همین سبب از طریق واکنش با هیدروکسید کلسیم، مقدار ژل C-S-H را افزایش داده که سبب بالا بردن استحکام و دوام بتن می‌شود. برتری مواد نانو سیلیس نسبت به دوده سیلیس ، بر مبنای کاهش زمان گیرش ملات می‌باشد [۲۰-۲۲]. از سوی دیگر، با اینکه تحقیقات زیادی در رابطه با مواد نانو سیلیس انجام شده، اطلاعات در حوزه مواد نانو آهن، نانو آلومینا و ذرات نانو رس، بسیار ناچیز است[۲۳].

۱-۱-۳-تصفیه پذیری

مطالعات فراوانی بر روی عملکرد بتن متخلخل در تصفیه روان آب شهری انجام شده است. با توجه به تخلخل فراوان بتن متخلخل و ایجاد سطح زیاد، این امکان وجود دارد که آلاینده به سطح سنگدانه‌ها متصل شده (جذب سطحی) و از روان آب حذف گردد. البته تغییرات اندازه سنگدانه، استفاده از سنگدانه‌های متخلخل به‌مانند پومیس و نانو ذرات به‌عنوان افزودنی در ساختار بتن متخلخل می‌تواند بر عملکرد تصفیه پذیری بتن متخلخل مؤثر باشد. جذب آلاینده‌های آلی به‌ویژه هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای PAH، حذف فسفر، آمونیاک، نیترات و ... از رواناب سبب کاهش فشار بر روی آلودگی محیط زیست شده و منابع آب‌های زیر زمینی شده و به این طریق آلودگی ایجاد شده در رواناب در محل تولید حذف می‌گردد. بنابراین این امکان وجود دارد تا رواناب زهکشی شده به‌منظور استفاده مجدد در محل تولید مورد استفاده مجدد قرار گیرد[۲۴-۲۶] .

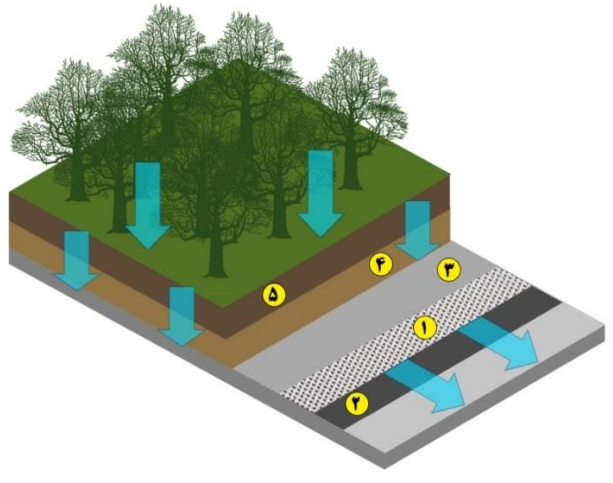
۲-۳- فضاهای سبز

از موانع بزرگ حل مشکلات مربوط به سیلاب‌های شهری، استفادهٔ بیش از حد از مصالح با نفوذپذیری پایین در مقابل آب در ساخت سازه‌های شهری است. به‌منظور کاهش تأثیر این مصالح در عدم جذب رواناب در لایه‌های زمین، افزایش سطوح نفوذپذیر در مناطق شهری امری حائز اهمیت است. جهت رسیدن به این مهم، افزایش فضاهای پوشیده از پوشش گیاهی و خاک طبیعی، روشی قابل توجه است. با افزایش این سطوح، رواناب ناشی از بارندگی‌ها در لایه‌های خاک نفوذ کرده و علاوه بر جلوگیری از وقوع سیلاب، سفره‌های آب زیرزمینی را احیا می‌کنند. فضاهای سبز می‌توانند مناطقی همچون از جمله بوستان‌ها، فضای میان معابر سواره‌رو و عابر پیاده، باغچه‌ها و فضای سبز تزئینی در حیاط ساختمان‌ها، محوطهٔ برج باغ‌ها و ... باشند. شکل ۳ نمونه از اجرای فضای سبز با رویکرد توسعه فضای شهری در کشور آمریکا را نشان می‌دهد.

