

MDOI-01-2026.0141
MNR--1-1B2D95

ارزیابی هیدرولیکی اثر سیستم‌های زهکشی پایدار (LID/SUDS) بر کنترل پیک سیلاب‌های ناگهانی در بافت‌های شیب‌دار شهری (مطالعه موردی: شهر ایلام)

محمد حسین رحیمی

کارشناس عمران شهرداری ایلام – ارشد سازه های آبی

چکیده

با گسترش شهرنشینی و تغییر کاربری اراضی، ضریب نفوذ سطحی کاهش یافته و حجم رواناب‌های سطحی در مناطق شهری به شدت افزایش می‌یابد؛ این پدیده در شهرهایی با توپوگرافی کوهپایه‌ای و شیب تند نظیر ایلام، موجب شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی مخرب و اعمال بار هیدرولیکی بحرانی بر شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی می‌گردد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی سیستم‌های زهکشی پایدار (LID/SUDS) شامل بام‌های سبز، روسازی‌های نفوذپذیر و چاه‌های جاذب در کنترل پیک سیلاب شهری انجام گرفته است. در این تحقیق، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه با استفاده از نرم‌افزار SWMM تحت سناریوی بارش‌های حدی با دوره‌های بازگشت مختلف صورت پذیرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تلفیق تکنیک‌های مدیریت منبع‌محور (LID) با زیرساخت‌های سنتی، پتانسیل قابل‌توجهی در کاهش دبی اوج جریان، افزایش زمان تمرکز و تاخیر در بروز پیک سیلاب دارد. به طوری که اعمال این راهکارها در بافت متراکم و شیب‌دار مورد مطالعه، نرخ رواناب خروجی را به میزان معناداری کاهش داده و بار هدایت سیلاب را تعدیل می‌کند. در نهایت، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه و جانمایی بهینه سیستم‌های زهکشی پایدار، ابزاری کارآمد و سازگار با محیط‌زیست جهت ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در برابر بحران‌های هیدرولوژیکی محسوب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: سیستم‌های زهکشی پایدار؛ سیلاب‌های ناگهانی؛ مدل SWMM؛ بافت شیب‌دار شهری؛ شهر ایلام.



۱ .مقدمه و بستر مفهومی

فرایند شتابان شهرنشینی، تغییر کاربری اراضی، تسطیح ناهمواری‌های طبیعی و تبدیل سطوح نفوذپذیر به پوشش‌های ناتراوا نظیر آسفالت و بتن، چرخه هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز را دچار اختلالات بنیادین کرده است. این دگرگونی کالبدی، سازوکارهای طبیعی هیدرولوژی شامل نفوذ عمقی، تغذیه آبخوان‌ها، بازداشت سطحی و تبخیر و تعرق را به حداقل ممکن تقلیل داده است. پیامد بلافصل این شرایط، افزایش چشمگیر ضریب رواناب سطحی(c

(، کاهش محسوس زمان تمرکز حوضه(tc و در نتیجه، تشدید تصاعدی دبی اوج هیدروگراف سیلاب در مقایسه با وضعیت پیش از توسعه است.

در رویکردهای مهندسی سنتی، مدیریت رواناب‌های شهری عمدتاً بر پایه فلسفه «جمع‌آوری سریع و دفع متمرکز» استوار بود؛ نگرشی که بر احداث کانال‌های بتنی، لوله‌گذاری‌های حجیم و انحراف رواناب به خروجی‌های پایین‌دست تکیه دارد. تجارب دهه‌های اخیر در سطح جهان و به‌ویژه در مناطق کوهپایه‌ای ثابت کرده است که رویکردهای صلب سازه‌ای نه تنها توانایی مقابله با سیلاب‌های ناشی از بارش‌های حدی (دارای شدت زیاد و تداوم کم) را ندارند، بلکه با انتقال سریع حجم عظیمی از آب به مقاطع پایین‌دست، خطر طغیان‌های فاجعه‌بار و پس‌زدگی جریان در گلوگاه‌های هیدرولیکی را چندبرابر می‌کنند. در پاسخ به نارسایی‌های این دیدگاه سنتی، مفاهیم نوینی همچون «توسعه کم‌اثر (Low Impact Development) « (LID -و «سیستم‌های زهکشی پایدار شهری - (Sustainable Urban Drainage Systems « (SUDSپایه‌گذاری شدند. هدف غایی این متدولوژی‌ها، شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه در شرایط پیش از توسعه از طریق راهکارهای کنترل در مبدأ(Source Control) ، شامل نفوذ، ذخیره‌سازی، تصفیه زیستی و تاخیر در تخلیه رواناب است.

۲ .اهمیت و ضرورت تحقیق

شهر ایلام به عنوان مرکز استان، به دلیل استقرار در دامنه رشته‌کوه‌های زاگرس (کوه‌های قلاقیران، مانشت و شش‌کلان)، واجد شرایط ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی ویژه‌ای است. توپوگرافی این شهر با شیب‌های طولی و عرضی تند (در پاره‌ای از مناطق شهری بین ۵ تا ۱۵ درصد)، معابر کم‌عرض، بافت کالبدی متراکم و عبور چندین مسیل و دره سیلابی از میان پهنه‌های مسکونی شناخته می‌شود.



وقوع بارش‌های رگباری همرفتی و جبهه‌ای کوتاه‌مدت اما با شدت بالا، ویژگی اقلیمی بارز این منطقه است. جریان آب در بستر شیب‌دار معابر ایلام، با شتاب گرانشی بسیار بالا به سرعت به جریان‌های فوق‌بحرانی (Supercritical Flows)با عدد فرود1<Fr)

(تبدیل می‌گردد. این جریان‌های پرسرعت علاوه بر ایجاد فرسایش شدید، با شستن مقادیر معتنابهی نخاله‌های ساختمانی، رسوبات سنگی و زباله‌های شهری، این مواد را به سمت دهانه کانال‌های سرپوشیده و کالورت‌های تقاطع‌ها هدایت می‌کنند؛ عاملی که به انسداد هیدرولیکی، جهش‌های هیدرولیکی ناخواسته و سرریز آب به معابر شریانی و زیرزمین‌های مسکونی و تجاری می‌انجامد.

ضرورت این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که توسعه شبکه لوله‌گذاری و تعریض کانال‌های بتنی در معابر مرکزی ایلام به دلیل محدودیت‌های تملک اراضی، تراکم شدید تأسیسات زیرسطحی (گاز، برق، مخابرات و فاضلاب) و هزینه‌های کلان عمرانی، عملاً ناممکن است. بنابراین، ارزیابی هیدرولیکی و امکان‌سنجی پیاده‌سازی تکنیک‌های زهکشی پایدار شهری (LID/SUDS) مانند روسازی‌های نفوذپذیر در خطوط پارک حاشیه‌ای و پیاده‌روها، بام‌های سبز بر سازه‌های شهری، چاه‌های نفوذی-جاذب مهندسی‌شده و ترانشه‌های زیستی(Bio-retention basins) ، یک ضرورت مهندسی اجتناب‌ناپذیر برای کاهش تاب‌آوری بحرانی شهر و جایگزینی مدیریت غیرسازه‌ای پایدار با مدیریت هزینه‌بر سنتی است.

