

کاربردهای هوش مصنوعی در علوم زراعی و بهنژادی گیاهی: راهبردها، فرصت‌ها و چالش‌ها

حمید اله‌دادی^۱، حجت‌اله لطیف‌منش^{۲*} و اسد معصومی اصل^{۳*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد اگروتکنولوژی-فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه

یاسوج، یاسوج، ایران hamid.alahdadii@gmail.com

۲- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران h.latifmanesh@yu.ac.ir

۳- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران masoumiasl@yu.ac.ir

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.latifmanesh@yu.ac.ir و masoumiasl@yu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶

چکیده

هوش مصنوعی (AI) در کشاورزی و بهنژادی گیاهی با هدف افزایش بهره‌وری و پایداری کشاورزی به‌طور فزاینده‌ای به کار گرفته می‌شود. در این مطالعه، از روش تحقیق توصیفی-تحلیلی استفاده شده است که شامل مرور اسناد و منابع کتابخانه‌ای می‌باشد. داده‌ها از مقالات علمی، وبسایت‌ها و سایر منابع معتبر جمع‌آوری و تحلیل شدند. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیرات کاربردهای هوش مصنوعی بر علوم زراعی، بهنژادی گیاهی و چالش‌های آن در توسعه پایدار کشاورزی است. این تحقیق به سؤالاتی از جمله ضرورت استفاده از هوش مصنوعی در کشاورزی، انواع الگوریتم‌های هوش مصنوعی، فواید و چالش‌های کاربرد آن پاسخ می‌دهد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، بینایی رایانه‌ای و پردازش زبان طبیعی به عنوان ابزارهای کلیدی در این زمینه معرفی شدند. در بخش کشاورزی، هوش مصنوعی قادر است با بهینه‌سازی مصرف آب، کود و سموم، کاهش ضایعات و بهبود پایداری محیطی، به افزایش عملکرد کمک کند. همچنین، در بهنژادی گیاهی، با تحلیل داده‌های ژنتیکی و فنوتیپی، می‌تواند به انتخاب گیاهانی با ویژگی‌های مطلوب همچون مقاومت به خشکی و بیماری‌ها کمک کند. با وجود مزایای گسترده، چالش‌هایی همچون هزینه‌های بالا، نیاز به زیرساخت‌های مناسب و تهدید بیکاری در بخش کشاورزی وجود دارد. در مناطق روستایی و دورافتاده، عدم دسترسی به فناوری‌های پیشرفته و اینترنت، موجب توزیع نابرابر این فناوری‌ها شده است. به‌رغم این چالش‌ها، هوش مصنوعی می‌تواند به کشاورزی پایدار کمک کرده و نقش مهمی در امنیت غذایی جهانی ایفا کند.