شکل۳) نمونهٔ استفاده مناسب از فضای سبز در مبانی توسعه شهری (فیادلفیا، ایالات متحده آمریکا)[۲۷]

۳-۳- بام‌های سبز

بام‌های ساختمان‌های شهری اغلب با قیرگونی و ایزوگام غیرقابل نفوذ می‌شوند. اما اخیراً روشی جدید جهت حرکت در راستای توسعهٔ پایدار در ساختمان‌ها شکل گرفته است. در این طراحی، بام‌های ساختمان متشکل از پوشش گیاهی طراحی و اجرا می‌شود که سبب جذب و هدایت رواناب حاصل از بارندگی‌ها، کاهش و جذب گرمای حاصل از تابش مستقیم خورشید، کاهش آلودگی هوا و همین‌طور ایجاد فضای چشم‌نواز بدون نیاز به اشغال سطوح اضافی بروی زمین می‌گردد. این بام‌ها با توجه به نوع طراحی می‌توانند از ۵ نوع لایه تشکیل گردد که عملکرد آن‌ها به این اجزا وابسته‌اند(شکل ۴). بدین ترتیب که آب حاصل از بارندگی، در لایهٔ ۵ که خاک باغچه است، نفوذ کرده و سپس از لایهٔ ۴ که از ماسه‌ی شسته شده تشکیل شده و مانند فیلتر آب را صاف می‌کند، عبور می‌کند. لایه‌های ۳ و ۱ به ترتیب متشکل از لایه‌های ژئوتکستایل[۳] و سلول‌های زهکشی‌اند و زیر آن‌ها در لایهٔ ۲، لایه‌ای از مواد نفوذناپذیر قرار گرفته که وظیفهٔ عایق کردن قسمت سازه‌ای سقف را بر عهده دارد. آب صاف شده پس از عبور از لایهٔ ۴، توسط لایه‌های ۳ و ۱، هدایت شده و به سمت بیرون ساختمان و سیستم‌های انتقال رواناب، منتقل می‌شود.

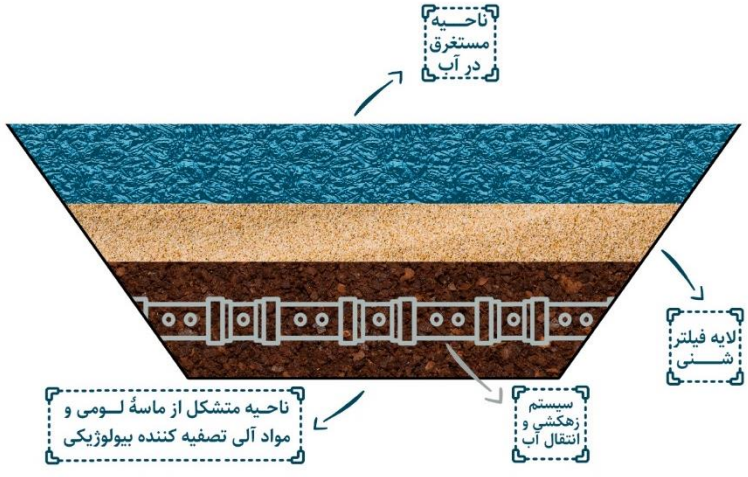


شکل۴) شمای کلی سیستم بام‌های سبز: (۱) سیستم زهکشی، (۲) لایه عایق رطوبت، (۳) ژئوتکستایل، (۴) ماسه شسته شده، (۵) خاک باغچه

3 Geotextile

۳-۴- تأسیسات نگهدارنده و تصفیه‌کنندهٔ بیولوژیکی

تأسیسات نگهدارنده و تصفیه‌کنندهٔ بیولوژیکی بیشتر به فیلترهای زیستی[1] و یا باغ‌های بارانی[2] مشهورند. این تأسیسات از طریق فرآیندهای زیستی توسط گیاهان و همچنین لایه‌های لومی ماسه‌ای[3]، به تصفیه و حذف آلاینده‌های رواناب می‌پردازند. این سیستم‌ها، یکی از روش‌های محبوب برای کنترل رواناب شهری و حرکت در جهت توسعهٔ پایدار در مبانی مدیریت آب شهری می‌باشند. این سیستم‌ها معمولاً متشکل از پنج بخش‌اند که عبارت‌اند از: لایهٔ زهکشی، لایهٔ انتقال، ناحیه مستغرق، سیستم فیلتر و لایهٔ نگهداشت و ذخیره (شکل ۵) [۲۸]. در این سیستم‌ها عملیات تصفیه رواناب اکثرا توسط لایه‌هایی متشکل از ماسه، خاک و مخلوطی از مواد آلی، انجام می‌شود [۲۹, ۳۰]. در این سیستم‌ها قبل از ورود آب به سیستم انتقال، از سرعت حرکت زباله‌ها، رسوبات و سایر آلاینده‌ها توسط پوشش گیاهی موجود کاسته شده و از آب جدا شده و رواناب تصفیه می‌شود [۳۱]. تصفیه به‌واسطه ویژگی‌ها و واکنش‌های شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی خاک، گیاهان و میکروب‌های موجود در لایه‌های این تأسیسات، انجام می‌شود [۳۲].

