مجله ترویجی علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی
دوره هشتم، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵، بهار و تابستان ۱۴۰۴
jaist.areeo.ac.ir

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/jaist.2025.368311.1130

مروری بر کاربرد فناوری دوقلوی رقمی در بخش کشاورزی

آرزو حسنوند[۱]، عرفان حسینی[۲]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مدیریت و توسعه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران ***(نویسنده مسئول)***.
رایانامه: *arezo.hasanvand@ut.ac.ir*

۲- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مدیریت و توسعه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران ، ***رایانامه:*** *serfanhosseini@ut.ac.ir*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰ صص: ۶۱-۴۹

چکیده

فناوری دوقلوی رقمی به‌عنوان یک الگوی مجازی از سامانه‌های فیزیکی، توانایی فراهم آوردن داده‌های بلادرنگ و دقیق از محیط‌ها و فرآیندهای مختلف را دارد. این فناوری در بخش‌های مختلف کشاورزی از جمله کشاورزی دقیق، مدیریت منابع آب، رباتیک کشاورزی و بهینه‌سازی فرآیندهای پس از برداشت، قابلیت‌های قابل‌توجهی برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها به ارمغان می‌آورد. مقاله حاضر کاربردهای فناوری دوقلوی رقمی در کشاورزیرا بررسی و فرصت‌ها و چالش‌های آن را تحلیل می‌کند. در ابتدا، فرصت‌های این فناوری، مانند بهبود مدیریت مزرعه، افزایش دقت پیش‌بینی‌ها، بهینه‌سازی مصرف منابع بررسی شده‌است و سپس چالش‌های موجود برای پیاده‌سازی آن در بخش کشاورزی، نظیر مسائل مربوط به کیفیت داده‌ها، حریم خصوصی، هزینه‌های اجرایی و پیچیدگی‌های فنی و قانونی، ارائه‌شده است. هدف این مطالعه، ارائه درک جامع‌تری از ظرفیت‌ها و موانع استفاده از دوقلوی رقمی در کشاورزی و ارائه پیشنهادهایی برای پژوهش‌ها و برنامه‌ریزی‌های آینده در این حوزه است.

کلیدواژه‌ها: کشاورزی رقمی، دوقلوی رقمی، سامانه‌های سایبر- فیزیکی، شبیه‌سازی.

1.Roberts

مقدمه

کشاورزی رقمی بر استفاده از فناوری‌های رقمی برای جمع‌آوری، مدیریت، و تحلیل داده‌ها با هدف نظارت دقیق‌تر، بهبود بهره‌وری و پایداری در کشاورزی تاکید دارد. اینترنت اشیاء و فناوری‌های بی‌سیم[1]، امکان انتقال و نظارت لحظه‌ای[2] داده‌ها را در کشاورزی رقمی فراهم می‌کنند. اینترنت اشیاء در ترکیب با سامانه‌های محاسبات ابری[3] ارتباط و تعامل بین سکوهای نرم‌افزاری، حسگرها، ماشین‌آلات و نظارت بر محصولات و حیوانات را تسهیل می‌کند. به عبارت دیگر، این فناوری‌ها با جمع‌آوری، انتقال و پردازش داده‌ها در اینترنت، امکان نظارت و مدیریت هوشمند این اجزاء را فراهم می‌کنند. با این حال، افزایش تعداد حسگرها و تولید داده‌های بسیار زیاد ممکن است بر رایانه‌های خدمات‌دهنده‌ی ابری فشار زیادی وارد کند و سرعت پاسخ‌دهی را کاهش دهد. در این شرایط، ممکن است امکان ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها در سامانه‌های ابری همیشه ممکن نباشد. ازطرفی، ازطریق سامانه‌های کشاورزی هوشمند و به‌منظور توسعه سخت‌افزار و نرم‌افزار، بهبود سازگاری، ایمنی و امنیت الگوریتم‌ها و سامانه‌های مبتنی بر رایانه، سامانه‌های سایبر-فیزیکی[4] معرفی‌شده‌اند. این سامانه‌ها امنیت و ایمنی اطلاعات جمع‌آوری شده در مزارع کشاورزی مانند داده‌های آب و هوا، آبیاری، خاک، تغذیه و عملکرد محصول را برای مدیریت بهتر فراهم می‌کنند. بااین‌حال، مدیریت حجم بالای داده‌ها و اطمینان از امنیت و یکپارچگی اطلاعات جمع‌آوری‌شده، از چالش‌های اصلی سامانه‌های سایبر-فیزیکی است (پارافوروس و گریپندترانگ[5]، ۲۰۲۱؛ ژانگ، کائو و دونگ[6]، ۲۰۲۰؛ نینگ، لی، شیء و یانگ[7]، ۲۰۲۰؛ سرکار، کولارتا، گیا، تنهونن و وسترلوند[8]، ۲۰۱۹؛ فاروغ، ریاض، عبید، عبید و نئیم[9]، ۲۰۱۹؛ آن و همکاران[10]، ۲۰۱۷). برای بهبود کارایی این سامانه‌ها، یک الگوی نوظهور به‌نام «دوقلوی رقمی» در کشاورزی رقمی معرفی و به اجرا درآمده است. این فناوری با ایجاد یک نمای رقمی پویا و امن، می‌تواند به حل این مشکلات کمک کند (نصیر احمدی و هنسل[11]، ۲۰۲۲).

ناسا برای نظارت بر رفتار فضاپیماها، دوقلوی رقمی را معرفی کرد. دوقلوی رقمی یک نمای رقمی یا مجازی از سامانه‌های فیزیکی است که برای شبیه‌سازی رفتار آن‌ها استفاده می‌شود. در ادبیات علمی، تعاریف مختلفی برای دوقلوی رقمی وجود دارد. براساس این تعریف، اشیاء فیزیکی و مجازی و مجموعه‌ای از ارتباطات موجود بین دارایی‌های فیزیکی و رقمی[12] ازجمله اجزای دوقلوی رقمی هستند (نصیر احمدی و هنسل[13]، ۲۰۲۲). ازطریق الگوسازی با دقت بالا و جریان‌های داده دوسویه، دوقلوی رقمی تفاوت‌های میان حسگری وضعیت[14]، درک موجودیت[15] و خودکارسازی فیزیکی[16] را حذف می‌کند. ویژگی نمایش مجازی در زمان واقعی، دوقلوی رقمی را در موقعیتی منحصربه‌فرد قرار می‌دهد تا رقمی‌سازی در کشاورزی را تسهیل کند. توانمندی‌هایی مانند ترکیب داده‌ها، الگوسازی و شبیه‌سازی «چه می‌شد اگر»[17]، می‌توانند بر محدودیت‌های موجود برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری رویکردی و خودکارسازی در مجموعه‌ای متنوع از فعالیت‌های کشاورزی غلبه کنند (پورسل و نوبایر[18]، ۲۰۲۳).

