



The Transformation of Five Generations of Agriculture: From Manual Labor to Artificial Intelligence and Automation

Arezoo Hassanvand¹✉

1- Ph.D. Candidate, Department of Agricultural Management and Development, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. Karaj, IRAN.

Email: arezo.hasanvand@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Review Article

Article history:

Received: July 02, 2025

Revised: July 15, 2025

Accepted: Aug 04, 2025

Published: Autumn, 2025

Keywords:

Agricultural Evolution,
Artificial Intelligence (AI),
Automation,
Fifth-Generation Agriculture
(5.0).

ABSTRACT

Throughout history, agriculture has undergone remarkable transformations, with each generation marked by technological advancements and fundamental changes in production methods. This article examines the evolution of five generations of agriculture, from the first generation, which relied on manual labor and animal power, to the fifth generation, which integrates advanced technologies such as artificial intelligence (AI), robotics, the Internet of Things (IoT), and automation, elevating agriculture to an entirely new level. The first generation of agriculture was characterized by traditional practices and simple tools, while the second generation brought about a revolution in productivity through mechanization and the use of machinery. The third generation, marked by the advent of biotechnology and genetic engineering, ushered in the Green Revolution. The fourth generation, leveraging digital and data-driven technologies, enabled precision and smart agriculture. Now, the fifth generation of agriculture focuses on human-machine collaboration, utilizing AI and automated systems to create sustainable, efficient, and environmentally friendly agricultural practices. In summary, the five-generation evolution of agriculture demonstrates this industry's progressive shift toward greater intelligence and reduced reliance on human labor. However, challenges such as infrastructure availability, cost-effectiveness of technology for smallholder farmers, and ethical considerations in artificial intelligence applications must be carefully addressed. To overcome these obstacles, necessary coordination through joint investments in research and development, establishment of international standards, and implementation of supportive policies is essential.

Cite this article: Hassanvand, A. (2025), *The Transformation of Five Generations of Agriculture: From Manual Labor to Artificial Intelligence and Automation*, *Soil and Sustainable Development*, 1 (2), 194-206.

DOI: <https://doi.org/10.22034/ssd.2025.532202.1013>

© The Author(s). Publisher: The University of Jiroft Press

تحولات پنج نسل کشاورزی؛ از کار دستی تا هوش مصنوعی و اتوماسیون

آرزو حسنوندا ✉

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مدیریت و توسعه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: arezo.hasanvand@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مروری تاریخ دریافت: ۱۱ تیر ۱۴۰۴ تاریخ بازنگری: ۲۴ تیر ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳ مرداد ۱۴۰۴ تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۴	کشاورزی در طول تاریخ دستخوش تحولات شگرفی شده است که هر نسل آن با پیشرفت‌های فناورانه و تغییرات بنیادین در روش‌های تولید همراه بوده است. مقاله حاضر به بررسی تحولات پنج نسل کشاورزی می‌پردازد؛ از نسل اول که مبتنی بر کار دستی و استفاده از نیروی حیوانات بود، تا نسل پنجم که با ادغام فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند هوش مصنوعی، رباتیک، اینترنت اشیا (IoT) و اتوماسیون، کشاورزی را به سطحی کاملاً جدید ارتقا داده است. در نسل اول، کشاورزی به صورت سنتی و با ابزارهای ساده انجام می‌شد، در حالی که نسل دوم با مکانیزاسیون و استفاده از ماشین‌آلات، انقلابی در افزایش بهره‌وری ایجاد کرد. نسل سوم با ورود فناوری‌های زیستی و اصلاح ژنتیکی، انقلاب سبز را رقم زد. نسل چهارم با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال و داده‌محور، کشاورزی دقیق و هوشمند را ممکن ساخت. اکنون، نسل پنجم کشاورزی با تمرکز بر همکاری انسان و ماشین، استفاده از هوش مصنوعی و سیستم‌های خودکار، به دنبال ایجاد کشاورزی پایدار، کارآمد و سازگار با محیط زیست است. در مجموع، تحولات پنج‌نسلی کشاورزی نشان‌دهنده حرکت این صنعت به سمت هوشمندتر شدن و کاهش وابستگی به نیروی انسانی است و چالش‌هایی مانند فراهم بودن زیرساخت‌ها، مقرون‌به‌صرفه بودن فناوری برای کشاورزان خرده‌پا و ملاحظات اخلاقی در استفاده از هوش مصنوعی نیز باید مورد توجه قرار گیرند. برای غلبه بر این چالش‌ها، هماهنگی‌های لازم در قالب سرمایه‌گذاری مشترک در تحقیق و توسعه، تدوین استانداردهای بین‌المللی، و طراحی سیاست‌های حمایتی ضروری است.
واژه‌های کلیدی: اتوماسیون، تحولات کشاورزی، کشاورزی نسل پنجم (۵.۰)، هوش مصنوعی (AI).	

ارجاع به مقاله: حسنوندا، آرزو، (۱۴۰۴)، تحولات پنج نسل کشاورزی؛ از کار دستی تا هوش مصنوعی و اتوماسیون، مجله خاک و توسعه پایدار، ۱ (۲)، ۱۹۴-۲۰۶.

