مجله ترویجی علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی
دوره نهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۷، بهار و تابستان ۱۴۰۵
jaist.areeo.ac.ir

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/jaist.2025.369919.1147

دوقلوی رقمی و مدیریت مخاطرات طبیعی

ابوالفضل جعفری
استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
رایانامه: *jaafari@rifr-ac.ir*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲ تاریخ چاپ: ۱۵ /۱۴۰۵/۰۲ صص : ۱۲-۱

چکیده

هدف مقاله پیش‌رو بررسی نقش و ظرفیت‌های فناوری دوقلوی رقمی در مدیریت مخاطرات طبیعی است. دوقلوی رقمی، نمایش مجازی، پویا و تعاملی از اشیاء، فرایندها یا محیط‌های واقعی است که با استفاده از اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و کلان‌داده، امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق شرایط و رفتار سامانه‌ها و پدیده‌ها را فراهم می‌کند. این فناوری که خاستگاه آن به طرح آپولوی ناسا در سال ۱۹۶۹ میلادی بازمی‌گردد، در سال‌های اخیر در حوزه‌های مختلف، به‌ویژه در مدیریت مخاطرات طبیعی، کاربردهای نوینی یافته است. این مقاله با رویکردی توصیفی، کاربردهای کلیدی دوقلوی رقمی، ازجمله نمونه‌سازی رخدادهای بحرانی، هشدار زودهنگام، پایش زیرساخت‌های حیاتی، مدیریت منابع اضطراری و آموزش واقع‌گرایانه را در حوزه کشاورزی بررسی می‌کند. همچنین، سکوهای رایج معرفی می‌شوند و نقش زبان تعریف دوقلوی رقمی در استانداردسازی ساختار و رفتار دوقلوهای رقمی تشریح می‌شود. در پایان، با شناسایی چالش‌های فنی و اجرایی، بر ضرورت توسعه زیرساخت‌های فناورانه، استانداردهای مشترک و پژوهش‌های میان‌رشته‌ای برای استقرار پایدار این فناوری تأکید می‌شود. در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، فناوری دوقلوی رقمی می‌تواند با شبیه‌سازی دقیق رخدادهای بحرانی در تحقیقات وآموزش تعاملی روش‌های مقابله با مخاطرات و ترویج الگوهای تاب‌آور و نوآورانه در کشاورزی و منابع طبیعی، در مدیریت مخاطرات طبیعی نقشی مؤثر داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: آتش‌سوزی جنگل و مرتع، خشک‌سالی، زمین‌لغزش، سیل، شبیه‌سازی، دوقلوی رقمی، مدیریت بحران.

مقدمه

دوقلوی رقمی[1] نمایش مجازی از یک جسم، فرایند، خدمت یا محیط است که هم‌زمان[2] با نسخه واقعی خود در تعامل است. این فناوری با ترکیب اینترنت اشیا [3]، هوش مصنوعی[4] و تحلیل داده‌های کلان[5] ، امکان شبیه‌سازی، پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملیات فیزیکی را فراهم می‌آورد. به عبارت ساده‌تر، دوقلوی رقمی مانند یک آینه است که رفتار، وضعیت و عملکرد شیی واقعی را به دقت شبیه‌سازی می‌کند. فناوری دوقلوی رقمی ازطریق حسگرهای مختلف، دنیای فیزیکی را در دنیای سایبری (در یک رایانه) شبیه‌سازی می‌کند و این شبیه‌سازی را برای پیش‌بینی ترتیب و پیامدهای پدیده‌های هدف اجرا می‌کند.

نخستین ایده‌های توسعه این فناوری به طرح آپولو[6] در سال ۱۹۶۹ بازمی‌گردد که در آن ناسا[7] دو فضاپیمای یکسان ساخت. یکی از آن‌ها را به ماموریت‌های ماه [8] ارسال کرد و دیگری که بر روی زمین باقی مانده بود را فضاپیمای همزاد نامید و از آن برای شبیه‌سازی وضعیت فضاپیمای دیگر استفاده کرد (روزن و همکاران، ۲۰۲۵)[9]. در سال ۱۹۹۱، دیوید گلرنتر[10] در کتاب جهان آیینه‌ای[11]، اصطلاح دوقلوی رقمی را برای نخستین بار ابداع و به کار برد. در سال ۲۰۰۳ و در همایش مهندسی تولید شرکت تروی، میشیگان، مایکل گریوز[12] استاد دانشگاه میشیگان اولین مفهوم عمومی و نمونه آزمایشی یک دوقلوی رقمی را ارائه کرد. درنتیجه، مفهوم دوقلوی رقمی به‌عنوان یک نمونه مفهومی برای تعریف مدیریت چرخه عمر محصول[13] پدید آمد (گریوز، ۲۰۰۵).

در سال ۲۰۱۰ و با طرح دوباره این مفهوم ازسوی جان ویسکرز[14] از ناسا، دوقلوی رقمی توجه بیشتری را به خود جلب کرد و فراگیر شد. جان ویسکرز توضیح داد که چگونه می‌توان از دوقلوی رقمی در شبیه‌سازی کپسول‌های فضایی و آزمایش بر روی آن‌ها استفاده کرد. در سال ۲۰۱۲، ناسا و آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی ایالات متحده[15]، دوقلوهای رقمی را برای وسایل نقلیه آینده معرفی کردند و آن را به‌عنوان یک شبیه‌سازی چندفیزیکی، چندمقیاسی و احتمالی از یک وسیله نقلیه یا سامانه ساخته‌شده تعریف کردند که بهترین نمونه‌های فیزیکی موجود، داده‌های حسگر به‌روز و داده‌های تاریخی را برای نمایش وضعیت و شرایط دوقلوهای رقمی به کار می‌گرفتند. در همان سال، ناسا واحد نمونه‌سازی، شبیه‌سازی، فناوری اطلاعات و پردازش[16] را راه‌اندازی کرد و اصطلاح دوقلوهای رقمی به‌طور گسترده برای محصولات و فرایندهای تولید به کار رفت.

