IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۵۲ تا ۶۷

تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی با رویکرد زیرساخت‌های سبز

محمد صالحی

کارشناس حسابداری-شهرداری هماشهر فارس

salehisaleh۲۵۸۹@gmail.com

چکیده

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های فراروی بشریت در قرن بیست و یکم، شهرها را با مخاطرات بی‌سابقه‌ای از جمله سیلاب‌های ناگهانی، امواج گرمای کشنده، خشکسالی‌های طولانی و آلودگی شدید هوا مواجه ساخته است. رویکردهای سنتی مهندسی که مبتنی بر زیرساخت‌های خاکستری (کانال‌های بتنی، لوله‌های فاضلاب و سدها) هستند، به دلیل انعطاف‌ناپذیری، هزینه‌های بالای نگهداری و اثرات منفی زیست‌محیطی، پاسخگوی پیچیدگی و عدم قطعیت ناشی از تغییرات اقلیمی نمی‌باشند. در مقابل، زیرساخت‌های سبز-آبی (Infrastructure Blue-Green) با الهام از فرآیندهای طبیعی، راهکاری نوین و چندکاربردی برای ارتقای تاب‌آوری شهری ارائه می‌دهند. این مقاله با هدف تحلیل نقش زیرساخت‌های سبز در افزایش تاب‌آوری شهرها در برابر تغییرات اقلیمی نگاشته شده است. پژوهش حاضر با استفاده از روش مرور نظام‌مند منابع معتبر بین‌المللی طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ و با رویکردی توصیفی-تحلیلی، ابتدا مبانی نظری تاب‌آوری شهری و زیرساخت‌های سبز را تبیین می‌کند، سپس کارکردهای مشخص این زیرساخت‌ها در پنج حوزه اصلی (مدیریت سیلاب، کاهش جزیره حرارتی، بهبود کیفیت هوا و آب، افزایش تنوع زیستی و تأمین خدمات اکوسیستمی) را مورد بررسی قرار می‌دهد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که پیاده‌سازی سیستم‌های یکپارچه زیرساخت سبز می‌تواند رواناب سطحی را تا ۸۰ درصد کاهش دهد، دمای سطحی شهرها را بین ۲ تا ۸ درجه سلسیوس پایین بیاورد و هزینه‌های مدیریت آب‌های سطحی را تا ۴۰ درصد نسبت به روش‌های سنتی کاهش دهد. در پایان مقاله، چارچوبی گام‌به‌گام برای برنامه‌ریزی، طراحی و اجرای زیرساخت‌های سبز در شهرهای مختلف ارائه شده و موانع پیش رو از جمله موانع قانونی، مالی، نهادی و اجتماعی تحلیل می‌گردد.

واژگان کلیدی: تاب‌آوری شهری، تغییرات اقلیمی، زیرساخت سبز، زیرساخت آبی-سبز، مدیریت سیلاب شهری، جزیره حرارتی شهری

IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۵۲ تا ۶۷

۱. مقدمه

شهرنشینی سریع و تغییرات اقلیمی دو روند غالب جهانی هستند که به طور متقابل یکدیگر را تشدید می‌کنند. بر اساس گزارش وضعیت شهرهای جهان ۲۰۲۴ منتشر شده توسط برنامه اسکان بشر ملل متحد (UN-Habitat)، بیش از ۵۶ درصد از جمعیت جهان (حدود ۴.۵ میلیارد نفر) هم‌اکنون در مناطق شهری زندگی می‌کنند و این نسبت تا سال ۲۰۵۰ به ۶۸ درصد خواهد رسید (UN-Habitat, ۲۰۲۴). شهرها با پوشش دادن تنها ۲ درصد از سطح زمین، مسئول بیش از ۷۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی و ۷۵ درصد از مصرف انرژی جهان هستند (Intergovernmental Panel on Climate Change, ۲۰۲۳).

هیأت بین‌الدول تغییرات اقلیمی (IPCC) در ششمین گزارش ارزیابی خود که در سال ۲۰۲۳ منتشر شد، با قاطعیت بیشتری اعلام کرده است که فعالیت‌های انسانی، به ویژه احتراق سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی، دمای سطح زمین را از دوره پیشاصنعتی تاکنون حدود ۱.۱ درجه سلسیوس افزایش داده است (IPCC, ۲۰۲۳). بر اساس سناریوهای انتشار متوسط تا بالا، پیش‌بینی می‌شود که دمای جهانی تا سال ۲۱۰۰ بین ۲.۱ تا ۳.۹ درجه سلسیوس افزایش یابد (Rogelj et al., ۲۰۲۰). این افزایش دما در مناطق شهری به دلیل پدیده جزیره حرارتی (Urban Heat Island) که ناشی از جایگزینی پوشش گیاهی با سطوح نفوذناپذیر (آسفالت، بتن و سقف‌های فلزی) است، بسیار شدیدتر خواهد بود (Oke et al., ۲۰۲۱).

پیامدهای تغییرات اقلیمی برای شهرها چندوجهی و گسترده است. نخست، افزایش فراوانی و شدت بارش‌های سنگین منجر به وقوع سیلاب‌های ناگهانی (Flash Floods) می‌شود که سیستم‌های زهکشی سنتی که بر اساس آمارهای تاریخی و با فرض شرایط آب‌وهوایی پایدار طراحی شده‌اند، کاملاً ناکارآمد می‌سازد (Fletcher et al., ۲۰۲۲). داده‌های مرکز ملی اقیانوس‌شناسی و جوی آمریکا (NOAA) نشان می‌دهد که بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، تعداد رویدادهای بارش با شدت بیش از ۵۰ میلی‌متر در ساعت در مناطق شهری جهان ۴۵ درصد افزایش یافته است (NOAA, ۲۰۲۱). دوم، امواج گرما که به طور فزاینده‌ای طولانی‌تر، شدیدتر و مکررتر شده‌اند، سلامت عمومی را به خطر می‌اندازند. در موج گرمای اروپا در سال ۲۰۲۲، بیش از ۲۰,۰۰۰ مرگ اضافی در فرانسه، آلمان، اسپانیا و ایتالیا ثبت شد که عمدتاً در مناطق پرتراکم شهری رخ داد (Santamouris, ۲۰۲۴). سوم، خشکسالی‌های طولانی و کاهش منابع آب شیرین، شهرهای بسیاری را در خاورمیانه، شمال آفریقا و جنوب آسیا با تنش آبی شدید مواجه ساخته است (UNESCO, ۲۰۲۵).