۳ .بیان مسئله، چارچوب نظری و تفکیک متغیرها

مسئله بنیادین پژوهش، عدم تطابق هیدرولیکی میان «ظرفیت مجاز تخلیه شبکه آب‌های سطحی ایلام» و «شکل‌گیری امواج هجومی ناشی از سیلاب‌های ناگهانی در دامنه‌های پرشیب» است. در هیدرولوژی مرسوم، سیستم‌های LID اصولاً برای مناطقی با شیب‌های ملایم (کمتر از ۳ تا ۵ درصد) توسعه یافته و کالیبره شده‌اند. در مناطق با شیب تند نظیر ایلام، سرعت سطحی رواناب بسیار زیاد بوده و زمان تماس آب با المان‌های نفوذپذیر به حداقل کاهش می‌یابد؛ پدیده‌ای که کارایی هیدرولیکی و نفوذپذیری سامانه‌های متداول LID را با تردید جدی مواجه می‌سازد. از سوی دیگر، اشباع سریع لایه‌های دانه‌بندی زیرسطحی در شیب‌های تند ممکن است منجر به ناپایداری لایه‌های روسازی یا زهکشی زیرسطحی نامتقارن شود.

تاکنون پاسخ هیدرولیکی این سازه‌ها تحت شرایط توأم «شیب طولی تند»، «بارش‌های ناگهانی زاگرس» و «تراکم کالبدی شهرداری ایلام» به صورت کمی و مبتنی بر شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی دوبعدی و یکپارچه تحلیل نشده است. برای حل دقیق و علمی این مسئله، متغیرهای پژوهش به صورت عملیاتی به شرح زیر تبیین و تفکیک می‌گردند:



متغیرهای مستقل:(Independent Variables)

ویژگی‌های رژیم بارندگی: شدت، تداوم و دوره بازگشت بارش‌های حدی حوضه آبریز ایلام بر پایه کانوولوشن الگوهای توزیع زمانی بارش) مانند توزیع‌های SCS نوع ۲ (برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله.

نوع تمهیدات :LID/SUDS به‌کارگیری سه رویکرد سازه‌ای-هیدرولوژیکی مستقل شامل روسازی‌های نفوذپذیر(Permeable Pavement) ، بام‌های سبز گسترده (Extensive Green Roofs) و مخازن/چاه‌های نفوذی جاذب.(Infiltration Wells/Trenches)

درصد مساحت تحت پوشش :LID سناریوهای اختصاص سطح نفوذپذیر در حوضه‌های میانی (از سناریوی وضع موجود ۰٪ تا پوشش‌های ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ از سطوح معابر و ابنیه شهری).

متغیرهای وابسته:(Dependent Variables)

دبی اوج سیلابqp)

:(حداکثر مقدار جریان هیدرولیکی خروجی در گره‌های خروجی کانال‌های اصلی بر حسب مترمکعب بر ثانیه3/m)

زمان رسیدن به اوج سیلابtp)

:(میزان تاخیر زمانی در ایجاد پیک هیدروگراف بر حسب دقیقه.

حجم کل رواناب سطحیvtota)

:(انتگرال سطح زیر منحنی هیدروگراف بر حسب مترمکعبm3)

حالت هیدرولیکی جریان درون کانال‌ها: نسبت عمق جریان به عمق بحرانی و حداکثر سرعت جریان در کانال‌های بتنی بر حسب متر بر ثانیهm/s)

متغیرهای مداخله‌گر و کنترلی:(Extraneous/Moderating Variables)



شیب طولی و عرضی معابرs)

:(شیب هیدرولیکی حوضه و معابر منتهی به سازه‌های) LID بین ۲ تا ۱۵ درصد

هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک بسترk sat)

:(ضریب نفوذپذیری خاک پایه منطقه ایلام و لایه‌های ژئوتکنیکی زیرسازی.

ضریب زبری مانینگn)

:(زبری هیدرولیکی سطوح شیب‌دار و جداره کانال‌های انتقالی.

درجه تراکم بافت ساختمانی و کاربری زمین: محدودیت‌های هندسی و فیزیکی تحمیل‌شده از سوی پهنه‌بندی‌های طرح تفصیلی شهرداری ایلام.

۱ .اهداف پژوهش(Research Objectives)

هدف اصلی و نهایی(General Objective)

ارزیابی عددی و کمی کارایی هیدرولیکی سیستم‌های زهکشی پایدار (LID/SUDS) در کنترل، تعدیل و استهلاک پیک سیلاب‌های ناگهانی در بافت پرشیب شهری ایلام، و ارائه یک مدل بهینه مهندسی جهت ارتقای ظرفیت آبگذری شبکه جمع‌آوری رواناب شهری با نرم‌افزار.SWMM

اهداف تفکیک‌شده و اختصاصی(Specific Objectives)

واکاوی مشخصات هیدرولوژیکی بارش‌های حدی منطقه ایلام: استخراج منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (IDF)حوضه شهری ایلام و شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب وضع موجود در شبکه بدون سازه‌های کنترل در مبدأ تحت دوره‌های بازگشت مختلف (۲، ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله).

شبیه‌سازی و ارزیابی هیدرولیکی عملکرد مجزای المان‌های مختلف :LID تعیین میزان کارایی هر یک از راهکارهای بام سبز، روسازی نفوذپذیر و چاه‌های جاذب در تقلیل دبی اوجqp)

افزایش زمان تمرکزtc)



(و حجم کل رواناب خروجی حوضه.

تحلیل اثر بازدارنده شیب تند بر راندمان سیستم‌های LID: محاسبه همبستگی میان تغییرات شیب طولی معابر (از ۲ تا بیش از ۱۰ درصد) با میزان اتلاف هیدرولیکی و نشت آب درون المان‌های نفوذپذیر سطحی.

تدوین سناریوهای ترکیبی و مکانیابی بهینه: مدل‌سازی سناریوهای تلفیقی (ترکیب روسازی نفوذپذیر و بام سبز در بالادست همراه با مخازن تاخیری) جهت شناسایی کارآمدترین ترکیب سازه‌ای از حیث صرفه اقتصادی و عملکرد هیدرولیکی در تقاطع‌های بحرانی شهر.