در صنعت هوافضا، دوقلوی رقمی به‌عنوان نسخه مجازی هواپیما یا سامانه‌های پروازی عمل می‌کند و برای بهینه‌سازی طراحی، افزایش بهره‌وری سوخت، برنامه‌ریزی تعمیرات پیش‌بینی‌شده و ارتقای ایمنی پرواز کاربرد دارد. اما کاربرد این فناوری به هوافضا محدود نیست و در بسیاری از صنایع تحول‌آفرین شده است. برای نمونه، در صنایع تولیدی، دوقلوی رقمی می‌تواند خطوط تولید را به‌شکل مجازی شبیه‌سازی کند تا گلوگاه‌های تولید شناسایی شوند، فرایندها بهینه شده و زمان تعمیرات پیشگیرانه تعیین شود؛ بدون آن‌که خللی در تولید واقعی ایجاد شود. با شبیه‌سازی قطار و شبکه ریل در حوزه حمل‌ونقل ریلی نیز می‌توان تأثیر شرایط آب‌وهوایی، ترافیک یا تغییرات سرعت بر عملکرد سامانه را تحلیل کرد و از خرابی‌های احتمالی پیشگیری کرد. نمونه‌های دوقلوی رقمی زیرساخت‌های شهری در شهرهای هوشمند، امکان مدیریت بهینه ترافیک، منابع انرژی و آب و فاضلاب را فراهم می‌آورند و به مدیران شهری فرصت می‌دهند تا با پیش‌بینی رشد جمعیت یا الگوهای مصرف، برنامه‌ریزی پایدارتری ارائه دهند.

1.Digital Twin
2. Real Time
3. Internet of Thingsl
4. Artificial Intelligence
5. Big Data
6. Apollo Project
7. NASA
8. Lunar Missions
9. Rosen et al., 2015
10. David Gelernter
11. Mirror Worlds
12. Michael Grieves
13. Product Life Cycle Management
14. John Vickers
15. United States Air Force (USAF)
16. Modeling, Simulation, Information, Technology, and Processing

در حوزه معماری و ساخت‌وساز، از دوقلوی رقمی ساختمان‌ها برای تحلیل مصرف انرژی، ایمنی در برابر زلزله یا آتش‌سوزی و بهینه‌سازی طراحی فضاها براساس الگوی تردد کاربران استفاده می‌شود. این فناوری، در شبکه‌های انرژی نیز امکان پایش دقیق عملکرد نیروگاه‌ها و پیش‌بینی وضعیت‌های بحرانی مانند افزایش بار مصرف یا نقص فنی را فراهم می‌کند و در پایداری شبکه نقش مهمی دارد.

در عرصه سلامت، ایجاد دوقلوی رقمی از بدن بیماران، به پزشکان کمک می‌کند تا واکنش فرد به داروهای خاص را پیش‌بینی کنند یا حتی عمل‌های جراحی به‌شکل مجازی تمرین و ارزیابی شوند. این فناوری به‌ویژه در مراقبت‌های ویژه و درمان‌های شخصی‌سازی‌شده نیز نقش کلیدی دارند. در حوزه محیط زیست، منابع طبیعی و کشاورزی، فناوری دوقلوی رقمی می‌تواند زمین‌های زراعی، جنگل‌ها یا منابع آبی را به‌شکل مجازی نمونه‌سازی کند. برای مثال، یک دوقلوی رقمی با جمع‌آوری داده‌هایی مانند مقدار رطوبت خاک، دمای محیط، شرایط رشد گیاه، وضعیت آفات و مصرف آب از یک مزرعه و بازنمایی[1] آن‌ها در یک نمونه مجازی، به کشاورزان کمک می‌کند تا با پیش‌بینی بهترین زمان برای آبیاری، سمپاشی یا برداشت محصول، منابع را بهینه مصرف کنند و بهره‌وری را افزایش دهند (حسنوند و حسینی، ۱۴۰۴).

همچنین، با شبیه‌سازی وضعیت جنگل‌ها یا حوزه‌های آبخیز در حوزه منابع طبیعی، می‌توان الگوهای تغییر کاربری زمین یا احتمال وقوع مخاطرات طبیعی[2] را پیش‌بینی کرد و برای حفاظت از بوم‌سازگان ها[3] تصمیم‌گیری مؤثرتری داشت.

هدف از مقاله پیش‌رو، معرفی قابلیت‌های فناوری دوقلوی رقمی در مدیریت مخاطرات طبیعی است. در این مقاله، ابتدا به نقش این فناوری و مزایای آن در فرایندهایی مانند نمونه‌سازی و شبیه‌سازی رخداد[4]های بحرانی، پیش‌بینی و هشدار زودهنگام مخاطرات و مطالعات موردی و مثال‌های عملی اشاره می‌کند. در ادامه، سکوهای اجرای دوقلوی رقمی و زبان برنامه‌نویسی آن تشریح می کند. در پایان، با ذکر چالش‌ها و محدودیت‌های اجرایی این فناوری، کاربردهای آن در مدیریت هوشمند و پایدار مخاطرات طبیعی تبیین خواهد شد.