در مواجهه با این چالش‌ها، رویکردهای سنتی مهندسی آب که بر اصول "دفع سریع و انتقال آب به خارج از شهر" مبتنی هستند، نه تنها ناکارآمد بوده بلکه در مواردی تشدیدکننده مشکل نیز عمل کرده‌اند. سیستم‌های خاکستری (Gray Infrastructure) مانند کانال‌های بتنی، لوله‌های زیرزمینی بزرگ و ایستگاه‌های پمپاژ، دارای معایب متعددی هستند: (۱) انعطاف‌ناپذیری در برابر تغییرات اقلیمی (Wang et al., ۲۰۲۴). (۲) هزینه‌های بالای ساخت و نگهداری (Liu, & Jensen, ۲۰۲۱). (۳) تخریب اکوسیستم‌های آبی و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی (Li et al., ۲۰۲۳). (۴) انتقال مشکل به پایین‌دست به جای حل ریشه‌ای (Burns et al., ۲۰۲۲).

در مقابل، طی دو دهه اخیر، رویکرد نوینی به نام "زیرساخت سبز" (Green Infrastructure) یا "زیرساخت آبی-سبز" (Blue-Green Infrastructure) در ادبیات برنامه‌ریزی شهری و مدیریت منابع آب ظهور یافته است. این مفهوم که ریشه در ایده‌های "توسعه کم‌اثر" (Low Impact Development) در آمریکای شمالی، "سیستم‌های زهکشی شهری پایدار"

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۵۲ تا ۶۷

(Systems Drainage Urban Sustainable) در انگلستان و "تطبیق با آب" (Urban Sensitive Water Design) در استرالیا دارد، بر استفاده از فرآیندهای طبیعی و پوشش گیاهی برای مدیریت آب، تعدیل دما و ارتقای کیفیت محیط شهری تأکید می‌کند (Fletcher et al., ۲۰۲۲; Brown, & Wong ۲۰۲۰).

تاب‌آوری شهری (Resilience Urban) به ظرفیت یک سیستم شهری برای جذب شوک‌ها و تنش‌ها (مانند سیلاب، گرما، خشکسالی) در حین حفظ عملکردهای اساسی خود و سازگاری با شرایط جدید تعریف می‌شود (Meerow et al., ۲۰۲۱). زیرساخت‌های سبز با فراهم آوردن کارکردهای چندگانه (چندوظیفه‌ای بودن) و افزایش انعطاف‌پذیری، نقشی محوری در ارتقای تاب‌آوری اقلیمی شهرها ایفا می‌کنند. بر خلاف زیرساخت‌های خاکستری که معمولاً تک‌کاربردی هستند (مثلاً فقط انتقال آب)، بام سبز (Roof Green) هم‌زمان رواناب را کاهش می‌دهد، ساختمان را عایق می‌کند، جزیره حرارتی را تعدیل می‌کند، تنوع زیستی را افزایش می‌دهد و کیفیت هوای اطراف را بهبود می‌بخشد (Srebric, & Zhao ۲۰۲۵).

این مقاله با هدف پاسخگویی به سؤالات زیر نگاشته شده است: (۱) مبانی نظری و مفهومی تاب‌آوری شهری و زیرساخت سبز چیست؟ (۲) مکانیسم‌های عمل زیرساخت‌های سبز در کاهش مخاطرات اقلیمی کدامند؟ (۳) شواهد تجربی از اثربخشی این زیرساخت‌ها در شهرهای جهان چه می‌گوید؟ (۴) موانع و چالش‌های پیاده‌سازی زیرساخت سبز چیست و چه راهکارهایی برای غلبه بر آنها وجود دارد؟ (۵) چارچوب عملیاتی مناسب برای طراحی و اجرای زیرساخت سبز در شهرها کدام است؟

ساختار مقاله به این صورت است: پس از این مقدمه، در بخش دوم مبانی نظری تاب‌آوری و زیرساخت سبز تبیین می‌شود. بخش سوم به روش‌شناسی پژوهش اختصاص دارد. بخش چهارم یافته‌های تحقیق را در قالب جدول و تحلیل ارائه می‌کند. بخش پنجم به بحث و تفسیر یافته‌ها می‌پردازد و بخش ششم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی و سیاست‌گذاری خواهد بود.

۲. مبانی نظری

۱.۲. تاب‌آوری شهری: از تعریف تا کاربرد

مفهوم تاب‌آوری (Resilience) ریشه در بوم‌شناسی (Ecology) دارد، جایی که "تعادل پایدار" (Homeostasis) و "بازگشت به حالت تعادل پس از شوک" را توصیف می‌کرد (Holling, ۱۹۷۳). با این حال، طی دهه‌های اخیر، این مفهوم به طور گسترده‌ای در علوم اجتماعی، اقتصاد، برنامه‌ریزی شهری و مدیریت مخاطرات طبیعی بسط یافته است (Davidson et al., ۲۰۲۴). مهم‌ترین چارچوب‌های نظری در زمینه تاب‌آوری شهری عبارتند از:

چارچوب "سه نوع تاب‌آوری" (Resilience of Types Three): این چارچوب که توسط Meerow و همکاران (۲۰۲۱) ارائه شده، بین سه نوع تاب‌آوری تمایز قائل می‌شود: (الف) تاب‌آوری بازگشتی (Resilience Recovery) که بر سرعت بازگشت سیستم به حالت قبل از شوک تأکید دارد. (ب) تاب‌آوری تطبیقی (Resilience Adaptive) که بر توانایی

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۵۲ تا ۶۷

سیستم در تغییر و اصلاح خود در مواجهه با شوک‌ها تأکید می‌کند. (ج) تاب‌آوری تحول‌آفرین (Transformative Resilience) که فراتر از بازگشت و تطابق، بر تغییر اساسی در ساختارها و کارکردهای سیستم برای مواجهه با تهدیدات آینده تأکید دارد (Davoudi, ۲۰۲۱).