1.wireless technologies
2. real-time
3. cloud computing systems
4. cyber-physical systems
5. Paraforos & Griepentrong
6. Zhang, Cao & Dong
7. Ning, Li, Shi & Yang
8. Sarker, Queralta, Gia, Tenhunen & Westerlund
9. Farooq, Riaz, Abid, Abid & Naeem
10. An et al
11. Nasirahmadi & Hensel
12. physical and digital assets
13. Nasirahmadi & Hensel
14. State sensing
15. Entity understanding
16. Physical automation
17. real-time virtual representation
18. what-if simulation
19. Purcell & Neubauer

بـا وجود اینکه مفاهیم دوقلوی رقمی در صنعت کشـاورزی هنوز در مراحل ابتدایی و آزمایشگاهی خود قرار دارد، اما علاقه به پیاده‌سـازی این روش در حوزه کشاورزی رو به افزایش است (وردو، تکینردوغان، بولنز و ولفرت[1] ، ۲۰۲۱). مطالعات پیشـین در کشور، بیشـتر جنبه‌های محدود و خاصی از دوقلوهای رقمی در بخش صنعت را بررسـی کرده‌اند اما تاکنون پژوهش جامعی که هم‌زمان کاربردهای گسـترده این فناوری در زمینه‌هایی مانند مدیریت خاک، آبیاری، تجهیزات کشـاورزی، ربات‌شناسی، و فرآوری پس از برداشت مواد غذایی را بررسی کند، انجام نشده اسـت. این خلأ پژوهشـی نشـان‌دهنده ضرورت انجام مطالعات جامـع و چندبعدی در این حوزه اسـت تا بتـوان از ظرفیت‌های دوقلوهـای رقمـی، به روشـی مؤثرتـر، برای تحـول در بخش کشاورزی اسـتفاده‌کرد. بنابراین، در این مطالعه مفاهیم دوقلوی رقمی به‌عنوان الگوی نسل بعدی برای رقمی‌سازی در کشاورزی بررسی می‌شود.

یافته‌ها

تاریخچه دوقلوی رقمی

مفهوم «دوقلوی رقمی» به مایکل گریو[2] از دانشگاه میشیگان و اقدامـات او بـه کمـک جان ویکرز[3] نسـبت داده می‌شـود. مفهوم اولیه‌ای که بعدها به دوقلوی رقمی تبدیل شـدند، به یک سخنرانی در سال ۲۰۰۲ درباره مدیریت چرخه عمر محصول باز می‌گردنـد. این مفهوم به‌عنوان یک معـادل رقمی و مجازی[4] از یـک محصول فیزیکی و جریـان داده دوجانبه بین آنها توصیف شده‌اسـت (پورسـل و نوبایر[5] ، ۲۰۲۳). در سال ۲۰۰۳، پروفسور گریـو، مفهوم دوقلـوی رقمـی را در دوره مدیریت چرخه عمر کلـی محصول معرفی کرد. از آن زمان تاکنون تعاریف متعددی از این فناوری ارائه‌شـده است (استارک و دامرو[6] ، ۲۰۱۹). اولین کاربرد تاریخی فناوری دوقلـوی رقمی به زمانی برمی‌گردد که در سـال ۱۹۷۰، مهندسان ناسا سعی داشـتند آپولو ۱۳ را اصلاح کرده و جان سـه فضانـورد را نجات دهند. درواقـع، این اولین کاربرد فوق‌العاده این فناوری بود. امروزه ناسـا از دوقلوی رقمی برای توسـعه فضاپیماهای نسـل بعدی اسـتفاده می‌کند (شفاعی نهنـد، ریاضی و آبرومند، ۱۴۰۲). شـرکت گارتنـر[7] این مفهوم را به‌عنـوان یکـی از فناوری‌هـای راهبردی سـال ۲۰۱۹ معرفی کرده اسـت. اکنون حوزه‌هایی مانند تولید، شـهرهای هوشمند، بهداشت و درمان و نیزکشاورزی، در سطحی پیشرفته، از مزایای دوقلوی رقمی استفاده می‌کنند (پورسل و نوبایر، ۲۰۲۳). امروزه شرکت‌ها و سازمان‌های پیشرو مانند زیمنس[8]، جنرال الکتریک[9]، ناسـا، و نیروی هوایی ایالات متحده از دوقلوهای رقمی استفاده می‌کنند. تولید ابزارهای نرم‌افزاری تجاری پیشـرفته برای توسعه دوقلوهای رقمی، مانند پریکس[10] و سیم‌سنتر سه‌بعدی[11] (نگری، فوماگالی و ماچی[12] ، ۲۰۱۷) نیز نشـان‌دهنده افزایش چشـمگیر علاقه بـه کاربردهای این فنـاوری در صنایع مختلف اسـت. بر اسـاس پژوهش‌ها، بازار فناوری دوقلوی رقمی با رشد سریع، از ۶,۹ میلیـارد دلار در سـال ۲۰۲۲ به ۷۳,۵ میلیارد دلار در سـال ۲۰۲۷ خواهد رسـید (سـایت بازار و بازارها[13] ، ۲۰۲۲). بنابراین، دوقلوی رقمی با اتصال دنیای فیزیکی و مجازی، ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سـازی فرآیندها، پیش‌بینـی رویدادها و تصمیم‌گیری هوشمند در سراسر جهان خواهد بود.

1.Verdouw, Tekinerdogan, Beulens & Wolfert
2. Michael Grieve
3. John Vickers
4. virtual, digital equivalent
5. Purcell & Neubauer
6. Stark & Damerau
7. Gartner
8. Siemens
9. General Electric
10. Predix
11. Simcenter 3D
12. Negri, Fumagalli, & Macchi
13. Nasirahmadi & Hensel

مفهوم دوقلوی رقمی

دوقلـوی رقمی، از زمـان پیدایش و طبقه‌بنـدی اولیه، ازنظر الزامـات، قابلیت‌ها و کاربردها تکامل یافتـه و از تمرکز اولیه بر تولید فراتر رفته‌است. همچنین، تعریف این مفهوم گسترش یافته اسـت تا بتواند نقش‌هـای جدید آن را نیزدربـر گیرد. اصطلاح دوقلوی رقمی بیش از پیش با زمینه‌ای که در آن فعالیت می‌کند، سازگار شده‌است (پورسل و نوبایر[1]، ۲۰۲۳). پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا تعریفی جامع از دوقلوی رقمی ارائه دهند که بتواند در زمینه نقش‌های نوظهور، کاربردهای پیش‌بینی‌نشده و پیشرفت‌های فناوری نیز مصداق داشـته باشد. یکی از این موارد، تعریفی است که در دایرةالمعارف مهندسـی تولید ارائه‌شـده است: «دوقلوی رقمی، نمایشـی از یک «محصـول» فعال و منحصربه‌فرد اسـت که می‌تواند یک دسـتگاه واقعی، شیء، ماشین، خدمت، دارایی ناملموس، یا سـامانه‌ای شـامل یک محصول و خدمات مرتبط با آن باشـد» (اسـتارک و دامرو[2]، ۲۰۱۹). با بررسی پیشرفت‌ها و کاربردهای پیشـرفته دوقلوی رقمی، جونز و همکاران[3] (۲۰۲۰) در مـرور نظام‌مند خود دریافتند کـه روندهای کنونی، با اندکی انحراف، با تعریف ارائه‌شـده در دایرةالمعارف مهندسـی تولید هم‌خوانی دارند. هرچند این تعریف گسترده مزایای زیادی دارد، اما یک نگرانی روبه‌رشد، ناتوانی در تمیز دقیق دوقلوهای رقمی از غیر دوقلوهای رقمی اسـت؛ مثل، برچسـب‌گذاری نادرست الگوهـای رایانه‌ای متداول به‌عنوان دوقلوی رقمی. یکی دیگر از نقاط ابهام، میزان دقت موردنیاز در یک دوقلوی رقمی اسـت تا بتوان آن را به‌عنوان یک نمایش دقیق از شـیء الگوسـازی شده در نظر گرفت (فولر، فن، دی و بارلو[4]، ۲۰۲۰). جونز و همکاران (۲۰۲۰)، اصطلاحات اصلی مرتبط با الگوسـازی دوقلوی رقمی را معرفـی کرده‌اند. «موجودیت فیزیکی» و «موجودیت مجازی» ازجمله این اصطلاحات هستند.