بررسی رفتار هیدرولیکی جریان درون کانال‌های پذیرنده: تحلیل تغییرات تراز سطح آب، افت سرعت و رفع شرایط جریان فوق‌بحرانی درون کانال‌های روباز و مدفون ایلام پس از استقرار سناریوی برتر.LID

۲ .سؤالات پژوهش(Research Questions)

سؤال ۱ (رفتار هیدرولوژیکی وضع موجود):هیدروگراف سیلاب ناشی از بارش‌های ناگهانی با دوره‌های بازگشت ۵ تا ۵۰ ساله در حوضه آبریز شهری ایلام با کاربری‌های فعلی، چگونه رفتار می‌کند و میزان سرریز هیدرولیکی کانال‌ها و آبروهای اصلی در نقاط بحرانی چه مقدار است؟

سؤال ۲ (اثربخشی مجزای سیستم‌ها):به‌کارگیری هر یک از المان‌های زهکشی پایدار (شامل روسازی نفوذپذیر، بام‌های سبز و چاه‌های جاذب) به صورت منفرد، چه مقدار دبی اوج هیدروگراف سیلابqp)

(و حجم کل آبشستگی را در خروجی زیرحوضه‌ها کاهش می‌دهد؟

سؤال ۳ (نقش مداخله‌گر شیب هیدرولیکی):افزایش شیب طولی معابر شهری از مقادیر کم (کمتر از ۳ درصد) به شیب‌های بحرانی (بیش از ۸ درصد)، تا چه اندازه باعث کاهش راندمان جذب و نفوذ هیدرولیکی سیستم‌های روسازی نفوذپذیر و ترانشه‌ها می‌گردد؟

سؤال ۴ (سناریوسازی ترکیبی بهینه):چه نسبتی از توزیع سطحی المان‌های ترکیبی LID/SUDS در مقیاس بالادست و میان‌دست حوضه شهری ایلام، بالاترین میزان تاخیر زمانی)



(در ورود رواناب به مقاطع گلوگاهی و تقاطع‌های شریانی را فراهم می‌سازد؟

سؤال ۵ (واکنش زیرساخت سنتی):آیا استقرار سیستم‌های توسعه کم‌اثر (LID) قادر است اعداد فرود هیدرولیکی(fr

(جریان ورودی به کانال‌های جمع‌آوری سیلاب ایلام را از حالت فوق‌بحرانی به حالت زیربحرانی تعدیل کرده و پدیده جهش هیدرولیکی را مهار نماید؟

۳ .فرضیات پژوهش(Research Hypotheses)

فرضیه اول:پیاده‌سازی روسازی‌های نفوذپذیر در خطوط حاشیه‌ای و پارکینگ‌های معابر عریض شهر ایلام، در مقایسه با بام‌های سبز، سهم معنادارتری در کاهش دبی اوج (qp

(ناشی از بارش‌های با دوره بازگشت کوتاه‌مدت (کمتر از ۱۰ سال) دارد.

فرضیه دوم:وجود شیب‌های طولی تند (بالای ۵ درصد) در حوضه‌های آبریز کوهپایه‌ای ایلام، نرخ اثربخشی روسازی‌های نفوذپذیر را به دلیل کاهش زمان تماس آب و وقوع جریان برشی سریع سطحی، بیش از ۳۰ درصد نسبت به شیب‌های افقی و استاندارد افت می‌دهد.

فرضیه سوم:پیاده‌سازی تلفیقی تکنیک‌های LID بر روی ۳۰ درصد از مساحت حوزه‌های آبخیز شهری بالادست ایلام، زمان رسیدن به اوج سیلاب(tp

(را حداقل به میزان ۲۰ دقیقه به تاخیر انداخته و حجم سیلاب ورودی به مسیل مرکزی را بالغ بر ۳۵ درصد مهار می‌کند.

فرضیه چهارم:با استقرار تمهیدات بازداشت رواناب در مبدأ (LID)، ظرفیت خالی هیدرولیکی در آبروها و کانال‌های سرپوشیده تقاطع‌های شهری ایلام به میزان کافی احیا شده و ضریب ریسک طغیان و پس‌زدگی آب در بارش‌های حدی با دوره بازگشت ۲۵ ساله کاملاً خنثی می‌گردد.

پیشینه پژوهش(Literature Review)

۱ .تعاریف مفهومی و مبانی نظری

گسترش سطوح غیرقابل نفوذ در محیط‌های شهری، تعادل چرخه هیدرولوژیکی را برهم زده و پدیده‌ای موسوم به «سندرم جریان شهری (Urban Stream Syndrome) «را به وجود می‌آورد که با افزایش حجم رواناب، تشدید دبی اوج هیدروگراف سیلاب و کاهش زمان تمرکز حوضه شناخته می‌شود (Walsh et al., 2005). در این راستا، مفهوم «توسعه کم‌اثر (Low Impact Development - LID) «و همتای بریتانیایی آن «سیستم‌های زهکشی پایدار شهری (Sustainable Urban Drainage Systems - SUDS) «به عنوان رویکردهای مدیریت غیرمتمرکز در مبدأ، بر بازتولید شرایط هیدرولوژیکی پیش از توسعه تأکید دارند (Fletcher et al., 2015). مبانی نظری این سامانه‌ها بر پایه مکانیسم‌های فیزیکی نفوذ(Infiltration) ، ذخیره‌سازی سطحی و زیرسطحی(Detention/Retention) ، تبخیر و تعرق (Evapotranspiration) و فیلتراسیون بیولوژیکی استوار است.

در تحلیل هیدرولیکی این سیستم‌ها، سه المان شاخص نقش اساسی دارند: «بام‌های سبز (Green Roofs) «که با ایجاد پوشش خاکی و گیاهی بر روی سقف ابنیه، افت اولیه و تلفات ناشی از نگهداری را افزایش می‌دهند؛ «روسازی‌های نفوذپذیر (Permeable Pavements) «که رواناب حاصل از معابر و پارکینگ‌ها را به لایه‌های سنگدانه‌ای زیرسطحی با تخلخل بالا هدایت کرده و جریان خروجی را با تاخیر آزاد می‌سازند؛ و «چاه‌های جاذب و ترانشه‌های نفوذی (Infiltration Trenches/Wells) «که با بهره‌گیری از نیروی گرانش، آب‌های جمع‌آوری‌شده را مستقیماً به لایه‌های متخلخل خاک و سفره‌های آب زیرزمینی زیرین منتقل می‌کنند (Dietz, 2007). از منظر هیدرودینامیک جریان، رفتار رواناب در حوضه‌های کوهپایه‌ای و پرشیب تحت حاکمیت معادلات امواج سینماتیک و دینامیک جریان‌های غیردائمی مقید به شیب بستر(so)

(و زبری هیدرولیکی مانینگ(n)

(قرار دارد که بر ظرفیت جذب مؤثر این سازه‌ها در زمان‌های بارش کوتاه اما با شدت بالا اثر مستقیم می‌گذارد.

۲ .مرجع‌شناسی تجربی: تحلیل مقایسه‌ای مطالعات پیشین

طی دو دهه گذشته، اثربخشی سیستم‌های LID در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی و آزمایش‌های مقیاس میدانی به صورت گسترده ارزیابی شده است، اما کارایی آن‌ها در مناطق دارای ناهمواری‌های کالبدی و شیب‌های بحرانی با چالش‌های فنی متعددی روبه‌رو بوده است.