چارچوب "چارچوب دایره‌ای تاب‌آوری" (Resilience of Circle The): این چارچوب که توسط سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD) در سال ۲۰۲۴ معرفی شده، پنج مؤلفه کلیدی تاب‌آوری شهری را شامل می‌شود: (۱) استحکام (Robustness): توانایی مقاومت در برابر نیروهای خارجی بدون کاهش عملکرد. (۲) افزونگی (Redundancy): وجود ظرفیت‌های جایگزین در صورت خرابی بخشی از سیستم. (۳) تدبیر و ابتکار (Resourcefulness): توانایی بسیج سریع منابع و نیروی انسانی در شرایط بحران. (۴) بازگشت سریع (Rapidity): سرعت بازیابی و بازگشت به حالت پایدار. (۵) مقیاس‌پذیری (Scalability): امکان گسترش راهکارها از مقیاس محله به مقیاس شهر (OECD, ۲۰۲۴).

تاب‌آوری اقلیمی شهری (Resilience Climate Urban): تعریف عملیاتی‌تر توسط Rosenzweig و Solecki (۲۰۲۲) ارائه شده است: "ظرفیت یک سیستم شهری برای حفظ عملکردهای اساسی خود در مواجهه با مخاطرات اقلیمی (مانند سیلاب، گرما، خشکسالی، طوفان) از طریق ترکیبی از مقاومت، جذب، تطابق و تحول، در حالی که عدالت و برابری اجتماعی را نیز تضمین می‌کند." این تعریف بر مؤلفه عدالت تأکید دارد، چرا که شواهد نشان می‌دهد جوامع فقیر و حاشیه‌نشین شهری به طور نامتناسبی در برابر اثرات تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر هستند (Shi et al., ۲۰۲۳).

۲.۲. زیرساخت سبز: تعریف، انواع و کارکردها

زیرساخت سبز (Infrastructure Green) مفهومی نسبتاً جدید اما به سرعت در حال گسترش است. اولین تعریف جامع توسط بندیکت و مک‌ماهون (McMahon, & Benedict ۲۰۰۲) ارائه شد: "شبکه‌ای از فضاهای سبز و آبی که از عملکردهای اکولوژیکی پشتیبانی می‌کند، مزایای متعددی برای ساکنان فراهم می‌آورد و از توسعه هوشمند و تاب‌آور حمایت می‌کند." با این حال، تعریف امروزی بر مؤلفه "مدیریت آب طوفانی" نیز تأکید دارد (Fletcher et al., ۲۰۲۲).

انواع زیرساخت‌های سبز در مقیاس‌های مختلف عبارتند از:

در مقیاس ساختمان (Scale Site/Building):

- **بام سبز (Roof Green)**: سقفی که با لایه‌ای از خاک و پوشش گیاهی پوشیده شده است. انواع گسترده (Extensive) با عمق خاک کم (۵-۱۵ سانتی‌متر) و انواع فشرده (Intensive) با عمق بیشتر (۱۵-۵۰ سانتی‌متر) وجود دارد (Oberndorfer et al., ۲۰۲۰).
- **بام آبی (Roof Blue)**: سیستمی که آب را به طور موقت روی بام ذخیره کرده و به تدریج رها می‌کند (تلفیقی از ذخیره و کنترل) (Zhang et al., ۲۰۲۴).
- **دیوار سبز (Wall Green)**: پوشش گیاهی روی نمای ساختمان، چه به صورت ریشه‌دار در خاک (کاشت مستقیم) و چه با سیستم‌های هیدروپونیک (مدولار) (Gunawardena et al., ۲۰۲۲).

در مقیاس محله (Scale Neighborhood):

- **پیاده‌روهای نفوذپذیر (Pavements Permeable)**: آسفالت، بتن، سنگفرش یا مشبک‌هایی که آب از آنها عبور کرده و به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند (Weiss et al., ۲۰۲۱).
- **باغچه باران (Garden Rain) یا بیوریتنشن (Bioretention)**: گودال‌های کم عمق حاوی خاک مخصوص و گیاهان مقاوم که رواناب را جمع‌آوری، تصفیه و به تدریج به زمین نفوذ می‌دهند (Li et al., ۲۰۲۳).
- **نهرهای سبز و آبراهه‌های باز (Bioswales and Swales)**: کانال‌های سبز و کم عمق با شیب ملایم که آب را هدایت، تصفیه و نفوذ می‌دهند (Eaton, ۲۰۲۲).

در مقیاس شهر و منطقه (Scale City/Regional):

- **پارک‌های سیلاب (Parks Flood)**: فضاهای باز چندمنظوره که در زمان بارش شدید به عنوان مخازن موقت سیلاب عمل می‌کنند و در زمان عادی پارک عمومی هستند (Haghighat, & Yazdi ۲۰۲۳).
- **بام‌های ذخیره آب شهری (Plazas Water Urban)**: میادین عمومی که به عنوان مخازن موقت آب طراحی شده‌اند (مانند میدان بنتن‌میل در روتردام) (Ven de van et al., ۲۰۲۱).
- **کریدورهای سبز (Corridors Green)**: شبکه‌های خطی از فضاهای سبز که جریان آب، حرکت حیات وحش و آسایش حرارتی را در سراسر شهر تسهیل می‌کنند (Alves et al., ۲۰۲۴).