یافته‌ها

نقش فناوری دوقلوی رقمی در مدیریت مخاطرات طبیعی

از دهه ۲۰۰۰ میلادی به بعد، فراوانی، شدت و وسعت مخاطرات طبیعی افزایش یافته و خسارات و تلفات سنگینی را در سراسر جهان به‌جا گذاشته است (دفتر سازمان ملل برای کاهش خطر مخاطرات، ۲۰۲۱)[5]. این مسئله نه‌تنها چالش‌هایی را در زمینه قابلیت و ظرفیت زیرساخت‌ها برای پیشگیری و کاهش اثر مخاطرات ایجاد کردند، بلکه در زمینه امداد، نجات و بازسازی نیز نیازهای گسترده‌ای را پدید آوردند (نوولو-کاسانووا و همکاران، ۲۰۲۱)[6].

بسیاری از کشورها برای مقابله با مخاطرات طبیعی، سازمان‌های مدیریت بحران ایجاد کردند؛ از جمله سازمان مدیریت اضطراری فدرال آمریکا، وزارت مدیریت اضطراری چین، سازمان مدیریت بحران ایران و دفتر سازمان ملل برای کاهش خطر مخاطرات. همچنین، اسناد راهبردی مانند برنامه پنج‌ساله چهاردهم چین، راهبرد مقابله با تغییرات اقلیمی و پیشگیری از مخاطرات طبیعی در ژاپن و اهداف آمادگی ملی در برابر مخاطرات طبیعی در ایالات متحده، بر توسعه نظام‌های هوشمند و یکپارچه در زمینه پیشگیری، کاهش، امدادرسانی، بازسازی پس از بحران و آموزش آگاهی از خطر تأکید کردند. با این حال، همچنان موانع زیادی در مسیر مدیریت مخاطرات طبیعی وجود دارد، ازجمله نبود هماهنگی میان فناوری‌ها، دشواری در به‌اشتراک‌گذاری منابع و

1. Representation
2. Natural Hazards
3. Ecosystem3
4. Scenario
5. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR)
6 Novelo-Casanova et al. (2021).

نبود یکپارچگی عملکردی (یو و هی، ۲۰۲۲) [1]. ازاین‌رو، ایجاد یک سکوی جامع برای مدیریت مؤثر مخاطرات طبیعی و بلایا [2]، به مسئله‌ای کلیدی تبدیل شد. در این میان، فناوری دوقلوی رقمی به‌عنوان یکی از نویدبخش‌ترین فناوری‌ها برای مدیریت هوشمند و جامع مخاطرات طبیعی شناخته شد.

نمونه‌سازی و شبیه‌سازی رخدادهای بحرانی

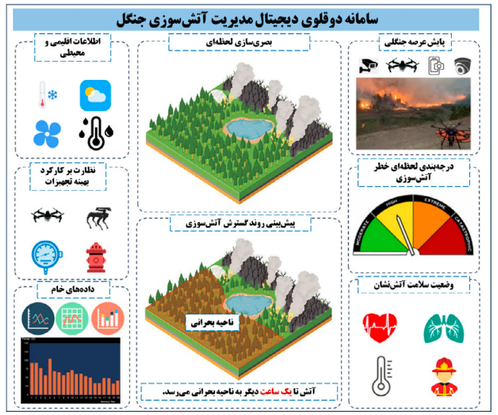
با استفاده از نمونه‌های مبتنی بر دوقلوی رقمی امکان نمونه‌سازی و شبیه‌سازی دقیق و واقع‌گرایانه انواع رخدادهای بحرانی، ازجمله زلزله، سیل، طوفان، آتش‌سوزی، نشت مواد شیمیایی و حملات سایبری فراهم می‌شود. دوقلوی رقمی، نسخه‌ای رقمی و به‌روز از دارایی‌ها، زیرساخت‌ها یا حتی کل یک شهر است که به‌شکل پیوسته با داده‌های واقعی به‌روزرسانی می‌شود. در این چارچوب، تصمیم‌گیران می‌توانند با تعریف شاخص‌های مختلف، رخدادهای فرضی یا واقعی را در بستر رقمی بازآفرینی کرده و رفتار سامانه‌ها، زیرساخت‌ها و افراد را در شرایط اضطراری بررسی کنند. برای مثال، در یک رخدادی شبیه‌سازی زلزله، می‌توان واکنش شبکه برق، آب، گاز، سامانه‌های حمل‌ونقل و امدادرسانی را تحلیل و نقاط آسیب‌پذیر را شناسایی کرد. این شبیه‌سازی‌ها به تصمیم‌گیران امکان می‌دهد تا سطح خسارات، تعداد تلفات و گلوگاه‌های عملیاتی را به‌دقت ارزیابی کنند و بر اساس آن، بهتر برنامه‌ریزی کنند. همچنین، با آزمودن رخدادهای مختلف واکنش، می‌توان گزینه‌های گوناگون مقابله را تحلیل و در نهایت بهترین و کارآمدترین راهکارها را انتخاب و بهینه‌سازی کرد.