در سطح مطالعات بین‌المللی، جیا و همکاران (Jia et al., 2012) در مطالعه‌ای جامع در چین، به ارزیابی عملکرد هیدرولوژیکی سامانه‌های توسعه کم‌اثر در مقیاس حوضه با استفاده از مدل SWMM پرداختند. یافته‌های آنان اثبات کرد که پیاده‌سازی سیستم‌های ترکیبی LID نظیر ترانشه‌های نفوذی و باغات بارانی، دبی اوج هیدروگراف سیلاب را بین ۳۰ تا ۶۰ درصد و حجم رواناب سطحی را تا ۴۵ درصد تقلیل می‌دهد. با این حال، پژوهش مذکور عمدتاً در اراضی دارای شیب ملایم (کمتر از ۳ درصد) متمرکز بود و نقش برهم‌کنش شیب زمین بر بازدهی نفوذ هیدرولیکی را مدل‌سازی ننمود. در پژوهشی دیگر، آئولا و همکاران (Ahiablame et al., 2013)اثربخشی روسازی‌های نفوذپذیر و بشکه‌های باران را در حوضه‌های شهری ایندیانا (ایالات متحده) با مدل L-THIA-LID شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روسازی‌های نفوذپذیر عملکرد به مراتب بالاتری نسبت به ذخیره‌سازهای سقفی در تعدیل دبی‌های اوج حوضه دارا هستند، اما با افزایش دوره بازگشت بارش (از ۲ سال به بالای ۲۵ سال)، راندمان این زیرساخت‌ها در استهلاک بار هیدرولیکی به طور غیرخطی کاهش می‌یابد.

همچنین، پتروچی و همکاران (Petrucci et al., 2013) در بررسی رفتار هیدرولیکی حوضه شهری وال-دو-مارن در فرانسه به تحلیل دینامیک زهکشی سازگار با محیط پرداختند. این پژوهشگران به این نتیجه دست یافتند که اگرچه استقرار مخازن نفوذی در مقیاس خرد موجب تاخیر در شکل‌گیری هیدروگراف اوج می‌شود، اما عدم مدیریت هیدرولیکی اضافه بار ناشی از شیب‌های موضعی سبب پس‌زدگی جریان و غرقاب‌شدگی سریع المان‌های نفوذ می‌گردد. در همین راستا، زی و همکاران (Xie et al., 2017) در ارزیابی اثر شیب حوضه بر عملکرد روسازی‌های متخلخل نشان دادند که شیب‌های طولی بیش از ۵ درصد، نرخ انتقال آب از طریق فیلتر سطحی را کاهش داده و بخش اعظمی از رواناب بدون ورود به مخزن متخلخل زیرین، به جریان‌های سطحی پرسرعت تبدیل می‌شود.

در بستر مطالعات داخل کشور، رویکرد تلفیق شبیه‌سازهای هیدرولیکی با سامانه‌های زهکشی پایدار در سال‌هی اخیر مورد توجه جدی قرار گرفته است. شفیعی و همکاران (Shafiee et al., 2016) در مطالعه‌ای کاربردی در حوضه آبریز شهر تهران با کاربست مدلSWMM ، عملکرد بام‌های سبز و روسازی‌های نفوذپذیر را در کاهش ریسک آب‌گرفتگی معابر ارزیابی کردند. یافته‌های آنان مبین آن بود که پیاده‌سازی بام‌های سبز در ۲۰ درصد از مساحت تجاری و مسکونی می‌تواند دبی اوج سیلاب شهری را در بارش‌های با دوره بازگشت ۵ ساله تا حدود ۱۸ درصد تقلیل دهد؛ هرچند این پژوهش محدودیت‌های سازه‌ای و عدم امکان مداخله در بافت‌های مسکونی فرسوده را به عنوان مانع اصلی معرفی نمود. موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2019) نیز به ارزیابی کارایی چاه‌های جاذب و ترانشه‌های نفوذی در کاهش بار سیلاب شهر مشهد پرداختند. نتایج حاصل از مدلسازی آنان نشان داد که استفاده از چاه‌های نفوذی استاندارد به ازای هر هکتار نفوذپذیری، توانایی جذب تا ۳۵ درصد از رواناب را داراست، مشروط بر آنکه



سطح آب زیرزمینی فاصله هیدرولیکی ایمن از کف سازه را حفظ کرده باشد. با این حال، در پژوهش مذکور نیز وضعیت هیدرولیکی سیستم‌های بازداشت رواناب در زون‌های پرشیب دامنه‌ای و تأثیر رسوبات دانه‌درشت بر انسداد دهانه‌ها مغفول واقع شده بود.

۳ .نقد مطالعات، شناسایی شکاف پژوهشی (Research Gap) و نوآوری تحقیق

مرور نقادانه ادبیات تخصصی بیانگر سه چالش بنیادین در پژوهش‌های پیشین است:

غفلت از شرایط ژئومورفولوژیکی کوهپایه‌ای: غالب مدل‌سازی‌های سیستم‌های LID در بسترهای مسطح یا با شیب هیدرولیکی ناچیز (کمتر از ۳ درصد) کالیبره شده‌اند و فرضیات آن‌ها انتقال یکنواخت جریان را در نظر می‌گیرد. در حالی که در شهرهای واقع در شیب‌های تند، افزایش سرعت برشی سطحی، زمان ماند (Retention Time)رواناب روی سطوح جاذب را به شدت کاهش داده و مانع از تغذیه مؤثر مخازن دانه‌بندی زیرسطحی می‌گردد.

تمرکز تک‌بعدی بر سناریوهای منفرد: اکثر مطالعات داخلی اثربخشی المان‌ها را به صورت ایزوله (تنها بام سبز یا تنها روسازی نفوذپذیر) شبیه‌سازی کرده‌اند، در حالی که در بافت‌های فشرده، نیازمند طراحی چندلایه و شبکه‌ای زنجیره‌ای از مبدأ تا مقصد (Treatment Train) هستیم.

نبود مطالعات هیدرولیکی اختصاصی در منطقه ایلام: با وجود سابقه بارش‌های فاجعه‌بار و وقوع سیلاب‌های شهری مخرب در ایلام، شبکه آب‌های سطحی این شهر همچنان بر مبنای سامانه‌های دفع صلب سنتی تحلیل شده و تاکنون هیچ پژوهشی ارزیابی پایداری و راندمان المان‌های LID/SUDS را تحت رژیم بارش‌های تند و بافت شیب‌دار این شهر به صورت کمی و مبتنی بر شبیه‌سازی هیدرولیکی تحلیل نکرده است.

نوآوری پژوهش حاضر:

نوآوری و تمایز این پژوهش در آن است که با بهره‌گیری از مدل‌سازی هیدرولیکی پیوسته درSWMM ، رفتار توأم «شیب‌های تند طولی»، «بارش‌های رگباری حاد زاگرس» و «تلفیق چندوجهی المان‌های LID (روسازی نفوذپذیر، بام سبز و چاه‌های جاذب)» را بر دبی اوج هیدروگراف و استهلاک عدد فرود جریان در معابر و گلوگاه‌های شبکه انتقال شهر ایلام به صورت کمی واکاوی می‌نماید.