© نویسندگان، ناشر: انتشارات دانشگاه جیرفت

DOI: <https://doi.org/10.22034/ssd.2025.532202.1013>

مقدمه

در طول سال‌ها، کشاورزی در سراسر جهان تحولات بسیاری را تجربه کرده است. هر انقلاب کشاورزی، تغییری بنیادین است و در عین حال همچون یک شمشیر دو لبه عمل می‌کند، زیرا دارای مزایا و معایب بالقوه‌ای است (Sadiku et al., 2021). در اولین انقلاب کشاورزی، فعالیت‌های کشاورزی به شیوه سنتی انجام می‌شد و وظایف توسط انسان‌ها و حیوانات به پایان می‌رسید. در دومین انقلاب کشاورزی، اگرچه برخی تغییرات ایجاد شد، اما همچنان بیشتر کارها به صورت دستی انجام می‌گرفت، که فرآیندی زمان‌بر بود. در نسل سوم، فناوری‌های جدیدی وارد صحنه شدند که توسعه فعالیت‌های کشاورزی را به شیوه‌ای قابل‌اجراتر ممکن ساختند. با این حال، کمبود دانش کافی و نبود متخصصان منجر به مدیریت نادرست فعالیت‌های کشاورزی شد. سرانجام، نسل چهارم با مجموعه‌ای از فناوری‌ها از جمله بلاک‌چین^۱، هوش ازدحامی^۲، کلان‌داده^۳، یادگیری ماشین^۴، یادگیری عمیق^۵، اینترنت اشیا (IoT)، سیستم‌های فیزیکی - سایبری^۶، رباتیک و سیستم‌های خودمختار^۷، شبکه‌های مولد رقابتی (GAN) و محاسبات ابری - لبه‌ای - مه^۸ ظهور کرد و عصر کشاورزی مدرن را متحول ساخت (Sharma et al., 2022).

کشاورزی نسل ۴.۰^۹ بر اساس چهار رکن اساسی بنا شده است؛ (۱) مدیریت مبتنی بر داده‌ها، (۲) استفاده از روش‌های تولید مبتنی بر ابزارهای نوین، (۳) تعهد به پایداری و (۴) تلاش برای حرفه‌ای‌سازی (Javaid et al., 2022). ظهور کشاورزی نسل ۵.۰^{۱۰} را می‌توان به‌عنوان یک گسترش طبیعی از اصول کشاورزی نسل ۴.۰ و صنعت نسل ۱۴.۰ به حوزه کشاورزی در نظر گرفت (Naikwade et al., 2021). ادغام کشاورزی نسل ۵.۰ در برنامه‌های استراتژیک تولیدکنندگان برجسته تجهیزات کشاورزی هدف مهمی برای دهه آینده است. کشاورزی ۵.۰ تحولی پارادایمی پیش‌بینی‌شده در آینده شیوه‌های کشاورزی هوشمند است. در آن دوره، انتظار می‌رود که استفاده از کشاورزی بدون سرنشین افزایش یابد و در شرایطی که کمبود نیروی کار وجود دارد، مزایایی را ارائه دهد (Razak et al., 2024). در واقع مفهوم کشاورزی نسل ۵.۰

1 Blockchain

2 Swarm Intelligence

3 Big Data

4 Machine Learning (ML)

5 Deep Learning (DL)

6 Cyber-Physical Systems

7 Robotics and Autonomous Systems

8 Cloud-Edge-Fog Computing

9 Agriculture 4.0

10 Agriculture 5.0

11 Industry 4.0

هنوز در حال توسعه است. لازم است که از طریق انقلاب دیجیتال کشاورزی^{۱۲} به کشاورزی نسل ۵.۰ گذر کنیم. جالب است که هر کدام از این انقلاب‌های کشاورزی در نقاط مختلفی از کره زمین در حال اجرا هستند (Sadiku et al., 2021).

در ادامه، مروری کوتاه بر پنج نسل کشاورزی خواهیم داشت. هر یک از این نسل‌ها نشان‌دهنده تحولات کلیدی در فناوری‌ها، شیوه‌های مدیریتی، و نقش انسان در فرایندهای کشاورزی بوده‌اند. این نسل‌ها از کشاورزی سنتی و مبتنی بر نیروی انسانی و حیوانات آغاز شده و با ورود مکانیزاسیون، انقلاب سبز، کشاورزی دیجیتال و در نهایت کشاورزی هوشمند و مبتنی بر هوش مصنوعی^{۱۳} به سطوح پیشرفته‌تری رسیده‌اند. این تحولات نقش مهمی در افزایش بهره‌وری، پایداری منابع، و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی ایفا کرده‌اند.

روش انجام تحقیق

در این پژوهش، از روش مرور روایتی برای جمع‌آوری، تحلیل و ترکیب اطلاعات استفاده شده است. داده‌ها و منابع علمی معتبر از پایگاه‌های داده‌ای نظیر Google Scholar، Scopus، Science Direct با استفاده از کلیدواژه‌هایی مانند "انقلاب‌های کشاورزی"^{۱۴}، "کشاورزی نسل ۴.۰"، "کشاورزی نسل ۵.۰" و "هوش مصنوعی" استخراج شدند. مقالات و منابع منتخب نیز براساس معیارهایی همچون تازگی، کیفیت علمی، ارتباط با موضوع و میزان تأثیرگذاری مورد ارزیابی قرار گرفتند و یافته‌ها سازماندهی شدند.