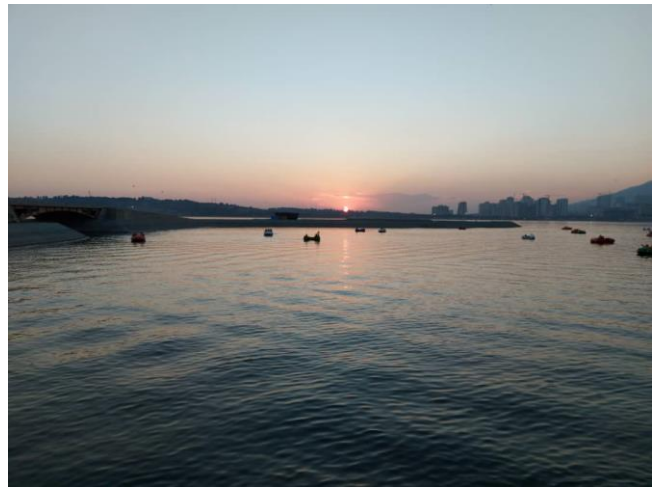


شکل۵) شماتیک سیستم نگهدارنده و تصفیه‌کننده بیولوژیکی

۳-۵- تالاب‌ها و دریاچه‌های مصنوعی

تالاب‌های مصنوعی، محیط‌هایی برای جمع‌آوری و تصفیه آب بوسیلهٔ برخی گیاهان و موجودات زنده هستند. همچنین یکی دیگر از فناوری‌های مورد استفاده در برنامهٔ شهرهای اسفنجی، استفاده از محوطه‌هایی گود برای جمع‌آوری رواناب جاری در سطح شهر پس از بارندگی بوده که به تالاب‌های مصنوعی مشهورند. در این سیستم‌ها معمولاً آب جمع‌آوری شده، نگهداری شده و از آن برای برخی مقاصد شهری مانند آبیاری فضاهای سبز و زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از دیگر استفاده‌های این تالاب‌ها می‌توان به استفاده‌های تفریحاتی و ورزشی مانند قایقرانی اشاره نمود. شکل ۶ دریاچه خلیج فارس را نشان می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان محلی جهت جمع آوری رواناب آب مورد نظر باشد.

1 bio-filters
2 rain gardens
3 sandy loam layers



شکل۶) تصویری از دریاچه خلیج فارس تهران، به‌عنوان نمونه‌ای از دریاچه‌های مصنوعی

۴- مزایای شهر اسفنجی

شهرهای اسفنجی پتانسیل بالایی در جهت ارتقاء مدیریت رواناب، تصفیه و نگهداری بیولوژیکی رواناب، کنترل گرما در کرهٔ زمین، رشد پوشش گیاهی و مدیریت آلودگی دارند [۳۳]. به‌طور کلی اهداف اصلی برنامهٔ شهرهای اسفنجی به سه بخش تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: ۱) حفاظت از ویژگی‌های هیدرولوژیکی، محیط‌زیست و منابع طبیعی شهرها مانند رودهای طبیعی، دریاچه‌ها، تالاب‌ها، مراتع سبز و سایر اکوسیستم‌ها. ۲) اصلاح و تصفیه آب‌های آلوده و سایر آسیب‌های زیست‌محیطی در شهرها. ۳) توسعهٔ کم اثر (LID)؛ این مفهوم یک روش در حوزهٔ کنترل آب‌های حاصل از بارندگی، کنترل رواناب و اصلاح آلودگی آن از طریق برخی امکانات کنترلی مانند ایجاد نفوذپذیری بالا در جاده‌ها، بام‌های سبز، میادین و معابر، فضاهای سبز و تأسیسات نگهدارندهٔ بیولوژیکی آب می‌باشد [۳۴]. علاوه بر این موضوعات، جهت جلوگیری از ایجاد سیلاب‌های شهری و همچنین کنترل آلودگی آب، ترویج ساخت و نوسازی سیستم‌های زهکشی رواناب، بهبود اتصالات شبکه‌های سیستم‌های رودخانه‌ای و تفکیک سیستم زهکشی رواناب و فاضلاب، راهکارهایی هستند که باید در مدیریت آب شهری اتخاذ شوند [۳۵].