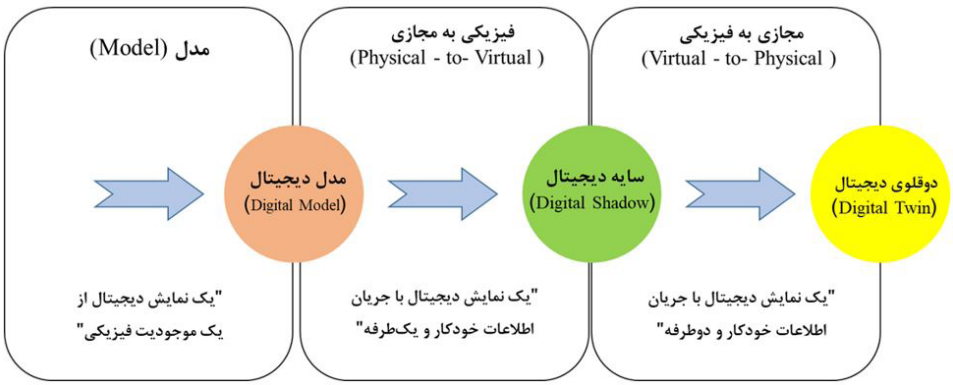
موجودیـت فیزیکـی[5]، بـه موجودیتـی اشـاره دارد که در دنیای واقعی وجود دارد و مسـتقل از دوقلوی رقمی اسـت. این موجودیت، ذاتاً یک شـیء یا فرآیند واقعی اسـت که به‌صورت مسـتقیم در محیط فیزیکـی حضور دارد. وقتـی این موجودیت فیزیکـی با یک نسـخه رقمی مرتبط می‌شـود، بـه آن دوقلوی فیزیکی[6] می‌گویند.

موجودیت مجازی[7]: نمایشی رقمی از یک محصول، فرآیند، یا محیط است که می‌تواند به شکل یک نمونه عمومی یا نمایشی خاص و متناسـب با حوزه مربوط باشـد. وقتی ایـن موجودیت مجازی به‌صورت همـزاد با یک موجودیـت فیزیکی در تعامل باشـد، به آن دوقلوی مجازی[8] گفته می‌شود. این ارتباط، امکان تحلیل، پیش‌بینی، و بهینه‌سـازی سـامانه‌های فیزیکـی را فراهم می‌کنـد. در سـامانه‌های نوین، مانند هـوش مصنوعی و اینترنت اشیاء، این مفاهیم اهمیت ویژه‌ای داشته و در بهبود تصمیم‌گیری، کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی نقشـی کلیدی دارند. در حوزه دوقلوهای رقمی، سه سطح ادغام قابل‌تمایز است: الگوی رقمی، سـایه رقمی و دوقلوی رقمی (شـکل ۱). در بیشتر مقالات حوزه کشـاورزی بین این سـه نوع دوقلوی رقمی تمایز قائل نمی‌شوند (پورسل و نوبایر[9]، ۲۰۲۳). درواقع، دوقلوهای رقمی با الگوهای سـه‌بعدی و شبیه‌سـازی‌های متداول تفاوت دارند زیرا، علاوه بر داده‌هـای لحظه‌ای، به جریان دوطرفه و پیوسـته اطلاعات، مابین دنیـای فیزیکی و رقمی، نیـاز دارند. برخلاف الگوهای ایسـتا، دوقلوهـای رقمی قابلیـت پیش‌بینی‌های جدید و به‌روزرسـانی خودکار داده‌ها را دارند.

الگوی رقمی، در شـکل ابتدایی خود، هیچ جریان خودکار اطلاعات میان دنیای فیزیکی و مجازی برقرار نمی‌کند. به این معنا که ارتباط میان این دو دنیا به‌صورت دسـتی انجام می‌شـود و هر

1.Purcell & Neubauer
2. Stark & Damerau
3. Jones et al
4. Fuller، Fan, Day & Barlow
5. Physical Entity
6. Physical Twin
7. Virtual Entity
8. Virtual Twin
9. Purcell & Neubauer

تغییری باید دستی انجام شود. سایه رقمی، قابلیت انتقال خودکار اطلاعات از دنیای فیزیکی به دنیای مجازی را دارد. این فرآیند معمولاً با استفاده از سامانه‌هایی انجام‌می‌شود که برای جمع‌آوری داده‌های فیزیکی از حسگرها استفاده کرده و این داده‌ها را به دنیای مجازی ارسال می‌کنند. تا زمانی که انتقال اطلاعات خودکار انجام شود، می‌توان این سطح از تعامل را به‌عنوان سایه رقمی طبقه‌بندی کرد. در دوقلوی رقمی، بین دنیای فیزیکی و مجازی، یکپارچگی کامل و تعامل دوطرفه وجود دارد. در این حالت، اطلاعات به‌طور خودکار از یک دنیا به دیگری منتقل می‌شود. اطلاعاتی که از دنیای مجازی ارسال می‌شود، می‌تواند برای به‌روزرسانی الگوی فیزیکی یا فعال‌سازی عملگرها برای انجام یک عملیات خاص استفاده شود. به‌طور مشابه، داده‌های تولید شده بااستفاده از دوقلوی فیزیکی می‌توانند به‌طور خودکار بر دوقلوی مجازی تأثیر بگذارند، به‌صورتی که دنیای مجازی، وضعیت لحظه‌ای و تکامل دنیای فیزیکی را به‌طور دقیق منعکس کند (پورسل و نوبایر[1]، ۲۰۲۳؛ شارما و همکاران[2]، ۲۰۲۲).



شکل ۱. الگوی رقمی، سایه رقمی و دوقلوی رقمی: ادغام / یکپارچه‌سازی داده‌ها (برگرفته از: پورسل و نوبایر[3]، ۲۰۲۳؛ کریتزینگر و همکاران[4]، ۲۰۱۸)