واژگان کلیدی: بهنژادی، کشاورزی دقیق، هوش مصنوعی، یادگیری ماشینی

مقدمه

کشاورزی، صنعت ابتدایی و هسته نخستین اقتصاد است که در شکوفایی اقتصادی دراز مدت حضوری اساسی دارد (Loizou *et al.*, 2019). بحران تأمین غذای جهان متناسب با روند افزایش جمعیت، نگران کننده است. حدود دو میلیارد نفر دارای ناامنی غذایی؛ ۶۹۰ میلیون نفر مبتلا به سوءتغذیه و ۳۴۰ میلیون کودک دچار کمبود ریزمغذی‌ها هستند (WHO, 2020). از آغاز دهه ۱۹۷۰ میلادی به دنبال افزایش فعالیت‌های کشاورزی فراگیر، تغییرات شدید اقلیمی نیز بروز یافته‌اند (Majeed and Mazhar, 2019). کشاورزی صنعتی و مخاطرات زیستی ناشی از بنگاه‌های اقتصادی آن (نظیر تخریب زیست‌بوم‌ها، آلودگی و سمیت آفت‌کش‌ها، تولید کربن بالا)، سهم ۱۲ درصدی از انتشار گازهای گلخانه‌ای را سبب شده‌اند (Yue *et al.*, 2017). این افزایش موجب فرسایش بیشتر خاک در بوم‌نظام‌ها می‌گردد (Nearing *et al.*, 2017)، از آنجا که فرایند تولید محصول باید در تعامل با حفظ آب و خاک بوم‌نظام‌های محلی و همراه با تأمین سلامت انسان صورت پذیرد، این امر نیازمند جهت‌گیری فرهنگ کشاورزی به سمت پایداری محیط‌زیست است. گزینش راهبردهای کشاورزی پایدار در صنایع زراعی حاکی از ظهور برنامه‌ای کارآمد جهت حفظ منابع طبیعی و تنوع زیستی می‌باشد (Saunders, 2017). شیوه‌های نوین در پرتو پیشرفت‌های نوظهور با کشاورزی پایدار ادغام شده و امکان ایجاد شرایط سازگار با محیط‌زیست را همراه با کمترین میزان ضایعات فراهم می‌کند. بنابراین در مسیر تولید محصولات گیاهی با عبور از رویکردهای سنتی، کشاورزی به‌سوی گفتمان‌های تازه حرکت می‌کند و در همین راستا، هوش مصنوعی (AI^1) با شتاب زیادی در حال الحاق شدن به بخشی مهم از توسعه فنی کشاورزی است. مقصد نهایی، تأمین غذای ۲ میلیارد نفر دیگر تا سال ۲۰۵۰ میلادی است که از طریق افزایش ۵۰ درصدی تولید جهانی غذا میسر می‌شود (BenAyed and Hanana 2021). راهکارهای هوش مصنوعی با افزایش کارآمدی کشاورزان به بهبود کمیت، کیفیت و سرعت ورود به بازار کمک می‌کند. به‌طور روزمره در مزارع داده‌های زیادی پیرامون خاک، آب، دما، اقلیم و ... ایجاد می‌شود. هوش مصنوعی قادر است از این اطلاعات در جهت دستیابی به دانش برتر برای تعیین تاریخ کاشت، نوع محصول قابل کشت و دیگر موارد با هدف دستیابی به عملکرد مطلوب استفاده کند (Bhat and Huang, 2021). رشد فزاینده جمعیت جهان، تقاضا برای غذا را به‌طور بی‌سابقه‌ای افزایش داده است. در عین حال، صنعت کشاورزی با چالش‌های متعددی از جمله کمبود منابع آب، آفات و بیماری‌های گیاهی و تغییرات آب و هوایی روبرو است. برای غلبه بر این چالش‌ها و اطمینان از امنیت غذایی جهانی، لازم است روش‌های تولید کشاورزی را به‌طور چشمگیری ارتقا داد. هوش مصنوعی (AI) به‌عنوان ابزاری قدرتمند، پتانسیل متحول کردن صنعت کشاورزی را دارد. با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده یادگیری ماشین و داده‌های عظیم، سیستم‌های هوش مصنوعی می‌توانند بینش‌های ارزشمندی را در مورد همه جنبه‌های عملیات کشاورزی ارائه دهند، از سلامت خاک و گیاه گرفته تا برنامه‌ریزی برداشت و بازاریابی.

کاربرد هوش مصنوعی به سبب بهبود شرایط کیفی و افزایش دقت مکانیزه، روش مدیریتی جدیدی را به نام کشاورزی دقیق (PA^2) معرفی می‌کند. کشاورزی دقیق با استفاده از فناوری هوش مصنوعی موجب شناسایی آفات و بیماری‌ها و جبران کمبودهای غذایی گیاهان می‌شود. لذا این پژوهش با بررسی جنبه‌های متعدد کاربرد ابزارهای هوش مصنوعی در علوم زراعی و به‌نژادی گیاهی سعی بر واکاوی مزایای این فناوری همراه با معایب کمتر دیده شده آن دارد.

روش‌شناسی تحقیق

این مطالعه از روش توصیفی-تحلیلی برای بررسی و تحلیل کاربردهای هوش مصنوعی (AI) در علوم زراعی و به‌نژادی گیاهی استفاده کرده است. در این راستا، داده‌های ثانویه از منابع معتبر شامل مقالات علمی، گزارش‌ها، و وب‌سایت‌های تخصصی جمع‌آوری شده و

