

MDOI-01-2026.0144
MNR--1-A386DA

امکان‌سنجی فنی و هیدرولیکی احداث حوضچه‌های آرامش و مخازن تاخیری زیرزمینی بتنی جهت مهار رواناب و تغذیه مصنوعی آبخوان‌های شهری

محمد حسین رحیمی

کارشناس عمران شهرداری ایلام – ارشد سازه های آبی

چکیده

این پژوهش به امکان‌سنجی فنی و هیدرولیکی احداث حوضچه‌های آرامش و مخازن تاخیری زیرزمینی بتنی برای مهار رواناب شهری و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها می‌پردازد. با توسعه شهرها و افزایش سطوح نفوذناپذیر، بخش بزرگی از بارش به‌جای نفوذ به زمین، به‌سرعت وارد شبکه جمع‌آوری می‌شود و سبب افزایش دبی اوج، فرسایش و آبگرفتگی معابر می‌گردد. در مقابل، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها تراز آب زیرزمینی را پایین می‌آورد. ساختارهای زیرزمینی می‌توانند بخشی از حجم رواناب را موقتاً ذخیره کنند و با تأخیر در تخلیه، هم اوج سیل را کاهش دهند و هم فرصت نفوذ را فراهم سازند. روش پژوهش در سه مرحله انجام می‌شود: نخست، بررسی شرایط اقلیمی، توپوگرافی، خاک و سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی؛ دوم، طراحی هیدرولیکی حوضچه و مخزن شامل ابعاد، دریچه خروجی، حجم مؤثر و زمان تخلیه؛ و سوم، شبیه‌سازی رواناب با مدل بارش-رواناب و ارزیابی کاهش دبی اوج و حجم نفوذی. امکان‌سنجی فنی بر پایه ملاک‌های ایمنی سازه‌ای، قابلیت نگهداری و هزینه ساخت، و امکان‌سنجی هیدرولیکی بر پایه کارایی ذخیره و نفوذ سنجیده می‌شود. انتظار می‌رود کارایی ساختارها به نسبت حجم ذخیره به مساحت حوضه و نفوذپذیری خاک وابسته باشد. یافته‌های نهایی پس از اجرای مدل ارائه خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: حوضچه آرامش؛ مخزن تاخیری زیرزمینی؛ مهار رواناب شهری؛ تغذیه مصنوعی آبخوان؛ امکان‌سنجی هیدرولیکی



۱ .مقدمه

۱-۱ .معرفی کلی موضوع

شهرهای کوهپایه‌ای غرب ایران، از جمله ایلام، با دو پدیده همزمان روبه‌رو هستند که کمتر در کنار هم بررسی شده‌اند. نخست، افزایش سیلاب‌های شهری در اثر بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت. دوم، افت مداوم سطح آب زیرزمینی که منابع آب شرب و کشاورزی اطراف شهر را تهدید می‌کند. این دو پدیده ریشه مشترک دارند: گسترش سطوح نفوذناپذیر. آسفالت، بتن و بام‌های ساختمانی بخش بزرگی از بارش را از نفوذ به خاک بازمی‌دارند و آن را به‌سرعت به شبکه جمع‌آوری آب سطحی منتقل می‌کنند. نتیجه این فرایند، افزایش دبی اوج، کوتاه‌شدن زمان تمرکز و تخلیه ناگهانی آب به معابر است. در همان حال، آبی که باید به آبخوان برسد از دسترس خارج می‌شود.

در پاسخ به این وضعیت، دو رویکرد مهندسی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. رویکرد نخست، کنترل رواناب در مبدأ یا در مسیر است تا اوج سیل کاهش یابد. رویکرد دوم، مدیریت آب باران برای تغذیه مصنوعی آبخوان است. حوضچه‌های آرامش و مخازن تاخیری زیرزمینی بتنی در هر دو رویکرد جای می‌گیرند. این سازه‌ها رواناب را برای مدت محدودی نگه می‌دارند، سپس آن را با دبی کنترل‌شده رها می‌کنند یا اجازه می‌دهند در زمین نفوذ کند. مزیت آن‌ها نسبت به حوضچه‌های سطحی، صرفه‌جویی در فضای شهری و کاهش تبخیر است.

با این حال، کاربرد این سازه‌ها در شرایط ایران هنوز به‌صورت نظام‌مند بررسی نشده است. طراحی بیشتر بر اساس تجربه یا الگوهای عمومی انجام می‌شود، در حالی که خاک، شیب، ترازهای آب زیرزمینی و الگوی بارش هر شهر ویژگی‌های خاص خود را دارند.

۱-۲ .اهمیت و ضرورت تحقیق

ضرورت این پژوهش از سه جنبه قابل بیان است. از جنبه فنی، امکان‌سنجی هیدرولیکی این سازه‌ها باید پیش از اجرا انجام شود، زیرا سازه زیرزمینی بتنی هزینه بالایی دارد و اشتباه در طراحی آن جبران‌ناپذیر است. اگر حجم ذخیره، قطر دریچه یا زمان تخلیه نادرست تعیین شود، سازه یا زود پر می‌شود و کارایی خود را از دست می‌دهد، یا در بارش‌های بزرگ هیچ کمکی نمی‌کند.

از جنبه منابع آب، تغذیه مصنوعی آبخوان در شهرهایی که آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب‌اند، اهمیت راهبردی دارد. اما تغذیه موفق، به کیفیت آب ورودی و ظرفیت نفوذ خاک وابسته است. آب رواناب شهری حامل روغن، فلزات سنگین و ذرات معلق است. بدون پیش‌تصفیه، نفوذ این آب می‌تواند کیفیت آبخوان را تهدید کند. بنابراین امکان‌سنجی فنی باید کیفیت را هم در نظر بگیرد و تنها به حجم توجه نکند.

از جنبه مدیریت شهری، بسیاری از پروژه‌های آب‌های سطحی به‌صورت جزیره‌ای و بدون پیوند با برنامه آبخوان اجرا می‌شوند. این پژوهش می‌کوشد دو هدف را در یک طراحی واحد بسنجد، تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند سرمایه‌گذاری را بر پایه چند کارکرد توجیه کنند.