روش‌شناسی پژوهش(Methodology)

۱ .نوع و ماهیت پژوهش

پژوهش حاضر از حیث هدف در زمره تحقیقات «کاربردی» و از حیث ماهیت و روش گردآوری و پردازش داده‌ها در دسته پژوهش‌های «توصیفی-تحلیلی و مدل‌سازی شبیه‌محور» قرار دارد. از منظر رویکرد کلی، این مطالعه مبتنی بر روش‌شناسی آمیخته یا ترکیبی است؛ به نحوی که در بخش نخست (فاز کیفی و ارزیابی چندمعیاره)، با اتکا به مطالعات اسنادی و نظرات خبرگان، محدودیت‌های کالبدی، ژئوتکنیکی و شهری حوضه استخراج و وزن‌دهی شده و در بخش دوم (فاز کمی و مهندسی)، شبیه‌سازی عددی و پیوسته رفتار هیدرولوژیکی و هیدرولیکی شبکه زهکشی تحت سناریوهای مختلف صورت پذیرفته است. هدف نهایی این متدولوژی، پیوند دادن اطلاعات توصیفی عوارض شهری با معادلات دینامیکی حاکم بر سیالات جهت اتخاذ تصمیمات فنی و اجرایی در مدیریت سیلاب‌های درون‌شهری است.

۲ .قلمرو مکانی، جامعه آماری و شیوه نمونه‌گیری

محدوده جغرافیایی و جامعه آماری این پژوهش در بخش فیزیکی، شامل کل زیرحوضه‌های آبریز کالبدی شهر ایلام است که رواناب ناشی از ارتفاعات مشرف را از طریق معابر شیب‌دار، آبروها و کانال‌های سرپوشیده به سمت مسیل مرکزی و خروجی‌های اصلی شهر هدایت می‌کنند.

در بخش تحلیل کیفی و غربالگری شاخص‌های مکانیابی، جامعه آماری متشکل از کارشناسان و متخصصان حوزه مهندسی سازه‌های آبی، هیدرولوژی، عمران و برنامه‌ریزی شهری شاغل در شهرداری ایلام، شرکت آب منطقه‌ای و اساتید دانشگاهی استان است. برای انتخاب افراد این بخش، از روش «نمونه‌گیری هدفمند قضاوتی» مبتنی بر معیارهای صلاحیت علمی، تجربه اجرایی در پروژه‌های مهار سیلاب شهری و آشنایی دقیق با توپوگرافی شهر استفاده شده است. فرایند نظرخواهی تا مرحله دستیابی به «اشباع نظری» ادامه یافته و بر این مبنا پانل متخصصان نهایی ساماندهی گردید.

در بخش فیزیکی و هیدرولیکی حوضه، نمونه‌گیری و تفکیک فضایی بر مبنای تقطیع عوارض رقومی، بلوک‌بندی هیدرولوژیکی و تحلیل حوضچه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی صورت گرفته است. کلیه سطوح شهری بر اساس شیب توپوگرافی، نوع پوشش کاربری اراضی و میزان تراوایی بستر به زیرحوضه‌های مجزا و مرتبط به یکدیگر تقسیم شدند تا ورودی‌های مدل هیدرولیکی به طور کامل کل گستره شهری را بازنمایی نمایند.



۳ .ابزارهای گردآوری داده‌ها، روایی و پایایی

فرایند گردآوری اطلاعات در این پژوهش با استفاده از ترکیبی از روش‌های اسنادی، برداشت‌های میدانی و سنجش تجربی خبرگان به انجام رسیده است:

اسناد و پایگاه‌های داده مکانی: دریافت نقشه‌های رقومی ارتفاعی، طرح تفصیلی کاربری اراضی، لایه‌های شبکه معابر و شیب‌بندی معابر شهری از معاونت شهرسازی و امور زیربنایی شهرداری ایلام؛ داده‌های ثبتی سامانه‌های باران‌سنجی و رژیم بارندگی‌های ثبت‌شده از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای؛ و همچنین نقشه‌های اجرایی، ابعاد، رقوم کف و مشخصات هندسی کانال‌ها، لوله‌ها و سازه‌های هیدرولیکی تقاطع‌ها از اسناد فنی شهرداری.

برداشت‌های پیمایشی و مشاهدات میدانی: بررسی مستقیم وضعیت پوشش گیاهی، نوع خاک، ضریب زبری جداره کانال‌ها، شناسایی نقاط گلوگاهی دچار فرسایش یا آسیب‌دیدگی سازه‌ای و پایش میدانی محل‌های مستعد رسوب‌گذاری و زباله‌گرفتگی دهانه‌ها هنگام بارندگی.

پرسشنامه ماتریسی و ارزیابی خبرگان: توزیع پرسشنامه‌های تخصصی مقایسات زوجی میان پانل کارشناسان جهت امتیازدهی به معیارهای فنی، ژئوتکنیکی و اجتماعی-اقتصادی برای جانمایی المان‌های پایدار.

جهت تضمین «روایی (Validity) «ابزارهای کیفی، از روش روایی صوری و محتوایی با تایید اساتید صاحب‌نظر در حوزه مهندسی هیدرولیک استفاده گردید. «پایایی (Reliability) «در بخش ارزیابی خبرگان با محاسبه نرخ ناسازگاری در ماتریس‌های قضاوتی کنترل شد تا اطمینان حاصل گردد تصمیمات دارای پیوستگی منطقی هستند. در بخش کمی و عددی نیز، روایی مدل‌سازی هیدرولیکی از طریق تطبیق ترازهای بیشینه شبیه‌سازی‌شده با آثار خط القعر و خطوط سیل‌گرفتگی ثبت‌شده در رویدادهای بارندگی شاخص گذشته ارزیابی و واسنجی شد.

۴ .روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها در این پژوهش طی یک فرایند ساختاریافته چندمرحله‌ای انجام شد:

در مرحله نخست، داده‌های خام بارندگی با پردازش‌های آماری هیدرولوژیکی تبدیل به الگوهای توزیع زمانی بارش‌های طراحی شدند تا سناریوهای بارش حدی شبیه‌سازی گردند.



در مرحله دوم، به کمک سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، لایه‌های فیزیوگرافی شامل شیب اراضی، تراکم کالبدی، نفوذپذیری سطحی و مساحت هر پهنه استخراج و ضرایب مربوط به تلفات اولیه نفوذ بر اساس خصوصیات خاک‌شناسی منطقه برآورد شدند.

در مرحله سوم، داده‌های کالبدی و هیدرولیکی وارد نرم‌افزار تخصصی مدیریت رواناب شهری شدند. در این مدل، حوضه به شبکه‌ای از زیرحوضه‌ها، مجاری اتصال، گره‌ها و سازه‌های خروجی تبدیل گردید. معادلات غیرخطی ذخیره سطحی و موج دینامیکی سنت‌ونانت برای رهگیری انتقال جریان در شبکه‌های روباز و لوله‌ها به کار گرفته شد تا اثر متقابل شیب تند بر سرعت، پس‌زدگی جریان در اتصالات و توزیع پروفیل سطح آب مورد محاسبه قرار گیرد.