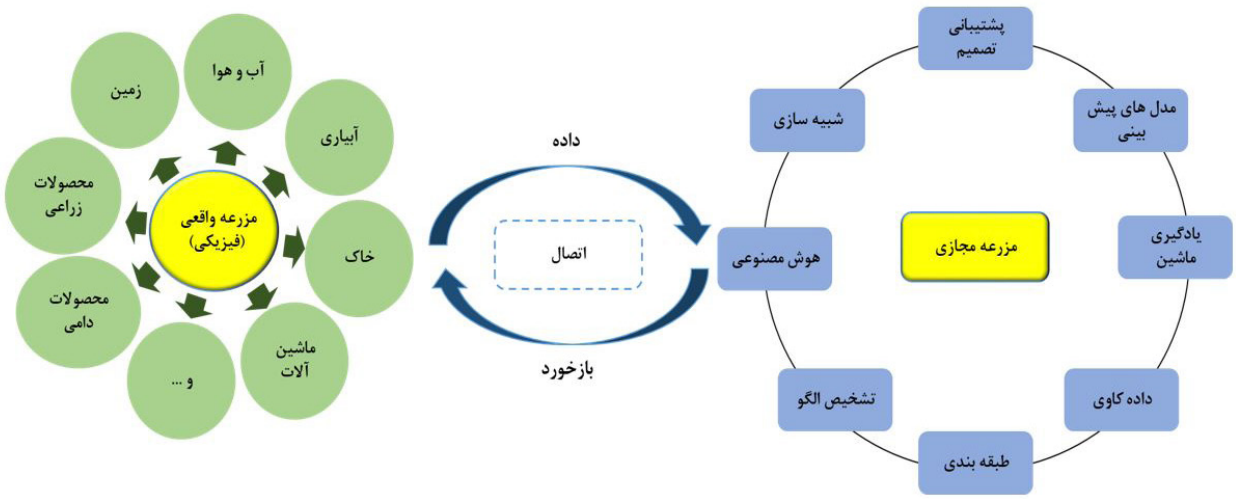
دستاوردها

کاربردهای دوقلوی رقمی در بخش کشاورزی

کشاورزی رقمی می‌تواند درباره استفاده از کودها، مواد شیمیایی، راهبردهای مدیریت آبیاری، حفاظت از محیط‌زیست، راه‌حل‌های مدیریتی نظارت بر آفات، شرایط آب و هوایی محصولات کشاورزی، و تقاضای بازار و شرایط تجاری اطلاعات مفیدی به کشاورزان ارائه کند (چرگوری، کچادی و مک‌دانل[5]، ۲۰۲۰). با این حال، سامانه‌های تولید کشاورزی پیچیده و پویا هستند و به مدیریت پیشرفته نیاز دارند (والترز و همکاران[6]، ۲۰۱۶). همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، سامانه فیزیکی یکی از اجزای کلیدی است و دوقلوی رقمی بدون دنیای فیزیکی صرفاً یک الگو است. مرزهای سامانه یک دوقلوی رقمی، براساس دنیای فیزیکی واقعی شناسایی می‌شود (لو، ژنگ، شوینگر و کریستیس[7]، ۲۰۲۱). در حوزه کشاورزی، سامانه فیزیکی ممکن است برخی از جنبه‌های محصول، خاک و سامانه‌های آبیاری یا بدن حیوان باشد. دنیای فیزیکی برای جمع‌آوری و دریافت داده‌ها از شیء فیزیکی، به فناوری‌های اندازه‌گیری و حسگرها نیاز دارد. حسگرهای نوری برای پوشش گیاهی و بیماری‌ها (آنجین و همکاران[8]، ۲۰۲۰؛ مقدم، لو و ادواردز[9]، ۲۰۲۰)، حسگرهای خاک و آب و هوا برای محصول (اسکوبلوف و همکاران[10]، ۲۰۲۰)، و حسگرهای اصطبل مانند دما، رطوبت و

1.Purcell & Neubauer
2. Sharma et al
3. Purcell & Neubauer
4. Kritzinger et al
5. Chergui, Kechadi & McDonnell
6. Walters et al
7. Lu, Zheng, Schweiger & Kiritsis
8. Angin et al
9. Moghadam, Lowe & Edwards
10. Skobelev et al

آمونیاک بـرای حیوانات (جو، پارک، پـارک و کیم[1]، ۲۰۱۸) نمونه‌هایـی از کاربرد دوقلوهای رقمی در کشـاورزی هوشـمند هسـتند. از سـامانه موقعیت‌یابی جهانی[2] و سامانه ردیابی نظام‌مند لحظـه‌ای[3] بـرای ردیابی ربات‌های کشـاورزی (تسـولاکیس، بچسـیس و بوچیتـز[4]، ۲۰۱۹) و نیز مدیریت زنجیـره تأمین مواد غذایی اسـتفاده می‌شود (پیلیانیدیس، اوسـینگا و آتاناسیادیس[5]، ۲۰۲۱). شکل ۲ الگووارهای از مفهوم دوقلوی رقمی در کشاورزی را نشان می‌دهد. با وجود اینکه استفاده ازمفهوم دوقلوی رقمی در کشاورزی هنوز در مراحل ابتدایی و آزمایشگاهی خود قرار دارد، امـا گرایش به پیاده‌سـازی این روش در حوزه کشـاورزی رو به افزایش اسـت (نصیر احمدی و هنسل[6]، ۲۰۲۲). در ادامه به برخی از موارد استفاده دوقلوی رقمی در پژوهش‌های کشاورزی اشاره خواهد شـد که اهمیت این فناوری در تحول بخش کشاورزی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. الگووارهای از مفهوم دوقلوی رقمی در کشاورزی (برگرفته از: نصیر احمدی و هنسل[6]، ۲۰۲۲)

کاربرد دوقلوی رقمی در محصولات زراعی و بهینه‌سازی منابع

اسکوبلوف و همکاران[7] (۲۰۲۰) با ارائه رویکردی چندعاملی[8]، این مفهوم را برای توسعه دوقلوی رقمی گندم توسعه داده‌اند. در ایـن رویکرد از یک پایگاه دانش جامع و الگوسـازی چندعاملی اسـتفاده شـده اسـت. این روش با هدف غلبه بر محدودیت‌های روش‌هـای مبتنی بر داده طراحی شده‌اسـت؛ چراکه این روش‌ها ممکن است در پیش‌بینی یا طبقه‌بندی وضعیت محصولات، به‌ویژه در شرایطی که سامانه واقعی و الگوشده دچار واگرایی می‌شوند، کارایی خود را از دسـت بدهند. این موضـوع در حوزه تغییرات اقلیمـی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این رویکرد، سـامانه چندعاملی برای شبیه‌سـازی پویای سامانه پایه طراحی شده و از پایگاه دانش برای شناسایی وضعیت‌های غیرعادی و ارائه راهکارهای اصلاحی اسـتفاده می‌شـود. این پژوهش گامی مهم در توسعه فناوری‌های پشـتیبانی تصمیم‌گیری مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی[9] اسـت و در آینده کشـاورزی، نقش حیاتی ایفا خواهـد کرد. مقدم، لو و ادواردز[10] (۲۰۲۰) یـک دوقلوی رقمی برای باغ‌ها ارائه کرده‌اند که از فناوری لیدار سـه‌بعدی[11] و دوربین‌ها اسـتفاده می‌کند. در این سـامانه، دوقلوی رقمی برای هر درخـت به‌صورت جداگانه ایجاد و به‌روزرسانی می‌شود. هدف این سامانه، نظارت بر شرایط درختان به‌صـورت لحظه‌ای و ارائه پشـتیبانی تصمیم‌گیری برای تعداد زیـادی از درختان اسـت، در حالی‌که نیاز بـه نیروی کار

1.Jo, Park, Park & Kim
2. Global Positioning System (GPS)
3. Real-Time Kinematic
4. Tsolakis, Bechtsis & Bochtis
5. Pylianidis, Osinga & Athanasiadis
6. Nasirahmadi & Hensel
7. Skobelev et al
8. Multi-Agent Approach
9. Climate-Resilient Decision-Support Technologies
10. Moghadam, Lowe & Edwards
11 .3D LIDAR
12. Angin et al

کشاورز را کاهش می‌دهد. آنجین و همکاران[1] (۲۰۲۰) دوقلوی رقمی‌ای مبتنی بر شبکه حسگر بی‌سیم و تصاویر پهپادی ارائه دادند که با استفاده از یادگیری عمیق، بیماری‌ها و علف‌های هرز گیاهان را شناسایی می‌کند و با یکپارچه‌سازی داده‌های جدید، دامنه کاربردهای خود را گسترش می‌دهد. آلوس و همکاران[2] (۲۰۱۹) بر بهینه‌سازی آبیاری برای بهبود عملکرد محصولات زراعی تاکید کرده‌اند و برای نظارت و پشتیبانی از تصمیم‌گیری، یک دوقلوی رقمی مبتنی بر اینترنت اشیاء ارائه داده‌اند. این سامانه از منابع داده‌ای متعدد، ازجمله حسگرهای محلی و سنجش از دور (مانند ایستگاه‌های هواشناسی)، به‌همراه معماری ابری برای یکپارچگی آسان استفاده می‌کند.