۱-۳ .بیان مسئله

مسئله اصلی این پژوهش آن است که آیا حوضچه‌های آرامش و مخازن تاخیری زیرزمینی بتنی، در شرایط هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی ایلام، می‌توانند هم اوج رواناب را به‌طور مؤثر کاهش دهند و هم حجم قابل توجهی را به آبخوان منتقل کنند، و اگر بله، این کارکرد به چه عواملی وابسته است؟

این مسئله از چند جهت دقیق‌تر از یک پرسش کلی درباره «مفید بودن» سازه است. نخست، دو هدف مهار سیل و تغذیه آبخوان گاهی متضادند. سازه‌ای که برای تأخیر زیاد طراحی شود، ممکن است زمان کافی برای نفوذ داشته باشد اما در بارش شدید به‌دلیل پرشدگی، کمکی به کاهش اوج نکند. برعکس، سازه‌ای که برای کاهش اوج بزرگ ساخته شود، ممکن است بیشتر آب را به‌سرعت تخلیه کند و فرصت نفوذ را از بین ببرد. دوم، کارایی هیدرولیکی این سازه‌ها به نسبت حجم ذخیره به مساحت حوضه بالادست وابسته است، اما این نسبت در شهرهای کوهپایه‌ای با شیب زیاد و بارش متمرکز متفاوت از شهرهای دشتی رفتار می‌کند. سوم، نفوذ آب به زمین با نفوذپذیری خاک، سطح آب زیرزمینی و امکان بالا آمدن آب در فصل بارش محدود می‌شود. اگر ترازِ آب زیرزمینی نزدیک کف سازه باشد، نفوذ عملاً متوقف می‌شود و سازه به یک مخزن نگه‌دارنده ساده تبدیل می‌شود.

بنابراین مسئله پژوهش، یک سؤال تک‌عاملی نیست. کارایی سازه به تعامل چند متغیر بستگی دارد و باید این تعامل در طراحی لحاظ شود.

۱-۳-۱ .تعریف متغیرها

متغیرهای مستقل عواملی هستند که پژوهشگر آن‌ها را در طراحی کنترل و تغییر می‌دهد. این متغیرها عبارت‌اند از: حجم مؤثر ذخیره سازه، که به‌صورت نسبت حجم به مساحت

حوضه بالادست بیان می‌شود؛ قطر یا دبی خروجی دریچه کنترل؛ و نوع سطح نفوذ کف سازه (کف بتنی کامل یا کف دارای بخش نفوذپذیر). متغیر مستقل چهارم، دوره بازگشت بارش طراحی است که شدت ورودی را تعیین می‌کند.

متغیرهای وابسته نتایجی هستند که اثر متغیرهای مستقل را نشان می‌دهند: درصد کاهش دبی اوج رواناب در خروجی شبکه؛ حجم آبی که به آبخوان نفوذ می‌کند؛ مدت زمانی که سازه پر است؛ و کیفیت آب خروجی از نظر غلظت ذرات معلق.

متغیرهای مداخله‌گر عواملی هستند که بر رابطه متغیرهای مستقل و وابسته اثر دارند اما موضوع اصلی بررسی نیستند، و باید کنترل یا گزارش شوند. این عوامل شامل ضریب نفوذپذیری خاک، عمق سطح آب زیرزمینی نسبت به کف سازه، شیب سطح حوضه، ضریب رواناب سطوح شهری، و تراکم ساختمانی است. بخشی از این عوامل در هر محدوده ثابت است، اما برخی مانند سطح آب زیرزمینی در فصول مختلف تغییر می‌کند و باید به‌صورت سناریو لحاظ شود.

تمایز این متغیرها از آن جهت مهم است که اگر عامل مداخله‌گر مانند نفوذپذیری خاک کنترل نشود، کارایی منسوب به سازه ممکن است در واقع ناشی از ویژگی زمین باشد. این خطای تفسیر، یکی از دلایل اصلی ناهمخوانی نتایج پژوهش‌های مشابه است.

۲ .اهداف، سؤال‌ها و فرضیات

۲-۱ .اهداف پژوهش

هدف اصلی: ارزیابی امکان‌سنجی فنی و هیدرولیکی حوضچه‌های آرامش و مخازن تاخیری زیرزمینی بتنی برای مهار رواناب و تغذیه آبخوان در محدوده شهری ایلام.

اهداف فرعی:

۱ .تعیین ظرفیت حجمی و ابعاد هیدرولیکی بهینه برای سازه، بر پایه داده‌های بارش و هیدرولوژی محدوده مطالعاتی.

۲ .سنجش میزان کاهش دبی اوج رواناب در خروجی شبکه، در سناریوهای مختلف حجم و دوره بازگشت بارش.

۳ .برآورد حجم آب نفوذی به آبخوان و تعیین سهم آن از کل حجم ذخیره‌شده، با توجه به نفوذپذیری خاک و عمق آب زیرزمینی.

۴ .مقایسه کارایی دو هدف مهار سیل و تغذیه آبخوان، و تعیین تعادل بهینه میان آن‌ها در طراحی دریچه خروجی.



۵ .ارزیابی ملاک‌های فنی شامل ایمنی سازه‌ای، امکان دسترسی برای تعمیر و نگهداری، و هزینه ساخت، برای تعیین امکان‌پذیری اجرا.

۶ .بررسی تأثیر کیفیت رواناب ورودی بر امکان تغذیه آبخوان، از طریق سنجش ذرات معلق و آلاینده‌های شاخص.

۲-۲ .سؤال‌های پژوهش

۱ .با فرض مشخص بودن شرایط بارش و خاک، حجم ذخیره و قطر دریچه خروجی چه مقادیری بیشترین کاهش دبی اوج را همراه با حفظ حجم کافی برای نفوذ فراهم می‌کنند؟

۲ .کاهش دبی اوج در اثر سازه تا چه حد به دوره بازگشت بارش طراحی وابسته است، و آیا این وابستگی در بارش‌های کم‌شدت و زیاد یکسان است؟

۳ .نفوذ آب به آبخوان تا چه اندازه به نفوذپذیری خاک و عمق سطح آب زیرزمینی نسبت به کف سازه محدود می‌شود؟

۴ .آیا کف بتنی کامل با کف دارای بخش نفوذپذیر تفاوت معنادار در حجم نفوذی و مدت پرشدگی ایجاد می‌کنند؟

۵ .کیفیت رواناب ورودی، به‌ویژه غلظت ذرات معلق، چه تأثیری بر امکان نفوذ پایدار و عمر مفید سازه دارد؟

۶ .کدام یک از متغیرهای مستقل، سهم بیشتری در تغییرات کارایی سازه دارد، و آیا این سهم با تغییر متغیرهای مداخله‌گر پایدار می‌ماند؟

۲-۳ .فرضیات پژوهش

H1(کارایی حجمی): افزایش نسبت حجم مؤثر ذخیره به مساحت حوضه بالادست، کاهش دبی اوج را افزایش می‌دهد، اما این افزایش در نسبت‌های بالاتر کاهش می‌یابد؛ یعنی رابطه کارایی و حجم غیرخطی و دارای نقطه بازده کاهشی است.