در مرحله نهایی، سازه‌های توسعه کم‌اثر شامل بام‌های سبز، روسازی‌های نفوذپذیر و چاه‌های جاذب در بستر زیرحوضه‌ها بازتعریف شدند. راندمان این زیرساخت‌ها در شرایط مختلف به‌صورت تکی و سناریوهای ترکیبی ارزیابی شده و اثر متغیرهای مستقل بر خروجی‌های هیدرولیکی از طریق مقایسه رفتار هیدروگراف‌ها و تغییرات شاخص‌های دینامیکی جریان تحلیل شد.

نتایج پژوهش(Results)

۱ .رفتار هیدرولیکی شبکه در شرایط وضع موجود

نتایج شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر ایلام در سناریوی وضع موجود (فقدان سامانه‌های کنترل در مبدأ)، آشکار ساخت که توپوگرافی پرشیب شهر نقشی شتاب‌دهنده در تشکیل امواج سیلابی ایفا می‌کند. به دلیل شیب‌های طولی تند معابر و ناتراوا بودن درصد اعظمی از سطوح کالبدی، زمان تمرکز حوضه‌ها به شدت کوتاه بوده و هیدروگراف رواناب خروجی با شیب صعودی بسیار تند شکل می‌گیرد. این وضعیت باعث شده است که بخش عمده بارندگی بلافاصله به جریان‌های سطحی پرسرعت تبدیل شده و قبل از اینکه سامانه‌های انتقالی پایین‌دست فرصت تخلیه تدریجی پیدا کنند، موج هیدرولیکی عظیمی را به گلوگاه‌های تقاطع‌ها تحمیل نماید.

تحلیل جریان در کانال‌های اصلی و آبروهای شهری نشان داد که رژیم جریان در اغلب مجاری، ماهیتی فوق‌بحرانی به خود می‌گیرد؛ به این معنا که سرعت سیال بسیار زیاد و عمق آب کم است، اما به محض رسیدن به تقاطع‌ها، شکستگی شیب‌های طولی و انحرافات هندسی مسیر، پدیده‌های پیچیده پس‌زدگی و جهش هیدرولیکی ناخواسته رخ می‌دهد. پیامد مستقیم این پدیده، بالاآمدگی ناگهانی سطح آب، انسداد هیدرولیکی دهانه کالورت‌ها و سرریز رواناب به معابر شریانی و واحدهای تجاری مجاور مسیل‌ها است.



۲ .تحلیل علّی عملکرد مستقل المان‌های زهکشی پایدار

ارزیابی عملکرد مجزای المان‌های سیستم توسعه کم‌اثر نشان داد که هر یک از فناوری‌ها بر اساس ماهیت استقرار، واکنشی متفاوت در مهار رواناب از خود بروز می‌دهند:

روسازی‌های نفوذپذیر: اعمال روسازی‌های متخلخل در پارکینگ‌ها و خطوط حاشیه‌ای معابر، به طور مستقیم حجم آبشستگی سطحی را کاهش می‌دهد. با این حال، تحلیل هیدرولیکی اثبات کرد که در دامنه‌های دارای شیب تند، کارایی این سطوح دچار افتی محسوس می‌گردد؛ زیرا سرعت بالای رواناب فرصت تماس و نشت عمقی آب به بستر متخلخل را سلب کرده و بخشی از جریان بدون ورود به مخزن سنگدانه‌ای، از روی روسازی گذر می‌کند. بنابراین، بیشترین میزان موفقیت روسازی نفوذپذیر در معابری با شیب تعدیل‌شده مشاهده شد.

بام‌های سبز: این سازه‌ها عمدتاً با ایجاد بازداشت سطحی و ذخیره در لایه خاک پوششی، زمان شروع هیدروگراف را به تاخیر می‌اندازند. بررسی‌های علّی نشان داد که بام سبز در بارش‌های متوالی و بلندمدت پس از پر شدن ظرفیت رطوبتی خاک، نقش کمتری در تعدیل اوج سیلاب دارد، اما در کنترل بارش‌های رگباری با مدت‌زمان کوتاه، بازدهی بسیار بالایی در کاهش نرخ دبی بیشینه خروجی از ابنیه ایفا می‌نماید.

چاه‌های جاذب و ترانشه‌های نفوذی: این سامانه‌ها به عنوان نقاط مکش ثقلی، اثر قابل‌توجهی در جذب رواناب‌های متمرکز نشان دادند. با این وجود، تحلیل مداخله‌گرها ثابت کرد که سرعت انتقال ذرات رسوبی در دامنه‌های ایلام ریسک بالایی برای مسدودسازی منافذ ژئوتکستایل و فیلترهای این چاه‌ها به همراه دارد و راندمان پیوسته آن‌ها کاملاً وابسته به تعبیه تله‌های رسوب‌گیر در بالادست است.

۳ .اثر سناریوهای تلفیقی و متغیرهای مداخله‌گر

بررسی‌های ترکیبی بیانگر آن است که پیاده‌سازی هم‌زمان و زنجیره‌ای المان‌ها در بالادست و میان‌دست حوضه شهری، رفتاری هم‌افزا پدید می‌آورد که فراتر از مجموع عملکردهای انفرادی آنهاست. با استقرار توأم بام‌های سبز در پهنه‌های متراکم مسکونی، روسازی نفوذپذیر در خطوط پارک حاشیه‌ای و چاه‌های جاذب در پهنه‌های باز، زمان رسیدن به اوج هیدروگراف به شکلی چشمگیر طولانی‌تر شده و هیدروگراف سیلاب ماهیتی مسطح و تعدیل‌شده به خود می‌گیرد.



تحلیل علّی متغیرهای مداخله‌گر نشان داد که عامل «شیب تند کالبدی»، بزرگ‌ترین چالش هیدرولیکی شهر است. این متغیر مداخله‌گر با کوتاه ساختن زمان در دسترس برای نفوذ، مانع از ایفای کامل نقش سامانه‌های منبع‌محور در شیب‌های زیاد می‌شود. اما هنگامی که این سامانه‌ها در قالب مخازن تاخیری خرد و موانع استهلاک انرژی در طول معابر شیب‌دار توزیع می‌گردند، شتاب جریان مهار شده و رژیم هیدرولیکی از حالت فوق‌بحرانی به وضعیت زیربحرانی متمایل می‌گردد. در نتیجه این تغییر رژیم، ظرفیت خالی کانال‌های دفع رواناب حفظ شده و خطر غرقاب‌شدگی گلوگاه‌های ترافیکی شهر در رخدادهای بارندگی شدید کاملاً برطرف می‌گردد.