نتایج و بحث

نسل اول؛ کشاورزی سنتی

اولین انقلاب، شاهد گذار انسان‌های شکارچی - گردآورنده^{۱۵} به سمت کشاورزی متمرکز و مستقر بود. این دوره شامل کشاورزی از زمان‌های باستان تا حدود سال ۱۹۲۰ است، زمانی که کشاورزی عمدتاً با کار فیزیکی زیادی همراه بود (Sadiku et al., 2021). در قرن هفدهم، کشاورزان از ابزارهایی مانند داس و چنگک برای کشت استفاده می‌کردند (Rapela, 2019). در این روش‌ها، تعداد زیادی نیروی کار برای انجام فعالیت‌های کشاورزی مورد نیاز بود، اما تولید محصولات کشاورزی بسیار کم بود (Sharma et al., 2022). به طور کلی، کشاورزی سنتی پایه و اساس سیستم‌های

12 Digital Agricultural Revolution

13 Artificial Intelligence (AI)

14 Revolutions of agriculture

15 Hunter-Gatherers

کشاورزی مدرن است و نقش مهمی در تاریخ توسعه کشاورزی داشته است. با این حال، محدودیت‌های آن منجر به توسعه روش‌های مکانیزه و فناورانه در نسل‌های بعدی کشاورزی شد.

نسل دوم کشاورزی؛ مکانیزاسیون و افزایش تولید

انقلاب مکانیزاسیون^{۱۶} که در اواخر قرن ۱۸ و ۱۹ میلادی اتفاق افتاد، تحولی در کشاورزی ایجاد کرد و کشاورزی نسل ۱۰۰ را به کشاورزی نسل ۲۰۰ تبدیل کرد. ورود تراکتورها، موتورهای بخار و داس‌های مکانیکی کارایی را افزایش داد، نیاز به کار دستی را کاهش داد و تولید محصولات کشاورزی را بهبود بخشید و در نتیجه موجب ثبات غذایی و گسترش اقتصادی شد. هدف این انقلاب، بهینه‌سازی کارایی در تمام جنبه‌های کشاورزی از جمله کشت، برداشت و ذخیره‌سازی بود که باعث کاهش هزینه‌های تولید شد (Gyamfi et al., 2024). در کشاورزی نسل ۲۰۰، فناوری‌های جدیدی نیز معرفی شدند که منابع انرژی مانند گاز و نفت جایگزین منابع انرژی اصلی نظیر بخار شدند. علاوه بر این، پیشرفت‌های اخیر در حوزه حمل‌ونقل به زنجیره تأمین غذا کمک کرد و امکان ارسال محموله‌های کشاورزی به مسافت‌های طولانی را فراهم ساخت (Sharma et al., 2022). طبق گزارش فائو^{۱۷}، کشاورزی صنعتی در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، نقش اساسی در تأمین غذای جمعیت‌های بزرگ و افزایش تولید محصولات کشاورزی ایفا کرده است (FAO, 2017). کشاورزی صنعتی با وجود افزایش تولید محصولات و تأمین غذا، مضراتی مانند تخریب محیط زیست، کاهش تنوع زیستی، آلودگی آب و خاک، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تشدید تغییرات اقلیمی داشته است. این چالش‌ها لزوم حرکت به سوی شیوه‌های پایدارتر را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

کشاورزی نسل سوم؛ استفاده از فناوری‌های زیستی و اصلاح ژنتیکی (انقلاب سبز)

انقلاب سوم کشاورزی، شامل تغییرات تولید در کشورهای در حال توسعه همراه با انقلاب سبز^{۱۸} است (Sadiku et al., 2021). انقلاب سبز به مجموعه‌ای از ابتکارات تحقیقاتی، توسعه و انتقال فناوری گفته می‌شود که بین سال‌های ۱۹۴۳ تا اواخر دهه ۱۹۷۰ در مکزیک اجرا شد و تولید کشاورزی صنعتی را در بسیاری از کشورهای در حال توسعه افزایش داد. این ابتکارات شامل توسعه دانه‌های غلات پرمحصول، گسترش زیرساخت‌های آبیاری و توزیع بذرهای هیبریدی، کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها به کشاورزان بود. هدف انقلاب سبز افزایش کارایی فرآیندهای کشاورزی به‌منظور افزایش تولید

16 mechanization revolution

17 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

18 Green Revolution

محصولات کشاورزی و کمک به کشورهای در حال توسعه در پاسخ به نیازهای جمعیت در حال رشد بود (Ameen & Raza, 2017). انقلاب سبز اثرات مثبت و متفاوتی به دنبال داشت. انقلاب سبز و کشاورزی ارگانیک دو رویکرد متفاوت در کشاورزی هستند که هر یک مزایا و معایب خود را دارند. انقلاب سبز به افزایش تولید جهانی کمک کرد اما مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی به همراه داشت. کشاورزی ارگانیک رویکردی پایدارتر است ولی در برخی مناطق نتیجه دلخواه را نمی‌دهد. هر دو رویکرد به دنبال بهبود عملکرد کشاورزی هستند، اما پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی آن‌ها نیازمند مدیریت دقیق است. کشاورزی نسل ۴.۰ با استفاده از فناوری‌های پیشرفته و نوآوری‌های دیجیتال می‌تواند چالش‌ها و معایب این رویکردها را کاهش دهد و بهره‌وری را افزایش دهد.