H2(تعادل دریچه): کاهش قطر دریچه خروجی، کاهش دبی اوج را بیشتر می‌کند، اما همزمان زمان ماندگاری آب در سازه را افزایش می‌دهد و احتمال پرشدگی مکرر را بالا می‌برد. این فرضیه بر پایه وجود تعادل میان مهار سیل و فرصت نفوذ است.

H3(وابستگی به دوره بازگشت): اثر سازه بر کاهش دبی اوج در بارش‌های با دوره بازگشت کوتاه‌تر، نسبت به بارش‌های با دوره بازگشت بلندتر، بیشتر است، زیرا در بارش‌های بزرگ‌تر حجم رواناب از ظرفیت ذخیره فراتر می‌رود.

H4(نفوذپذیری و حجم نفوذی): حجم آب نفوذی به آبخوان، بیش از آن‌که به حجم ذخیره وابسته باشد، به نفوذپذیری خاک و فاصله عمودی کف سازه تا سطح آب زیرزمینی وابسته است. هرگاه این فاصله کمتر از یک آستانه باشد، نفوذ عملاً متوقف می‌شود.

H5(کف نفوذپذیر): کف دارای بخش نفوذپذیر، نسبت به کف بتنی کامل، حجم نفوذی بیشتری تولید می‌کند، اما این مزیت در خاک‌های با نفوذپذیری پایین ناچیز است.

H6(کیفیت رواناب): غلظت بالای ذرات معلق در رواناب ورودی، نفوذپذیری کف را در بازه زمانی طولانی کاهش می‌دهد و در نتیجه حجم نفوذی تجمعی را پایین می‌آورد، بدون آنکه کارایی مهار اوج را به‌طور معنادار تغییر دهد.

H7(سهم نسبی متغیرها): در محدوده مطالعاتی، حجم مؤثر ذخیره سهم بیشتری در تغییرات کاهش دبی اوج دارد تا قطر دریچه، اما این برتری با تغییر دوره بازگشت بارش کاهش می‌یابد.

H8(امکان‌سنجی فنی): طراحی سازه با حجم و قطر دریچه‌ای که بیشترین کارایی را دارد، از نظر ایمنی سازه‌ای و دسترسی نگهداری در محدوده‌ی قابل‌قبول قرار دارد، اما هزینه ساخت آن در شیب‌های بالای محدوده، به‌طور معناداری افزایش می‌یابد.

۲-۴ .نسبت میان اهداف، سؤال‌ها و فرضیات

اهداف یک تا سه به‌ترتیب به سؤال‌های یک تا سه و فرضیات H1 تا H4 مربوطاند. هدف چهارم، که به تعادل مهار و نفوذ می‌پردازد، با سؤال‌های یک و چهار و فرضیه H2 پیوند دارد. هدف پنجم به امکان‌سنجی فنی و سؤال‌های پنجم و ششم و فرضیه H8 ارتباط دارد. هدف ششم، که کیفیت را بررسی می‌کند، سؤال پنجم و فرضیه H6 را پوشش می‌دهد. فرضیه H5 و H7 نیز به‌ترتیب به سؤال چهارم و ششم پاسخ می‌دهند.

یادآوری: این فرضیات پیش از اجرای مدل تدوین شده‌اند و هیچ‌یک تأیید یا رد نشده است. آستانه‌های عددی مانند نقطه بازده کاهشی یا حداقل فاصله عمودی کف تا آب زیرزمینی باید از داده‌های طراحی و آزمون حساسیت به‌دست آیند و نه از پیش فرض شوند.

۳ .پیشینه پژوهش

هشدار: منابع خارجی را از حافظه نوشته‌ام و آنلاین بررسی نکرده‌ام. من به ابزار جست‌وجو دسترسی ندارم و جزئیات روش و جامعه را فقط برای مواردی آورده‌ام که از آن‌ها مطمئنم. برای مطالعات داخلی نمی‌توانم نام یا یافته بسازم، پس جایگاهشان را با کروشه خالی گذاشته‌ام. هر ارجاع را پیش از تحویل در Scopus یا SID بررسی کنید.

۳-۱ .تعریف مفاهیم کلیدی

مخزن تأخیری سازه‌ای است که بخشی از رواناب را موقتاً ذخیره می‌کند و با دبی کنترل‌شده تخلیه می‌کند تا دبی اوج پایین‌دست کاهش یابد .(Mays, 2001) حوضچه آرامش در ادبیات هیدرولیک، سازه‌ای برای مستهلک‌کردن انرژی جریان در پایین‌دست سرریز یا خروجی است .(Chow, 1959) در این پژوهش، مفهوم آن به حوضچه‌ای گسترش یافته که جریان ورودی را آرام می‌کند و رسوب آن را ته‌نشین می‌سازد. تغذیه مصنوعی آبخوان مجموعه‌ای از روش‌های مهندسی است که با آن آب به‌صورت عمدی به آبخوان افزوده می‌شود .(Bouwer, 2002) امکان‌سنجی هیدرولیکی سنجش این است که سازه با ابعاد و دریچه‌ای معین، در بارش طراحی، کارکرد مورد نظر را ارائه می‌دهد یا نه. امکان‌سنجی فنی ملاک‌هایی مانند ایمنی سازه‌ای، نگهداری و هزینه را در بر می‌گیرد.

۳-۲ .مبانی نظری

مبنای نظری پژوهش حاضر سه بخش دارد. نخست، نظریه بارش-رواناب است. افزایش سطوح نفوذناپذیر ضریب رواناب را بالا می‌برد و زمان تمرکز را کوتاه می‌کند. این امر هیدروگراف را تیزتر می‌سازد .(Chow et al., 1988) مخزن تأخیری با معادله پیوستگی ذخیره عمل می‌کند. تغییر حجم ذخیره برابر تفاضل ورودی و خروجی است و خروجی تابعی از تراز آب و مشخصات دریچه است. بنابراین کاهش اوج به نسبت حجم ذخیره به حجم هیدروگراف ورودی بستگی دارد.

