

مقدمه

مدیریت مؤثر حوزه‌های آبخیز یکی از مهم‌ترین زمینه‌های پژوهش در علوم محیطی و مهندسی منابع آب است، چراکه این واحدهای طبیعی نقش حیاتی در تأمین منابع آب، کاهش خطر سیلاب، حفظ تنوع زیستی و توسعه پایدار ایفا می‌کنند. تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و فشارهای انسانی، مدیریت منابع آب را با چالش‌های پیچیده‌ای روبرو کرده است که نیاز به ابزارهای نوین برای پایش، مدل‌سازی و تصمیم‌گیری بهینه را ضروری می‌سازد [۱۴]. در این زمینه، فناوری دوقلوی دیجیتال به‌عنوان یک مدل دیجیتال پویا از سیستم‌های فیزیکی، امکان شبیه‌سازی لحظه‌ای، تحلیل پیش‌بینی و پایش دقیق حوزه‌های آبخیز را فراهم می‌آورد. این فناوری با ترکیب داده‌های سنسوری، مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، نسخه‌ای به‌روز و هم‌زمان از سیستم فیزیکی ایجاد می‌کند که می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا با دقت بالاتر و هزینه کم‌تر منابع آب را مدیریت کنند [۲۵].

باوجود تحقیقات گسترده در زمینه مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب، تعداد مطالعاتی که کاربرد دوقلوی دیجیتال را به‌صورت یکپارچه در حوزه‌های آبخیز بررسی کرده باشند محدود است. بیش‌تر پژوهش‌ها بر پیش‌بینی سیلاب یا بهینه‌سازی مصرف آب تمرکز دارند و کم‌تر به تحلیل هم‌زمان کیفیت و کمیت آب، پوشش گیاهی و اثرات تغییرات اقلیمی پرداخته‌شده است [۱ و ۷]. این شکاف تحقیق نشان می‌دهد که هنوز جای کار گسترده‌ای برای استفاده از دوقلوی دیجیتال در مدیریت جامع و هوشمند حوزه‌های آبخیز وجود دارد. هم‌چنین، پیچیدگی‌های داده‌ای و نیاز به مدل‌های دقیق و لحظه‌ای باعث شده که بسیاری از مدیران و پژوهشگران از توانایی کامل این فناوری در تصمیم‌گیری بهینه بهره‌مند نشوند [۲]. دوقلوی دیجیتال باوجود افزایش مطالعات مرتبط با فناوری دوقلوی دیجیتال در حوضه منابع آب، اغلب پژوهش‌های مروری بر کاربردهای خاص این فناوری، مانند شبکه‌های توزیع آب شهری، تصفیه‌خانه‌ها، سامانه‌های زهکشی یا مدیریت سیلاب متمرکز بوده‌اند. در مقابل، مرور جامعی که کاربردهای دوقلوی دیجیتال را در مدیریت یکپارچه حوزه‌های آبخیز، شامل پایش منابع آب، پیش‌بینی سیلاب، مدیریت کیفیت آب، حفاظت از بوم‌سازگان و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی به‌صورت یکپارچه بررسی کند، محدود است. هم‌چنین، چالش‌های فنی، مدیریتی و پژوهشی توسعه این فناوری در مدیریت حوزه‌های آبخیز کم‌تر موردتوجه قرار گرفته است.

کاربرد دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز

پریسا ملکی^۱، نرگس فلاح حسین آبادی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

DOI: / 10.22034/WMJ.2026.2090322.1139

چکیده

مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز در مواجهه با تغییرات اقلیمی، افزایش فشارهای انسانی و رشد تقاضا برای منابع آب، نیازمند بهره‌گیری از فناوری‌های نوین است. هدف این مقاله، بررسی کاربرد فناوری دوقلوی دیجیتال^۳ در مدیریت حوزه‌های آبخیز و تحلیل ظرفیت‌ها، کاربردها، چالش‌ها و فرصت‌های این فناوری در مدیریت هوشمند منابع آب است. این پژوهش به روش مرور نظام‌مند منابع علمی انجام شد و مطالعات منتشرشده در زمینه دوقلوی دیجیتال و مدیریت منابع آب، هیدرولوژی و حوزه‌های آبخیز موردبررسی و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که دوقلوی دیجیتال با تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور، حسگرهای اینترنت اشیا، مدل‌های هیدرولوژیکی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، امکان پایش برخط، پیش‌بینی سیلاب، ارزیابی کیفیت و کمیت آب، شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب را فراهم می‌کند. هم‌چنین، مرور مطالعات نشان داد که مهم‌ترین موانع توسعه این فناوری شامل کمبود داده‌های باکیفیت، هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، پیچیدگی مدل‌سازی، نبود استانداردهای یکپارچه و محدودیت‌های مدیریتی و سازمانی است. درمجموع، نتایج این مطالعه بیانگر آن است که دوقلوی دیجیتال می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارتقای مدیریت هوشمند و پایدار حوزه‌های آبخیز مورداستفاده قرار گیرد، مشروط بر آنکه زیرساخت‌های داده‌ای، فنی و سازمانی لازم برای استقرار آن فراهم شود.

کلید واژه: پهنه‌بندی، بهره‌وری منابع آب، پیش‌بینی سیلاب، دوقلوی دیجیتال، مدیریت هوشمند حوزه‌های آبخیز.

۱- کارشناس بررسی طرح‌ها، آب منطقه‌ای مازندران

۲- کارشناس بررسی طرح‌ها، آب منطقه‌ای البرز،

Email: nfallah.work@gmail.com

3. Digital Twin

بر این اساس، هدف این مقاله ارائه یک مرور جامع از کاربردهای فناوری دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز، تحلیل روندهای پژوهشی، شناسایی چالش‌های موجود و تبیین فرصت‌ها و مسیرهای آینده پژوهش در این حوزه است. وجه تمایز این مطالعه با مرورهای پیشین، ارائه دیدگاهی یکپارچه نسبت به کاربردهای دوقلوی دیجیتال در مدیریت هوشمند حوزه‌های آبخیز و بررسی هم‌زمان مزایا، محدودیت‌ها و الزامات پیاده‌سازی این فناوری است.

مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، مفهوم دوقلوی دیجیتال به عنوان یک فناوری نوین در حوزه‌های مختلف، از جمله مدیریت منابع آب، مورد توجه گسترده قرار گرفته است. دوقلوی دیجیتال یک بازنمایی دیجیتال هم‌زمان از سامانه‌های فیزیکی است که امکان شبیه‌سازی، پایش و پیش‌بینی شرایط محیطی را در زمان واقعی فراهم می‌سازد [۲۳]. در حوضه منابع آب و به ویژه مدیریت حوزه‌های آبخیز، این فناوری توانسته نقش مهمی در بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و افزایش تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی ایفا کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از دوقلوی دیجیتال می‌تواند به بهبود پیش‌بینی سیلاب، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، پایش کیفیت آب و بهینه‌سازی الگوهای بهره‌برداری از منابع آبی کمک نماید [۷ و ۳].

یکی از مهم‌ترین حوضه‌های کاربرد دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز، شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی سیستم در شرایط متغیر اقلیمی و کاربری اراضی است. برای نمونه، یک مدل دوقلوی دیجیتال هیدرولوژیکی توسعه داده‌اند که قادر به شبیه‌سازی جریان‌های سطحی و زیرسطحی، تبخیر و تعرق و فرایند رسوب‌گذاری در یک حوزه بزرگ است [۱۴]. هم‌چنین، مطالعات دیگری نشان داده‌اند که این فناوری می‌تواند در طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های پیش‌بینی سیلاب و مدیریت ریسک در حوزه‌های آبخیز مورد استفاده قرار گیرد. چنین مدل‌هایی با اتصال داده‌های سنجش‌ازدور، ایستگاه‌های هیدرومتری و الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، ظرفیت بالایی در تحلیل پویای چرخه آب دارند [۱۵ و ۱۹].

علاوه بر این، دوقلوی دیجیتال به‌طور روزافزون در حوضه پایش و مدیریت کیفیت آب نیز مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان نمونه، کیم و بارتوس^۱ [۹] مدلی برای شبیه‌سازی حرکت و انتقال آلاینده‌ها در رودخانه‌ها و منابع آب توسعه داده‌اند که می‌تواند به صورت لحظه‌ای کیفیت آب را رصد کرده و در صورت افزایش آلاینده‌ها هشدارهای لازم را صادر کند. هم‌چنین خو و همکاران^۲ [۱۴] یک بستر سه‌بعدی مبتنی بر دوقلوی دیجیتال برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌های شهری طراحی کرده‌اند که قابلیت ترکیب داده‌های سنسوری با شبیه‌سازی‌های عددی را داراست. این نوع

کاربردها می‌توانند در مدیریت بحران‌های زیست‌محیطی و حفاظت پایدار از منابع آب مؤثر واقع شوند [۱۵].

با وجود مزایای فراوان دوقلوی دیجیتال، پیاده‌سازی آن در مدیریت حوزه‌های آبخیز با چالش‌هایی همراه است. یکی از این چالش‌ها، وابستگی شدید مدل‌ها به داده‌های دقیق، بهنگام و باکیفیت است [۱۳]. در کنار این موضوع، پیچیدگی مدل‌سازی، هزینه‌های توسعه و نیاز به زیرساخت‌های محاسباتی پیشرفته نیز از موانع مهم محسوب می‌شوند [۲۲]. علاوه بر این، به کارگیری دوقلوی دیجیتال مستلزم همکاری بین‌رشته‌ای میان متخصصان هیدرولوژی، علوم کامپیوتر و سیاست‌گذاران منابع آب است [۱]. بنابراین، اگرچه این فناوری چشم‌اندازهای بسیار امیدوارکننده‌ای برای مدیریت حوزه‌های آبخیز دارد، اما غلبه بر موانع اجرایی و فنی پیش شرط تحقق عملیاتی آن به شمار می‌رود.

با این حال، مرور ادبیات موجود نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر، بیشتر مطالعات انجام‌شده تاکنون روی مدل‌سازی‌های موردی یا سامانه‌های شهری متمرکز بوده‌اند و پژوهش‌های اندکی به بررسی جامع کاربرد دوقلوی دیجیتال در مدیریت یکپارچه و چندبعدی حوزه‌های آبخیز پرداخته‌اند. علاوه بر این، فقدان چارچوب‌های عملیاتی برای پیوند دادن داده‌های چند منبعی (مانند سنجش‌ازدور، اینترنت اشیا و داده‌های زمینی) با مدل‌های هیدرولوژیکی هنوز یک خلأ جدی محسوب می‌شود [۱۴]. از همین رو، این مقاله باهدف پر کردن این شکاف و ارائه یک تحلیل جامع از ظرفیت‌ها، چالش‌ها و فرصت‌های کاربرد دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز نگاشته شده است تا بتواند مسیر تحقیقات آینده و اقدامات اجرایی در این حوزه را روشن‌تر سازد.

روش‌ها و تکنیک‌های مورداستفاده در فناوری دوقلوی دیجیتال

در مطالعات اخیر، پیاده‌سازی فناوری دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز بر پایه مجموعه‌ای از روش‌ها و فناوری‌های مکمل انجام می‌شود. این فناوری‌ها شامل مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی [۱۰ و ۱۸]، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سنجش‌ازدور، اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین و بسترهای یکپارچه‌سازی داده‌ها هستند. هر یک از این مؤلفه‌ها نقش مشخصی در ایجاد، به‌روزرسانی و بهره‌برداری از سامانه دوقلوی دیجیتال ایفا می‌کنند [۴ و ۱۳].

مدل‌های فیزیکی و عددی یکی از اجزای اصلی سامانه دوقلوی دیجیتال هستند و برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوزه آبخیز به کار می‌روند. این مدل‌ها با استفاده از داده‌های تاریخی و داده‌های برخط حاصل از حسگرها، رفتار سیستم را بازسازی کرده و امکان پیش‌بینی تغییرات کمیت و کیفیت آب، ارزیابی سناریوهای مدیریتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری را فراهم می‌کنند [۴، ۱۱، ۲۱ و ۲۲].

1. Kim and Bartos
2. Xu et al.

علاوه بر این، برخی تحقیقات بر یکپارچه‌سازی مدل‌های داده‌ای و فیزیکی تمرکز دارند تا قابلیت اعتماد و اعتبار مدل افزایش یابد [۱] و [۶]. این رویکرد، امکان ارزیابی ریسک و مدیریت بحران را فراهم می‌کند و به شکل‌گیری چارچوب‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر داده کمک می‌کند.

مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب مدل‌های فیزیکی، هوش مصنوعی و داده‌های لحظه‌ای، اساس دوقلوی دیجیتال‌های موفق در مدیریت حوزه‌های آبخیز را تشکیل می‌دهد و بهینه‌سازی منابع آب و کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی را ممکن می‌سازد [۷-۱۰].

روش پژوهش

این پژوهش از نوع مروری است و باهدف بررسی کاربرد فناوری دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز انجام شده است. به‌منظور گردآوری اطلاعات، منابع علمی منتشرشده در پایگاه‌های معتبر بین‌المللی و داخلی موردبررسی قرار گرفتند. مقالات مرتبط با استفاده از کلیدواژه‌هایی نظیر دوقلوی دیجیتال، مدیریت هوشمند حوزه‌های آبخیز، هیدرولوژی، بهره‌وری منابع آب و ترکیب‌های مرتبط جستجو شدند. پس از گردآوری منابع، مقالات بر اساس ارتباط موضوعی، اعتبار علمی و میزان انطباق با اهداف پژوهش انتخاب شدند. سپس اطلاعات استخراج‌شده به‌صورت توصیفی و تحلیلی طبقه‌بندی و در قالب محورهای شامل کاربردهای دوقلوی دیجیتال، فناوری‌های مورداستفاده، مزایا، محدودیت‌ها، چالش‌های اجرایی و فرصت‌های آینده تحلیل شدند. درنهایت، نتایج حاصل از مطالعات منتخب به‌صورت یکپارچه تلفیق و ارائه گردید.

کاربرد دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز

دوقلوی دیجیتال به‌عنوان یک ابزار نوین، در مدیریت حوزه‌های آبخیز کاربردهای متعددی دارد که از پایش و شبیه‌سازی جریان آب تا بهینه‌سازی مصرف منابع و مدیریت ریسک‌های محیطی را شامل می‌شود. یکی از مهم‌ترین کاربردها، پایش لحظه‌ای کیفیت و کمیت آب است. با استفاده از سنسورها و داده‌های IoT، دوقلوی دیجیتال می‌تواند تغییرات در سطح آب، جریان و کیفیت را پیش‌بینی کرده و هشدارهای به‌موقع برای جلوگیری از بحران‌ها ارائه دهد [۹ و ۲۲]. علاوه بر آن، دوقلوی دیجیتال امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریتی و اقلیمی را فراهم می‌کند. برای مثال، سناریوهای

بارش شدید، خشک‌سالی یا تغییرات کاربری اراضی می‌توانند در مدل شبیه‌سازی شوند تا اثرات آن‌ها بر جریان‌های سطحی و زیرسطحی حوزه پیش‌بینی شود [۴ و ۸]. این قابلیت به مدیران حوزه‌های آبخیز اجازه می‌دهد تصمیمات مبتنی بر داده بگیرند و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت را بهینه کنند [۶ و ۱۸].

یکی دیگر از کاربردهای کلیدی، مدیریت ریسک و بحران‌های محیطی است. دوقلوی دیجیتال‌ها می‌توانند تحلیل ریسک سیل، فرسایش خاک و آلودگی منابع آب را انجام دهند و گزینه‌های مختلف مدیریت بحران را ارزیابی کنند [۱ و ۸]. هم‌چنین، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، قابلیت پیش‌بینی رویدادهای غیرمنتظره و ارائه توصیه‌های مدیریتی بهبود می‌یابد [۱۱ و ۲۱].

دوقلوی دیجیتال هم‌چنین در بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب و انرژی مؤثر است. با تحلیل داده‌های تاریخی و لحظه‌ای، می‌توان مصرف آب، نگهداری سدها و شبکه‌های توزیع را بهینه کرده و هدررفت منابع را کاهش داد [۱۱ و ۲۲]. این کاربردها نشان می‌دهند که دوقلوی دیجیتال می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تصمیم‌گیری پایدار و کارآمد در مدیریت حوزه‌های آبخیز باشد [۷، ۹، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۲۰ و ۲۴]. جدول زیر شامل کاربرد، داده‌های ورودی، خروجی و مزایا موارد ذکرشده به‌طور خلاصه است:

چالش‌ها و محدودیت‌ها

پیاده‌سازی دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز، هرچند که مزایای قابل توجهی دارد، با مجموعه‌ای از چالش‌ها و محدودیت‌ها مواجه است که باید موردتوجه قرار گیرند. این چالش‌ها را می‌توان به شش دسته اصلی تقسیم کرد: چالش‌های داده‌ای و سنجشی، محدودیت‌های فنی و مدل‌سازی، موانع اقتصادی و منابع، مسائل مدیریتی و سازمانی و چالش‌های اجتماعی و قانونی و چالش‌های مرتبط با استانداردسازی و قابلیت همکاری.

چالش‌های داده‌ای و سنجشی

یکی از اصلی‌ترین موانع توسعه دوقلوی دیجیتال در حوزه‌های آبخیز، کمبود داده‌های دقیق و قابل‌اعتماد است. دوقلوی دیجیتال‌ها برای ایجاد مدل‌های شبیه‌سازی دقیق، به داده‌های تاریخی و لحظه‌ای نیاز دارند، ازجمله داده‌های جریان آب، کیفیت آب، بارش، تبخیر

جدول ۱: خلاصه کاربردهای فناوری دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز، داده‌های ورودی، خروجی‌ها و مزایای عملی

مزیت	خروجی	داده‌های موردنیاز	کاربرد
واکنش سریع به آلودگی	نقشه کیفیت آب، تشخیص آلودگی	داده حسگرهای کیفیت آب، تصاویر ماهواره‌ای، نمونه‌برداری	پایش کیفیت آب
تخصیص بهینه آب	پیش‌بینی منابع آب، سناریوهای بهره‌برداری	بارش، دبی، سطح آب زیرزمینی، مصرف آب	مدیریت منابع آب
اولویت‌بندی عملیات آبخیزداری	نقشه خطر فرسایش	شیب، خاک، پوشش گیاهی، بارندگی	کنترل فرسایش
مدیریت بحران کم‌آبی	شاخص خشک‌سالی و پیش‌بینی آن	بارش، تبخیر، رطوبت خاک، دما	مدیریت خشک‌سالی

جدول ۲: چالش‌های داده‌ای و سنجشی در پیاده‌سازی فناوری دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز و راهکارهای پیشنهادی