مدیریت و نظارت دام

اردلی و جانوسی[3] (۲۰۱۹) یک دوقلوی رقمی برای پرواربندی دام ارائه داده‌اند. نتایج اولیه آن‌ها نشان‌می‌دهد که الگوسازی سامانه‌هایی با عوامل نامشخص، مانند ورودی‌های انسانی، چالش‌برانگیز است. به‌عنوان یک گام ابتدایی، تنها زیرسامانه‌های منفرد و نقاط تعامل آن‌ها در نظر گرفته شده و هر یک ازطریق معادلات ریاضی، که همبستگی‌ها و ویژگی‌های فرآیند تولید را ثبت می‌کند، الگوسازی شده‌اند. این الگو از داده‌های تولید و اندازه‌گیری‌های حیوانات برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند و هدف آن بهینه‌سازی فرآیند تولید است. جو، پارک، پارک و کیم[4] (۲۰۱۸) نیز ایجاد یک دوقلوی رقمی کشاورزی را امکان‌سنجی کرده‌اند. در این پژوهش، با تنظیم سامانه‌های اصطبل برای حفظ کیفیت هوا و دما در محدوده‌ای از پیش تعریف‌شده، یک دوقلوی رقمی برای رشد بهینه دام ارائه‌شده است. برای شناسایی شرایط منجر به نتایج مطلوب، از ترکیب داده‌های کلان و شبیه‌سازی مبتنی بر الگو استفاده شده‌است. این داده‌ها برای پشتیبانی ازتصمیم‌گیری و خودکارسازی نظارت بر سامانه‌های اصطبل به‌کار می‌رود. گرچه مشخصات دقیق الگوی مورداستفاده ارائه نشده، اما احتمالاً از الگوی یادگیری ماشین یا یادگیری عمیق استفاده شده‌است. با تنظیم سرعت فن و باز و بسته‌کردن خودکار پنجره‌ها، شرایط مطلوب ایجاد می‌شود. همچنین در ادامه‌ی پژوهش قبل، جو و همکاران[5] (۲۰۱۹) مصرف انرژی را در یک اصطبل خوک شبیه‌سازی کردند تا برای طراحی بهینه اصطبل، ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری ارائه دهند. این دوقلوی رقمی از ترکیب داده‌های اینترنت اشیاء، مشخصات روش و الگوی عملیاتی اصطبل استفاده می‌کند. هدف، بهینه‌سازی مصرف انرژی ازطریق ارزیابی و بهبود طراحی اصطبل برای دستیابی به کیفیت مطلوب هوا، دما و رطوبت با کمترین مصرف انرژی ممکن است. این اقدام ازطریق شبیه‌سازی انجام‌می‌شود و امکان شناسایی چیدمان‌های بهینه همراه با فن مناسب (از نظر قدرت و اندازه) را بدون نیاز به توسعه و آزمایش پرهزینه و زمان‌بر زیرساخت‌های واقعی فراهم می‌کند.

کشاورزی شهری و سامانه‌های آبزی‌کشت[6]

احمد و همکاران[7] (۲۰۱۹) برای بهینه‌سازی و مدیریت سامانه‌های پیچیده، یک دوقلوی رقمی ـ عملیاتی را ارائه داده‌اند که در آن بر مزایای کشاورزی آبزی‌کشت تأکید کرده‌اند. آبزی‌کشت ترکیبی از آب‌کشت[8] (کشت در آب) و آبزی‌پروری (پرورش ماهی) است که در یک تعامل هم‌زیستی عمل می‌کنند. همچنین، قندار و همکاران[9] (۲۰۲۱) الگوی مبتنی بر عامل برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در کشاورزی شهری ارائه داده‌اند. آن‌ها دوقلوی رقمی از یک سامانه تولید آبزی‌کشت برای پیش‌بینی و تصمیم‌گیری طراحی کرده‌اند که از ترکیب اینترنت اشیاء، یادگیری ماشین و شبیه‌سازی داده‌محور استفاده می‌کند. این

1.Angin et al
2. Alves et al
3. Erdélyi & Jánosi
4. Jo, Park, Park & Kim
5. Jo et al
6. Aquaponics
7. Ahmed et al
8. Hydroponic
9. Ghandar et al

پژوهش درباره مدیریت و یکپارچه‌سازی مزارع شهری است. نتایج پژوهش نشـان داد که شبیه‌سازی الگومحور، در شرایط داده‌های محدود، می‌تواند نسـبت به رویکردهای یادگیری ماشین مزایایی داشته باشد. جانسون، سنگر و کلوس[1] (۲۰۲۰) یک دوقلوی رقمی مبتنی بـر عامل، برای زنبورداری شـهری پیشـنهاد می‌دهند. این دوقلو از داده‌های حسـگرها، مستندسـازی و الگوسازی مبتنی بر عامل برای پایش از راه دور و پشتیبانی از تصمیم استفاده می‌کند. الگوسـازی این دوقلو شامل اسـتفاده از یادگیری ماشین، تحلیل احتمالاتی و هم‌جوشـی داده‌ها اسـت. یکی از نکات جالب این رویکرد، الگوسازی عوامل به‌عنوان نماینده کندوها و زنبورداران اسـت، که تأثیرات مستقیم یا غیرمسـتقیم زنبوردار بر کندوها را تحلیل می‌کند. هوارد، ما، آسـلینگ و جورجنسـون[2] (۲۰۲۰) نیز برای کاربردهـای عمومی در گلخانه‌های تجـاری یک دوقلوی رقمـی ارائه می‌دهنـد. بهینه‌سـازی مدیریت و مصـرف انرژی، اهداف کلیدی این سـامانه است که به الگوسازی و متعادل‌سازی چندین متغیر سامانه به‌هم مرتبط نیازمند است. این دوقلو که هنوز به‌طور کامل پیاده‌سازی نشده، در سطحی کلان توصیف شده و از ترکیب اینترنت اشیاء، الگوسازی مبتنی بر عامل و هوش مصنوعی استفاده می‌کند.