دوم، نظریه جریان در محیط متخلخل است. نفوذ آب به آبخوان تابع قانون دارسی و رسانایی هیدرولیکی خاک است. این نفوذ با عمق منطقه غیراشباع محدود می‌شود، زیرا نزدیکی سطح آب زیرزمینی به کف سازه گرادیان را کاهش می‌دهد .(Bouwer, 2002) سوم، چارچوب مدیریت یکپارچه آب شهری است که زهکشی شهری را همراه با منابع آب بررسی می‌کند. مفاهیمی مانند توسعه کم‌اثر و زهکشی پایدار شهری در این چارچوب جای می‌گیرند .(Fletcher et al., 2015) این چارچوب توضیح می‌دهد که مهار سیل و تغذیه آبخوان را می‌توان در یک طراحی واحد بررسی کرد.

۳-۳ .مرور تجربی

الف) مهار رواناب و تغییر اقلیم Arnbjerg-Nielsen .و همکاران (۲۰۱۳) پژوهش‌های مربوط به اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی و شبکه‌های زهکشی شهری را مرور کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که شدت بارش‌های کوتاه‌مدت در بسیاری از مناطق افزایش می‌یابد و

ظرفیت شبکه‌های موجود را به چالش می‌کشد. این یافته ضرورت ذخیره موقت را نشان می‌دهد، اما درباره کارایی یک سازه مشخص در یک شهر کوهپایه‌ای چیزی نمی‌گوید.

ب) تغذیه مصنوعی Bouwer (2002) .روش‌های تغذیه سطحی و چاهی را از نظر هیدروژئولوژی و مهندسی مقایسه کرد. او نشان داد که گرفتگی لایه نفوذ، اصلی‌ترین محدودیت عملیاتی است و کیفیت آب ورودی در آن تعیین‌کننده است Dillon (2005) . در مرور خود، ظرفیت این روش‌ها برای مدیریت آینده آبخوان‌ها را بررسی کرد Dillon .و همکاران (۲۰۱۹) نیز پیشرفت جهانی تغذیه مدیریت‌شده آبخوان را در شصت سال گذشته بازبینی کردند. هر سه پژوهش، مرور مفهومی‌اند و بر تغذیه با آب‌های متنوع تمرکز دارند، نه بر مخازن بتنی زیرزمینی شهری با کارکرد دوگانه.

ج) کیفیت رواناب Pitt .و همکاران (۱۹۹۹) پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی از روش‌های نفوذ آب باران را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که آلاینده‌ها در رواناب شهری وجود دارند و بخشی از آن‌ها خطر بیشتری برای آبخوان دارند. این یافته مبنایی برای فرضیه مربوط به ذرات معلق و عمر مفید سازه است.

د) پژوهش‌های داخلی. پژوهش‌های داخلی دو دسته‌اند: مطالعات مربوط به پهنه‌بندی خطر سیل شهری، و مطالعات مربوط به تغذیه مصنوعی و سازه‌های آبخیزداری. [نویسندگان، سال] با [روش و ابزار] در [محدوده مطالعاتی] به [یافته اصلی] رسیدند. [نویسندگان، سال] نیز با [روش] در [محدوده] نتیجه گرفتند که [یافته]. این بخش را باید با مقاله‌های واقعی از SID، نورمگز یا مگیران پر کرد. گزارش‌شده که مقاله داوند و همکاران (۱۴۰۰) درباره آمادگی سیل در ایلام است، اما شناسنامه کامل آن را ندارم.

۳-۴ .تحلیل تطبیقی

مرورها در یک نقطه همگرا هستند: افزایش رواناب شهری واقعی است و تغذیه مصنوعی ابزار عملی برای جبران آن است. اما در سه نکته اختلاف یا خلأ دیده می‌شود. نخست، پژوهش‌های مربوط به کنترل سیل بر کاهش اوج تمرکز دارند و حجم نفوذی را نادیده می‌گیرند. پژوهش‌های تغذیه نیز از اثر آن بر اوج سیل چشم‌پوشی می‌کنند. دوم، اغلب مطالعات تغذیه به شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی خاص خود وابسته‌اند و تعمیم آن‌ها به شهر کوهپایه‌ای با شیب زیاد و بارش متمرکز مشخص نیست. سوم، کیفیت آب ورودی معمولاً جداگانه بررسی می‌شود، نه به‌عنوان متغیر مداخله‌گر در کارایی هیدرولیکی.

۳-۵ .نقد و جمع‌بندی

مرورهای یادشده ارزش مفهومی بالایی دارند، اما محدودیت‌هایی نیز دارند. بیشتر آن‌ها مرور مفهومی‌اند و داده‌ای ندارند که بتوان آن را به سازه مشخص در ایلام نسبت داد. آستانه‌هایی مانند حداقل فاصله کف تا آب زیرزمینی یا نقطه بازده کاهشی حجم از ادبیات به‌دست نمی‌آید و باید از داده محلی استخراج شود. افزون بر این، مطالعات داخلی در این حوزه کم‌اند و به نظر می‌رسد کارکرد دوگانه را در یک طراحی واحد نسنجیده‌اند. این ادعا باید پس از جست‌وجوی نظام‌مند تأیید شود.

۳-۶ .شکاف پژوهشی و نوآوری

شکاف پژوهش را می‌توان در سه نقطه خلاصه کرد. نخست، نبود ارزیابی هم‌زمان کاهش اوج و حجم نفوذی در یک سازه زیرزمینی بتنی. دوم، نبود داده تطبیقی برای شهر کوهپایه‌ای ایلام. سوم، کم‌توجهی به کیفیت رواناب به‌عنوان متغیر مداخله‌گر. پژوهش حاضر این سه نقطه را در یک چارچوب شبیه‌سازی هیدرولیکی کنار هم می‌آورد و هر دو کارکرد را با متغیرهای مستقل یکسان می‌سنجد. نوآوری آن در همین ترکیب و در بومی‌سازی آستانه‌های طراحی است، نه در ابداع یک سازه تازه.

روش‌شناسی

یادآوری: این بخش طرح اجرای پژوهش را گزارش می‌کند. هنوز داده‌ای گردآوری نشده و مدلی اجرا نشده است. هر جا اجرا با طرح تفاوت کرد، متن باید مطابق اجرای واقعی اصلاح شود. نام نرم‌افزارها را پیشنهادی بنویسید و با ابزار واقعی خودتان جایگزین کنید.

نوع تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی است، زیرا نتیجه آن به تصمیم‌گیری درباره طراحی و مکان‌یابی سازه‌ها در شهر ایلام کمک می‌کند. از نظر ماهیت و روش، توصیفی-تحلیلی با رویکرد شبیه‌سازی عددی است. بخش اصلی آن کمی است و بر خروجی مدل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی تکیه دارد. بخش کیفی محدود است و فقط به داوری کارشناسی درباره ملاک‌های فنی مربوط می‌شود. بنابراین پژوهش را باید ترکیبی با غلبه کمی نامید. پژوهش آزمایشی نیست، چون سازه‌ای ساخته نمی‌شود و سناریوها در مدل مقایسه می‌شوند.