۵- چالش‌های تحقق برنامهٔ شهرهای اسفنجی

علاوه بر مزایای بسیار شهر اسفنجی، چالش‌های فراوانی هم در تحقق این راه وجود دارد. این چالش‌ها را می‌توان به‌طور کلی در قالب پنج دسته بیان نمود: ۱) چالش‌های فنی؛ بلندپروازی بیش از حد بدون داشتن پایه علمی مطمئن، استفاده از یک مدل واحد برای تمامی نقاط کشور، عدم وجود منابع آموزشی کافی در این حوزه، عدم وجود محصولات و مواد دوستدار محیط‌زیست مورد نیاز جهت به کار بردن در فناوری‌های مورد استفاده در شهرهای اسفنجی و... ، ۲) چالش‌های فیزیکی؛ تفاوت‌های اقلیمی و جغرافیایی، تفاوت‌ها و تغییرات آب و هوایی، وجود شرایط متفاوت در خاک مناطق مختلف و همچنین کمبود اراضی برای توسعه فناوری‌های این شهرها، ۳) چالش‌های مالی؛ همچون عدم وجود ثبات در حوزهٔ هزینه و سود و همچنین مشکلات مربوط به پروژه‌های تحت مدل PPP، ۴) چالش‌های حقوقی، ۵) چالش‌های اجتماعی؛ مربوط به پذیرش عمومی جامعه مانند **مقاومت در برابر تغییر رویکردهای** سنتی معرفی نمود [۸].

۶- بررسی چند مطالعه انجام شده در چین

چین به‌عنوان کشور پیشرو در زمینهٔ اجرا و طراحی شهرهای اسفنجی، در سال ۲۰۱۵ تعداد ۱۶ شهر و سپس در سال ۲۰۱۶ تعداد ۱۴ شهر دیگر را وارد این برنامه کرد [۳۶]. در جدول ۲، شهرهایی تحت برنامهٔ شهرهای اسفنجی

چین طبق ویژگی‌های اقلیمی و مربوط به میزان بارندگی، و همچنین فناوری‌های پیشنهادی جهت قدم برداشتن در راستای این مفهوم، دسته‌بندی شده‌اند [۸, ۳۷].

جدول ۲: ویژگی‌های اقلیمی و استراتژی‌های پیشنهاد شده در برنامهٔ شهرهای اسفنجی در چهار شهر چین

نوع داده	شهر Qianan (منطقه گرمسیری)	شهر Baicheng (منطقه معتدل)	شهر Shenzhen (منطقه نیمه گرمسیری جنوبی)	شهرYuxi (منطقه نیمه گرمسیری میانی و منطقه نیمه گرمسیری شمالی)
دمای سالانه (^oC)	۱۱/۵	۴/۶	۲۲/۴	۱۹/۲
بارش سالانه (mm)	۶۷۲	۴۱۰	۱۸۳۷	۹۰۹
تبخیر سالانه (mm)	۱۱۰۰	۱۸۴۰	۱۶۷۵	۱۸۰۱
کنترل رواناب (mm)	۸۰	۸۵	۷۰	۸۲
کنترل رواناب (٪)	۲۸/۰	۲۵	۳۱/۳	۲۳/۹
منابع باران (٪)	۷	۶	≤۸	۱۰
بام‌های سبز (٪)	۶	۵	≤۳۰	۱۲/۶
روسازی نفوذپذیر (٪)	۴۶/۵	۴۶/۲	≤۷۰	۳۸/۲