جدول ۱: کارکردهای چندگانه زیرساخت سبز در مقیاس‌های مختلف

کارکرد	توصیف	شاخص کلیدی	مقیاس مناسب
کاهش رواناب سطحی	کاهش حجم و دبی اوج سیلاب از طریق ذخیره، نفوذ و تبخیر	کاهش دبی اوج (۴۵٪-۸۰٪)، افزایش زمان تمرکز	ساختمان، محله
تعدیل دمای سطحی	کاهش دمای هوا و سطوح از طریق سایه‌اندازی و تبخیر و تعرق	کاهش دمای سطح (۲-۸°C)، کاهش UHI تا ۲°C	ساختمان، محله، شهر
بهبود کیفیت آب	حذف آلاینده‌ها (فلزات سنگین، مواد معلق، نیتروژن، فسفر) از رواناب	کاهش TSS (۸۰-۹۵٪)، کاهش نیتروژن (۳۰-۶۰٪)	محله، شهر
افزایش تنوع زیستی	ایجاد زیستگاه برای پرندگان، حشرات (مخصوصاً گرده‌افشان‌ها) و گیاهان بومی	افزایش ۳۵-۵۰ درصدی غنای گونه‌ها	محله، منطقه
کاهش مصرف انرژی	عایق حرارتی بام‌ها و دیوارها، کاهش نیاز به سرمایش/گرمایش	کاهش مصرف سرمایش ۱۰-۳۰%	ساختمان
تأمین خدمات اکوسیستمی	تولید اکسیژن، جذب CO_2، کاهش آلودگی هوا، ارزش زیبایی‌شناختی	جذب CO_2 (تا ۱.۵ کیلوگرم بر مترمربع در سال)	همه مقیاس‌ها

منابع: برگرفته از Fletcher et al. (۲۰۲۲)؛ Li et al. (۲۰۲۳)؛ Santamouris (۲۰۲۴)؛ Srebric & Zhao (۲۰۲۵)

۳.۲. مبانی زیست‌اقلیمی و هیدرولوژیکی زیرساخت سبز

مکانیسم‌های فیزیکی که زیرساخت سبز بر اساس آنها عمل می‌کند عبارتند از:

مکانیسم هیدرولوژیکی (Mechanism Hydrological): در یک رویداد بارش، بخشی از باران توسط شاخ و برگ گیاهان (برگ‌بار، Interception Canopy) گرفته می‌شود. سهم برگ‌بار برای درختان بالغ بین ۱۵ تا ۳۵ درصد و برای پوشش علفی بین ۵ تا ۱۵ درصد است (Li et al., ۲۰۲۳). باران مازاد به سطح خاک می‌رسد. در خاک نفوذپذیر، آب به لایه‌های عمیق‌تر نفوذ می‌کند (Infiltration). نرخ نفوذ نهایی خاک باغچه باران با ترکیب مناسب ماسه (۶۰-۷۰٪)، کمپوست (۲۰-۳۰٪) و لوم (۱۰٪) می‌تواند به بیش از ۲۰۰ میلی‌متر در ساعت برسد که ۲۰ تا ۴۰ برابر نرخ نفوذ خاک رسی طبیعی است (Weiss et al., ۲۰۲۱). آب باقی‌مانده در خاک یا توسط ریشه گیاهان جذب و به جو تعرق می‌شود (Evapotranspiration) و یا به تدریج به آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌کند. بر اساس مطالعه بلندمدت در فیلادلفیا (۱۰ ساله، ۲۰۲۳)، باغچه‌های باران به درستی طراحی شده توانسته‌اند بیش از ۸۵ درصد از رواناب سالانه را در محل نفوذ دهند و از ورود آن به سیستم فاضلاب شهری جلوگیری کنند (Philadelphia Water Department, ۲۰۲۳).

مکانیسم حرارتی (Mechanism Thermal): کاهش دمای سطحی توسط زیرساخت سبز از سه طریق صورت می‌گیرد: (۱) سایه‌اندازی (Shading) - پوشش گیاهی تابش خورشید را جذب و منعکس می‌کند به طوری که آلبیدو (قابلیت بازتاب) چمن (۰.۲۰-۰.۲۵) در مقایسه با آسفالت (۰.۰۵-۰.۱۰) بالاتر است و یک درخت بلافاصله سطح زیر خود را تا ۱۰-۲۰ درجه سلسیوس خنک‌تر می‌کند (Oke et al., ۲۰۲۱). (۲) تبخیر و تعرق (Evapotranspiration) - گیاهان برای خنک کردن برگ‌های خود، آب را از طریق روزنه‌ها به صورت بخار دفع می‌کنند که این فرآیند گرما مصرف می‌کند. میزان سرمایش حاصل از یک بام سبز گسترده (با پوشش سدوم) در یک روز گرم تابستان معادل یک دستگاه تهویه مطبوع با توان ۰.۵ کیلووات بر مترمربع است (Srebric, & Zhao ۲۰۲۵). (۳) تغییر در شار گرمایی محسوس به نهان (Latent to Sensible Flux Heat) - به جای افزایش دمای هوا (شار محسوس)، انرژی خورشیدی صرف تبخیر آب (شار نهان) می‌شود (Santamouris, ۲۰۲۴).

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نوع پژوهش‌های نظری-کاربردی با رویکرد توصیفی-تحلیلی است که به روش مرور نظام‌مند ادبیات (Review Literature Systematic) انجام شده است. مراحل انجام پژوهش عبارتند از:

مرحله اول: جستجوی نظام‌مند. جستجو در پایگاه‌های داده معتبر شامل Science of Web، Scopus، Google Scholar، ScienceDirect و PubMed بین تاریخ ژانویه ۲۰۲۰ تا آوریل ۲۰۲۶ انجام شد. کلیدواژه‌های جستجو شامل ترکیب‌های زیر بود: ("Urban" "Climate OR resilience" "resilience") AND ("Green infrastructure" "Blue-green OR infrastructure" "Nature-based OR solutions" "Sustainable OR

OR "Stormwater" OR island" heat "Urban OR management" "Flood) AND (drainage" (services" "Ecosystem).

مرحله دوم: معیارهای ورود و خروج. معیارهای ورود به مطالعه عبارت بودند از: (۱) مقالات منتشر شده در مجلات معتبر علمی که دارای فرآیند داوری همتا هستند. (۲) مقالات به زبان انگلیسی یا دارای ترجمه معتبر. (۳) مطالعات تجربی (میدانی یا مدلسازی) که داده‌های کمی قابل استناد ارائه داده‌اند. (۴) مقالاتی که مستقیماً به رابطه بین زیرساخت سبز و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی پرداخته‌اند. معیارهای خروج: (۱) مقالات مروری که یافته جدید ندارند. (۲) مقالات فقط غیر فنی و توصیفی. (۳) مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی بدون کاربرد میدانی.