چالش	تأثیر	راهکار پیشنهادی
کمبود داده‌های برخط	کاهش دقت مدل و پیش‌بینی	و پایش پیوسته IoT توسعه شبکه حسگرهای
ناهمگونی داده‌ها	دشواری یکپارچه‌سازی اطلاعات	استفاده از استانداردهای تبادل داده و مدل‌های یکپارچه
کیفیت پایین داده‌ها	افزایش خطا در شبیه‌سازی	کنترل کیفیت داده‌ها و اعتبارسنجی مستمر
کمبود داده‌های تاریخی	کاهش قابلیت پیش‌بینی بلندمدت	استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و باز تحلیل‌های اقلیمی
هزینه بالای تجهیزات پایش	محدود شدن پیاده‌سازی در مقیاس وسیع	استفاده از حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های متن‌باز و فناوری‌های ابری

اطمینان و کارایی سامانه‌های دوقلوی دیجیتال را افزایش دهند. همچنین، تقویت همکاری میان سازمان‌های متولی منابع آب، مراکز پژوهشی و نهادهای اجرایی در زمینه اشتراک‌گذاری داده‌ها، نقش مهمی در توسعه و استقرار موفق این فناوری خواهد داشت. در جدول زیر خلاصه‌ای از راهکارها و چالش‌ها ارائه شده است:

موانع اقتصادی و منابع

یکی دیگر از محدودیت‌های مهم، هزینه‌های بالای توسعه و نگهداری دوقلوی دیجیتال‌ها است. پیاده‌سازی کامل یک دوقلوی دیجیتال نیازمند سرمایه‌گذاری در تجهیزات سنجش، سیستم‌های ذخیره‌سازی و پردازش داده، نرم‌افزارهای مدل‌سازی و پرسنل متخصص است [۱ و ۱۱]. بسیاری از سازمان‌های مدیریت منابع آب در کشورهای در حال توسعه یا مناطق کم‌درآمد، توان مالی لازم برای ایجاد و نگهداری چنین سیستم‌هایی را ندارند. علاوه بر هزینه اولیه، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری طولانی‌مدت نیز قابل توجه است. برای حفظ دقت مدل‌ها، سنسورها و سیستم‌های جمع‌آوری داده باید به‌صورت مداوم کالیبره و تعمیر شوند و مدل‌ها باید به‌روزرسانی شوند تا تغییرات محیطی و اقلیمی جدید را لحاظ کنند [۹ و ۲۲]. این مسئله می‌تواند بار مالی و نیروی انسانی زیادی بر سازمان‌های آب وارد کند و پیاده‌سازی گسترده دوقلوی دیجیتال را محدود سازد.

مسائل مدیریتی و سازمانی

چالش دیگر، موانع مدیریتی و سازمانی است. دوقلوی دیجیتال نیازمند همکاری میان‌رشته‌ای میان مهندسان آب، متخصصان داده، برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران است. نبود هماهنگی میان این گروه‌ها می‌تواند منجر به ایجاد مدل‌هایی شود که کاربرد عملی محدودی دارند [۶ و ۷]. علاوه بر آن، بسیاری از سازمان‌ها به دلیل مقاومت در برابر تغییرات فناوری یا عدم آشنایی با قابلیت‌های دوقلوی دیجیتال، تمایل محدودی به استفاده از این ابزارها دارند [۸ و ۲۱]. آموزش پرسنل و تغییر رویه‌های سنتی مدیریت منابع آب، از جمله الزامات مهمی است که اغلب نادیده گرفته می‌شود و محدودیت کاربرد دوقلوی دیجیتال را افزایش می‌دهد.

چالش‌های اجتماعی و قانونی

پیاده‌سازی دوقلوی دیجیتال هم‌چنین با مسائل اجتماعی و قانونی

و مصرف منابع [۹ و ۱۳]. در بسیاری از مناطق، شبکه‌های سنجش آب ناکافی یا پراکنده هستند که باعث کاهش دقت مدل‌ها و افزایش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها می‌شود [۴ و ۶]. علاوه بر این، کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده می‌تواند تحت تأثیر خطاهای سنسورها، مشکلات انتقال داده و محدودیت‌های نگهداری تجهیزات قرار گیرد. داده‌های ناقص یا نویزی می‌توانند منجر به پیش‌بینی‌های نادرست شوند و اعتماد مدیران را نسبت به دوقلوی دیجیتال کاهش دهند [۲۱ و ۲۲]. برای مثال، سنجش کیفیت آب در رودخانه‌ها و منابع سطحی نیازمند سنسورهای با دقت بالا و کالیبراسیون مداوم است و نبود این تجهیزات در بسیاری از مناطق باعث محدودیت در کاربرد عملی دوقلوی دیجیتال می‌شود.

محدودیت‌های فنی و مدل‌سازی

چالش دیگر، پیچیدگی فنی و مدل‌سازی دوقلوی دیجیتال است. مدل‌های دوقلوی دیجیتال معمولاً نیازمند ترکیب چندین مدل فیزیکی، هیدرولوژیکی و محیطی هستند و این کار مستلزم دانش تخصصی بالا در زمینه مهندسی آب، برنامه‌نویسی، هوش مصنوعی و تحلیل داده است [۸ و ۹]. ادغام داده‌های لحظه‌ای با مدل‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی، به‌ویژه در شرایط غیرخطی و تغییرات ناگهانی محیطی، یک چالش فنی محسوب می‌شود. علاوه بر این، بسیاری از مدل‌های موجود تنها برای مقیاس‌های کوچک یا شرایط خاص طراحی شده‌اند و انتقال آن‌ها به مقیاس وسیع‌تر حوزه‌های آبخیز بزرگ، نیازمند بازطراحی مدل و افزایش توان محاسباتی است [۸ و ۱۸]. این مسئله به‌ویژه در مناطقی با تغییرات اقلیمی شدید یا زیرساخت‌های پیچیده شبکه آب اهمیت دارد، زیرا مدل‌ها باید بتوانند تنوع شرایط هیدرولوژیکی و کاربری اراضی را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کنند.