جامعه آماری و نمونه‌گیری

جامعه آماری، زیرحوضه‌های شهری ایلام است که رواناب آن‌ها به شبکه جمع‌آوری آب سطحی وارد می‌شود. واحد تحلیل، یک زیرحوضه همراه با محل پیشنهادی سازه است، نه



یک فرد. نمونه‌گیری هدفمند است. زیرحوضه‌ها بر پایه سه معیار انتخاب می‌شوند: سابقه آبگرفتگی معابر، وجود فضای قابل استفاده برای احداث سازه زیرزمینی، و وجود داده کافی درباره خاک یا آب زیرزمینی. هدف، پوشش دادن تنوع شیب، تراکم ساختمانی و نوع خاک است تا نتایج به یک زیرحوضه خاص محدود نشود. تعداد نمونه به دسترسی به داده و مجوز میدانی بستگی دارد و در گزارش نهایی باید صریح اعلام شود.

برای بخش کیفی، گروه خبرگان شامل مهندسان آب، ژئوتکنیک و مدیریت شهری انتخاب می‌شوند. نمونه‌گیری این گروه نیز هدفمند و بر پایه تجربه اجرایی در پروژه‌های زهکشی یا تغذیه است. اندازه گروه کوچک است، چون هدف آن تعیین وزن و داوری فنی است، نه تعمیم آماری.

ابزار گردآوری داده‌ها

داده‌ها از سه مسیر گردآوری می‌شوند.

اسناد و داده‌های موجود. سری بارش و منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی از سازمان هواشناسی، نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش سطح از شهرداری، طرح شبکه جمع‌آوری آب سطحی از مدیریت شهری، ترازهای آب زیرزمینی از شرکت آب منطقه‌ای، و مدل رقومی ارتفاعی از منابع رسمی نقشه‌برداری. کیفیت و بازه زمانی هر سند باید در گزارش نهایی ثبت شود.

مشاهده و اندازه‌گیری میدانی. آزمون نفوذپذیری خاک با روش‌های استاندارد در محل‌های پیشنهادی، حفر گمانه یا استفاده از گزارش‌های ژئوتکنیک برای تعیین بافت خاک و عمق لایه‌های محدودکننده، و برداشت نمونه رواناب در بارش‌های واقعی برای سنجش ذرات معلق و آلاینده‌های شاخص. اندازه‌گیری کیفیت در آزمایشگاه مجاز و با روش استاندارد انجام می‌شود.

ابزار کیفی. فرم ساختاریافته داوری کارشناسی، که در آن خبرگان اهمیت ملاک‌های ایمنی سازه‌ای، دسترسی نگهداری و هزینه را رتبه‌بندی می‌کنند. این ابزار پرسشنامه عمومی نیست و فقط برای گروه خبرگان به کار می‌رود. مصاحبه گسترده انجام نمی‌شود.

طراحی مدل و سناریوها

برای شبیه‌سازی بارش-رواناب از یک مدل هیدرولوژیکی-هیدرولیکی شبکه زهکشی شهری استفاده می‌شود. مدل پیشنهادی SWMM است، اما نرم‌افزار نهایی باید در گزارش ثبت شود. مدل، هر زیرحوضه را با مساحت، شیب، درصد سطح نفوذناپذیر و ضریب زبری تعریف می‌کند. سازه به‌صورت یک گره ذخیره با منحنی تراز-حجم، دریچه خروجی و مسیر نفوذ



تعریف می‌شود. نفوذ کف بر پایه قانون دارسی و رسانایی هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده محاسبه می‌شود و با عمق سطح آب زیرزمینی محدود می‌گردد. اگر پاسخ آبخوان مدنظر باشد، یک مدل ساده آب زیرزمینی نیز به آن متصل می‌شود.

سناریوها بر پایه اصل تغییر یک عامل در هر مرحله ساخته می‌شوند. هر بار فقط یکی از متغیرهای مستقل، یعنی نسبت حجم ذخیره، قطر دریچه، نوع کف یا دوره بازگشت، تغییر می‌کند و بقیه ثابت می‌مانند. متغیرهای مداخله‌گر، یعنی نفوذپذیری خاک، عمق آب زیرزمینی، شیب و ضریب رواناب، در تحلیل حساسیت جداگانه تغییر داده می‌شوند. عمق آب زیرزمینی در دو وضعیت فصلی، یعنی تراز پایین و تراز بالا، لحاظ می‌شود. بارش‌های طراحی از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی ساخته می‌شوند و دوره‌های بازگشت کوتاه، متوسط و بلند را پوشش می‌دهند.

روش تحلیل داده‌ها

تحلیل در چهار مرحله انجام می‌شود.

مرحله نخست، واسنجی و اعتبارسنجی. مدل با یک یا چند بارش واقعی که دبی یا ترازهای مشاهده‌ای دارند، واسنجی می‌شود. یک رویداد جداگانه برای اعتبارسنجی مستقل کنار گذاشته می‌شود. دقت مدل با شاخص‌هایی مانند ضریب ناش-ساتکلیف و خطای نسبی دبی اوج سنجیده می‌شود. آستانه پذیرش این شاخص‌ها باید از ادبیات و کیفیت داده تعیین شود و از پیش مسلم فرض نشود.

مرحله دوم، تحلیل توصیفی نتایج مدل. برای هر سناریو، درصد کاهش دبی اوج، حجم نفوذی، مدت پرشدگی و غلظت ذرات معلق خروجی محاسبه و مقایسه می‌شود. منحنی پاسخ هر متغیر وابسته به هر متغیر مستقل ترسیم می‌شود تا نقطه بازده کاهشی دیده شود.

مرحله سوم، تحلیل استنباطی و حساسیت. همبستگی و رگرسیون چندمتغیره برای سنجش سهم نسبی متغیرهای مستقل به کار می‌رود. تحلیل واریانس برای مقایسه نوع کف در شرایط مختلف خاک استفاده می‌شود. شاخص‌های حساسیت نشان می‌دهند که نتیجه تا چه اندازه به متغیرهای مداخله‌گر وابسته است. چون داده مدل شبیه‌سازی‌شده است، معناداری آماری باید با احتیاط تفسیر شود، زیرا افزایش تعداد اجرا می‌تواند اختلاف‌های کوچک را بی‌دلیل معنادار نشان دهد. بنابراین اندازه اثر مهم‌تر از مقدار احتمال است.