کشاورزی نسل چهارم؛ بهره‌گیری از دانش و فناوری‌های نوین

مفهوم کشاورزی نسل ۴.۰ به‌عنوان یک قیاس با اصطلاح صنعت نسل ۴.۰ که توسط صنعت آلمان مطرح شد، شکل گرفته است. این اصطلاح توسط اجلاس جهانی دولت‌ها^{۱۹} استفاده شده و با کشاورزی پایدار مرتبط است. برخی کشاورزی نسل ۴.۰ را به‌عنوان "انقلاب سبز دوم"^{۲۰} می‌شناسند. شکل (۱) چشم‌اندازهای مختلف کشاورزی نسل ۴.۰ را نشان می‌دهد (Araújo et al., 2021). مفهوم کشاورزی دقیق^{۲۱} از افزایش تقاضا برای فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) در کاربردهای کشاورزی به وجود آمده است. کشاورزان می‌توانند با استفاده از پیشرفت‌های موجود در اتوماسیون^{۲۲}، سیستم‌های اطلاعاتی مدرن^{۲۳} و فناوری اینترنت تولید خود را افزایش دهند و منابع را به طور مؤثرتری توزیع کنند. سیستم‌های پشتیبانی تصمیم کشاورزی^{۲۴} (DSSs) برای کشاورزی نسل ۴.۰ به یک موضوع تحقیقاتی جذاب تبدیل شده‌اند. سیستم‌های پشتیبانی تصمیم ابزارهای تعاملی هستند که به کاربران کمک می‌کنند تا تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد مسائل غیرساختاری اتخاذ کنند. این سیستم‌ها می‌توانند کاملاً خودکار، با کمک انسان، یا ترکیبی از هر دو باشند. همچنین، سیستم پشتیبانی تصمیم مقادیر زیادی داده را تجزیه و تحلیل و ترکیب می‌کند تا به تصمیم‌گیری کمک کند (Naikwade et al., 2021). کشاورزی نسل ۴.۰ ارتباط نزدیکی با مفاهیم دیگر در ادبیات علمی دارد و حتی به عنوان مترادف کشاورزی هوشمند، کشاورزی دیجیتال و کشاورزی دقیق استفاده می‌شود.

19 World Government Summit

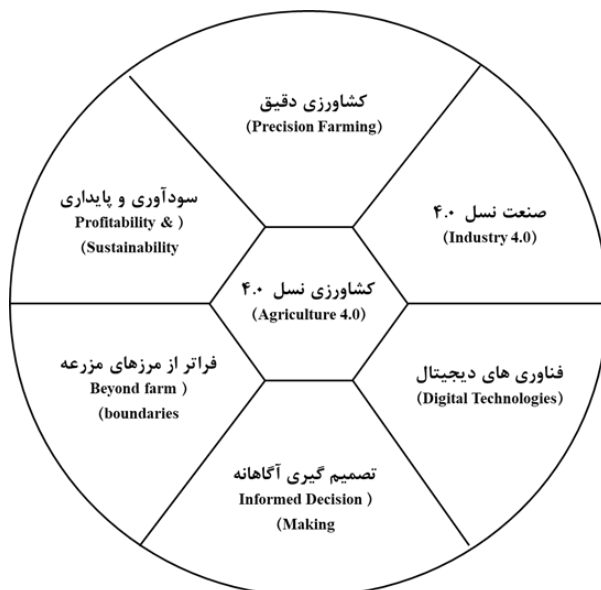
20 Green Revolution 2.0

21 precision farming

22 Automation

23 modern information systems

24 Agricultural Decision Support Systems (DSSs)



شکل ۱- چشم اندازهای مختلف کشاورزی نسل ۴.۰ (اقتباس از: Sadiku et al., 2021)

مطالعات مختلف بر این نکته تأکید کرده‌اند که کشاورزی نسل ۴.۰ باعث افزایش سودآوری و تضمین پایداری کشاورزی می‌شود (Beluhova-Uzunova & Dunchev, 2022). از میان مزایای اصلی که کشاورزی نسل ۴.۰ می‌تواند به همراه داشته باشد، افزایش بازده مالی (Kodan et al., 2020; Huh & Kim, 2018) و کاهش هزینه‌ها (Pivoto et al., 2019) قابل ذکر است. از طرف دیگر، مزایای زیست‌محیطی مانند کاهش پسماند، مصرف آب و انرژی (Zhai et al., 2020; Quiroz & Alferez, 2020) نیز وجود دارند. مزایای اجتماعی مرتبط با امنیت کشاورزان (Wolfert et al., 2014) و ایجاد شغل در بخش کشاورزی (Quiroz & Alferez, 2020) هستند. در مقابل، برخی مطالعات به معایب کشاورزی نسل ۴.۰ اشاره دارند، از جمله خطرات پیاده‌سازی فناوری‌های جدید (Pivoto et al., 2019) و طرد یا تبعیض علیه کشاورزان فاقد مهارت‌های دیجیتال (Klerkx et al., 2019). همچنین، Klerkx & Rose (۲۰۲۰) بر دشواری ارزیابی اثرات زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی بر گسترش کشاورزی نسل ۴.۰ تأکید دارند. در این راستا، چالش‌های اصلی باید مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند تا پیاده‌سازی کشاورزی نسل ۴.۰ تحریک و تشویق شود (Beluhova-Uzunova & Dunchev, 2022).