اگرچه چالش‌های داده‌ای و سنجشی از مهم‌ترین موانع توسعه فناوری دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شوند، بسیاری از این محدودیت‌ها با بهره‌گیری از راهکارهای فنی و مدیریتی قابل کاهش هستند. توسعه شبکه‌های پایش هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مناسب، به‌کارگیری استانداردهای یکپارچه برای تبادل داده، اجرای فرآیندهای کنترل کیفیت داده و بهره‌گیری از زیرساخت‌های رایانش ابری از جمله مهم‌ترین راهکارهایی هستند که می‌توانند دقت، قابلیت

نتایج و بحث

بررسی و مقایسه مطالعات منتخب نشان می‌دهد که اگرچه تمامی پژوهش‌ها بر ظرفیت بالای فناوری دوقلوی دیجیتال در ارتقای مدیریت منابع آب تأکید دارند، اما تفاوت‌های قابل توجهی در اهداف، مقیاس اجرا، فناوری‌های مورد استفاده و میزان بلوغ سامانه‌های توسعه یافته مشاهده می‌شود. بخش عمده مطالعات اولیه بر کاربردهای محدود مانند پیش‌بینی سیلاب، پایش کیفیت آب یا مدیریت شبکه‌های توزیع متمرکز بوده‌اند، در حالی که پژوهش‌های جدیدتر به سمت توسعه سامانه‌های یکپارچه برای مدیریت کل حوزه آبخیز حرکت کرده‌اند. این روند نشان می‌دهد که مسیر تکامل فناوری دوقلوی دیجیتال از حل مسائل منفرد به سمت پشتیبانی از مدیریت جامع و هوشمند حوزه‌های آبخیز در حال تغییر است.

تحلیل تطبیقی مطالعات هم‌چنین نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل موفقیت سامانه‌های دوقلوی دیجیتال، صرفاً استفاده از مدل‌های پیشرفته یا الگوریتم‌های هوش مصنوعی نیست، بلکه کیفیت یکپارچگی و بهنگام بودن داده‌های ورودی نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد آن‌ها دارد. پژوهش‌هایی که داده‌های سنجش‌ازدور، حسگرهای اینترنت اشیا، داده‌های هیدرومتری و مدل‌های هیدرولوژیکی را به صورت هم‌زمان تلفیق کرده‌اند، نسبت به مطالعات متکی بر یک منبع داده، دقت و قابلیت اطمینان بیش‌تری در پیش‌بینی و تصمیم‌سازی ارائه کرده‌اند؛ بنابراین، توسعه زیرساخت‌های داده‌ای و استانداردسازی تبادل اطلاعات، پیش‌نیاز استقرار موفق این فناوری محسوب می‌شود.

از سوی دیگر، مروج انتقادی مطالعات نشان می‌دهد که باوجود گزارش مزایای متعدد، اغلب پژوهش‌ها در مقیاس‌های آزمایشگاهی یا حوزه‌های محدود اجرا شده‌اند و شواهد کافی از عملکرد دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده هنوز وجود ندارد. هم‌چنین، چالش‌هایی مانند هزینه بالای استقرار، نبود استانداردهای مشترک، محدودیت دسترسی به داده‌های برخط و ضعف هماهنگی بین سازمان‌های متولی، از مهم‌ترین عوامل محدودکننده توسعه عملی این فناوری هستند. از این رو، انتقال موفق نتایج پژوهش‌ها به مرحله بهره‌برداری عملی، مستلزم تقویت زیرساخت‌های داده‌ای، توسعه استانداردهای ملی و بین‌المللی، آموزش نیروی انسانی و ایجاد سازوکارهای همکاری بین‌رشته‌ای است.

بر این اساس، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که استقرار موفق دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز بر چهار رکن اساسی شامل یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی، تلفیق مدل‌های فیزیکی و هوش مصنوعی، پایش برخط و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر سناریو استوار است. این جمع‌بندی، ضمن تبیین ارتباط میان نتایج مطالعات مختلف، چارچوبی منسجم برای توسعه تحقیقات آینده و کاربرد عملی این فناوری در مدیریت هوشمند حوزه‌های آبخیز ارائه می‌کند.

بررسی ادبیات موجود نشان می‌دهد که دوقلوی دیجیتال در

مواجهه است. جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای و استفاده از مدل‌های دیجیتال ممکن است نگرانی‌هایی درباره حریم خصوصی و امنیت داده‌ها ایجاد کند [۱۱ و ۲۱]. در برخی کشورها، قوانین دسترسی به داده‌های محیطی یا آب‌های سطحی محدود است و این موضوع می‌تواند مانعی برای توسعه دوقلوی دیجیتال‌های دقیق باشد. علاوه بر آن، پذیرش اجتماعی فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب نیز یک چالش است. جوامع محلی ممکن است نسبت به نتایج مدل‌های دیجیتال بی‌اعتماد باشند یا تصور کنند که تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر مدل‌ها، منافع محلی آن‌ها را نادیده می‌گیرد [۹ و ۲۲]؛ بنابراین، شفافیت در استفاده از داده‌ها، مشارکت جامعه و آموزش عمومی از الزامات موفقیت‌آمیز بودن پیاده‌سازی دوقلوی دیجیتال است.

چالش‌های مرتبط با استانداردسازی و قابلیت همکاری

یکی دیگر از محدودیت‌های کلیدی، نبود استانداردهای جهانی و قابلیت همکاری میان سیستم‌ها است. بسیاری از مدل‌ها و دوقلوی دیجیتال‌ها به صورت مستقل توسعه یافته‌اند و قابلیت تبادل داده و یکپارچه‌سازی با سایر سیستم‌ها را ندارند [۱ و ۵]. این محدودیت می‌تواند بهره‌وری دوقلوی دیجیتال‌ها را کاهش دهد و مانع از ایجاد شبکه‌های گسترده مدیریت حوزه‌های آبخیز شود.

جمع‌بندی چالش‌ها

به طور کلی، باوجود اینکه دوقلوی دیجیتال پتانسیل بالایی برای بهبود مدیریت حوزه‌های آبخیز دارد، پیاده‌سازی آن بدون برنامه‌ریزی جامع و سرمایه‌گذاری در داده، فناوری و آموزش، با محدودیت‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و قانونی مواجه است. مطالعات اخیر تأکید دارند که برای بهره‌برداری کامل از قابلیت‌های دوقلوی دیجیتال، لازم است که:

- شبکه‌های سنجش و جمع‌آوری داده توسعه یابند و کیفیت داده‌ها تضمین شود [۹ و ۱۳].
 - مدل‌های دوقلوی دیجیتال با مقیاس‌های مختلف و شرایط محیطی متنوع سازگار شوند [۸ و ۱۸].
 - سرمایه‌گذاری طولانی‌مدت در تجهیزات، نرم‌افزار و نیروی انسانی انجام شود [۱۱ و ۲۲].
 - همکاری میان‌رشته‌ای میان متخصصان آب، داده و سیاست‌گذاران تقویت شود [۶ و ۷].
 - استانداردهای داده‌ای و مدل‌سازی ایجاد شود تا قابلیت تبادل و یکپارچه‌سازی سیستم‌ها فراهم گردد [۲ و ۵].
 - مشارکت جامعه و آموزش عمومی برای جلب اعتماد و پذیرش اجتماعی فناوری‌های نوین فراهم شود [۹ و ۲۲].
- مطالعات نشان می‌دهند که غلبه بر این چالش‌ها می‌تواند امکان بهره‌برداری حداکثری از دوقلوی دیجیتال‌ها را فراهم کند و مدیریت پایدار و کارآمد منابع آب را در حوزه‌های آبخیز تضمین نماید [۸ و ۲۱].