خدمات هوشمند و مدیریت ماشین‌آلات

تسـولاکیس، بچسـیس و بوچیتـز[3] (۲۰۱۹) یک سـکو به‌نام آگـروس[4] معرفـی کرده‌اند که برای شبیه‌سـازی ماشـین‌آلات کشـاورزی در فضـای مجازی طراحی شده‌اسـت. این سـکو با اسـتفاده از رابط‌هـای سـایبری ـ فیزیکی، ورودی‌ها و شـرایط واقعی را شبیه‌سـازی می‌کند تا بتوان رفتار سـامانه را در شـرایط واقعـی مزرعه بهتر تحلیل کرد. همچنین این سـکو امکان اتصال نسـخه فیزیکی ماشین‌آلات به سامانه را فراهم می‌کند تا داده‌های حسـگرها به‌صورت لحظه‌ای منتقل شـوند. این فناوری، به‌عنوان گامی مهم به‌سـوی توسـعه دوقلوی رقمی کشـاورزی شـناخته شده‌اسـت. همچنین، سوسـاروف، اورلوف، مورف و کراوتس[5] (۲۰۱۹) یـک کاربرد عملی دوقلوی رقمی را معرفی کرده‌اند که شـباهت زیادی به نمونه‌های رایـج در صنعت تولید دارد. آن‌ها با سـاخت یک دوقلوی رقمی برای شاسی یک دستگاه ربات بدون سرنشـین نشـان دادند که می‌توان اجزای مختلـف را با دقت بالا الگوسـازی و در یک الگوی جامع ادغـام کرد. این روش امکان آزمایش سریع و آسان اجزاء و بررسی تعامل آن‌ها با دیگر اجزاء را فراهم کرده و به ارزیابی سـریع قطعات جدید کمک می‌کند. کمپکر، ستیچ، یوسن، موزر و کونتز[6] (۲۰۱۹) ایجاد یک دوقلوی رقمی را به‌عنوان یک خدمت هوشـمند برای ماشین‌های برداشت سیب‌زمینی بررسـی کرده‌اند. هدف این سامانه ارائه روشی برای تنظیم خودکار ماشـین‌های برداشت سیب‌زمینی است. این سامانه یک حسگر شبیه به سـیب‌زمینی واقعی دارد که اطلاعات مربوط بـه وزن و اندازه را جمع‌آوری کـرده و با داده‌های مربوط به نوع سـیب‌زمینی و یادگیری ماشینی ترکیب می‌کند تا پیکربندی بهینه ماشـین را مشـخص کند. این اقدام، آسـیب به سـیب‌زمینی‌ها را کاهش داده و عملکرد ماشین را بهبود می‌بخشد.

زنجیره تأمین و ارزش

برای بهبود سامانه سرمایش و به‌تبع آن کیفیت میوه، تاگلیاوینی، دفرایه و کارملیت[7] (۲۰۱۹) از رویکرد الگوسازی چندفیزیکی[8] و شبیه‌سـازی عددی به‌عنوان روشـی برای بررسی تغییرات کیفیت میوه در شـرایط سرمایشی مختلف استفاده کرده‌اند. این پژوهش، شـکل، مـواد و ویژگی‌های مرتبط با میوه را الگوسـازی کرده و برای نظارت بر شرایط اقلیمی و بهینه‌سازی کیفیت، بنیانی را برای دوقلـوی رقمی آینده ایجاد کرده اسـت. در سـطح کلان، کیتز[9] (۲۰۱۹) دوقلـوی رقمی را برای بهبود زنجیره ارزش گوشـت و

1.Johannsen, Senger & Kluss
2. Howard, Ma, Aaslyng & Jørgensen
3. Tsolakis, Bechtsis & Bochtis
4. AgROS
5. Susarev, Orlov, Morev & Kravets
6. Kampker, Stich, Jussen, Moser & Kuntz
7. Tagliavini, Defraeye & Carmeliet
8. Multi-Physics Modelling
9. Keates

دام معرفی کرده است. این دوقلو به‌عنوان روشی برای ثبت و اشتراک‌گذاری شاخص‌های کلیدی و ارزیابی عملکرد آن‌ها، در مقایسه با یک الگوی مرجع، طراحی شده‌است. یکی از کاربردهای کلیدی مطرح‌شده، تولید داده‌های مفقود ازطریق شبیه‌سازی زنجیره تأمین فیزیکی براساس الگوی مرجع است که باعث درک بهتر زنجیره تأمین می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، تشویق به پذیرش فناوری اینترنت اشیاء و مفهوم دوقلوی رقمی ازطریق نشان‌دادن ارزش عملیاتی آن است. همچنین یک نقشه راه جامع برای دستیابی به این هدف ارائه‌شده است.

چالش‌های به‌کارگیری دوقلوی رقمی در بخش کشاورزی

کریتزینگر و همکاران[1] (۲۰۱۸) تعریفی ساده و کاربردی برای دوقلوی رقمی ارائه کردند که در بسیاری از موارد مفید است. اما طبقه‌بندی سختگیرانه، شامل الگوی رقمی، سایه رقمی و دوقلوی رقمی، ممکن است برای کشاورزی محدودکننده باشد. وردو، تکینردوغان، بولنز و ولفرت[2] (۲۰۲۱) در تحلیل خود از کاربرد دوقلوی رقمی در کشاورزی هوشمند، تعریفی به‌روزتر ارائه داده‌اند که پیچیدگی استفاده از این فناوری در کشاورزی را کاهش می‌دهد و به نیازهای خاص این بخش توجه دارد. اما همچنان برخی ابهامات باقی است، مثلاً چه زمانی یک الگو به‌اندازه کافی دقیق است که به دوقلوی رقمی تبدیل شود؟ یا برای یک گاو، جریان خودکار اطلاعات دوسویه چگونه خواهد بود؟ این چالش‌ها نیازمند گسترش تعریف‌های فعلی هستند تا در پژوهش و صنعت توافقی کلی حاصل شود. حفظ حریم خصوصی و مسائل اخلاقی، از دیگر موضوعات مهم هستند. با افزایش جمع‌آوری داده‌های حساس، مالکیت داده‌ها به یک مسئله حیاتی تبدیل شده است. راهکارهای فناوری و قانونی می‌توانند در مدیریت این چالش کمک کنند، اما آموزش و توافق میان ذی‌نفعان نیز ضروری است. کیفیت داده و نحوه پردازش آن هم چالشی مداوم است. بدون داده‌های باکیفیت، الگوها عملکرد ضعیفی خواهند داشت. بنابراین، بهبود شناسایی داده‌های غیرعادی، تولید داده‌های قابل‌اعتماد و ایجاد مجموعه داده‌های استاندارد ضروری است (رشید، سان و کوامسدال[3]، ۲۰۲۰). همچنین، تغییرات در داده‌ها و مفهوم آن‌ها باید شناسایی و مدیریت شوند تا الگوها دقیق باقی بمانند (لو، لیو، سانگ و ژانگ[4]، ۲۰۲۰). برای استفاده بهینه از منابع داده موجود و تحلیل رفتار موجودیت‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، به روش‌هایی برای همگام‌سازی داده‌ها با تفاوت زمانی زیاد نیاز است. این مسئله در کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد. جو و همکاران[5] (۲۰۱۹) تأکید می‌کنند که برای یکپارچه‌سازی سامانه‌ها و داده‌ها، به‌ویژه در سامانه‌های پیچیده‌ای که هنوز به‌خوبی شناخته‌نشده‌اند، پژوهش‌های بیشتری لازم است. برای مثال، الگوسازی دوقلوی رقمی در سطح مزرعه به همکاری‌های گسترده بین‌رشته‌ای و ترکیب چندین الگوی پیچیده نیاز دارد که در پژوهش‌های فعلی با محدودیت‌هایی روبرو است (مین، لو، لیو، سوء و و انگ[6]، ۲۰۱۹). همچنین، در موقعیت‌هایی که داده‌ها محدود هستند، ممکن است به روش‌هایی نیاز باشد که بتوانند به‌تدریج چرخه عمر موجودیت‌ها را یاد بگیرند و الگوسازی کنند (لو، لیو، سانگ و ژانگ[7]، ۲۰۲۰).