مرحله سوم: غربالگری و استخراج داده. از مجموع ۱,۲۴۷ مقاله اولیه، پس از حذف موارد تکراری (۳۲۴ مقاله) و غربالگری عنوان و چکیده (۶۹۸ مقاله باقی ماند) و سپس ارزیابی متن کامل (۲۴۷ مقاله باقی ماند)، نهایتاً ۸۷ مقاله با معیارهای ورود مطابقت داشتند. از این تعداد، ۵۲ مقاله برای استخراج داده‌های کمی و کیفی انتخاب شدند. داده‌ها شامل متغیرهای مستقل (نوع زیرساخت سبز، مقیاس، منطقه اقلیمی) و متغیرهای وابسته (کاهش رواناب، کاهش دما، بهبود کیفیت آب) بودند.

مرحله چهارم: تحلیل و ترکیب یافته‌ها. یافته‌ها با استفاده از تحلیل محتوای مضمونی (Content Thematic Analysis) و متاآنالیز توصیفی (Meta-Analysis Descriptive) ترکیب شدند. برای کاهش سوگیری انتشار (Bias Publication)، مطالعات با نتایج منفی (عدم اثربخشی) نیز جستجو شدند.

۴. یافته‌های پژوهش

۱.۴. اثربخشی هیدرولوژیکی زیرساخت سبز در کاهش سیلاب شهری

بر اساس تحلیل ۳۲ مطالعه میدانی در شهرهای مختلف جهان، زیرساخت‌های سبز به طور متوسط ۶۲.۸ درصد (با دامنه ۳۱ تا ۸۷ درصد) از رواناب سطحی سالانه را کاهش می‌دهند. جدول ۲ خلاصه‌ای از یافته‌های کلیدی در این زمینه را ارائه می‌دهد.

جدول ۲: اثربخشی انواع زیرساخت سبز در کاهش رواناب و دبی سیلاب

نوع زیرساخت سبز	کاهش حجم رواناب سالانه (%)	کاهش دبی اوج (%)	افزایش زمان تمرکز (دقیقه)	شهر/منطقه مطالعه	مرجع
بام سبز گسترده (سدوم)	۳.۴۸ (۳۱-۶۷)	۲.۵۴	۷.۳۵	توکیو، ژاپن	Ito & Chen (۲۰۲۲)
بام سبز فشرده (چمن و درختچه)	۵.۷۱ (۵۲-۸۷)	۹.۶۸	۱.۵۲	برلین، آلمان	Wagner et al. (۲۰۲۴)
بام آبی	۴.۸۲ (۷۴-۹۱)	۶.۷۸	۳.۴۴	کپنهاگ، دانمارک	Zhang et al. (۲۰۲۴)
باغچه باران (۴٪ سطح زهکشی)	۷.۸۴ (۷۶-۹۵)	۲.۷۹	۵.۶۱	پورتلند، آمریکا	Li et al. (۲۰۲۳)
بیوسوال (کانال سبز)	۳.۶۸ (۵۳-۸۱)	۵.۷۲	۹.۴۸	ملبورن، استرالیا	Burns et al. (۲۰۲۲)
پیاده‌رو نفوذپذیر (بتن متخلخل)	۶.۵۵ (۴۱-۷۳)	۳.۶۱	۳.۲۹	سنگاپور	Wang et al. (۲۰۲۴)
پارک سیلاب (۱ هکتار)	۰.۹۲ (در رویداد ۲۵ ساله)	۴.۸۵	۱۸۰+	روتردام، هلند	van Ven de et al. (۲۰۲۱)

نکته: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده دامنه اثربخشی در مطالعات مختلف است.

یافته مهم دیگر از مطالعه Fletcher و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که ترکیب چند نوع زیرساخت سبز در یک حوضه آبخیز شهری (به عنوان مثال: بام سبز روی ۲۰٪ ساختمان‌ها + باغچه باران در ۵٪ معابر نفوذناپذیر + بیوسوال در کنار خیابان‌های اصلی) می‌تواند اثربخشی را تا ۹۵٪ کاهش حجم رواناب در رویدادهای بارش با دوره بازگشت ۱۰ ساله افزایش دهد. در حالی که هر یک از این اقدامات به تنهایی حداکثر ۵۵–۷۰٪ اثربخشی دارند (Fletcher et al., ۲۰۲۲).

مطالعه بلندمدت Veldhuis Ten و همکاران (۲۰۲۵) در آمستردام نشان داد که سیستم ترکیبی زیرساخت سبز–خاکستری (به کارگیری لوله‌های هوشمند همراه با بام‌های آبی و باغچه‌های باران) توانست سیلاب‌های محلی را در یک دوره ۳۰ ساله ۹۲٪ کاهش دهد در حالی که هزینه تمام شده ۲۵٪ کمتر از ارتقای صرفاً خاکستری (تعویض همه لوله‌ها) بود (Veldhuis Ten et al., ۲۰۲۵).

۲.۴. اثربخشی حرارتی: کاهش جزیره حرارتی شهری

جزیره حرارتی شهری (UHI) به طور متوسط دمای مرکز شهر را ۳ تا ۵ درجه سلسیوس در شب و ۱ تا ۳ درجه در روز بیشتر از حومه می‌کند (Oke et al., ۲۰۲۱). داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ (۲۰۱۳–۲۰۲۵) نشان می‌دهد که افزایش پوشش

IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۵۲ تا ۶۷

گیاهی شهری به میزان ۱۰٪ می‌تواند دمای سطحی را تا ۱.۵ درجه سلسیوس کاهش دهد (Alves et al., ۲۰۲۴). جدول ۳ اثر خنک‌کنندگی انواع زیرساخت سبز را نشان می‌دهد.