مدیریت حوزه‌های آبخیز مزایای متعددی دارد و می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی جریان آب و کیفیت منابع آب کمک کند. مدل‌های دوقلوی دیجیتال که داده‌های تاریخی و لحظه‌ای را ترکیب می‌کنند، توانسته‌اند پیش‌بینی‌های دقیق‌تر نسبت به روش‌های سنتی ارائه دهند و مدیران منابع آب را قادر سازند تصمیمات مبتنی بر داده و واقعیت محیطی اتخاذ کنند [۱۰ و ۱۳]. شبیه‌سازی سناریوهای بارش شدید و خشک‌سالی با استفاده از دوقلوی دیجیتال نشان داده است که تغییرات سطح آب، فرسایش خاک و کیفیت آب می‌تواند به صورت دقیق‌تر پیش‌بینی شود که این امر به کاهش هدررفت منابع و مدیریت پایدار کمک می‌کند [۴ و ۸]. مطالعات همچنین نشان می‌دهند که دوقلوی دیجیتال‌ها می‌توانند ابزار قدرتمندی برای مدیریت ریسک و بحران باشند. توانایی تحلیل چند سناریویی و شبیه‌سازی لحظه‌ای به مدیران امکان می‌دهد ریسک وقوع سیل، آلودگی یا خشک‌سالی را پیش‌بینی کرده و راهکارهای مدیریتی مناسب را شناسایی کنند [۱ و ۸]. این قابلیت به‌ویژه در مناطقی با تغییرات اقلیمی شدید اهمیت دارد، زیرا امکان آماده‌سازی و واکنش سریع به شرایط اضطراری را فراهم می‌کند و از خسارات زیست‌محیطی و اقتصادی جلوگیری می‌کند [۱۱ و ۲۱].

دوقلوی دیجیتال علاوه بر پیش‌بینی، نقش مهمی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب و انرژی دارد. تحلیل داده‌های لحظه‌ای و شبیه‌سازی چند سناریویی به بهینه‌سازی مصرف آب، مدیریت سدها و شبکه‌های توزیع کمک می‌کند و هدررفت منابع را کاهش می‌دهد [۱۱ و ۲۲]. این ویژگی باعث می‌شود تصمیمات اقتصادی و محیط‌زیستی پایدارتر اتخاذ شوند و کارایی مدیریت منابع افزایش یابد [۷ و ۹].

یکی دیگر از یافته‌های کلیدی، کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در دوقلوی دیجیتال‌ها است که توانایی مدل در پیش‌بینی شرایط غیرخطی و پیچیده را افزایش می‌دهد و امکان واکنش سریع به تغییرات محیطی را فراهم می‌کند [۵ و ۲۱]. ترکیب داده‌های IoT با یادگیری ماشین، مدل‌های دوقلوی دیجیتال را پویا و قابل به‌روزرسانی می‌کند و باعث می‌شود تصمیم‌گیری هوشمند و لحظه‌ای ممکن شود [۱۱ و ۲۲]. این رویکرد در شبیه‌سازی رخداد‌های غیرمنتظره و ارائه توصیه‌های مدیریتی، کاربرد عملی قابل توجهی دارد.

با وجود مزایای متعدد، مطالعات نشان می‌دهند که دوقلوی دیجیتال با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. کمبود داده‌های دقیق و لحظه‌ای، پیچیدگی فنی مدل‌ها، هزینه بالای پیاده‌سازی و مقاومت سازمانی و اجتماعی از جمله چالش‌های اصلی هستند [۶، ۸ و ۱۰]. نبود استانداردهای جهانی و قابلیت همکاری میان سیستم‌ها نیز مانع ایجاد شبکه‌های یکپارچه مدیریت حوزه‌های آبخیز شده و بهره‌وری مدل‌ها را کاهش می‌دهد [۱ و ۵]. تحلیل همگرایی یافته‌ها نشان می‌دهد که پژوهش‌های اخیر به سمت یکپارچه‌سازی داده‌ها، مدل‌های فیزیکی و هوش مصنوعی حرکت کرده‌اند تا قابلیت پیش‌بینی و کاربرد عملی

دوقلوی دیجیتال افزایش یابد [۸، ۹ و ۱۸]. استفاده از سناریوهای متعدد و مدل‌های شبیه‌سازی چندبعدی، امکان ارزیابی تصمیمات مدیریتی بلندمدت را فراهم می‌کند و به مدیران کمک می‌کند اثرات تغییرات محیطی و اقلیمی را پیش‌بینی کنند [۷ و ۲۲].

فرصت‌های آینده شامل پیشرفت فناوری سنسورها، اینترنت اشیا و پردازش داده‌های بزرگ است که می‌تواند دقت مدل‌ها را افزایش دهد و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد. همچنین، ارتقاء پذیرش اجتماعی و سازمانی، آموزش پرسنل و ایجاد همکاری میان‌رشته‌ای، از عوامل کلیدی موفقیت دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شوند [۸، ۱۱ و ۲۱]. استانداردهای داده‌ها و مدل‌ها و ایجاد قابلیت همکاری میان سیستم‌ها، مسیر مهمی برای توسعه گسترده و کاربردی دوقلوی دیجیتال‌ها در سطح جهانی است [۱ و ۵].

دوقلوی دیجیتال به‌عنوان فناوری نوین، توانمندی بالایی در بهبود مدیریت پایدار منابع آب، کاهش ریسک‌های محیطی و بهینه‌سازی مصرف انرژی دارد. با این حال، موفقیت در بهره‌برداری از آن مستلزم حل چالش‌های داده‌ای، فنی، اقتصادی و اجتماعی و تقویت همکاری میان‌رشته‌ای و استانداردسازی مدل‌ها است. پیشرفت در این زمینه‌ها می‌تواند دوقلوی دیجیتال‌ها را به ابزار عملی و گسترده برای مدیریت حوزه‌های آبخیز تبدیل کرده و مدیریت منابع آب را به سطحی هوشمند، پایدار و کارآمد ارتقاء دهد [۷، ۱۰ و ۲۲].

نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل تطبیقی مطالعات بررسی‌شده، این پژوهش صرفاً به‌مرور کاربردهای فناوری دوقلوی دیجیتال محدود نبوده، بلکه یک چارچوب مفهومی و اجرایی برای استقرار این فناوری در مدیریت حوزه‌های آبخیز پیشنهاد می‌کند. در این چارچوب، استقرار دوقلوی دیجیتال به‌عنوان یک فرآیند پیوسته و یکپارچه در پنج گام اصلی شامل (۱) جمع‌آوری و یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی، (۲) توسعه مدل دیجیتال حوزه آبخیز، (۳) پایش و همگام‌سازی برخط مدل با داده‌های واقعی، (۴) شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوهای مدیریتی و اقلیمی و (۵) پشتیبانی از تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی مدیریت منابع آب تعریف می‌شود. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که هر یک تنها بر یکی از اجزای این فرآیند تمرکز داشته‌اند، چارچوب پیشنهادی حاضر ارتباط میان مؤلفه‌های داده، مدل، تحلیل و تصمیم‌گیری را در قالب یک نظام منسجم تبیین می‌کند. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای طراحی سامانه‌های دوقلوی دیجیتال در پروژه‌های اجرایی مدیریت حوزه‌های آبخیز بوده و مسیر توسعه پژوهش‌های آینده را نیز مشخص سازد.

دوقلوی دیجیتال به‌عنوان یک فناوری نوین، قابلیت‌های چشمگیری در مدیریت حوزه‌های آبخیز ارائه می‌دهد و می‌تواند به بهبود پیش‌بینی جریان و کیفیت آب، مدیریت ریسک‌های محیطی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع کمک کند. با این حال،

- توسعه مدل‌های یکپارچه، مقیاس‌پذیر و پویا که بتوانند داده‌های IoT و هوش مصنوعی را در زمان واقعی ادغام کنند
- افزایش آگاهی و مشارکت جامعه محلی برای جلب اعتماد و پذیرش اجتماعی فناوری‌های نوین در مدیریت حوزه‌های آبخیز

منابع

1. Bartos, M., and Kerkez, B. 2021. Pipedream: An interactive digital twin model for natural and urban drainage systems. *Environmental Modelling & Software* 144 105120.
2. Brahmbhatt, P., Maheshwari, A. and Gudi, R.D. 2023. Digital twin assisted decision support system for quality regulation and leak localization task in large-scale water distribution networks. *Digital Chemical Engineering* 9 100127.
3. Brocca, L., Barbetta, S., Camici, S., Ciabatta, L., Dari J., Filippucci, P., Massari, C., Modanesi, S., Tarpanelli, A., and Bonaccorsi, B. 2024. A Digital Twin of the terrestrial water cycle: a glimpse into the future through high-resolution Earth observations. *Frontiers in Science* 1 1190191.
4. Chen H., Xiao X., Chen C., Chen M., Li C., Lu K., Lin H., and Fang C. 2024. Digital twin-based virtual modeling of the Poyang Lake wetland landscapes. *Environmental Modelling & Software* 181 106168.
5. Chen R., Wang Q. and Javanmardi A. 2025. A review of the application of machine learning for pipeline integrity predictive analysis in water distribution networks: R. Chen et al. *Archives of Computational Methods in Engineering* 32 (6): 3821-3849.
6. Dui H., Cao T., and Wang F. 2025. Digital twin-based resilience evaluation and intelligent strategies of smart urban water distribution networks for emergency management. *Resilient Cities and Structures* 4 (1), 41-52.
7. Expósito, A., and Cebollero E.D. 2025. How the digital revolution is reshaping water management and policy: A focus on Spain. *Utilities Policy* 96 102020.
8. Feng, J., Tang, H., Zhou, S., Cai, Y., and Zhang, J. 2025. Cognitive digital twins of the natural environment: Framework and application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 139 109587.

محدودیت‌هایی از جمله کمبود داده‌های دقیق، پیچیدگی فنی، هزینه‌های بالای پیاده‌سازی و چالش‌های اجتماعی و مدیریتی، هنوز مانع استفاده گسترده از این فناوری هستند. برای بهره‌برداری کامل، لازم است شبکه‌های داده توسعه یابند، همکاری میان‌رشته‌ای تقویت شود و استانداردهای مدل‌سازی ایجاد گردد. در نهایت، دوقلوی دیجیتال می‌تواند به ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری پایدار و هوشمند در مدیریت حوزه‌های آبخیز تبدیل شود، به شرط آنکه چالش‌های موجود به صورت برنامه‌ریزی شده حل شوند و فناوری به طور عملی و گسترده پیاده‌سازی گردد. بر اساس نتایج حاصل از مرور مطالعات، می‌توان یک چارچوب مفهومی برای استقرار فناوری دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز پیشنهاد کرد. این چارچوب شامل پنج مرحله اصلی است:

1. جمع‌آوری و یکپارچه‌سازی داده‌ها: گردآوری داده‌های هیدرولوژیکی، هواشناسی، توپوگرافی، کیفیت آب، تصاویر سنجنش‌ازدور و اطلاعات حسگرهای اینترنت اشیا.
 2. ایجاد مدل دیجیتال حوزه آبخیز: توسعه مدل دیجیتال با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل‌های هیدرولوژیکی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی.
 3. پایش و به‌روزرسانی بلادرنگ: همگام‌سازی مستمر مدل با داده‌های واقعی به منظور پایش وضعیت حوزه آبخیز و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها.
 4. شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی: ارزیابی سناریوهای مختلف مانند وقوع سیلاب، خشک‌سالی، تغییر کاربری اراضی و اجرای عملیات آبخیزداری برای انتخاب بهترین گزینه مدیریتی.
 5. پشتیبانی از تصمیم‌گیری: استفاده از نتایج شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی، مدیریت منابع آب، کاهش مخاطرات طبیعی و بهبود مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز.
- این چارچوب می‌تواند به عنوان یک راهنمای مفهومی برای توسعه سامانه‌های دوقلوی دیجیتال در مدیریت حوزه‌های آبخیز مورد استفاده پژوهشگران و مدیران اجرایی قرار گیرد.