پیش‌بینی و هشدار زودهنگام مخاطرات

دوقلوی رقمی می‌تواند با استفاده از داده‌های لحظه‌ای و ترکیب آن‌ها با نمونه‌های تحلیلی و پیش‌بینی، نقش بسیار مهمی در شناسایی زودهنگام مخاطرات طبیعی داشته باشد. این فناوری با اتصال به شبکه‌ای از حسگرها، تصاویر ماهواره‌ای، پهپادها و منابع داده محیطی، به‌طور پیوسته اطلاعات اقلیمی و محیطی را پایش می‌کند. سامانه دوقلوی رقمی با شناسایی هرگونه ناهنجاری یا بروز الگوهای رفتاری غیرعادی که با مخاطرات طبیعی مرتبط هستند، می‌تواند به‌شکل خودکار هشدارهای اولیه را صادر کند و مسئولان، امدادگران و حتی مردم را از احتمال وقوع بحران آگاه سازد. این هشدارها می‌توانند ازطریق سامانه‌های پیامکی، برنامه‌های کاربردی همراه، بلندگوهای محلی یا حتی شبکه‌های اجتماعی منتشر شوند (شکل ۱).

آموزش و آگاهی‌بخشی

در آموزش‌های واقع‌گرایانه نیز می‌توان از دوقلوهای رقمی



شکل ۱. ساختار و اجزای سامانه دوقلوی رقمی آتش‌سوزی جنگل (لی و همکاران، ۲۰۲۴) [3]

1. Yu and He (2022)
2. Disasters
3.Li et al. (2024)

استفاده کرد. سازمان‌های امدادی، نیروهای شهری و حتی عموم مردم با استفاده از شبیه‌سازی‌های رقمی می‌توانند در شرایط مشابه واقعی آموزش ببینند. در کنار این موارد، شبیه‌سازی‌های رقمی بستر مناسبی برای آموزش و تمرین تیم‌های امدادی فراهم می‌کنند. تیم‌های عملیاتی می‌توانند در محیطی ایمن و واقع‌گرایانه، رخدادهای پیچیده بحران را تمرین کنند و آمادگی خود را برای مواجهه با شرایط واقعی افزایش دهند. همچنین، چنین رویکردی احتمال خطر و میزان هزینه‌ها را نیز کاهش می‌دهد چرا که به‌جای انجام تمرین‌های پرهزینه و گاه محدود فیزیکی، می‌توان در محیط‌های شبیه‌سازی‌شده، اثرات اقدامات مختلف را بدون پیامدهای مختلف ارزیابی کرد.

دستاوردها

سکوهای کاربردی دوقلوی رقمی

سکوهای کاربردی دوقلوی رقمی بسترهایی نرم‌افزاری یا ترکیبی از سخت‌افزار و نرم‌افزار هستند که امکان نمونه‌سازی، شبیه‌سازی، پایش بلادرنگ، پیش‌بینی و بهینه‌سازی اشیاء، فرایندها یا سامانه‌های فیزیکیس را در قالب نسخه‌ای مجازی فراهم می‌کنند. از این سکوها اغلب به‌عنوان زیرساخت اصلی در طرح های صنعتی، شهری، عمرانی، کشاورزی، پزشکی و محیط‌زیستی استفاده می‌شود.

اجزای اصلی سکوهای دوقلوی رقمی

نمونه‌سازی مجازی [1]: ایجاد یک نمونه رقمی از سامانه واقعی (مانند ماشین، پل، انسان، مزرعه و جنگل).

یکپارچه‌سازی داده [2]: گردآوری داده‌های بلادرنگ با استفاده از حسگرها، اینترنت اشیا و سامانه‌های سرپرستی و گردآوری داده [3].

تحلیل و شبیه‌سازی [4]: اجرای تحلیل‌های پیش‌بینی، تشخیص ناهنجاری‌ها و آزمون رخدادهای فرضی.

بازخورد دوطرفه [5]: تبادل اطلاعات بین محیط واقعی و نمونه مجازی به‌شکل بلادرنگ.

بصری‌سازی [6]: نمایش داده‌ها به‌شکل گرافیکی، سه بعدی، *واقعیت مجازی* [7]، واقعیت افزوده [8] یا نقشه‌های رقمی.

در جدول ۱ معروف‌ترین و کارآمدترین سکوهای کنونی دوقلوی رقمی ارائه شده است.

در جدول ۲، سکوهای مناسب برای مدیریت مخاطرات طبیعی مقایسه شده‌اند. پشتیبانی از رخدادهای بحرانی، یکپارچگی با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و اینترنت اشیا، توانمندی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی، تحلیل‌های بلادرنگ و مناسب بودن برای زیرساخت‌های بحرانی ازجمله معیارهای ارزیابی هستند. همچنین، در جدول ۳، راهنمای انتخاب سکو براساس کاربرد در مدیریت مخاطرات طبیعی نشان داده شده است.

1. Virtual Modeling
2.Data Integration
3. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)
4. Simulation & Analytics
5.. Bi-directional Feedback
6. Visualization
5. Virtual Reality
6. Visualization
7. Virtual Reality
8. Additive Reality

جدول ۱. معروف ترین و کارآمدترین سکوهای کنونی دوقلوی رقمی

نام سکو	توسعه دهنده	ویژگی‌ها و کاربردها
Azure Digital Twins	مایکروسافت	IoTHub ساخت نمونه‌های رقمی از محیط‌های هوشمند مانند ساختمان‌ها، کارخانه‌ها و شهرها. قابلیت اتصال به
Siemens NX & Teamcenter	زیمنس	با پشتیبانی از دوقلوی رقمی در صنعت (PLM) طراحی، شبیه‌سازی و مدیریت چرخه عمر محصول
PTC ThingWorx	PTC	سکو IOT و دوقلوی رقمی با تمرکز بر رصصه گیری صنعتی تعمیرات پیش بینانه وAR
Dassault Systems3 فEXPERIENCE	Dassault Systems	کاربرد در هوافضا، حمل‌ونقل، انرژی، پزشکی و محیط زیست
GE Digital Predix	جنرال الکتریک	تمرکز بر صنایع سنگین و انرژی برای بهینه‌سازی عملیات و کاهش خرابی
Ansys Twin Builder	Ansys	طراحی و شبیه‌سازی دوقلوی رقمی مهندسی با تمرکز بر نمونه‌های چندفیزیکی
IBM Digital Twin Exchange	IBM	یک بازار برای دوقلوهای رقمی از تأمین‌کنندگان مختلف، یکپارچگی با Watson AI
Bentley iTwin Platform	Bentley Systems	مدیریت زیرساخت‌های عمرانی (پل، تونل، راه‌آهن،...)، یکپارچه با BIM و GIS