با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت که شهر Qianan در منطقهٔ گرمسیری، شهر Baicheng در منطقه معتدل، شهرShenzhen در منطقه نیمه گرمسیری جنوبی و شهر Yuxi در منطقه نیمه گرمسیری میانی قرار دارند. همچنین از جدول ۲، تفاوت‌های عمدهٔ این چهار شهر از نظر شرایط اقلیمی کاملاً مشهود است؛ شهر Baicheng از نظر اقلیمی، دارای آب و هوایی سرد و بارش کم نسبت به شهرهای دیگر است. از طرف دیگر شهر Shenzhen دارای هوایی گرم بوده و از نظر بارش شرایط بسیار مرطوب‌تری نسبت به دیگر شهرهای مذکور در جدول ۲ دارد. اما با توجه دقیق‌تر به داده‌های فناوری مربوط به شهرهای اسفنجی، هر چهار شهر به‌صورت تقریبی مقادیری بسیار نزدیک به هم دارند. از این رو کاملاً مشهود است که دولت چین بدون توجه به شرایط اقلیمی شهرهای مختلف خود، برنامه و مدلی تقریباً یکسان و شبیه به هم را برای تمامی نقاط کشور اتخاذ کرده است. در صورتی که شهری مانند Baicheng با توجه به کمبود بارش، از نظر منابع آب شهری با مشکلات بیشتری نسبت به شهری مانند Shenzhen خواهد داشت. از سوی دیگر به دلیل بارش زیاد سالانه در شهر Shenzhen، این شهر از نظر کنترل رواناب شهری و جلوگیری از وقوع سیلاب‌های شهری، باید اقدامات متفاوتی در راستای رسیدن به شهر اسفنجی در نظر بگیرد. در ادامه به نکات مهمی در رابطه با پیاده‌سازی مفهوم شهرهای اسفنجی، متناسب با شرایط متفاوت اقلیمی و آب و هوایی پرداخته خواهد شد. به‌طور کلی نواحی با آب و هوای گرم در کشور چین، مناطقی با منابع آبی کمیاب بوده و بارش سالانه آن‌ها در حدود ۴۰۰ الی ۶۰۰ میلی‌متر خواهد بود. به همین دلیل در برنامهٔ شهرهای اسفنجی در این گونه نواحی، حفظ تعادل میان ذخیره و مصرف آب باید در نظر گرفته شود. از طرفی در شهرهای واقع در نواحی شمالی و نیمه گرمسیری به دلیل وجود بارش‌ها و منابع آبی فراوان، خطر وقوع سیلاب بالا می‌باشد. بارش سالانه در این نواحی در حدود ۱۱۰۰ الی ۱۶۰۰ میلی‌متر ارزیابی شده است. در این مناطق به‌منظور حرکت در راستای برنامهٔ شهر اسفنجی، در نظر گرفتن خطر وقوع بلایای سیلابی و مدیریت رواناب سطحی نسبت به دیگر اهداف اولویت خواهد داشت. بخش دیگری از شهرهای چین در ناحیه جنوبی آن کشور با آب و هوای نیمه گرمسیری، شرایط مناسبی از لحاظ دمایی و بارندگی دارند و میانگین بارندگی آن‌ها به‌طور سالانه حدود ۱۵۰۰ الی ۲۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. ولی از سوی دیگر معضلات اصلی در این مناطق فرسایش شدید خاک، آلودگی رواناب و کیفیت پایین آب است. بنابراین می‌بایست توجه اصلی برنامهٔ شهر اسفنجی در این شهرها، به تصفیه، نفوذ و تخلیه رواناب باشد [۳۷].