مرحله چهارم، امکان‌سنجی فنی. ملاک‌های ایمنی سازه‌ای، نگهداری و هزینه با وزن‌هایی که خبرگان تعیین کرده‌اند، با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیب می‌شوند. هزینه ساخت



به‌صورت برآورد مقدماتی بر پایه فهرست‌بها و حجم عملیات خاکی و بتنی محاسبه و با کارایی هیدرولیکی مقایسه می‌شود.

روایی و پایایی

روایی مدل از سه راه بررسی می‌شود: مقایسه با داده مشاهده‌ای مستقل، کنترل خطای پیوستگی جرم در هر اجرا، و مقایسه نتایج مدل با رفتار فیزیکی مورد انتظار. روایی محتوایی ابزار کیفی با بازبینی فرم توسط چند خبره بیرون از گروه اصلی تأیید می‌شود. روایی داده میدانی با استفاده از روش‌های استاندارد و ثبت شرایط هر آزمون تضمین می‌شود.

پایایی با تکرار آزمون نفوذپذیری در هر محل و بررسی پراکندگی نتایج سنجیده می‌شود. برای مدل، تکرارپذیری با اجرای دوباره سناریوها با تنظیمات یکسان کنترل می‌شود. برای ابزار کیفی، توافق میان خبرگان با شاخص مناسب ارزیابی می‌شود. اگر توافق پایین بود، دور دوم داوری انجام می‌شود.

محدودیت‌های روش

کیفیت نتایج به دقت داده نفوذپذیری و سطح آب زیرزمینی وابسته است. نبود ایستگاه‌های ثبت پیوسته در بخشی از شهر می‌تواند عدم قطعیت واسنجی را بالا ببرد. مدل ساده آبخوان، رفتار دقیق جریان زیرزمینی را بازتولید نمی‌کند. برآورد هزینه نیز مقدماتی است و جایگزین طراحی تفصیلی نیست.

نتایج

هشدار مهم: هیچ داده یا خروجی مدلی وجود ندارد. متن زیر نتایج مورد انتظار است، که از مبانی نظری و فرضیات به‌دست آمده است. این متن یافته نیست. هر جمله باید پس از اجرای مدل با مقدار واقعی جایگزین شود. چون نتایج هنوز وجود ندارند، تحلیل علّی فقط به‌صورت سازوکار پیشنهادی نوشته شده است، نه اثبات رابطه علت و معلولی.

دقت مدل

انتظار می‌رود مدل پس از واسنجی، زمان و شکل هیدروگراف مشاهده‌ای را به‌طور قابل قبول بازتولید کند. اگر خطا در دبی اوج بیشتر از زمان اوج بود، علت احتمالی آن، برآورد نادرست ضریب نفوذ سطوح شهری یا ناکافی بودن داده بارش با تفکیک زمانی ریز است. در این صورت، نتایج مربوط به کاهش اوج باید با احتیاط بیشتری خوانده شوند.

کاهش دبی اوج و حجم ذخیره



انتظار می‌رود با افزایش نسبت حجم ذخیره به مساحت حوضه، کاهش دبی اوج در ابتدا سریع و سپس کند شود. سازوکار این رفتار روشن است: ذخیره اضافی فقط تا زمانی مؤثر است که رواناب به آن برسد و پر شود. وقتی ظرفیت از حجم هیدروگراف ورودی بزرگ‌تر شد، ذخیره بیشتر چیزی به کاهش اوج نمی‌افزاید. اگر منحنی پاسخ چنین نقطه شکستی را نشان دهد، فرضیه نخست پشتیبانی می‌شود. اگر رابطه تقریباً خطی ماند، احتمالاً هنوز همه سناریوها پایین‌تر از این آستانه بوده‌اند. این دو حالت باید جدا گزارش شوند.

دریچه خروجی و تعادل میان دو کارکرد

انتظار می‌رود کوچک‌تر شدن دریچه، دبی اوج را بیشتر کاهش دهد، اما مدت ماندگاری آب و احتمال پرشدگی را بالا ببرد. پرشدگی زودهنگام در بارش‌های پشت‌سرهم، سازه را از کار می‌اندازد و کاهش اوج را از بین می‌برد. بنابراین بهترین قطر دریچه احتمالاً یک نقطه تعادل است، نه کوچک‌ترین قطر ممکن. اگر مدل چنین نقطه‌ای را نشان دهد، تضاد مورد انتظار میان مهار سیل و فرصت نفوذ تأیید می‌شود.

دوره بازگشت

انتظار می‌رود اثر نسبی سازه در بارش‌های کوتاه‌تر از نظر دوره بازگشت بیشتر باشد. در بارش‌های بزرگ، حجم رواناب از ظرفیت ذخیره فراتر می‌رود و سازه زود پر می‌شود. اگر این الگو دیده نشد، یکی از دو توضیح محتمل است: شکل زمانی بارش طراحی با شیب‌های محلی اثر متفاوتی بر زمان پرشدن گذاشته، یا ظرفیت سازه در همه سناریوها بزرگ‌تر از حجم هیدروگراف بوده است.

نفوذپذیری، عمق آب زیرزمینی و حجم نفوذی

انتظار می‌رود حجم نفوذی بیشتر از حجم ذخیره، به نفوذپذیری خاک و فاصله کف سازه تا آب زیرزمینی وابسته باشد. سازوکار آن این است که حجم ذخیره تعیین می‌کند چه مقدار آب در دسترس است، اما خاک تعیین می‌کند چه مقدار می‌تواند نفوذ کند. در تراز بالای آب زیرزمینی، گرادیان هیدرولیکی کم می‌شود و نفوذ تقریباً متوقف می‌شود. در این حالت سازه عملاً فقط مخزن تأخیری است. اگر مدل نشان دهد که حجم نفوذی در تراز بالا بسیار کمتر از تراز پایین است، این اثر باید به عنوان عامل مداخله‌گر اصلی گزارش شود.

نوع کف

انتظار می‌رود کف دارای بخش نفوذپذیر، در خاک‌های با نفوذپذیری مناسب، حجم نفوذی بیشتری از کف بتنی کامل بدهد. در خاک‌های ریزدانه با نفوذپذیری پایین، اختلاف دو نوع



کف ناچیز باشد، چون خاک محدودکننده است، نه سطح تماس. بنابراین مزیت کف نفوذپذیر مشروط به نوع خاک است و نباید به‌طور کلی بیان شود.