جدول ۲. سکوهای قابل استفاده برای مدیریت مخاطرات طبیعی

سکو	توسعه دهنده	قابلیت ها	محدودیت ها
Azure Digital Twins	مایکروسافت	نمونه‌سازی زیرساخت شهری، اتصال به حسگرها، تحلیل وقایع بلادرنگ با AI و GIS	نیاز به دانش فنی زیاد و زیرساخت ابری مایکروسافت
Bentley iTwin Platform	Bentley Systems	برای پایش پل‌ها، جاده‌ها، سدها و خطوط حیاتی در برابر GIS و BIM ادغام مخاطرات	پیچیدگی کاربری، مناسب‌تر برای کاربران حرفه‌ای
Ansys Twin Builder	Ansys	شبیه‌سازی دقیق رفتار سازه‌ها و سامانه‌های زیر بار زلزله، سیل یا طوفان	نیاز به مهارت زیاد در نمونه‌سازی فیزیکی
PTC ThingWorx	PTC	پایش تجهیزات، هشدار بلادرنگ AI برای عملیات میدانی پشتیبانی از IOT	در نمونه‌سازی شهر و GIS محدودتر است
Dassault 3DEXPERI-ENCE	Dassault Systems	شبیه‌سازی محیط زیست، تغییر اقلیم، زلزله، توسعه رخداد	هزینه زیاد و نیاز به مجوزهای تخصصی
GE Predix	GE Digital	تحلیل عملکرد سامانه‌های برق، انرژی، خطوط لوله در بلایا	محدودتر برای محیط‌های شهری و طبیعی

جدول ۳. سکوهای کاربردی برای مدیریت مخاطرات طبیعی

کاربرد	سکو پیشنهادی	توضیح
پایش و پیش‌بینی سیل در شهرها	Azure Digital Twins + ArcGIS	قابلیت اتصال به ایستگاه‌های سنجش باران، نمونه‌سازی بلادرنگ و نمایش نقشه
پایش زیرساخت بحرانی (پل، سد و راه‌آهن)	Bentley iTwin Platform + Ansys Twin Builder	نمونه‌سازی مهندسی و سنجش رفتار سازه‌ها در بحران
هشدار سریع زمین‌لغزش	PTC ThingWorx + IBM Watson	داده‌محور، سریع و مناسب برای سامانه‌های هشدار مردمی
تحلیل اثرات اقلیمی بلندمدت (خشکسالی و آتش‌سوزی جنگل)	Dassault 3DEXPERIENCE	پشتیبانی از رخدادهای اقلیمی و تغییرات بلندمدت
مدیریت خطر در صنایع حساس (نیروگاه و پالایشگاه)	GE Predix + IBM Digital Twin	پایش هوشمند تجهیزات و تاب‌آوری در بحران

معرفی زبان تعریف دوقلوی رقمی[1]

زبان تعریف دوقلوی رقمی، یک زبان نمونه‌سازی است که برای توصیف ویژگی‌ها، رفتارها و روابط بین اجزای مختلف یک دوقلوی رقمی طراحی شده است. این زبان به توسعه‌دهندگان، مهندسان و تحلیل‌گران اجازه می‌دهد تا ساختار منطقی یک دوقلوی رقمی را به‌شکل یک نمونه رسمی بیان کنند. زبان تعریف دوقلوی رقمی به‌عنوان بخشی از سکوی Azure Digital Twins ارائه شده است. هدف از طراحی این زبان، ایجاد یک قالب استاندارد برای نمونه‌سازی دارایی‌های رقمی و فیزیکی به‌شکل بخش بخش، قابل ترکیب و قابل تعامل است. ازنظر ساختاری، زبان تعریف دوقلوی رقمی برپایهJSON-LD ، که یک ساختار داده‌ای گسترش‌پذیر است، توسعه یافته است. این ساختار باعث می‌شود نمونه‌ها، هم برای انسان قابل فهم باشند و هم برای ماشین‌ها قابل پردازش. هر نمونه تعریف دوقلوی رقمی اغلب شامل اجزای زیر است:

۱- @id: شناسه یکتا هر نمونه یا مؤلفه؛

۲- @type: نوع مؤلفه (مانند Interface, Telemetry, Property, Command)؛

۳- displayName برای هر کاربرد انسانی؛

۴- contents: فهرستی از ویژگی‌ها، دورسنج‌ها، دستورات و روابط مؤلفه.