۷- بحث و بررسی

در این تحقیق سعی شد با نگاهی کلی و گسترده به موضوع ایجاد شهرهای اسفنجی، آشنایی مختصری با فناوری‌های شهر اسفنجی، مزایا و چالش‌های آن و راه رسیدن به هدف مورد نظر در این زمینه ایجاد شد. با توجه به موضوعاتی که در مورد شهر اسفنجی توضیح داده شد، علاوه بر مزایای فراوان، چالش‌هایی نیز وجود دارد که در کشورهای کمتر توسعه یافته بیشتر حس می‌شوند. از جملهٔ این چالش‌ها می‌توان به مشکلات مربوط به کمبود منابع مالی در دولت‌ها و نیاز گستردهٔ آن‌ها به همکاری با شرکت‌های خصوصی، مشکلات مربوط به تنوع زیاد اقلیمی و تفاوت فناوری‌های موردنیاز برای هر ناحیه، مشکلات مربوط به عدم آموزش کافی جامعه و عدم پذیرش عمومی برای ایجاد تغییرات ساختاری و همچنین مشکلات مربوط به عدم وجود تأسیسات، مصالح و دانش کافی برای پیشبرد فناوری‌های مربوط به این برنامه، اشاره نمود. به‌طور خاص با نگاه به زیرساخت‌ها و منابع موجود در ایران، این چالش‌ها پررنگ‌تر خواهند شد. در ایران علی‌رغم وجود معضلات عدیده مانند سیلاب‌های فصلی ویران کننده، مشکلات مربوط به کمبود منابع آب و همچنین کاهش ذخایر سفره‌های آب زیرزمینی، زیرساخت‌ها و منابع مالی لازم جهت اقدام در راستای برنامهٔ ایجاد شهرهای اسفنجی وجود ندارد. جهت نگاهی دقیق‌تر به نواحی مختلف ایران با شرایط اقلیمی متنوع، می‌توان استان‌هایی مانند خوزستان با اقلیمی گرم و مرطوب، گیلان با اقلیمی معتدل و مرطوب و اصفهان با اقلیمی گرم و خشک را در نظر گرفت. مهم‌ترین مشکل استان‌های مرطوب و پر بارش مانند خوزستان و گیلان، وقوع سیلاب‌های مخرب و همچنین وجود آلودگی در آب‌های مصرفی در شهرها می‌باشد. بنابراین اهم فناوری شهرهای اسفنجی در این مناطق، استفاده از مکانیسم‌هایی برای جلوگیری از وقوع سیلاب و همچنین تصفیهٔ آب جمع‌آوری شده می‌باشد؛ به‌طور مثال استفاده از روسازی‌های متخلخل جهت جمع‌آوری و هدایت رواناب و همچنین استفاده از تأسیسات خود تصفیه کنندهٔ بیولوژیکی در تعمیم مفهوم شهر اسفنجی مثمر به ثمر خواهد بود. از سوی دیگر در مناطق خشک مانند اصفهان، با بارشی بسیار کم‌تر از خوزستان و گلستان، مهم‌ترین موضوع، جمع‌آوری و ذخیرهٔ آب برای استفاده در فصل‌های کم آب‌تر است. لذا استفاده از مکانیسم‌های انتقال رواناب به مخازن طراحی شده، اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. اگر بعضی از فناوری‌های مختص شهر اسفنجی مانند استفاده از بام‌های سبز، گسترش روسازی‌های نفوذپذیر با مقاومت مکانیکی پایین در معابر کم عبور و مرور مانند بوستان‌ها، مسیرهای مخصوص دوچرخه‌سواران در فضاهای سبز و افزایش محوطه‌های سبز در سطح شهرها بکار گرفته شوند، تا حد زیادی در جهت رسیدن به شهر اسفنجی حرکت کرده‌ایم. در شهرهای گرم و خشکی مانند یزد، کرمان، زاهدان و ... که مشکل اصلی کمبود آب بخصوص در فصول گرم سال است، به کار بردن مکانیسم‌هایی که تعادل میان ذخیره‌سازی و مصرف آب برقرار می‌کنند ارجحیت داشته و شهرهای مرطوبی مانند رشت و بندر انزلی که مشکل کم‌آبی وجود نداشته و بارندگی‌های سیل‌آسایی تجربه می‌کنند، به کار بردن مکانیسم‌های خود تصفیه کننده و هدایت رواناب، از اهمیت بیشتری برخوردار است. استان های نظیر گلستان، فارس، بوشهر، هرمزگان، خوزستان از جمله استان آسیب پذیر بوده اند که می توانند اولویت اجرای شهرهای اسفنجی باشند. بطورکلی جهت ایجاد شهرهای اسفنجی باید دولت در بخش های وزارت راه شهرسازی، وزارت نیرو، شهرداری و ... به یک نقشه راه کلی در این زمینه دست پیدا کنند. تاکنون در ایران اقدام اساسی در این زمینه انجام نشده است. با این حال این پتانسیل وجود دارد که در آینده نزدیک در شهرهای شمال و جنوب کشور که بیشترین آسیب از سیلاب های فصلی را داشتند از این رویکرد استفاده کرد. در نهایت به‌صورت کلی باید با استفاده از تحقیقات گسترده‌تر و بررسی پژوهش‌های دانشمندان کشورهای پیشرو در این زمینه مانند کشور چین، موانع حاضر را تا حد امکان کاهش داده و با ارائه برنامه‌های کاربردی در زمینهٔ جذب سرمایه‌گذاران برای همکاری با ارکان دولتی در پیشبرد این موضوع، راه را برای رسیدن کشور به این هدف، هموار کرد.

۴-۳- تأسیسات نگهدارنده و تصفیه‌کنندهٔ بیولوژیکی

یکی از بهترین راه‌های کاهش مشکلات هیدرولوژیکی در شهرهای بزرگ و پرجمعیت به‌منظور جلوگیری از تأثیرات مخرب مربوط با توسعه شهرنشینی، بهره‌گیری از مفهوم شهرهای اسفنجی است. نتایج مرور این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:

- استفاده از فناوری‌های بتن متخلخل در حوزه زهکشی و مدیریت رواناب و همچنین ایجاد فضای سبز، بام‌های سبز، تأسیسات بیولوژیکی، تالاب و دریاچه‌ها به‌منظور افزایش ظرفیت هیدرولوژیکی می‌تواند پایداری شهرها را در برابر سیلاب‌های فصلی افزایش دهد.
- شهرهای اسفنجی با چالش‌های فنی، فیزیکی، مالی، حقوقی و اجتماعی مواجهه هستند. اما با این حال منافع زیست محیطی، کاهش آلودگی آب و کنترل رواناب از نکات برجسته توسعه آن‌ها می‌باشد.
- روسازی‌های متخلخل در کاهش آلودگی آب و هوا، کاهش آلودگی صوتی، استفاده مجدد از مصالح بازیافتی و اثر جزیره گرمایی شهرها مؤثر است.
- نکتهٔ بسیار مهم در اجرایی کردن این برنامه، توجه کامل به نوع ویژگی‌های اقلیمی و آب و هوایی هر منطقه، و نیازهای ارجح هر منطقه به هر یک از فناوری‌های مورد نظر از این برنامه می‌باشد. لذا بنا به شرایط اقلیمی باید از فناوری‌های متناسب با آن استفاده کرد.
- بسیاری از استان‌های جنوبی مانند فارس، بوشهر، خوزستان، هرمزگان سالانه با خسارات شدید سیلاب فصلی مواجهه هستند. به‌کارگیری بتن متخلخل در کنترل سیلاب فصلی می‌تواند در کاهش خسارات و کنترل هیدرولوژیکی آن شهرها مؤثر باشد.
- بررسی‌ها نشان می‌دهد استفاده از بتن متخلخل، ایجاد بام‌های سبز در ساختمان‌ها، توسعه فضای‌های سبز در سطح شهرهای آسیب‌پذیر ایران به‌منظور تحقق مفهوم شهرهای اسفنجی مؤثر است.
- مفهوم شهر اسفنجی و پیاده سازی آن در شهرهای ایران می‌تواند راهکار مؤثر در کاهش آلودگی منابع آب‌های زیر زمینی، کنترل سیلاب و استفاده مجدد از آن در کشاورزی باشد. ساخت شهرهای اسفنجی یک فرآیند زمان‌گیر است، و در بلند مدت نتایج آن در بهینه سازی زیرساخت‌های سبز و استفاده مجدد از منابع و در نهایت توسعه پایدار آشکار خواهد شد.

۸- مراجع

[۱] J. G. Lee and J. P. Heaney, "Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems," Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 129, no. 5, pp. 419-426, 2003.

[۲] M. V. Carle, P. N. Halpin, and C. A. Stow, "Patterns of watershed urbanization and impacts on water quality 1," JAWRA Journal of the American Water Resources Association, vol. 41, no. 3, pp. 693-708, 2005.

[۳] S. A. P. Division, World population prospects: the 2008 revision. United Nations Publications, 2010.

[۴] H. Jia, H. Yao, Y. Tang, L. Y. Shaw, R. Field, and A. N. Tafuri, "LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China," Journal of Environmental Management, vol. 149, pp. 65-76, 2015.

[۵] D. R. Marlow, M. Moglia, S. Cook, and D. J Beale, "Towards sustainable urban water management: A critical reassessment," Water research, vol. 47, no. 20, pp. 7150-7161, 2013.

[۶] "Speech writing / re-reading of the flood of 1398," ed, 2020.

[۷] F. K. S. Chan et al., "“Sponge City” in China—a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context," Land Use Policy, vol. 76, pp. 772-778, 2018.

[۸] H. Li, L. Ding, M. Ren, C. Li, and H. Wang, "Sponge city construction in China: A survey of the challenges and opportunities," Water, vol. 9, no. 9, p. 594, 2017.

[۹] H. Wang, C. Mei, J. Liu, and W. Shao, "A new strategy for integrated urban water management in China: Sponge city," Science China Technological Sciences, vol. 61, no. 3, pp. 317-329, 2018.

[۱۰] C. Zevenbergen, D. Fu, and A .Pathirana, "Sponge cities: Emerging approaches, challenges and opportunities," 2018.

[۱۱] O. AlShareedah and S. Nassiri, "Pervious Concrete Mixture Optimization, Physical, and Mechanical Properties and Pavement Design: A Review," Journal of Cleaner Production, p. 125095, 2020.

[۱۲] J. Xia, Y. Zhang, L. Xiong, S. He, L. Wang, and Z. Yu, "Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China," Science China Earth Sciences, vol. 60, no. 4, pp. 652-658, 2017.

[۱۳] R. Cunha Marques, "Comparing private and public performance of Portuguese water services," Water policy, vol. 10, no. 1, pp. 25-42, 2008.

[۱۴] L. Tang, Q. Shen, M. Skitmore, and E. W. Cheng, "Ranked critical factors in PPP briefings," Journal of management in engineering, vol. 29, no. 2, pp. 164-171, 2013.