پیشنهادات

- توسعه و تقویت شبکه‌های داده و سنجنش آنلاین برای افزایش دقت مدل‌های دوقلوی دیجیتال
- ارتقاء همکاری میان‌رشته‌ای میان مهندسان آب، متخصصان داده و سیاست‌گذاران برای بهبود کاربرد عملی دوقلوی دیجیتال
- استانداردسازی مدل‌ها و داده‌ها برای ایجاد قابلیت همکاری و یکپارچه‌سازی سیستم‌های دوقلوی دیجیتال
- آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی جهت افزایش پذیرش فناوری و توان مدیریت دوقلوی دیجیتال‌ها
- ایجاد سیاست‌های حمایتی و سرمایه‌گذاری هدفمند برای کاهش موانع اقتصادی و افزایش پیاده‌سازی گسترده دوقلوی دیجیتال‌ها

18. Pesantez, J.E., Alghamdi, F., Sabu, S., Mahinthakumar, G., and Berglund, E.Z. 2022. Using a digital twin to explore water infrastructure impacts during the COVID-19 pandemic. *Sustainable Cities and Society* 77 103520.
19. Rápalo, L.M., Gomes, Jr M.N. and Mendiondo, E.M. 2024. Developing an open-source flood forecasting system adapted to data-scarce regions: A digital twin coupled with hydrologic-hydrodynamic simulations. *Journal of Hydrology* 644 131929.
20. Shafiei, M., Gholizadeh, S., Jodoy, A., Majidi, M., and Ghobadi, F. 2022. Analytical Note: Developing a Digital Atlas of Iran's Water Resources Necessity, Vision, and Macro-Strategies *Journal of Water and Sustainable Development*, 9(2), 127-134.
21. Sharifi, A., Beris, A.T., Javidi, A.S., Nouri, M., Lonbar, A.G., and Ahmadi, M. 2024. Application of artificial intelligence in digital twin models for stormwater infrastructure systems in smart cities. *Advanced Engineering Informatics* 61 102485.
22. Wang, A.-J., Li, H., He, Z., Tao, Y., Wang, H., Yang, M., Savic, D., Daigger, G.T., and Ren, N. 2024. Digital twins for wastewater treatment: A technical review. *Engineering* 36, 21-35.
23. Yang, Y., Xie, C., Fan, Z., Xu, Z., Melville, B.W., Liu, G., and Hong, L. 2024. Digital twinning of river basins towards full-scale, sustainable and equitable water management and disaster mitigation. *npj Natural Hazards* 1 (1), 43.
24. Yuntao, Y., Yunzhong, J., Lili, L., Hongli, Z., Jingjing G., Jiaping D., Yin C., and Hao D. 2022. Digital twin watershed: new infrastructure and new paradigm of future watershed governance and management. *Advances in Water Science* 33 (5), 683-704.
25. Zekri, S., Jabeur, N., and Gharrad, H. 2022. Smart water management using intelligent digital twins. *Computing and Informatics* 41 (1), 135–153.
9. Kim, M.-G., and Bartos, M. 2024. A digital twin model for contaminant fate and transport in urban and natural drainage networks with online state estimation. *Environmental Modelling & Software* 171 105868.
10. Kim, Y., Oh, J., and Bartos, M. 2025. Stormwater digital twin with online quality control detects urban flood hazards under uncertainty. *Sustainable Cities and Society* 118 105982.
11. Li, X., Luo, J., Li, Y., Wang, W., Hong, W., Liu, M., Li, X., and Lv, Z. 2022. Application of effective water-energy management based on digital twins technology in sustainable cities construction. *Sustainable Cities and Society* 87 104241.
12. Liu, H., Su, H., and Li, H. 2024. Study on Digital Twin Technologies for Watershed Information Modeling (WIM): A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. *Archives of Computational Methods in Engineering* 31 (1), 263-289.
13. Liu, W., He S., Mou, J., Xue, T., Chen, H., and Xiong, W. 2023. Digital twins-based process monitoring for wastewater treatment processes. *Reliability Engineering & System Safety* 238 109416.
14. Morlot, M., Rigon, R., and Formetta, G. 2024. Hydrological digital twin model of a large anthropized italian alpine catchment: The Adige river basin. *Journal of Hydrology* 629 130587.
15. Pal, D., Marttila, H., Ala-Aho, P., Lotsari, E., Ronkanen, A.-K., Gonzales-Inca, C., Croghan, D., Korppoo, M., Kämäri, M., and Rooijen, E.v. 2025. Blueprint conceptualization for a river basin's digital twin. *Hydrology Research* 56 (3), 197-212.
16. Park, D., and You, H. 2023. A Digital Twin Dam and Watershed Management Platform. *Water* 15 (11), 2106.
17. Patel, R.K., Soni, P. and Singh, P. 2026. Advances in remote sensing and GIS applications in watershed hydrology: a systematic review. *Journal of Hydrology* 664 134459.



Abstract

Application of Digital Twin in Watershed ManagementP. Maleki¹ and N. Fallah Hossein Abadi^{2*}

Received: 2026/06/01 Accepted: 2026/09/01

Sustainable watershed management in the face of climate change, increasing anthropogenic pressures, and growing demand for water resources requires the adoption of advanced technologies. This study aims to investigate the applications of Digital Twin technology in watershed management and to analyze its potential, applications, challenges, and opportunities for smart water resources management. A systematic review of the scientific literature was conducted, focusing on published studies addressing Digital Twin technology in the fields of water resources management, hydrology, and watershed management. The findings indicate that Digital Twins, through the integration of remote sensing data, Internet of Things (IoT) sensors, hydrological models, and artificial intelligence algorithms, can facilitate real-time monitoring, flood forecasting, assessment of water quantity and quality, simulation of management scenarios, and optimization of water resource operations. The review also identified several major barriers to the development and implementation of this technology, including limited availability of high-quality data, high implementation costs, modeling complexity, the lack of standardized and interoperable frameworks, and managerial and organizational constraints. Overall, the findings suggest that Digital Twin technology can serve as an effective tool for advancing smart and sustainable watershed management, provided that the necessary data, technical, and organizational infrastructure is established.

Keywords: Digital twin, Flood forecasting, Smart watershed management, Water resources efficiency.

1. Design Review Expert, Regional Water Mazandaran Province

2. Design Review Expert, Regional Water Alborz Province, nfallah.work@gmail.com