- زبان تعریف دوقلوی رقمی به چهار نوع مؤلفه اصلی اجازه تعریف می‌دهد:
- دورسنجی[2]: برای ارسال داده‌ها از دستگاه به فضای ابری (مانند دما و رطوبت)؛
- ویژگی[3]: داده‌هایی با وضعیت پایدار که می‌توان آن‌ها را خواند یا نوشت (مانند وضعیت وقوع/عدم وقوع یک مخاطره)؛
- فرمان[4]: برای ارسال دستور از فضای ابری به دستگاه (مانند فرمان راه‌اندازی دوباره یا تنظیمات جدید)؛
- رابطه[5]: توصیف روابط بین اجزای مختلف، مانند «این حسگر متعلق به این ماشین است».نمونه‌ای ساده از یک نمونه زبان تعریف دوقلوی رقمی در شکل ۲ ارائه شده است.

1. Digital Twins Definition Language (DTDL)
2. Telemetry
3. Property
4. Command
5. Relationship

```
[
 {
  "@id": "dtmi:example:Sensor;1",
  "@type": "Interface",
  "displayName": "Environmental Sensor",
  "description": "A generic environmental sensor device",
  "@context": "dtmi:dtdl:context;2",
  "contents": [
   {
    "@type": "Property",
    "name": "sensorType",
    "schema": "string",
    "description": "Type of the sensor (e.g., temperature, humidity, smoke)"
   },
   {
    "@type": "Telemetry",
    "name": "sensorValue",
    "schema": "double",
    "description": "Real-time value from the sensor"
   },
   {
    "@type": "Relationship",
    "name": "locatedIn",
    "target": "dtmi:example:ForestRegion;1",
    "properties": [
     {
      "name": "installationDate",
      "schema": "string"
     }
    ]
   }
  ]
 }
]
```

شکل ۲. ساختار کلی از یک نمونه زبان تعریف دوقلوی رقمی

مزایای استفاده از زبان تعریف دوقلوی رقمی

- استانداردسازی: استفاده از زبان تعریف دوقلوی رقمی باعث می‌شود نمونه‌سازی دوقلوهای رقمی به‌شکل استاندارد انجام شده و قابلیت همکاری میان سامانه‌ها فراهم شود؛
- خوانایی بالا: این زبان با ساختاری مبتنی بر JSON، برای توسعه‌دهندگان قابل فهم و توسعه‌پذیر است؛
- نمونه‌سازی سلسله‌مراتبی: امکان تعریف نمونه‌های پیچیده با ترکیب مؤلفه‌های ساده؛
- قابلیت تعامل‌پذیری: نمونه‌های زبان تعریف دوقلوی رقمی می‌توانند به‌راحتی با سایر خدمات ابری و هوش مصنوعی ترکیب شوند؛
- پشتیبانی از اعتبارسنجی: از آنجایی که ساختار زبان صریح[1] است و در آن تعاریف، روابط، منطق و فرایندهای نمونه‌سازی به‌شکل شفاف، دقیق و قابل‌فهم بیان می‌شوند، می‌توان نمونه‌ها را به‌شکل خودکار بررسی و اعتبارسنجی کرد.

چالش‌ها و آینده‌نگری

- با وجود مزایای گسترده، پیاده‌سازی مؤثر دوقلوی رقمی با چالش‌های زیادی روبه‌رو است که لازم است در ابعاد فنی، اجرایی و اجتماعی مورد توجه قرار گیرند. همچنین، برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های این فناوری، آینده‌پژوهی و توسعه پژوهش‌های بین‌رشته‌ای ضرورت دارد.

1. Explicit

چالش‌های فنی و اجرایی

پیاده‌سازی یک سامانه دوقلوی رقمی فرایندی ساده نیست و به هماهنگی دقیق بین سخت‌افزار، نرم‌افزار، زیرساخت داده و تخصص‌های گوناگون نیاز است. برخی از چالش‌های اصلی در این زمینه عبارت‌اند از:

۱-یکپارچگی داده‌ها: برای ایجاد یک دوقلوی رقمی دقیق، باید داده‌هایی از منابع مختلف (حسگرها، پایگاه‌های داده و سامانه‌های مدیریت منابع) به‌شکل هماهنگ، منسجم و در لحظه جمع‌آوری شوند که به پروتکل‌های ارتباطی استاندارد، زیرساخت‌های ابری یا لبه‌ای قدرتمند و قابلیت اطمینان زیاد در شبکه انتقال داده نیاز دارد. در بسیاری از طرح‌ها، ناهماهنگی بین داده‌ها یا کیفیت پایین داده‌های اولیه، کارایی دوقلوی رقمی را کاهش می‌دهد؛

۲-نمونه‌سازی پیچیده: طراحی نمونه‌های فیزیکی، ریاضی و یادگیری ماشین برای بازنمایی دقیق سامانه‌های واقعی، به تخصص و منابع محاسباتی سنگین نیازمند است؛ به‌ویژه در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی که رفتار سامانه‌ها غیرخطی و پیچیده است و نمونه‌سازی آن‌ها به شکل پویا و دقیق دشوار و پرهزینه خواهد بود؛

۳- مقیاس‌پذیری: در کاربردهایی مانند شهرهای هوشمند، دوقلوی رقمی باید بتواند اطلاعات هزاران یا میلیون‌ها جزء فیزیکی (مانند هر یک از عوارض زمین) را مدیریت کند. چنین مقیاسی، به معماری‌های توزیع‌شده، الگوریتم‌های فشرده‌سازی هوشمند و قابلیت ارتقاء در زمان واقعی نیاز دارد؛

۴-هزینه و نگهداری: استقرار و نگهداری یک سامانه دوقلوی رقمی کامل هزینه‌بر است. خرید و نصب حسگرها، توسعه نرم‌افزارهای اختصاصی و تأمین منابع انسانی متخصص، همگی به سرمایه‌گذاری مداوم نیاز دارند. همچنین، این سامانه‌ها باید پیوسته بروزرسانی شوند تا ازنظر امنیت سایبری و کیفیت عملکرد، در سطح مطلوب باقی بمانند.