[۱۵] T. T. Nguyen et al., "Implementation of a specific urban water management-Sponge City," Science of the Total Environment, vol. 652, pp. 147-162, 2019.

[۱۶] T. T. Nguyen, H. H. Ngo, W. Guo, and X .C. Wang, "A new model framework for sponge city implementation: Emerging challenges and future developments," Journal of environmental management, vol. 253, p. 109689, 2020.

[۱۷] M. A. R. Bhutta, K. Tsuruta, and J. Mirza, "Evaluation of high-performance porous concrete properties," Construction and Building Materials, vol. 31, pp. 67-73, 2012.

[۱۸] S. Ishiguro and O. Morita, "Application of lightweight porous concrete to floating base structures for plantation," in Proceedings of the JCI symposium on design, construction and recent applications of porous concrete, Japan Concrete Institute, Tokyo, 2004, pp. 158-60 .

[۱۹] R. Zhong, Z. Leng, and C.-s. Poon, "Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review," Construction and Building Materials, vol. 183, pp. 544-553, 2018.

[۲۰] L. Senff, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, D. Hotza, and W. L. Repette, "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars," Construction and Building Materials, vol. 23, no. 7, pp. 2487-2491, 2009.

[۲۱] N. Salemi and K. Behfarnia, "Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement," Construction and Building Materials, vol. 48, pp. 934-941.۲۰۱۳ ,

[۲۲] F. Pacheco-Torgal, S. Miraldo, Y. Ding, and J. Labrincha, "Targeting HPC with the help of nanoparticles: an overview," Construction and Building Materials, vol. 38, pp. 365-370, 2013.

[۲۳] F. Sanchez and K. Sobolev, "Nanotechnology in concrete–a review," Construction and building materials, vol. 24, no. 11, pp. 2060-2071, 2010.

[۲۴] V. T. Tang and K. Pakshirajan, "Novel advanced porous concrete in constructed wetlands: preparation, characterization and application in urban storm runoff treatment," Water Science and Technology, vol. 78, no. 11, pp. 2374-2382, 2018.

[۲۵] J. A. Koupai, S. S. Nejad, S. Mostafazadeh-Fard, and K. Behfarnia, "Reduction of urban storm-runoff pollution using porous concrete containing iron slag adsorbent," Journal of Environmental Engineering, vol. 142, no. 2, p. 04015072, 2016.

[۲۶] H. Shang and Z. Sun, PAHs (naphthalene) removal from stormwater runoff by organoclay amended pervious concrete.

[۲۷] "Philadelphia Navy Yards," ed, 2015.

[۲۸] F. M. IX and E. H. George" ,Review on sponge city construction for flood management," Sustainability, Agri, Food and Environmental Research, vol. 10, no. 1, 2022.

[۲۹] A. P. Davis, W. F. Hunt, R. G. Traver, and M. Clar, "Bioretention technology: Overview of current practice and future needs," Journal of environmental engineering, vol. 135, no. 3, pp. 109-117, 2009.

[۳۰] A. P. Davis, R. G. Traver, and W. F. Hunt, "Improving urban stormwater quality: applying fundamental principles," Journal of Contemporary Water Research & Education ,vol. 146, no. 1, pp. 3-10, 2010.

[۳۱] K. DeBusk and T. Wynn, "Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation," Journal of Environmental Engineering, vol. 137, no. 9, pp. 800-808, 2011.

[۳۲] J. Liu, D. J. Sample, C. Bell, and Y. Guan" ,Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater," Water, vol. 6, no. 4, pp. 1069-1099, 2014.

[۳۳] D. Thorpe and Y. Zhuge, "Advantages and disadvantages in using permeable concrete as a pavement construction material ",in Proceedings of the 26th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management (ARCOM 2010), 2010, vol. 2: Association of Researchers in Construction Management (ARCOM), pp. 1341-1350 .

[۳۴] M. E. Dietz, "Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions," Water, air, and soil pollution, vol. 186, no. 1, pp. 351-363, 2007.

[۳۵] H. Liu, Y. Jia, and C. Niu, "“Sponge city” concept helps solve China’s urban water problems," Environmental Earth Sciences, vol. 76, no. 14, pp. 1-5, 2017.

[۳۶] Y. Peng and K. Reilly, "Using Nature to Reshape Cities and Live with Water: An Overview of the Chinese Sponge City Programme and Its Implementation in Wuhan," 2021.

[۳۷] Z. Zhang and L. Zhang, "Development of Sponge Cities and Construction Strategies of Different Climate Zones in China," in International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate, 2019: Springer, pp. 255-269 .