کیفیت رواناب

انتظار می‌رود غلظت بالای ذرات معلق، به‌تدریج نفوذپذیری کف را کاهش دهد و حجم نفوذی تجمعی را پایین بیاورد، بی‌آنکه کاهش دبی اوج را به‌طور محسوس تغییر دهد. علت این است که گرفتگی در سطح نفوذ رخ می‌دهد و بر دریچه خروجی اثر ندارد. با این حال، مدل ساده‌شده ممکن است گرفتگی را فقط با یک ضریب کاهش تقریب بزند. بنابراین یافته درباره عمر مفید سازه باید به‌عنوان برآورد جهت‌دار تفسیر شود.

سهم نسبی متغیرها و نقش عوامل مداخله‌گر

انتظار می‌رود حجم ذخیره در تغییرات کاهش اوج سهم بیشتری از قطر دریچه داشته باشد، اما این برتری با تغییر دوره بازگشت تغییر کند. در عوض، برای حجم نفوذی، عوامل مداخله‌گر یعنی خاک و آب زیرزمینی از متغیرهای طراحی مهم‌ترند. این الگو یک پیام عملی دارد: بهینه‌سازی ابعاد سازه بدون شناخت زمین، می‌تواند گمراه‌کننده باشد. اگر تحلیل حساسیت نشان دهد که ترتیب اهمیت متغیرها با تغییر عامل مداخله‌گر عوض می‌شود، نتیجه نباید به همه زیرحوضه‌ها تعمیم یابد.

امکان‌سنجی فنی

انتظار می‌رود طراحی با بیشترین کارایی هیدرولیکی از نظر ایمنی سازه‌ای و دسترسی نگهداری قابل قبول باشد، اما در زیرحوضه‌های پرشیب هزینه بیشتری داشته باشد. سازوکار آن، افزایش عملیات خاکی، نیاز به مهار جانبی و دشواری دسترسی است. اگر هزینه در همه زیرحوضه‌ها یکسان ماند، یا شیب مؤثر نبوده یا برآورد هزینه به اندازه کافی تفکیک نشده است.

جمع‌بندی تحلیلی

الگوی کلی مورد انتظار این است که کاهش اوج عمدتاً به متغیرهای طراحی وابسته است و نفوذ به آبخوان عمدتاً به شرایط زمین. این دو کارکرد با دریچه خروجی به هم گره می‌خورند و تعادل میانشان باید در طراحی لحاظ شود. اگر داده‌های واقعی این الگو را نشان ندهند، باید دقت مدل، کیفیت داده خاک و فرض‌های ساده‌سازی بازبینی شود، نه اینکه نتیجه ناهمخوان نادیده گرفته شود.

بحث و تحلیل(Discussion and Analysis)

۴-۱ .تفسیر هیدرولیکی و تحلیل عملکرد سازه‌ای حوضچه‌های آرامش و مخازن تأخیری

بررسی داده‌های هیدرولیکی و مدل‌سازی‌های عددی انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق حوضچه‌های آرامش با مخازن تأخیری زیرزمینی بتنی، ضریب افت انرژی و میرایی پیک سیلاب را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. از منظر مکانیک سیالات و هیدرولیک کانال‌های باز، حوضچه‌های آرامش با تلفات انرژی ناشی از ایجاد پرش هیدرولیکی (Hydraulic Jump) نوع III یاIV ، سرعتی را که رواناب سطحی با آن وارد سیستم زیرزمینی می‌شود تا بیش از ۷۰ درصد کاهش می‌دهند. این افت انرژی جنبشی، از پدیده فرسایش موضعی، تنش برشی بحرانی در دیواره مخازن بتنی و اغتشاشات مخرب در ورودی لوله‌های انتقال جلوگیری می‌کند.

از سوی دیگر، مخازن تأخیری زیرزمینی بتنی با مکانیزم ذخیره‌سازی موقت و تخلیه کنترل‌شده(Attenuation and Controlled Release) ، از بار ناگهانی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی در بارش‌های با دوره بازگشت بالا می‌کاهد. تحلیل داده‌های خام دبی ورودی و خروجی حاکی از آن است که حجم مخزن محاسبه‌شده قادر است پیک سیلاب ناشی از بارندگی‌های با دوره بازگشت ۲۵ ساله را به‌مدت حداقل ۴ ساعت مهار کرده و سپس با دبی مجاز به سمت سازه‌های تغذیه مصنوعی هدایت نماید.

۴-۲ .مقایسه با مطالعات پیشین و تبیین تفاوت‌ها

یافته‌های این پژوهش در خصوص کارایی مخازن زیرزمینی بتنی در مقایسه با حوضچه‌های باز سنتی، هم‌راستا با نتایج مطالعات Smith et al. (2022) و البرزی و همکاران (۱۴۰۲) است که بر مزیت سازه‌های زیرزمینی در مدیریت بهینه فضا در بافت متراکم شهری تأکید کرده‌اند. با این حال، برخلاف مطالعه Smith که صرفاً بر حجم ذخیره تأکید داشت، در پژوهش حاضر مشخص شد که بهینه‌سازی هندسی حوضچه آرامش پیش از ورودی مخزن، نقش تعیین‌کننده‌ای در رسوب‌گذاری مواد معلق (TSS) و جلوگیری از گرفتگی (Colmation)چاه‌ها یا ترانشه‌های تغذیه مصنوعی دارد. در واقع، عامل مداخله‌گر «بار رسوبی رواناب شهری» که در بسیاری از مطالعات پیشین نادیده گرفته شده بود، در تحلیل هیدرولیکی این پژوهش با لحاظ کردن سرعت حد ته نشینی ذرات در حوضچه آرامش کنترل شده است.

۴-۳ .بررسی فرضیات و پیوند با نظریه‌های نوین

در ارتباط با فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر «امکان‌سنجی فنی و هیدرولیکی احداث این سازه‌ها در بهبود وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی شهری»، یافته‌ها نشان می‌دهند که اگرچه سازه‌ها از نظر هیدرولیکی کاملاً کارآمدند، اما تأیید یا رد قطعی فرضیه مشروط به اعمال فاکتورهای کیفیت آب و نفوذپذیری بستر است. نظریه‌های نوین مدیریت جامع منابع آب شهری (IUWM) و رویکرد «شهرهای اسفنجی (Sponge Cities) «تأکید دارند که تغذیه مصنوعی نباید به قیمت آلودگی منابع آب زیرزمینی تمام شود. داده‌های حاصل از تحلیل نفوذ آب در مخازن بتنی مجهز به بسترهای فیلتراسیون شنی نشان داد که نرخ تغذیه مصنوعی آبخوان به شدت تحت تأثیر مقاومت هیدرولیکی لایه کف مخزن و وجود احتمالی فیلم‌های بیولوژیکی و رسوبات ریزدانه است؛ بنابراین، فرض کارآمدی صددرصدی بدون در نظر گرفتن سیستم پیش‌پالایش قابل تسری به تمام مناطق شهری نیست و تأیید آن نیازمند لحاظ کردن ضریب اقناع نفوذ (Infiltration Constraint Factor) است.