با پیشرفت فناوری و توسعه رویکردهای نوین، کشاورزی نسل ۵.۰ به عنوان مرحله‌ای پیشرفته‌تر از کشاورزی نسل ۴.۰ شکل گرفته است. این نسل از کشاورزی بر ترکیب فناوری‌های هوش مصنوعی (AI)، یادگیری ماشین (ML)، رباتیک و

سامانه‌های هوشمند با تأکید بر پایداری، خودکارسازی و بهبود کارایی در تمام مراحل تولید کشاورزی تمرکز دارد. در کشاورزی نسل ۵.۰ نیز هدف اصلی نه تنها افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف منابع است، بلکه بهبود کیفیت محصولات، کاهش اثرات زیست‌محیطی، و ایجاد اکوسیستم‌های کشاورزی هوشمند و قابل‌پایش برای پاسخ به چالش‌های جهانی غذا و محیط زیست نیز از اولویت‌ها به شمار می‌رود. در ادامه، ویژگی‌ها و قابلیت‌های این نسل از کشاورزی بررسی خواهد شد.

نسل پنجم کشاورزی؛ ورود فناوری‌های هوشمند و دیجیتال

کمیسیون اروپا^{۲۵} در سال ۲۰۲۱ به طور رسمی آغاز عصر «صنعت نسل ۵.۰»^{۲۶} را اعلام کرد. این عصر، علاوه بر هوش مصنوعی، بر سنجش از دور کشاورزی^{۲۷} یا کاربردهای رایانش ابری^{۲۸} نیز متکی است (Vanghele et al., 2021). در واقع، ظهور کشاورزی نسل ۵.۰ نمایانگر یک مرحله منحصر به فرد و تحول‌آفرین است. به‌طور کلی، نیاز به کشاورزی هوشمند^{۲۹} از ضرورت مواجهه با چالش‌هایی مانند رشد جمعیت، کمبود منابع، تغییرات اقلیمی، بهینه‌سازی هزینه‌ها و کارایی نیروی کار ناشی می‌شود. منابعی مانند آب، زمین و انرژی محدود هستند و به‌دلیل رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی تحت فشار فزاینده‌ای قرار دارند. کشاورزی هوشمند این ظرفیت را دارد که روش‌های کشاورزی سنتی را در ترکیب با فناوری‌های پیشرفته متحول کند و به سیستم‌های پایدارتر، کارآمدتر و دوستدار محیط زیست منجر شود (Otieno, 2023). به عبارتی، با ادغام تغییرات جغرافیایی و زمانی در پیشرفت‌های فناوری و فرآیند تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌ها^{۳۰}، کشاورزی هوشمند امکان مدیریت دقیق منابع، کاهش ضایعات و حداکثر استفاده از منابعی مانند آب، کودها و انرژی را فراهم می‌آورد (Race et al., 2023; Rodríguez et al., 2021)، که در نهایت بهره‌وری اقتصادی را افزایش داده و همزمان ورودی‌های منابع و عواقب زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند (Bwambale et al., 2022). همچنین کشاورزان قادر خواهند بود تصمیمات مبتنی بر داده را در مراحل مختلف تولید، مانند شرایط آب‌وهوایی متغیر، تغییر الگوهای بارش و شیوع آفات و بیماری‌ها، با استفاده بهینه از منابع (Thakur et al., 2023) از طریق رباتیک، سیستم‌های کنترل

25 European Commission

26 Industry 5.0

27 Agricultural Remote Sensing

28 Cloud Computing Applications

29 smart agriculture

30 data-driven decision-making process

خودکار^{۳۱} و روش‌های هوش مصنوعی (Shrivastava et al., 2023) اتخاذ کنند، همچنین با ادغام تحقیق و اطلاعات کشاورزی، بهره‌وری و اثربخشی صنعت کشاورزی بهینه خواهد شد (Cordeiro et al., 2022). بنابراین، کشاورزان نیازی به تکیه بر کار دستی برای انجام وظایفی مانند کاشت، علف‌زنی و برداشت ندارند که این امر با کاهش مواجهه با شرایط خطرناک، ایمنی کارگران را افزایش می‌دهد (Nyangaresi et al., 2022). همچنین این نسل از کشاورزی، بر همکاری و تعامل میان انسان‌ها و ماشین‌ها تأکید دارد. ادغام ربات‌ها و الگوریتم‌های هوش مصنوعی در مزارع داده‌محور^{۳۲} که امکان تعامل یکپارچه^{۳۳} میان کشاورزان، ماشین‌های خودران^{۳۴} و الگوریتم‌های داده‌محور^{۳۵} را فراهم می‌آورد، به‌عنوان کشاورزی نسل ۵.۰ شناخته می‌شود (Zambon et al., 2019). مؤلفه‌های اصلی کشاورزی نسل ۵.۰ در جدول (۱) خلاصه شده‌اند و مفهوم کشاورزی نسل ۵.۰ در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱- مؤلفه‌های کشاورزی نسل پنجم (۵.۰)

مؤلفه‌ها	شرح
اتصال و همه‌جایی بودن داده‌ها ^{۳۶}	کشاورزی ۵.۰ در محیطی رشد می‌کند که ارتباط وسیعی بین دستگاه‌ها و جریان‌های داده وجود دارد، جایی که ابزارها، ماشین‌آلات، حسگرها و جریان‌های داده لحظه‌ای در آن حضور دارند. ظهور فناوری 5G، همراه با اینترنت اشیاء (IoT)، موجب حضور گسترده داده‌ها می‌شود و تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا درک دقیق و بروزی از سیستم‌های کشاورزی خود داشته باشند.
تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌ها	بهینه‌سازی عملیات یا فرآیندهای کشاورزی با استفاده از ترکیب تحلیل‌های پیشرفته، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌سازی پیش‌بینی بر اساس درک دقیق از محیط داده‌ها.
رباتیک و اتوماسیون	حداقل‌سازی مداخلات مضر مانند استفاده از مواد شیمیایی به‌منظور ترویج و تقویت همزیستی هماهنگ بین تخصص انسانی و دقت ماشین در انجام وظایف با دقت و کارایی.
اکوسیستم دقیق و اقدامات پایدار ^{۳۷}	اطمینان از روش‌های کشاورزی پایدار که مانع از آسیب‌دیدن اکوسیستم زیست‌محیطی می‌شود تا منابع پایدار، از جمله خاک‌های بارور، منابع آب غیرآلوده و اکوسیستم‌های شکوفا برای نسل‌های آینده فراهم گردد.