آینده‌نگری و پژوهش‌های مورد نیاز

با وجود چالش‌ها، آینده فناوری دوقلوی رقمی روشن و پرامید است. برای تحقق کامل ظرفیت‌های این فناوری، باید بر چهار محور کلیدی تمرکز داشت:

- استانداردسازی و چارچوب‌های مرجع: توسعه چارچوب‌های استاندارد برای تعریف ساختار، تعامل‌پذیری، امنیت و ارزیابی دوقلوهای رقمی از ضروریات آینده است. این استانداردها می‌توانند همکاری بین سازمان‌ها و کشورها را تسهیل کرده و از دوباره‌کاری جلوگیری کنند؛
- توسعه فناوری‌های مرتبط: پیشرفت‌هایی در حوزه‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، رایانش ابری و رایانش لبه‌ای، پایه‌های اصلی توسعه دوقلوی رقمی هستند. پژوهش‌های آتی باید ترکیب این فناوری‌ها در معماری‌های دوقلوی رقمی را بهینه‌سازی کند؛
- رویکردهای چندرشته‌ای: برای موفقیت در طراحی و استقرار دوقلوهای رقمی، همکاری میان رشته‌های مختلف مانند مهندسی، علوم داده، علوم اجتماعی، اخلاق، حقوق و سیاست‌گذاری ضروری است. پژوهش‌های میان‌رشته‌ای می‌توانند به شناسایی بهتر خطرها، توسعه سیاست‌های ایمن‌ساز و ارتقاء پذیرش اجتماعی این فناوری کمک کنند؛
- ارزیابی اثرات بلندمدت: باید درزمینه تأثیرات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده گسترده از فناوری دوقلوی رقمی، پژوهش‌های بلندمدت و آینده‌پژوهی انجام شود. این پژوهش‌ها می‌توانند به تصمیم‌سازان کمک کنند تا سیاست‌هایی جامع، انعطاف‌پذیر و اخلاق‌محور طراحی کنند.

توصیه‌ها

در این مقاله، نقش دوقلوی رقمی در مدیریت مخاطرات طبیعی بررسی شد. دوقلوی رقمی به‌عنوان یک نمونه رقمی پویا و داده‌محور از سامانه‌های واقعی، می‌تواند در حوزه‌هایی همچون برنامه‌ریزی، پایش، تحلیل، آموزش و واکنش به مخاطرات طبیعی

نقش مهم و تحول‌آفرینی ایفا کند. با بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء، سنجش از دور، شبیه‌سازی عددی، هوش مصنوعی و واقعیت ترکیبی، می‌توان وضعیت مناطق در معرض خطر را به‌شکل دقیق بازآفرینی و رخدادهای مختلف بحران را با دقت زیاد شبیه‌سازی کرد. این کار به تصمیم‌گیران امکان می‌دهد تا پیش از وقوع حوادث، راهکارهای مختلف را بررسی کرده و برای آن‌ها آمادگی لازم را کسب کنند. کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش دقت در تصمیم‌گیری، بهبود آموزش‌های تخصصی، ارتقای آگاهی عمومی و تقویت همکاری‌های بین‌سازمانی و بین‌المللی، ازجمله مزایای استفاده از دوقلوی رقمی در مدیریت مخاطرات طبیعی است. بااین‌حال، چالش‌هایی نیز در مسیر استفاده گسترده از این فناوری وجود دارد؛ از جمله، محدودیت منابع مالی، کمبود زیرساخت‌های داده‌ای، موانع فنی، ضعف در سواد رقمی و نبود چارچوب‌های قانونی جامع برای حفظ حریم خصوصی و امنیت اطلاعات. سیاست‌گذاران و مدیران می‌توانند با سرمایه‌گذاری هدفمند در توسعه زیرساخت‌های رقمی، آموزش نیروی انسانی، بهبود سطح آگاهی عمومی و تدوین مقررات دقیق در زمینه امنیت داده‌ها، زمینه بهره‌برداری مؤثرتر از ظرفیت‌های دوقلوی رقمی را در مدیریت بحران فراهم کنند. باتوجه به روند رو به رشد کاربرد این فناوری در سطح جهان، انتظار می‌رود که دوقلوی رقمی به یکی از ارکان اصلی برنامه‌های آینده‌نگر در حوزه مدیریت مخاطرات طبیعی تبدیل شود.