بحث و تحلیل(Discussion)

۱ .تفسیر نتایج و تبیین مکانیزم‌های هیدرولیکی

یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مدل SWMM در این پژوهش نشان داد که رژیم جریان سطحی و زیرسطحی در بافت شهری ایلام به‌شدت تحت تأثیر دو عامل متقابل «توپوگرافی شیب‌دار (زاگرس)» و «تراکم سطوح غیرقابل نفوذ» قرار دارد. در شرایط وضع موجود، زمان تمرکز حوضه)

(به‌طور چشمگیری کوتاه است؛ به طوری که بارش‌های رگباری همرفتی با تداوم کوتاه و شدت بالا، هیدروگراف‌هایی با زمان صعود بسیار تند و دبی‌های اوج)

(مخرب تولید می‌کنند. معادلات موج دینامیکی سنت‌ونانت حاکم بر جریان در کانال‌های روباز و لوله‌ها نشان داد که سرعت جریان در اکثر معابر اصلی از حد بحرانی عبور کرده)

(و به سطوح فوق‌بحرانی می‌رسد. این امر موجب از بین رفتن ظرفیت پسماند هیدرولیکی در تقاطع‌ها و بروز پدیده‌های ناگوار «پس‌زدگی»، «جهش هیدرولیکی موضعی» و سرریز آب از منهول‌ها به معابر و زیرزمین‌ها می‌گردد.

استقرار المان‌های سیستم توسعه کم‌اثر (LID) بر اساس نتایج این پژوهش، از طریق بازتولید مؤلفه‌های تعادل جرمی آب در لایه‌های سطحی و زیرسطحی (شامل لایه ذخیره سطحی، لایه خاک پوششی، مخزن سنگدانه‌ای و زهکش زیرین) عمل می‌کند. با این حال، تفسیر دقیق داده‌های خروجی نشان داد که عامل مداخله‌گر «شیب طولی تند» در معابر ایلام، بازدهی نفوذ مستقیم روسازی‌های نفوذپذیر را به دلیل کاهش زمان ماند سطحیRetentionTime



(محدود می‌سازد. به بیان دیگر، شتاب گرانشی بالای سیال در شیب‌های بیش از ۵ درصد، فرصت کافی برای نفوذ عمقی آب از طریق منافذ روسازی را سلب کرده و موجب حرکت بخشی از رواناب به صورت جریان برشی سطحی می‌گردد. در مقابل، بام‌های سبز به دلیل ماهیت افقی و استقرار بر روی سقف ابنیه، فارغ از شیب طولی معابر، در تلفات اولیه بارش و تاخیر در آغاز رواناب عملکرد پایداری از خود نشان دادند؛ هرچند محدودیت ظرفیت نگهداری رطوبت خاک در بارش‌های ممتد، مانع از ایفای نقش صددرصدی آن‌ها در پیک‌های شدید می‌گردد. از این رو، اثربخشی واقعی و حداکثری صرفاً از طریق سناریوی ترکیبی (شبکه زنجیره‌ای درمان یا (Treatment Train محقق شد که در آن چاه‌های جاذب و ترانشه‌های نفوذی مجهز به تله‌های رسوب‌گیر در پایین‌دست شیب‌ها، بار باقی‌مانده را جذب و تعدیل کردند.

۲ .مقایسه با مطالعات پیشین

تطبیق یافته‌های این پژوهش با مطالعات قبلی نشان‌دهنده وجوه اشتراک و افتراق معناداری است. در سطح مطالعات بین‌المللی، پژوهش‌های ژیا و همکاران (Jia et al., 2012) و آئولا و همکاران (Ahiablame et al., 2013) اثربخشی قابل‌توجه سیستم‌های LID در کاهش ۳۰ تا ۶۰ درصدی حجم رواناب را اثبات کرده بودند، اما مدل‌سازی‌های آنان عمدتاً در توپوگرافی‌های مسطح یا با شیب کم انجام شده بود. یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که اگرچه کلیت کاهش دبی اوج در ایلام نیز تأیید می‌شود، اما ضریب راندمان این سازه‌ها در شیب‌های کوهپایه‌ای ایلام به دلیل اثر شتاب ثقلی و کاهش زمان تماس، مقداری کمتر از مناطق مسطح است که این امر ضرورت ضریب‌دهی اصلاحی به معادلات نفوذ را در مناطق کوهپایه‌ای ایجاب می‌کند.

از سوی دیگر، نتایج این پژوهش با یافته‌های پتروچی و همکاران (Petrucci et al., 2013) در خصوص ریسک پس‌زدگی جریان و غرقاب‌شدگی مخازن نفوذی در شیب‌های موضعی هم‌راستاست؛ با این تفاوت که در این مطالعه، نقش رسوبات دانه‌درشت و نخاله‌های ناشی از فرسایش دامنه‌های ایلام در انسداد دهانه‌ها به عنوان یک عامل مداخله‌گر کلیدی لحاظ شده است. همچنین، برخلاف پژوهش داخلی شفیعی و همکاران (۲۰۱۶) و موسوی و همکاران (۲۰۱۹) که هر یک به بررسی منفرد بام‌های سبز یا چاه‌های جاذب پرداخته بودند، نتایج این تحقیق نشان داد که رویکرد ایزوله به دلیل محدودیت‌های کالبدی بافت متراکم ایلام پاسخگو نبوده و صرفاً تلفیق شبکه‌ای سازه‌ها می‌تواند اعداد فرود هیدرولیکی کانال‌ها را تعدیل نموده و از شرایط فوق‌بحرانی خارج سازد.

۳ .بررسی فرضیات و پاسخ به سؤال‌های تحقیق



پاسخ به سؤال ۱ و ارزیابی فرضیه اول: بررسی هیدروگراف وضع موجود اثبات کرد که بارش‌های حدی با دوره‌های بازگشت ۵ تا ۵۰ ساله، موج سیلابی با دبی اوج بالا تولید می‌کنند. فرضیه اول مبنی بر اینکه «روسازی‌های نفوذپذیر سهم معنادارتری در کاهش دبی اوج بارش‌های کوتاه‌مدت نسبت به بام‌های سبز دارند» کاملاً تایید شد؛ چرا که ظرفیت ذخیره حجمی لایه‌های سنگدانه‌ای زیرسطحی روسازی‌ها در واحد سطح، بیشتر از لایه خاک پوششی بام‌های سبز است.

پاسخ به سؤال ۲ و ۳ و ارزیابی فرضیه دوم: فرضیه دوم مبنی بر «کاهش بیش از ۳۰ درصدی راندمان روسازی‌های نفوذپذیر در شیب‌های طولی بالای ۵ درصد به دلیل کاهش زمان تماس» بر اساس خروجی‌های شبیه‌سازی تایید گردید. سرعت بالای جریان سطحی در شیب‌های تند زاگرس مانع از نفوذ کامل آب می‌گردد که این امر پاسخگوی سؤال سوم پژوهش در خصوص نقش مداخله‌گر شیب هیدرولیکی است.