بکارگیری دوقلوی رقمی در بخش کشاورزی در کشورهای در حال توسعه، ازجمله ایران، با چالش‌های متعدد و پیچیده‌ای روبرو است. یکی از اصلی‌ترین موانع، ضعف زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات، به‌ویژه در مناطق روستایی و کشاورزی است که باعث محدودیت در جمع‌آوری و انتقال داده‌های موردنیاز برای ایجاد دوقلوی رقمی می‌شود. ازسوی دیگر، هزینه‌های بالای پیاده‌سازی و نگهداری این فناوری برای بسیاری از کشاورزان و شرکت‌های کوچک و متوسط مقرون‌به‌صرفه نیست. همچنین، کمبود دانش فنی و مهارت‌های

1.Kritzinger et al
2. Verdouw, Tekinerdogan, Beulens & Wolfert
3. Rasheed, San & Kvamsdal
4. Lu, Liu, Song & Zhang
5. Jo et al
6. Min, Lu, Liu, Su & Wang
7. Lu, Liu, Song & Zhang

لازم در بین کشاورزان و کارشناسان بخش کشاورزی، مانع بزرگی در استفاده مؤثر از این فناوری است. علاوه بر این، مسائل مربوط به امنیت داده‌ها و حریم خصوصی نیز از نگرانی‌های مهم این حوزه هستند (فائو، ۲۰۲۰). از دیدگاه باقری (۱۳۹۸)، چالش‌هایی مانند ضعف زیرساخت اینترنت و شبکه، ضعف بنیه مالی بهره‌برداران کشاورزی، خرد بودن واحدهای بهره‌بردار و ضعف در مکانیزاسیون کشاورزی، ازجمله عوامل اصلی هستند که مانع پیشرفت فناوری‌های نوین در ایران شده‌اند. در نهایت، نبود سیاست‌ها و قوانین حمایتی ازسوی دولت برای تشویق و تسهیل بکارگیری این فناوری در بخش کشاورزی، به عنوان یک چالش کلیدی مطرح است. این عوامل، استفاده گسترده از دوقلوی رقمی در کشاورزی ایران را با دشواری‌های قابل‌توجهی روبرو کرده‌اند و به توجه جدی و برنامه‌ریزی جامع برای رفع این موانع نیاز دارند.

در مجموع، استفاده از دوقلوی رقمی در کشاورزی توان بالقوه بالایی برای بهبود فرآیندها، افزایش دقت و بهره‌وری دارد. بااین‌حال، بهره‌برداری مؤثر از این فناوری مستلزم غلبه بر چالش‌های فنی، مالی و آموزشی است. همچنین، این حوزه به پژوهش‌های بیشتری نیازدارد. دستیابی به این اهداف نیازمند همکاری بین‌رشته‌ای و توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد بخش کشاورزی است تا بتوان از ظرفیت‌های کامل این فناوری بهره‌برداری کرد.

نتیجه‌گیری و توصیه‌ها

استفاده از فناوری‌های رقمی در کشاورزی، به‌ویژه مفاهیم دوقلوی رقمی، در سال‌های اخیر تحولات چشمگیری در این بخش به وجود آورده‌است. دوقلوی رقمی می‌تواند با به‌کارگیری فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء، یادگیری ماشین و سامانه‌های سایبر-فیزیکی، قابلیت‌های متنوعی را برای بهبود کارایی، بهره‌وری و کاهش اتلاف در مزارع کشاورزی فراهم کند. این فناوری‌ها به مدیران کشاورزی کمک می‌کنند تا فرآیندها و شرایط محیطی را به‌صورت بهینه مدیریت کرده و مشکلات موجود در مزارع را پیش‌بینی و رفع کنند. با این حال، استفاده از دوقلوی رقمی در کشاورزی همچنان با چالش‌هایی روبه‌رو است که باید به‌طور جدی بررسی شوند. نبود الگوهای استاندارد و تعریف‌های مشخصی از دوقلوی رقمی در کشاورزی، مسائل مربوط به حفظ حریم خصوصی داده‌ها و مشکلات فنی مانند کیفیت داده‌ها و پیش‌پردازش، برخی از این چالش‌ها هستند. در حالی که پژوهش‌های زیادی در زمینه‌های مختلف صنعتی مانند تولید و بهداشت انجام شده‌است، در کشاورزی هنوز پژوهش‌های گسترده‌ای در حال انجام است، که به‌طور خاص، بر توسعه الگوهای رقمی توین برای نظارت و تحلیل داده‌ها در سطح مزارع کشاورزی تاکید دارند. بنابراین، پژوهش‌های آینده باید بر روی شبیه‌سازی دقیق‌تر، الگوسازی سامانه‌های زیستی، و توسعه الگوهای تجاری مرتبط با دوقلوی رقمی در کشاورزی متمرکز شوند. همچنین، استفاده از روش‌های نوآورانه برای توسعه و پیاده‌سازی فناوری‌های تسهیل‌کننده، به‌ویژه در زمینه‌های تحلیل داده‌های کلان و شبیه‌سازی سه‌بعدی، می‌تواند باعث رشد بیشتر این فناوری در کشاورزی شود. با توسعه استفاده از این فناوری‌ها، کشاورزان می‌توانند با بهره‌گیری از الگوهای مجازی دقیق‌تر، در حوزه‌های مختلف کشاورزی تصمیمات بهتری اتخاذ کنند. این مسئله می‌تواند به کاهش فشارهای اقتصادی، افزایش بهره‌وری و بهبود مدیریت منابع کمک کند. درنهایت، دوقلوی رقمی فرصتی هیجان‌انگیز برای رقمی‌سازی و خودکارسازی سامانه‌های پیچیده کشاورزی فراهم خواهد آورد. به‌نظر می‌رسد که رفع چالش‌های موجود و گسترش پژوهش‌ها در این حوزه، بتواند نقشی کلیدی در بهبود کشاورزی آینده ایفا کند.

منابع

شفاعی نهند، و.، ریاضی، ح. و آبرومند، ن. (۱۴۰۲). مروری بر دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) در صنعت. *اولین همایش ملی نوآوری در مهندسی: راهی به‌سوی توسعه*، ۵ اسفند ۱۴۰۲، چالوس، ایران.

باقری، ن. "*فناوری اطلاعات بسترساز توسعه کشاورزی هوشمند. مجله ترویجی علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی*. ۲(۱)، ص ۳۵- ۴۸، ۱۳۹۸.

Ahmed, A., Zulfiqar, S., Ghandar, A., Chen, Y., Hanai, M., Theodoropoulos, G. (2019). Digital Twin Technology for Aquaponics: Towards Optimizing Food Production with Dynamic Data Driven Application Systems. In: Tan, G., Lehmann, A., Teo, Y., Cai, W. (eds) Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems. AsiaSim 2019. *Communications in Computer and Information Science,* Springer, Singapore.

Alves, R. G., Souza, G., Maia, R. F., Tran, A. L. H., Kamienski, C., Soininen, J. P., Aquino, P. T., & Lima, F. (2019). A digital twin for smart farming. In: *2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference* (GHTC). Seattle, WA, USA. 1-4.

An, W., Wu, D., Ci, S., Luo, H., Adamchuk, V., & Xu, Z. (2017). Agriculture Cyber-Physical Systems. In H. Song, D. B. Rawat, S. Jeschke, & C. Brecher (Eds.), *Cyber-Physical Systems. Boston: Academic Press.*

Angin, P., Anisi, M. H., Göksel, F., Gürsoy, C., & Büyükgülcü, A. (2020). Agrilora: a digital twin framework for smart agriculture. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications,* 11(4), 77-96.

Chergui, N.; Kechadi, M.T.; McDonnell, M. (2020). The Impact of Data Analytics in Digital Agriculture: A Review. In: *Proceedings of the 2020 International Multi-Conference on: Organization of Knowledge and Advanced Technologies* (OCTA), Tunisia, 1–13.