در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، فناوری دوقلوی رقمی می‌تواند در سه حوزه کلیدی تحقیقات، آموزش و ترویج نقشی مؤثر در مدیریت مخاطرات طبیعی داشته باشد. در حوزه تحقیقات، دوقلوی رقمی با ایجاد یک نسخه مجازی دقیق از سامانه‌های طبیعی و کشاورزی، امکان شبیه‌سازی رخدادهای مختلف مانند خشکسالی، سیل، تغییرات اقلیمی و شیوع آفات یا بیماری‌ها را فراهم می‌کند. این شبیه‌سازی‌ها به پژوهشگران امکان می‌دهد تا آثار اقدامات مدیریتی را بر منابع طبیعی و بوم‌سازگان‌ها ارزیابی کنند و برای کاهش مخاطرات، راهکارهای بهینه‌تری ارائه دهند. در حوزه آموزش، دوقلوی رقمی بستری برای برگزاری دوره‌های تعاملی و داده‌محور فراهم می‌آورد که مفاهیمی مانند کشاورزی هوشمند، مدیریت منابع آب و افزایش تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی را به‌شکل عملی و شبیه‌سازی‌شده آموزش می‌دهد. این رویکرد به ارتقای اثربخشی آموزش و گسترش دسترسی به دانش در مناطق دورافتاده کمک می‌کند. در حوزه ترویج، دوقلوی رقمی ابزاری برای نمایش کاربردی الگوهای موفق کشاورزی پایدار، فناوری‌های نوین مزرعه و روش‌های تاب‌آور در برابر بحران‌ها است. همچنین، این فناوری با ایجاد شبکه‌های مجازی میان کشاورزان، پژوهشگران و تصمیم‌گیران، بستر مناسبی را برای تبادل دانش و نوآوری فراهم می‌آورد. درمجموع، دوقلوی رقمی نه‌تنها ابزاری فناورانه برای تحلیل دقیق شرایط محیطی است، بلکه به‌عنوان سکویی راهبردی است که آماده‌سازی و واکنش مؤثر در برابر مخاطرات طبیعی در بخش کشاورزی را پیش‌بینی می‌کند.

منابع

حسنوند، آرزو و حسینی، عرفان. (۱۴۰۴). *مروری بر کاربرد فناوری دوقلوی رقمی در بخش کشاورزی. علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی*، ۸ (۱)، ۹۴-۱۶.

Ariyachandra, M. M. F., & Wedawatta, G. (2023). Ariyachandra, M. M. F., & Wedawatta, G. (2023). Digital twin smart cities for disaster risk management: a review of evolving concepts. *Sustainability*, 15(15), 11910

Ford, D. N., & Wolf, C. M. (2020). Smart cities with digital twin systems for disaster management. *Journal of Management in Engineering,* 36(4), 04020027.

Grieves, M. W. (2005). Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1-2), 71-84.

Henriksen, H. J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I. K., ... & Stisen, S. (2022). A new digital twin for climate change adaptation, water management, and disaster risk reduction (HIP digital twin). *Water*, 15(1), 25.

Ju, L. Y., Xiao, T., He, J., Xu, W. F., Xiao, S. H., & Zhang, L. M. (2025). A simulation-enabled slope digital twin for real-time assessment of rain-induced landslides. *Engineering Geology*, 108116.

Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., Ma, W., & Phil-Ebosie, O. (2021). Digital twin aided vulnerability assessment and risk-based maintenance planning of bridge infrastructures exposed to extreme conditions. *Sustainability*, 13(4), 2051.

Lagap, U., & Ghaffarian, S. (2024). Digital post-disaster risk management twinning: A review and improved conceptual framework. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 104629.

Li, Y., Zhang, T., Ding, Y., Wadhwani, R., & Huang, X. (2024). Review and perspectives of digital twin systems for wildland fire management. *Journal of Forestry Research*, 36(1), 14.

Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015*).* About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *Ifac-papersonline,* 48(3), 567-572.

Ugliotti, F. M., Osello, A., Daud, M., & Yilmaz, O. O. (2023). Enhancing risk analysis toward a landscape digital twin framework: A multi-hazard approach in the context of a socio-economic perspective. *Sustainability*, 15(16), 12429.

UNDRR. (2020) The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000–2019). Retrieved from: *Human Cost of Disasters* 2000–2019 FINAL.pdf (www.undrr.org).

Wang, Y., Yue, Q., Lu, X., Gu, D., Xu, Z., Tian, Y., & Zhang, S. (2024). Digital twin approach for enhancing urban resilience: A cycle between virtual space and the real world. *Resilient Cities and Structures,* 3(2), 34-45.

Yu, D., & He, Z. (2022). Digital twin-driven intelligence disaster prevention and mitigation for infrastructure: advances, challenges, and opportunities. *Natural Hazards,* 112(1), 1-36.

Zhang, H., Ma, S., Li, X., You, M., & Tao, Y. (2025). Forest fire rescue framework to jointly optimize firefighting force configuration and facility layout: a case study of digital-twin simulation optimization. *Soft Computing,* 29(3), 1789-1810.

Journal of Agricultural Information sciences and Technology
Volume 9, Issue 1, Serial Number 17, Spring and Summer 2026
jaist.areeo.ac.ir

Digital Twin and natural hazard management

Abolfazl Jaafari
Assistant Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: *jaafari@rifr-ac.ir*

Abstract

This article introduces the capabilities and applications of digital twin technology in natural hazard management. A digital twin is a virtual, dynamic, and interactive representation of physical objects, processes, or environments that, through the integration of the Internet of Things, artificial intelligence, and big data, enables accurate simulation and prediction of system conditions and behaviors. Originating from NASA's Apollo program in ۱۹۶۹, this technology has found novel applications in recent years across various domains, particularly in natural hazard management. Adopting a descriptive approach, the article examines key applications such as critical scenario modeling, early warning systems, real-time monitoring of vital infrastructure, emergency resource management, and immersive training. It also introduces commonly used platforms and explains the role of the Digital Twin Definition Language (DTDL) in standardizing digital twin structures and behaviors. The article further highlights existing technical and operational challenges and underscores the importance of developing supportive infrastructure, unified standards, and interdisciplinary research for the sustainable adoption of this technology. Within the Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), digital twins can enhance natural hazard management through scenario-based research, interactive training in disaster response, and the promotion of innovative, resilient agricultural models.

Keywords: Drought, crisis management, flood, landslide, Digital Twin, simulation, wildfire.