اقتباس از؛ Razak et al., 2024

31 Automated control systems

32 data-driven farms

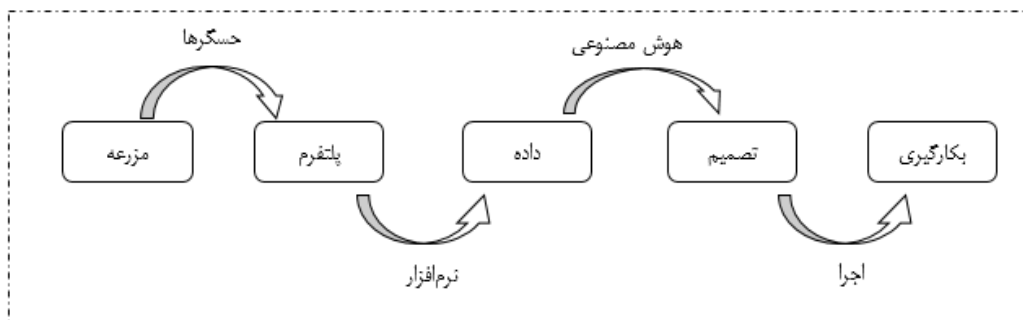
33 seamless interaction

34 autonomous machinery

35 data-driven algorithms

36 Connectivity and Data ubiquity

37 Precision ecosystem and Sustainable Practices



شکل ۲- مفاهیم کشاورزی نسل ۵.۰ (اقتباس از: Polymeni et al., 2023)

هوش مصنوعی (AI)، تحولی اساسی در کشاورزی ایجاد کرده است. یکی از نمونه‌های بارز این تحول، توانایی هوش مصنوعی در استفاده از تحلیل پیش‌بینی‌کننده^{۳۸} با بهره‌گیری از داده‌ها و ارائه راه‌حل‌های نوآورانه برای کشاورزی است. سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی شامل طیف گسترده‌ای از فناوری‌ها مانند رباتیک و اتوماسیون^{۳۹}، پهپادها^{۴۰}، اینترنت اشیا (IoT)، فناوری‌های حسگر^{۴۱} و الگوریتم‌های هوشمند تصمیم‌گیری^{۴۲} هستند. این کاربردها به‌ویژه به دلیل پوشش همه زیربخش‌های کشاورزی، از جمله محصولات زراعی، دامپروری و آبی‌پروری بسیار سودمند هستند (Sharifulden, 2024). کاربرد هوش مصنوعی در بخش کشاورزی به اوایل دهه ۱۹۸۰ بازمی‌گردد، زمانی که تحقیقات مربوط به رباتیک در ژاپن برای حمایت از عملیات مزرعه انجام شد و به دنبال آن در سال ۱۹۸۵ مدل شبیه‌سازی محصول پنبه (GOSSYM) در یونان توسعه یافت. هرچند که هوش مصنوعی بیش از ۴۰ سال است در کشاورزی استفاده می‌شود، اما تا سال ۲۰۱۱ و با محبوب شدن مفهوم کشاورزی نسل ۴.۰، این فناوری به‌طور گسترده‌تری به کار گرفته شد و توسعه یافت. کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی، به‌ویژه با ظهور کشاورزی نسل ۵.۰، موضوع مورد توجهی بوده است. در طول قرن‌ها، کشاورزی از نیروی کار دستی و نیروی حیوانات (کشاورزی نسل ۱.۰) به استفاده از ماشین‌آلات، آفت‌کش‌ها و کودها (کشاورزی نسل ۲.۰) تکامل یافته است. این روند با تکنیک‌های کشاورزی دقیق در کشاورزی نسل ۳.۰ و عصر کشاورزی هوشمند در کشاورزی نسل ۴.۰ ادامه یافت. در حال حاضر، کشاورزی نسل ۵.۰ با گامی فراتر، فناوری‌هایی نظیر کلان داده^{۴۳}، هوش مصنوعی (AI) و اینترنت اشیا (IoT) را با منابع انرژی تجدیدپذیر ادغام