Erdélyi, V., & Jánosi, L. (2019). Digital Twin and Shadow in Smart Pork Fetteners. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 4(1), 515-520.

Farooq, M.S.; Riaz, S.; Abid, A.; Abid, K.; Naeem, M.A. (2019). A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. *IEEE Access*, 7, 156237–156271.

FAO (Food and Agriculture Organization). (2020). The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture.

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access,* 8, 108952-108971.

Ghandar, A., Ahmed, A., Zulfiqar, S., Hua, Z., Hanai, M., & Theodoropoulos, G. (2021). A Decision Support System for Urban Agriculture Using Digital Twin: A Case Study With Aquaponics. *IEEE Access*, 9, 35691-35708.

Howard, D. A., Ma, Z., Aaslyng, J. M., & Jørgensen, B. N. (2020). Data architecture for Digital Twin of commercial greenhouse production. In: *2020 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies* (RIVF), Ho Chi Minh City, Vietnam, 1-7.

Jo, S. K., Park, D. H., Park, H., & Kim, S. H. (2018). Smart Livestock Farms Using Digital Twin: Feasibility Study. In: *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence* (ICTC), Jeju, Korea (South), 1461-1463.

Jo, S. K., Park, D. H., Park, H., Kwak, Y., & Kim, S. H. (2019). Energy Planning of Pigsty Using Digital Twin. In: 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, Korea (South), 723-725.

Johannsen, C., Senger, D., Kluss, T. (2021). A Digital Twin of the Social-Ecological System Urban Beekeeping. In: Kamilaris, A., Wohlgemuth, V., Karatzas, K., Athanasiadis, I.N. (eds) *Advances and New Trends in Environmental Informatics*. Progress in IS. Springer, Cham, 193-207.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52.

Kampker, A., Stich, V., Jussen, P., Moser, B., & Kuntz, J. (2019). Business Models for Industrial Smart Services – The Example of a Digital Twin for a Product-Service-System for Potato Harvesting. *Procedia CIRP*, 83, 534-540.

Keates, O. (2019). The Design and Validation of a Process Data Analytics Methodology for Improving Meat and Livestock Value Chains. *Business Process Management,* 24(20), 114-117.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine,* 51(11), 1016-1022.

Lu, J., Liu, A., Song, Y., & Zhang, G. (2020). Data-driven decision support under concept drift in streamed big data. *Complex & Intelligent Systems,* 6(1), 157-163.

Lu, J., Zheng, X., Schweiger, L., Kiritsis, D. (2021). A

Cognitive Approach to Manage the Complexity of Digital Twin Systems. In: West, S., Meierhofer, J., Ganz, C. (eds) *Smart Services Summit.* Progress in IS. Springer, Cham, 105-115.

Market and Markets. (2022). *Digital Twin Market Size & Share.* Retrieved 11/01/2025 from https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html

Min, Q., Lu, Y., Liu, Z., Su, C., & Wang, B. (2019). Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. *International Journal of Information Management, 4*9, 502-519.

Moghadam, P., Lowe T., Edwards, EJ. (2020) Digital Twin for the Future of Orchard Production Systems. *Proceedings,* 36(1), 92.

Nasirahmadi, A., & Hensel, O. (2022). Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. *Sensors,* 22(2), 498.

Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia manufacturing*, 11, 939-948.

Ning, H., Li, Y., Shi, F., & Yang, L. T. (2020). Heterogeneous edge computing open platforms and tools for internet of things. *Future Generation Computer Systems,* 106, 67-76.

Paraforos, D.S., Griepentrog, H.W. (2021). Digital Farming and Field Robotics: Internet of Things, Cloud Computing, and Big Data. In: Karkee, M., Zhang, Q. (eds). *Fundamentals of Agricultural and Field Robotics: Agriculture Automation and Control. Springer, Cham,* 365-385.

Purcell, W., & Neubauer, T. (2023). Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review. *Smart Agricultural Technology,* 3, 100094.

Pylianidis, C., Osinga, S., & Athanasiadis, I. N. (2021). Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture,* 184, 105942.

Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective. *IEEE Access,* 8, 21980-22012.

Sarker, V. K., Queralta, J. P., Gia, T. N., Tenhunen, H., & Westerlund, T. (2019). *A Survey on LoRa for IoT: Integrating Edge Computing. In: 2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing* (FMEC), Rome, Italy, 295-300.

Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2022). Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration,* 30, 100383.

Skobelev, P. O., Mayorov, I. V., Simonova, E. V., Goryanin, O. I., Zhilyaev, A. A., Tabachinskiy, A. S., & Yalovenko, V. V. (2020). Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management. *Journal of Physics: Conference Series*, 1703(1), 012022.

Stark, R., & Damerau, T. (2019). Digital Twin. In S. Chatti & T. Tolio (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin, Heidelberg.* Springer, 1-8.

Susarev, S. V., Orlov, S. P., Morev, A. S., & Kravets, O. J. (2019). Digital tests of the robotic chassis' cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle. *Journal of Physics:* Conference Series, 1399(4), 044032.

Tagliavini, G., Defraeye, T., & Carmeliet, J. (2019). Multiphysics modeling of convective cooling of non-spherical, multi-material fruit to unveil its quality evolution throughout the cold chain. *Food and Bioproducts Processing,* 117, 310-320.

Tsolakis, N., Bechtsis, D., Bochtis, D. (2019). AgROS: A Robot Operating System Based Emulation Tool for Agricultural Robotics. *Agronomy*, 9(7), 403.

Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems,* 189, 103046.

Walters, J. P., Archer, D. W., Sassenrath, G. F., Hendrickson, J. R., Hanson, J. D., Halloran, J. M., Vadas, P., & Alarcon, V. J. (2016). Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. *Ecological Modelling,* 333, 51-65.

Zhang, X., Cao, Z., & Dong, W. (2020). Overview of Edge Computing in the Agricultural Internet of Things: Key Technologies, Applications, Challenges. *IEEE Access,* 8, 141748-141761.

Journal of Agricultural Information sciences and Technology
Volume 8, Issue 1, Serial Number 15, Spring and Summer 2025
jaist.areeo.ac.ir

A review of Digital Twin technology applications in the agricultural sector

Arezo Hassanvand[1]*, Erfan Hosseini[2]

1. PhD student,Department of Agricultural Management and Development, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (corresponding author) **Email:** *arezo.hasanvand@ut.ac.ir*
2. PhD student,Department of Agricultural Management and Development, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. **Email:** serfanhosseini@ut.ac.ir

Abstract

Digital Twin technology, as a virtual model of physical systems, enables the provision of real-time and precise data from various environments and processes. In agricultural sectors, including precision farming, water resource management, agricultural robotics, and post-harvest process optimization, this technology offers significant capabilities for enhancing productivity and reducing costs. This paper examines the applications of Digital Twin technology in agriculture and analyzes its opportunities and challenges. Initially, the opportunities, such as improved farm management, enhanced prediction accuracy, and resource consumption optimization, are examined. Subsequently, the implementation challenges in the agricultural sector, including data quality issues, privacy concerns, operational costs, and technical and legal complexities, are presented. This study aims to provide a more comprehensive understanding of the capabilities and barriers in implementing Digital Twin technology in agriculture while offering recommendations for future research and planning in this domain.

Keywords: Digital agriculture, Digital twin, Cyber-physical systems, Simulation.