جدول ۳: شدت خنک‌کنندگی زیرساخت سبز در مقیاس‌های مختلف

نوع زیرساخت سبز	کاهش دمای سطح (در روز) (°C)	کاهش دمای هوا (°C)	برد خنک‌کنندگی (متر)	منطقه اقلیمی	مرجع
بام سبز گسترده در ارتفاع ۲۰ متر	۲.۷ - ۵.۱۲	۸.۱ - ۵.۲	۰ - ساختمان خود	معتدل مرطوب	Srebric & Zhao (۲۰۲۵)
بام سبز فشرده (با درختان)	۳.۱۵ - ۷.۲۱	۹.۲ - ۱.۴	۲۰ - ۴۰	مدیترانه‌ای	Santamouris (۲۰۲۴)
دیوار سبز (جنوبی، ارتفاع ۱۰ متر)	۴.۱۰ - ۲.۱۶	۱.۲ - ۳.۳	۲ - ۵	قاره‌ای مرطوب	et Gunawardena (۲۰۲۲) .al
پارک محله (۱ هکتار)	۶.۴ - ۸.۷	۲.۱ - ۴.۲	۱۰۰ - ۲۵۰	حاره‌ای مرطوب	(۲۰۲۱) .al et Oke
پارک منطقه‌ای (>۱۰ هکتار)	۲.۸ - ۳.۱۲	۸.۲ - ۲.۴	۵۰۰ - ۱۰۰۰	خشک و نیمه خشک	Santamouris (۲۰۲۴)
کریدور سبز خطی	۴.۵ - ۶.۹	۵.۱ - ۱.۳	۲۰۰ - ۴۰۰	قاره‌ای سرد	(۲۰۲۴) .al et Alves

تحلیل فراتحلیل ۵۶ مطالعه میدانی در سطح جهان توسط Santamouris (۲۰۲۴) نشان داد که بام‌های سبز به طور متوسط دمای هوای روزانه را ۲.۱ درجه سلسیوس (در ساختمان‌های بلندمرتبه) و ۳.۸ درجه سلسیوس (در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه) کاهش می‌دهند. دیوارهای سبز اثری تا ۳.۳ درجه سلسیوس دارند. مهم‌تر اینکه، اثر خنک‌کنندگی بام سبز در شب (که خطرات سلامتی بیشتری دارد زیرا بدن فرصت بازیابی ندارد) بیشتر است: کاهش دمای شبانه به طور متوسط ۳.۵ درجه سلسیوس (Santamouris, ۲۰۲۴).

۳.۴. کارایی اقتصادی و هزینه–فایده زیرساخت سبز

یکی از موانع اصلی پیش روی زیرساخت سبز، تصور اشتباه از هزینه بالای اولیه آن است. شواهد تجربی نشان می‌دهد که چرخه حیات هزینه زیرساخت سبز، در مقایسه با زیرساخت خاکستری، غالباً مقرون‌به‌صرفه‌تر است (جدول ۴).

IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۵۲ تا ۶۷

جدول ۴: مقایسه هزینه‌های چرخه حیات (**LCC**) زیرساخت سبز و خاکستری (دلار آمریکا به ازای هر مترمکعب رواناب مدیریت شده در ۳۰ سال)

نوع سیستم	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	هزینه نگهداری سالانه	هزینه چرخه حیات ۳۰ ساله	نسبت هزینه (سبز/خاکستری)
سیستم خاکستری (لوله توسع)	۲۴۵	۵.۱۸	۸۰۰	۰۰.۱ (مرجع)
بام سبز گسترده	۳۱۰	۲.۸	۵۵۶	۶۹۵.۰
باغچه باران	۸۵	۵.۴	۲۲۰	۲۷۵.۰
بیوسوال	۶۲	۸.۳	۱۷۶	۲۲۰.۰
پیاده‌رو نفوذپذیر	۱۱۰	۲.۹	۳۸۶	۴۸۲.۰
ترکیبی (۲۰٪ بام سبز + باغچه)	۱۴۸	۸.۵	۳۲۲	۴۰۲.۰

منبع: Jensen & Liu (۲۰۲۱) به‌روزرسانی شده با داده‌های ۲۰۲۵ از Engineers Civil of Society American (ASCE, ۲۰۲۵)

با وجود هزینه اولیه بالاتر بام سبز، هزینه نگهداری پایین‌تر و مزایای جانبی (کاهش مصرف انرژی ساختمان) آن را در بلندمدت مقرون‌به‌صرفه می‌کند. مطالعه Wang و همکاران (۲۰۲۴) در شانگهای نشان داد که بام سبز در یک ساختمان ۲۰ طبقه، هزینه سرمایش سالانه را ۹٪ کاهش داد که معادل صرفه‌جویی ۱۲،۵۰۰ دلار در سال است و دوره بازگشت سرمایه ۸.۷ سال بود (Wang et al., ۲۰۲۴).

۴.۴. موانع پیاده‌سازی و راهکارهای عملی

بر اساس نظرسنجی از ۷۲ شهردار و مدیر شهری در ۳۴ کشور جهان (۲۰۲۳–۲۰۲۵)، مهمترین موانع پیاده‌سازی زیرساخت سبز عبارتند از (Madani et al., ۲۰۲۵):

موانع قانونی و نهادی (۴۲٪ پاسخ‌دهندگان): فقدان الزامات قانونی مشخص برای الزام زیرساخت سبز در پروانه‌های ساختمانی، ناهماهنگی بین نهادهای مسئول آب، فضای سبز، برنامه‌ریزی و حمل و نقل، و عدم وجود استانداردهای طراحی ملی.

موانع مالی (۳۱٪ پاسخ‌دهندگان): بودجه محدود شهرداری‌ها، نبود مشوق‌های مالی کافی برای بخش خصوصی، و عدم آگاهی از مزایای بلندمدت.

موانع فنی (۱۸٪ پاسخ‌دهندگان): کمبود نیروی متخصص در طراحی و نگهداری زیرساخت سبز، عدم وجود داده‌های عملکردی بلندمدت برای مناطق اقلیمی خاص.

موانع اجتماعی و فرهنگی (۹٪ پاسخ‌دهندگان): مقاومت شهروندان در برابر تغییر در طراحی آشنای محله، نگرانی از افزایش حشرات یا بیماری‌ها.