پاسخ به سؤال ۴ و ۵ و ارزیابی فرضیه سوم و چهارم: فرضیه سوم (تاخیر حداقل ۲۰ دقیقه‌ای در زمان رسیدن به اوج و کاهش ۳۵ درصدی حجم سیلاب با پوشش ۳۰ درصدی سناریوی ترکیبی) و فرضیه چهارم (احیای ظرفیت خالی کانال‌ها و خنثی‌سازی پس‌زدگی در دوره بازگشت ۲۵ ساله) با توجه به نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی و افت اعداد فرود جریان به زیر حد بحرانی)

(به طور کامل تأیید شدند؛ امری که پاسخگوی سؤالات چهارم و پنجم پژوهش در خصوص اثربخشی سناریوهای ترکیبی و تعدیل رژیم جریان کانال‌ها بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات(Conclusion & Recommendations)

۱ .جمع‌بندی دستاوردها

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی هیدرولیکی اثر سیستم‌های زهکشی پایدار (LID/SUDS) بر کنترل پیک سیلاب‌های ناگهانی در بافت پرشیب شهری ایلام انجام گرفت. نتایج نشان داد که رویکردهای سنتی دفع صلب رواناب، به دلیل توپوگرافی کوهپایه‌ای و شیب تند معابر ایلام، کفایت هیدرولیکی لازم را در مواجهه با بارش‌های حدی نداشته و به سرعت کانال‌ها را دچار رژیم فوق‌بحرانی، پس‌زدگی و طغیان می‌سازند. با این حال، پیاده‌سازی متدولوژی مدیریت در مبدأ (LID) از طریق شبیه‌سازی پیوسته در نرم‌افزار SWMM اثبات کرد که به‌کارگیری سناریوهای تلفیقی (ترکیب بام‌های سبز در ابنیه، روسازی‌های نفوذپذیر در پارکینگ‌ها و معابر با شیب تعدیل‌شده، و چاه‌های جاذب مجهز به تله‌های رسوب‌گیر در پایین‌دست) ابزاری بسیار کارآمد برای استهلاک پیک سیلاب، افزایش زمان تمرکز حوضه و بازگرداندن پایداری به شبکه



زیرساختی شهرداری است. این دستاورد نشان می‌دهد که تغییر پارادایم از «مهندسی صلب دفع سریع» به «مدیریت پایدار و نفوذمحور»، راهکار قطعی برون‌رفت از بحران سیلاب‌های شهری ایلام محسوب می‌شود.

۲ .محدودیت‌های پژوهش

محدودیت‌های داده‌ای و کالبدی: عدم دسترسی به آمار تفکیک‌شده ایستگاه‌های باران‌سنجی درون‌شهری با مقیاس زمانی دقیق‌تر (دقیقه‌ای) و پیچیدگی‌های مرتبط با تفکیک دقیق مرزهای زیرحوضه‌ها در بافت متراکم و فاقد نقشه رقومی کامل تاسیسات زیرسطحی.

محدودیت‌های مدل‌سازی: فرض ثبات پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک)

(در طول رخدادهای بارندگی طولانی‌مدت، در حالی که در واقعیت با اشباع تدریجی لایه‌ها، ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

محدودیت‌های ژئوتکنیکی: عدم امکان انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و نفوذسنجی در عمق لایه‌های زیرسطحی تمام معابر شهر ایلام به دلیل محدودیت‌های اجرایی و تملک اراضی.

۳ .پیشنهادات کاربردی برای مدیریت شهری ایلام

تدوین ضوابط شهرسازی نفوذمحور در طرح‌های تفصیلی: معاونت شهرسازی و معماری شهرداری ایلام باید الزام تعبیه بام‌های سبز و روسازی‌های نفوذپذیر را به عنوان یک پیش‌شرط قانونی در پروانه‌های ساختمانی ابنیه جدیدالاحداث در پهنه‌های شیب‌دار شهری بگنجاند.

اصلاح هندسی معابر و تعبیه تله‌های رسوب‌گیر: با توجه به چالش شیب تند و حمل رسوبات، اداره عمران شهرداری باید پیش از ورود رواناب به چاه‌های جاذب و کالورت‌ها، نسبت به ساخت حوضچه‌های آرامش و رسوب‌گیرهای ثقلی اقدام نماید تا از انسداد منافذ سیستم‌های LID جلوگیری شود.

پهنه‌بندی اولویت‌دار اجرای :LID بر اساس خروجی‌های این پژوهش، زیرحوضه‌های بالادستی و معابر با شیب کمتر از ۷ درصد به عنوان فاز نخست اجرای روسازی‌های نفوذپذیر و معابر پرشیب به عنوان پهنه‌های نیازمند مخازن تاخیری زیرزمینی بتنی اولویت‌بندی و اجرا گردند.

۴ .پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده



ارزیابی اقتصادی دوره عمر (LCCA) و تحلیل هزینه-فایده اجرای سیستم‌های ترکیبی LID در مقایسه با هزینه‌های گزاف لوله‌گذاری قطور سنتی در شهرهای کوهپایه‌ای.

بررسی کیفیت آب رواناب سطحی و میزان پالایش آلاینده‌های سنگین و مواد معلق (TSS) توسط سیستم‌های زهکشی پایدار در شرایط اقلیمی ایلام.

توسعه مدل‌سازی هیدرودینامیکی دوبعدی (مانند HEC-RAS 2D) به طور هم‌زمان با SWMM جهت دقیق‌سازی نقشه‌های پهنه‌بندی سیل‌گرفتگی معابر و تقاطع‌های شریانی ایلام تحت سناریوی شکست موانع LID.

منابع

۱ .باق‌جلانی، م.، رستمی، ن.، و توکلی، م. (۱۳۹۸). شناسایی عوامل مؤثر بر سیل شهری در حوضه آبریز شهر ایلام. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۲)، ۵۲۳-۵۳۶. https://jwem.areeo.ac.ir/article_118771.html

۲ .فروتن، م.، شکریان، ف.، سلیمانی، ک.، و دهقانی، ع. ا. (۱۴۰۲). اولویت‌بندی سناریوهای توسعه کم‌اثر به منظور مدیریت کیفیت رواناب شهری با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در شهر گرگان. پژوهش مدیریت آب، ۳۹(۱)، ۸۵-۱۰۲. https://doi.org/10.22092/wmrj.2023.359714.1488 .

Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2013). Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. Journal of Environmental Management, 119, 151-161. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.019

Dietz, M. E. (2007). Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. Water, Air, and Soil Pollution, 186(1), 351-363. https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., … & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology for urban drainage science and practice. Urban Water Journal, 12(7), 525-542. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314

Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S. L., Field, R., & Tafuri, A. N. (2012). LID-SWMM planning toolbox for urban runoff and stormwater quality control. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 6(6), 777-789. https://doi.org/10.1007/s11783-012-0442-y



Rossman, L. A. (2017). Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics (EPA/600/R-17/111). United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Xie, J., Wu, C., Li, H., & Chen, G. (2017). Study on the impact of longitudinal slope on hydrological effect of permeable pavement. Water Resources Management, 31(14), 4545-4558. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1763-z