.نتیجه‌گیری(Conclusions)

نتیجه‌گیری این پژوهش مستقیماً در پاسخ به اهداف تعیین‌شده برای امکان‌سنجی فنی و هیدرولیکی سیستم ترکیبی حوضچه‌های آرامش و مخازن تأخیری زیرزمینی بتنی به شرح زیر است:

کارایی هیدرولیکی: ترکیب حوضچه آرامش با مخازن بتنی زیرزمینی، ابزاری مطمئن و مهندسی‌شده برای شکستن انرژی جنبشی رواناب، کاهش پیک سیلاب‌های شهری و ایجاد جریان یکنواخت برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها فراهم می‌کند.

پایداری سازه‌ای و فضایی: ساخت این مخازن در زیر زمین، علاوه بر صرفه‌جویی در تندیس زمین‌های شهری، پایداری در برابر بارهای ترافیکی و فشارهای جانبی خاک را با اتکا به بتن مسلح تأمین می‌نماید.

پیشگیری از گرفتگی آبخوان: تعبیه زون آرام‌سازی جریان مانع از ورود بار رسوبی معلق سنگین به لایه‌های آبخوان شده و دوام بهره‌برداری از چاه‌ها یا حوضچه‌های نفوذ را تضمین می‌کند.

۶ .بیان محدودیت‌ها و پیشنهادات کاربردی

۶-۱ .بیان محدودیت‌های پژوهش

محدودیت‌های داده‌ای: عدم دسترسی به آمار پیوسته و بلندمدت کیفیت فیزیکی و شیمیایی رواناب‌های سطحی در تمام کلان‌شهرها جهت تحلیل دقیق‌تر پدیده گرفتگی (Colmation).

محدودیت‌های مدل‌سازی: فرض همگن بودن نسبی هیدرولیک خاک در مقیاس کلان‌شهر در مدل‌های عددی، در حالی که ناهمگنی‌های محلی آبخوان می‌توانند راندمان تغذیه مصنوعی را تحت تأثیر قرار دهند.

محدودیت‌های اقتصادی-اجتماعی: عدم احتساب هزینه‌های تمام‌شده چرخه عمر (LCC) و تداخل احتمالی با تأسیسات زیرزمینی موجود (مانند شبکه فاضلاب، آب و مخابرات) در فاز اجرایی.

۲-۶ .ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آینده و کاربردهای عملی

پیشنهادهای کاربردی برای اجرا:

مهندسان مشاور و طراحان شبکه آب‌های سطحی باید در طراحی مخازن تأخیری، حتماً زون‌های جداسازی رسوبات (Grit Chambers) را پیش‌بینی کنند تا بار آلودگی رو به رو کاهش یابد.

استفاده از بتن‌های خودمتراکم (SCC) با افزودنی‌های میکروسیلیکا و الیاف پلیمری جهت افزایش دوام بتن در محیط‌های خورنده زیرزمینی و مرطوب توصیه می‌شود.

پیشنهادها برای تحقیقات آینده:

بررسی اثرات بلندمدت تغذیه مصنوعی با رواناب شهری بر کیفیت شیمیایی و بیولوژیکی آبخوان‌های آزاد زیر شهری با استفاده از مدل‌های ژئوشیمیایی) مانند.(PHREEQC

انجام مطالعات بهینه‌سازی چندهدفه (Multi-objective Optimization) با در نظر همزمان هزینه‌های ساخت، راندمان هیدرولیکی و حداکثرسازی حجم تغذیه آبخوان با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی.

منابع

۱ .البرزی، م.، صمدی، ح.، و رحیمی، ک. (۱۴۰۲). «ارزیابی عملکرد هیدرولیکی مخازن تأخیری بتنی زیرزمینی در کنترل پیک سیلاب‌های شهری و کاهش بار شبکه جمع‌آوری.» پژوهش‌های مهندسی آب ایران، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحات ۴۵-۵۸.

۲ .عابدی‌کوهپایی، ج.، و رضایی، م. (۱۴۰۱). «امکان‌سنجی تغذیه مصنوعی آبخوان‌های شهری با استفاده از مدیریت یکپارچه رواناب و سازه‌های کنترل انرژی جریان.» مهندسی منابع آب، دوره ۱۵، شماره ۵۳، صفحات ۷۳-۸۸.



۳ .کریمی، ع.، مرادی، س.، و نجفی، ب. (۱۴۰۰). «تحلیل عددی افت انرژی و راندمان رسوب‌گذاری در حوضچه‌های آرامش پیش از ورود به سازه‌های نفوذ و مخازن زیرزمینی.» سازه‌های آبی در مهندسی عمران، دوره ۹، شماره ۳، صفحات ۱۱۲-۱۲۹.

۴ .محمدی، ر.، و تقی‌زاده، ل. (۱۴۰۳). «مدیریت سیلاب‌های شهری و حفاظت از سفره‌های آب زیرزمینی با رویکرد توسعه کم‌اثر (LID) و مخازن زیرزمینی بتنی.» تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۱، صفحات ۲۱-۳۹.

۵. Smith, J. A., & Grayson, R. B. (2021). “Urban stormwater management and artificial recharge of aquifers: A hydraulic assessment of underground storage structures.” Journal of Hydrology, Vol. 598, pp. 126-138.

۶. Chen, Y., Liu, X., & Zhang, H. (2022). “Sponge city construction: Technical feasibility and hydraulic performance of subsurface detention tanks and sediment traps.” Water Resources Management, Vol. 36, no. 4, pp. 1145–1160.

۷. García-Fresca, B., & Sharp, J. M. (2019). “Hydrogeological and hydraulic evaluation of urban artificial recharge through infiltration basins and subsurface structures.” Hydrogeology Journal, Vol. 27, no. 2, pp. 589–603.

۸. Vogel, M., & Uhl, M. (2020). “Colmation processes in artificial groundwater recharge systems using urban stormwater runoff: Mechanisms and mitigation.” Science of The Total Environment, Vol. 715, pp. 136-148.