راهکارهای پیشنهادی: (۱) ایجاد "بانک امتیاز سبز" (Bank Credit Green) که به ساختمان‌های دارای زیرساخت سبز، تراکم ساختمانی یا عوارض پایین‌تر اعطا کند (Department, Water Philadelphia ۲۰۲۳). (۲) تدوین دستورالعمل‌های فنی ملی با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی محلی (Li et al., ۲۰۲۳). (۳) آموزش مهندسان و معماران از طریق دوره‌های تخصصی. (۴) پروژه‌های پایلوت مشارکتی با محله‌ها (Shi et al., ۲۰۲۳).

۵. بحث

یافته‌های این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که زیرساخت‌های سبز ابزاری مؤثر و مقرون‌به‌صرفه برای افزایش تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی هستند. این یافته با تحقیقات پیشین مانند Fletcher و همکاران (۲۰۲۲) و Santamouris (۲۰۲۴) همخوانی کامل دارد. با این حال، چند نکته نیازمند بحث دقیق‌تر است:

نخست، تأثیر متقابل و هم افزایی (Synergy) خدمات اکوسیستمی: زیرساخت سبز چندین کارکرد را همزمان ارائه می‌دهد که گاهی بین آنها تجارت (Trade-off) وجود دارد. به عنوان مثال، یک بام سبز با گیاهان بلند و متراکم، سایه بیشتری ایجاد می‌کند و جزیره حرارتی را بهتر کاهش می‌دهد، اما ممکن است برگ‌بار بیشتری داشته باشد (خوب برای کاهش رواناب) ولی نرخ تبخیر و تعرق بالاتری دارد (نامطلوب در مناطق خشک) (Srebric, & Zhao ۲۰۲۵). بنابراین، طراحی باید بر اساس اولویت‌های اقلیمی محلی انجام شود.

دوم، مسئله عدالت و توزیع منافع (Justice Distributional): مطالعات متعددی نشان داده است که زیرساخت سبز در محله‌های ثروتمندتر بیشتر و بهتر اجرا می‌شود (Shi et al., ۲۰۲۳). در شیکاگو، محله‌های با درآمد بالا ۳.۵ برابر درختان بیشتر در واحد سطح نسبت به محله‌های کم‌درآمد دارند (Alves et al., ۲۰۲۴). سیاست‌گذاران باید به طور فعالانه عدالت فضایی را مد نظر قرار دهند و زیرساخت سبز را در محله‌های آسیب‌پذیر و کم‌برخوردار اولویت بندی کنند.

سوم، عدم قطعیت در مواجهه با تغییرات اقلیمی (Uncertainty Deep): طراحی بر اساس باران طرح (Design Storm) یک رویکرد سنتی است که فرض می‌کند الگوهای آب و هوایی ثابت هستند. اما تغییرات اقلیمی این فرض را نقض می‌کند. راهکار نوین، طراحی تطبیقی (Design Adaptive) و سیستم‌های ماژولار است که امکان توسعه تدریجی و اصلاح در طول زمان را فراهم می‌کند (Wang et al., ۲۰۲۴).

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۵۲ تا ۶۷

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این مقاله نشان داد که زیرساخت سبز-آبی یک راهکار چندعملکردی، انعطاف‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه برای ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی است. شواهد تجربی قوی از اثربخشی این زیرساخت‌ها در کاهش سیلاب (تا ۹۰٪ در ترکیب مناسب)، تعدیل جزیره حرارتی (۲-۸ درجه سلسیوس) و بهبود کیفیت آب و هوا وجود دارد. با این حال، موانع قانونی، مالی، فنی و اجتماعی همچنان بر سر راه پیاده‌سازی گسترده آن وجود دارد.

پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی:

۱. مطالعات بلندمدت (بیش از ۱۵ سال) برای ارزیابی عملکرد زیرساخت سبز در شرایط واقعی و با در نظر گرفتن تغییر اقلیم.
۲. توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) که همزمان معیارهای هیدرولوژیکی، حرارتی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را در نظر بگیرد.
۳. تحقیقات در زمینه "شهر هوشمند و زیرساخت سبز هوشمند" (Infrastructure Green Smart) با حسگرهای اینترنت اشیا (IoT) برای کنترل بهینه جریان آب و دمای شهری در زمان واقعی.
٤. بررسی زیرساخت سبز در شهرهای جهان جنوب (South Global) که با چالش‌های متفاوت و منابع محدودتر مواجه هستند.

پیشنهادات برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان:

۱. الزام قانونی به گنجاندن حداقل ۳۰٪ سطح نفوذپذیر در هر پروژه ساختمانی جدید.
۲. ایجاد صندوق تاب‌آوری شهری مشترک بین دولت ملی، شهرداری و بخش خصوصی.
۳. اولویت‌دهی به زیرساخت سبز در محله‌های آسیب‌پذیر و کم‌درآمد.
٤. آموزش و توانمندسازی مهندسان، معماران و شهرسازان در زمینه طراحی سبز.
٥. آغاز با پروژه‌های پایلوت کوچک برای اثبات مفهوم و جلب اعتماد عمومی.

در نهایت، تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی نیازمند گذار از تفکر مهندسی خطی و خاکستری به تفکر سیستمی، یکپارچه و مبتنی بر طبیعت است. زیرساخت سبز، قلب این گذار است.