38 Predictive Analytics

39 Robotics and Automation

40 Drones

41 Sensor Technology

42 Intelligent Decision-Making Algorithms

43 Big Data

می‌کند. هدف اصلی کشاورزی همواره بهبود بهره‌وری بوده است؛ با این حال، کشاورزی نسل ۵.۰ به‌طور هم‌زمان تلاش می‌کند تا اثرات زیست‌محیطی این بخش را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد (Sharifulden, 2024). در حال حاضر، تحقیقات گسترده‌ای در سراسر جهان در زمینه ترکیب هوش مصنوعی و فناوری کشاورزی انجام می‌شود. این تحقیقات عمدتاً بر کلان‌داده‌های کشاورزی، شبکه مکانیزه کشاورزی^{۴۴}، اکوسیستم‌های بسته^{۴۵}، کارخانه‌های هوشمند برای تولید گیاهان^{۴۶}، حسگرهای ویژه کشاورزی^{۴۷}، دانش زیستی^{۴۸}، وسایل هوایی بدون سرنشین^{۴۹}، تجهیزات هوشمند، فناوری کشاورزی دقیق و غیره متمرکز هستند (Vanghele et al., 2021). به‌طور کلی، هوش مصنوعی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی کشاورزی نسل ۵.۰، به‌طور ویژه در ارتقاء دقت و کارایی فرآیندهای کشاورزی مؤثر است. این فناوری به کشاورزان این امکان را می‌دهد که تصمیمات بهینه‌تری در زمینه مدیریت منابع، پیش‌بینی‌های دقیق‌تر در مورد بیماری‌ها و آفات، و بهبود روش‌های تولید اتخاذ کنند. در حالی که کشاورزی نسل ۴.۰ عمدتاً بر استفاده از ابزارهای دیجیتال برای بهبود بهره‌وری متمرکز بود، کشاورزی نسل ۵.۰ با اتکا به هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، به دنبال ارتقای سطح خودکارسازی و پیشرفت در همه جنبه‌های کشاورزی است.

نتیجه‌گیری

تحولات پنج نسل کشاورزی نشان‌دهنده مسیری پویا و رو به جلو در تاریخ کشاورزی است که از روش‌های سنتی و مبتنی بر کار دستی آغاز شده و به سوی فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند هوش مصنوعی، رباتیک، اینترنت اشیا و اتوماسیون حرکت کرده است. هر نسل از این تحولات، با معرفی فناوری‌ها و روش‌های جدید، چالش‌های خاص خود را داشته و در عین حال، فرصت‌های بی‌شماری را برای افزایش بهره‌وری، پایداری و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی فراهم کرده است. نسل اول کشاورزی، با تکیه بر نیروی انسانی و حیوانات، پایه‌های اولیه کشاورزی را بنا نهاد. نسل دوم با مکانیزاسیون و استفاده از ماشین‌آلات، انقلابی در افزایش تولید ایجاد کرد. نسل سوم با ورود فناوری‌های زیستی و اصلاح ژنتیکی، انقلاب سبز را رقم زد و تولید غذا را به میزان قابل توجهی افزایش داد. نسل چهارم با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال و داده‌محور، کشاورزی دقیق و هوشمند را ممکن ساخت. اکنون، نسل پنجم کشاورزی با ادغام هوش مصنوعی،

44 Mechanized Agricultural Network

45 Closed Ecosystems

46 Smart Factories for Plant Production

47 Special Agricultural Sensors

48 Biological Knowledge

49 Unmanned Aerial Vehicles

رباتیک و سیستم‌های خودکار، به دنبال ایجاد کشاورزی پایدار، کارآمد و سازگار با محیط زیست است. کشاورزی نسل پنجم (۵.۰) نه تنها به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها می‌پردازد، بلکه بر بهبود کیفیت محصولات، کاهش مصرف منابع و حفظ محیط زیست نیز تأکید دارد. این نسل از کشاورزی با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، امکان مدیریت دقیق‌تر منابع، پیش‌بینی دقیق‌تر بیماری‌ها و آفات، و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید را فراهم می‌کند. علاوه بر این، کشاورزی نسل پنجم با تمرکز بر همکاری انسان و ماشین، ایمنی کارگران را افزایش داده و امکان تولید پایدار را در شرایطی که کمبود نیروی کار وجود دارد، فراهم می‌کند. با این حال، پیاده‌سازی کامل کشاورزی نسل پنجم چالش‌هایی را نیز به همراه دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به نیاز به سرمایه‌گذاری کلان در فناوری‌های نوین، آموزش نیروی کار، و ایجاد زیرساخت‌های مناسب اشاره کرد. همچنین، مسائل اخلاقی و اجتماعی مرتبط با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، مانند حریم خصوصی داده‌ها و عدالت در دسترسی به فناوری، نیازمند توجه ویژه هستند. موفقیت این نسل از کشاورزی مستلزم همکاری‌های بین‌المللی، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، و ایجاد سیاست‌های حمایتی است تا اطمینان حاصل شود که این تحولات به نفع همه کشاورزان و جامعه جهانی خواهد بود.

منابع مورد استفاده

- Ameen, A. & Raza, S. (2017). Green revolution: a review. *International Journal of Advances in Scientific Research*, 3(12), 129-137.
- Araújo, S.O., Peres, R.S., Barata, J., Lidon, F., & Ramalho, J.C. (2021). Characterising the agriculture 4.0 landscape—emerging trends, challenges and opportunities. *Agronomy*, 11(4), 667.
- Beluhova-Uzunova, R., & Dunchev, D. (2022). Agriculture 4.0-concepts, technologies and prospects. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*. Vol. 22, Issue 2, 2022. ISSN 2284-7995, E-ISSN 2285-3952.
- Bwambale, E., Abagale, F.K., & Anornu, G.K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260. doi:10.1016/j.agwat.2021.107324.
- Cordeiro, M., Markert, C., Araújo, S.S., Campos, N.G.S., Gondim, R.S., da Silva, T.L.C., & da Rocha, A.R. (2022). Towards Smart Farming: Fog-enabled intelligent irrigation system using deep neural networks. *Future Generation Computer Systems*, 129, 115–124. doi:10.1016/j.future.2021.11.013.
- FAO. (2017). The future of food and agriculture—Trends and challenges. Annual Report 296, 2017.
- Gyamfi, E.K., ElSayed, Z., Kropczynski, J., Yakubu, M.A., & Elsayed, N. (2024). Agricultural 4.0 leveraging on technological solutions: Study for smart farming sector. In 2024 IEEE 3rd International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI) (pp. 1-9). IEEE.
- Huh, J. H., & Kim, K. Y. (2018). Time-based trend of carbon emissions in the composting process of swine manure in the context of agriculture 4.0. *Processes*, 6(9), 168.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., & Suman, R. (2022). Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*, 3, 150–164. doi:10.1016/j.ijin.2022.09.004.
- Kodan, R., Parmar, P., & Pathania, S. (2020). Internet of things for food sector: Status quo and projected potential. *Food Reviews International*, 36(6), 584-600.
- Klerkx, L & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, vol. 24, March 2020.

- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and Agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda, *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, vol. 90-91, December 2019.
- Naikwade, R.R., Patle, B.K., Joshi, V.S., Pagar, N.D., & Hirwe, S.B. (2021). Agriculture 5.0: Future of Smart Farming. National Conference on Innovative Global Technology Trends in Art, Design, Technology, Management, Vedic Science, Education and Architecture, Film & Media, 1-6.
- Sharifulden, N.S.A.N. (2024). What Does it Take to Transform Malaysia's Agriculture Sector into a High-Tech Industry? Kuala Lumpur: Khazanah Research Institute. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0.
- Nyangaresi, V.O., El-Omari, N.K.T., & Nyakina, J.N. (2022). Efficient Feature Selection and ML Algorithm for Accurate Diagnostics. *Journal of Computer Science Research*, 4(1), 10–19. doi:10.30564/jcsr.v4i1.3852.
- Otieno, M. (2023). An extensive survey of smart agriculture technologies: Current security posture. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 18(3), 1207–1231. doi:10.30574/wjarr.2023.18.3.1241.
- Pivoto, D., Barham, B., Waquil, P. D., Foguesatto, C. R., Dalla Corte, V. F., Zhang, D., & Talamini, E. (2019). Factors influencing the adoption of smart farming by Brazilian grain farmers. *International Food and Agribusiness Management Review*, 22(4), 571-588.
- Polymeni, S., Plastras, S., Skoutas, D.N., Kormentzas, G., & Skianis, C. (2023). The Impact of 6G-IoT Technologies on the Development of Agriculture 5.0: A Review. *Electronics*, 12(12), 2651. doi:10.3390/electronics12122651.
- Quiroz, I.A., & Alferez, G.H. (2020). Image recognition of Legacy blueberries in a Chilean smart farm through deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105044.
- Race, D., Gentle, P., & Mathew, S. (2023). Living on the margins: Climate change impacts and adaptation by remote communities living in the Pacific Islands, the Himalaya and desert Australia. *Climate Risk Management*, 40. doi:10.1016/j.crm.2023.100503.
- Rapela, M.A. (2019). A comprehensive solution for agriculture 4.0. In: *Fostering Innovation for Agriculture 4.0*. Springer, pp. 53–69. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-32493-3>.
- Razak, S.F.A., Yogarayan, S., Sayeed, M.S., & Derafi, M.I.F.M. (2024). Agriculture 5.0 and explainable ai for smart agriculture: A scoping review. *Emerging Science Journal*, 8(2), 744-760.
- Rodríguez, J.P., Montoya-Munoz, A.I., Rodríguez-Pabon, C., Hoyos, J., & Corrales, J.C. (2021). IoT-Agro: A smart farming system to Colombian coffee farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190. doi:10.1016/j.compag.2021.106442.
- Sadiku, M.N.O, Chukwu, U.C, Majebi, A.A., & Musa, S.M. (2021). Introduction to Agriculture 4.0. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 2021, 8(4):121-128.
- Sharma, V., Tripathi, A.K., & Mittal, H. (2022). Technological revolutions in smart farming: Current trends, challenges & future directions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201, 107217.
- Shrivastava, A., Nayak, C.K., Dilip, R., Samal, S.R., Rout, S., & Ashfaque, S.M. (2023). Automatic robotic system design and development for vertical hydroponic farming using IoT and big data analysis. *Materials Today: Proceedings*, 80, 3546–3553. doi:10.1016/j.matpr.2021.07.294.
- Thakur, N., Nigam, M., Mann, N.A., Gupta, S., Hussain, C.M., Shukla, S.K., Shah, A.A., Casini, R., Elansary, H.O., & Khan, S.A. (2023). Host-mediated gene engineering and microbiome-based technology optimization for sustainable agriculture and environment. *Functional and Integrative Genomics*, 23(1). doi:10.1007/s10142-023-00982-9.
- Vanghele, N.A., Petre, A.A., Matache, A., & Stanciu, M.M. (2021). AGRICULTURE 5.0-REVIEW. *Annals of the University of Craiova-Agriculture, Montanology, Cadastre Series*, 51(2), 576-583.
- Wolfert, S., Goense, D., & Sorensen, C.A.G. (2014). A future internet collaboration platform for safe and healthy food from farm to fork. Annual SRII Global Conference, SRII, pp. 266–273.
- Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M.G., & Colantoni, A. (2019). Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes*, 7(1). doi:10.3390/pr7010036.
- Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>