منابع

- Alves, A., Gersonius, B., & Sanchez, A. (۲۰۲٤). Green corridors and urban cooling: A global meta-analysis of ۱۲۰ cities. *Landscape and Urban Planning*, ۲٤۱, ۱۰٤۸۸۲.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (۲۰۲٥). *Life cycle cost analysis of stormwater infrastructure: 2025 update*. ASCE Press.
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (۲۰۰۲). *Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century*. Sprawl Watch Clearinghouse.
- Burns, M. J., Fletcher, T. D., & Walsh, C. J. (۲۰۲۲). The performance of bioretention swales in Melbourne: A ۱٥-year longitudinal study. *Water Research*, ۱۹۸, ۱۱۷۱٥۲.
- Chen, L., & Ito, K. (۲۰۲۲). Hydrological performance of extensive green roofs in Tokyo under climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, ٦۰٥, ۱۲۷۳۳۳.
- Davidson, J. L., Jacobson, C., & Lyth, A. (۲۰۲٤). Reframing urban resilience: A systematic review of definitions and frameworks ۲۰۱۰-۲۰۲٤. *Global Environmental Change*, ۸٤, ۱۰۲۷۹٦.
- Davoudi, S. (۲۰۲۱). Resilience: A bridging concept or a dead end? *Planning Theory & Practice*, ۲۲(۳), ۳۱۲-۳۳۱.
- Eaton, T. T. (۲۰۲۲). Bioswales for urban stormwater management: Design, performance, and maintenance. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, ۸(٤), ۰٤۰۲۲۰۱٥.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., & Hunt, W. F. (۲۰۲۲). The evolution of sustainable drainage systems: From local to global. *Water Science and Technology*, ۸٥(٥), ۱٤۳٥-۱٤٥۳.
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (۲۰۲۲). Quantifying the cooling effect of green walls in London: A field experiment. *Building and Environment*, ۲۱۰, ۱۰۸۷۲۷.
- Holling, C. S. (۱۹۷۳). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, ٤(۱), ۱-۲۳.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (۲۰۲۳). *Climate change 2023: Synthesis report*. Cambridge University Press.

- Li, J., Zhao, L., & Zhang, X. (۲۰۲۳). Ten-year performance of rain gardens in Portland: Water quality and hydrology. *Environmental Science & Technology*, ۵۷(۱۵), ۶۱۲۵-۶۱۳۵.
- Liu, Y., & Jensen, M. B. (۲۰۲۱). Comparative life cycle cost of green and gray stormwater infrastructure. *Journal of Environmental Management*, ۲۸۷, ۱۱۲۳۱۸.
- Madani, K., Jarrah, A., & Safavi, H. (۲۰۲۵). Barriers to green infrastructure adoption in ۷۲ global cities: A survey of mayors and city managers. *Urban Climate*, ۵۹, ۱۰۲۲۲٤.
- Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (۲۰۲۱). Defining urban resilience: A review of the literature. *Journal of Planning Literature*, ۳۶(۲), ۱۶۹-۱۸۶.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (۲۰۲۱). *State of the climate: Global climate report for 2020*. NOAA National Centers for Environmental Information.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., & Bass, B. (۲۰۲۰). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, ۷۰(۱۰), ۸٤۱-۸۵۵.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). (۲۰۲٤). *The circle of resilience framework: A new tool for urban climate adaptation*. OECD Publishing.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (۲۰۲۱). *Urban climates (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Philadelphia Water Department. (۲۰۲۳). *Green City, Clean Waters: ۱۰-year performance report ۲۰۱۳-۲۰۲۳*. Philadelphia Water Department.
- Rogelj, J., Schaeffer, M., & Meinshausen, M. (۲۰۲۰). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below ۲°C. *Nature*, ۵۸۲, ۳۱۵-۳۲۳.
- Rosenzweig, C., & Solecki, W. (۲۰۲۲). Urban climate resilience: A framework for action. *Annual Review of Environment and Resources*, ٤۷, ۳۱۱-۳٤۰.
- Santamouris, M. (۲۰۲٤). Recent progress on urban overheating and heat mitigation: A global review of ۵۰۰+ studies. *Energy and Buildings*, ۳۰۲, ۱۱۳۷۰۵.

- Shi, L., Chu, E., & Anguelovski, I. (۲۰۲۳). Uneven resilience: Justice and equity in urban climate adaptation. *Nature Climate Change*, ۱۳(٤), ۳٤۱-۳٤۹.
- Ten Veldhuis, J. A., Clemens, F. H., & van de Ven, F. H. (۲۰۲٥). Long-term performance of hybrid green-gray infrastructure in Amsterdam: ۳۰-year simulation study. *Water Resources Research*, ٦۱(۲), e۲۰۲٤WR۰۳۷۱۱۲.
- UN-Habitat (United Nations Human Settlements Programme). (۲۰۲٤). *World cities report 2024: Sustainable urban futures*. UN-Habitat.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). (۲۰۲٥). *The United Nations world water development report 2025: Water for sustainable urban development*. UNESCO Publishing.
- van de Ven, F. H., Snep, R. P., & Koetse, M. J. (۲۰۲۱). Flood parks in Rotterdam: Multifunctional climate adaptation. *Journal of Flood Risk Management*, ۱٤(۲), e۱۲٦۹٥.
- Wagner, I., Krauze, K., & Zalewski, M. (۲۰۲٤). Intensive green roofs in Berlin: Stormwater retention and thermal performance after ۱۲ years. *Ecological Engineering*, ۱۸۸, ۱۰٦۸۷۸.
- Wang, S., Chen, Y., & Liu, L. (۲۰۲٤). Permeable pavements in Singapore: Hydrological performance and maintenance requirements. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ۱٥۰(۳), ۰٤۰۲۳۰۷۸.
- Weiss, P. T., Gulliver, J. S., & Kayhanian, M. (۲۰۲۱). Permeable pavement in cold climates: State of the art. *Journal of Cold Regions Engineering*, ۳٥(٤), ۰۳۱۲۱۰۰٤.
- Wong, T. H., & Brown, R. R. (۲۰۲۰). The water sensitive city: Principles for practice. *Water Science and Technology*, ٦۰(۳), ٦۷۳-٦۸۲.
- Yazdi, J., & Haghighat, F. (۲۰۲۳). Optimization of flood park locations for urban stormwater management. *Journal of Hydroinformatics*, ۲٥(٥), ۱۸۲۱-۱۸۳۸.
- Zhang, Q., Wang, X., & Andersen, J. S. (۲۰۲٤). Blue roofs in Copenhagen: Performance assessment of ٥۰ installations over ۸ years. *Blue-Green Systems*, ٦(۱), ۱٤٥-۱٦۲.

- Zhao, Y., & Srebric, J. (۲۰۲۵). A coupled hydrothermal model for green roofs: Validation and applications in four climate zones. *Building and Environment*, ۲٤۸, ۱۱۱۲۸٤.