¹ Artificial Intelligence

² Precision Agriculture

از طریق تحلیل محتوای کیفی بررسی شدند. تمرکز اصلی این مطالعه بر نقش هوش مصنوعی در مدیریت منابع کشاورزی، بهینه‌سازی تولید، کاهش ضایعات، و توسعه راهبردهای جدید در زراعت و بهنژادی گیاهی بوده است. اطلاعات از طریق مطالعه اسنادی و کتابخانه‌ای و با جستجوی کلمات کلیدی نظیر هوش مصنوعی در کشاورزی، کشاورزی دقیق، بهنژادی گیاهی، یادگیری ماشین و کشاورزی پایدار در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر نظیر ScienceDirect، IEEE Xplore، PubMed و Google Scholar گردآوری شدند. تمرکز بر مقالاتی بود که در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ منتشر شده‌اند تا از به‌روز بودن داده‌ها و همخوانی آنها با وضعیت کنونی فناوری اطمینان حاصل شود. در انتخاب منابع به جامعیت، اعتبار علمی و سطح نوآوری آنها توجه شد. معیارهایی همچون بررسی اثرات هوش مصنوعی بر افزایش بهره‌وری، بهبود کیفیت محصولات، کاهش هزینه‌ها، و کمک به پایداری محیطی در انتخاب منابع در نظر گرفته شدند. این رویکرد کمک کرد تا پژوهش‌هایی که مستقیماً به کاربرد AI در کشاورزی و بهنژادی گیاهی پرداخته‌اند، اولویت داده شوند. برای تحلیل محتوای کیفی، منابع جمع‌آوری شده به دسته‌های اصلی بهینه‌سازی مدیریت منابع، بهنژادی گیاهی، کاهش اثرات زیست‌محیطی، بهبود کارایی و دقت در تصمیم‌گیری تقسیم‌بندی شدند. تحلیل داده‌ها با تفسیر و ترکیب اطلاعات به دست آمده از منابع مختلف و مقایسه نتایج صورت گرفت تا دیدگاه جامعی در مورد چالش‌ها، فرصت‌ها و پیامدهای استفاده از هوش مصنوعی در کشاورزی ارائه شود. برای افزایش اعتبار پژوهش، از مقالات و منابع معتبر علمی که دارای داوری هم‌تا بوده و در مجلات معتبر منتشر شده‌اند، استفاده شد. همچنین، یافته‌های کلیدی مقایسه و نتایج برای ارزیابی دقیق و جامع پیامدهای AI در کشاورزی مورد بررسی قرار گرفتند. نقاط قوت و ضعف به کارگیری AI از طریق تجزیه و تحلیل دقیق متون و یافته‌های پیشین بررسی شد تا راهبردها، چالش‌ها و فرصت‌های این حوزه به صورت دقیق ارائه شود.

پیشینه و تعریف هوش مصنوعی

نخستین بار در دهه ۱۹۵۰ "آلن تورینگ"، یک نوع بازی را برای این پرسش آیا یک ماشین می‌تواند فکر کند؟ ارائه داد که به‌عنوان آزمون تورینگ معروف است (Warwick, 2013). یک رایانه جهت قبولی در آزمون تورینگ لازم است چهار مهارت داشته باشد: پردازش زبان طبیعی (NLP^1)، نمایش دانش (KR^2)، استدلال خودکار^۳ و یادگیری ماشین (ML^4) (Kok et al., 2009). چند سال بعد واژه "هوش مصنوعی" برای اولین بار در کارگاه دارتموث توسط McCarthy et al. (1955) مطرح شد که توصیه نمود هر جنبه از یادگیری می‌تواند به قدری دقیق توصیف شود که ماشینی ساخت تا آن را شبیه سازی کند. سه دهه پس از آن، استفاده از رایانه‌ها در کشاورزی مطرح شد (Baker et al., 1983). ایده کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی اولین بار توسط McKinion and Lemmon (1985) جهت تشکیل الگوی شبیه‌سازی محصول پنبه به کمک سامانه هوشمند^۵ برای بهینه‌سازی آبیاری، کنترل علف‌های هرز، کنترل شرایط آب و هوایی و دیگر عوامل شکل گرفت (Bannerjee et al., 2018). امروزه به دلیل گسترش وسیع هوش مصنوعی در طول زمان، ارائه تعریفی جامع از آن ناممکن یا دشوار است. با این وجود، می‌توان تعاریف کلی را به شرح زیر ارائه داد:

هوش مصنوعی را سامانه‌ای گویند که شبیه یک انسان می‌اندیشد، مثل یک انسان عمل می‌کند و دارای چند خصوصیت است: ۱- عقلانی فکر می‌کند یا منطقی کار می‌کند (Kok et al., 2009). ۲- تحت عنوان "برنامه‌ای که در یک دنیای دلخواه از یک انسان بدتر نیست" تعریف می‌شود (Dobrev, 2012). ۳- ابزاری که تقلیدکننده فرایندهای هوش و توانایی بشری به واسطه ماشین‌ها،

¹ Natural Language Processing

² Knowledge representation and reasoning

³ Automated reasoning

⁴ Machine learning

⁵ Expert system

سامانه‌های رایانه‌ای پیشرفته، ربات‌ها و تجهیزات دیجیتال است (Gangwar, 2023) و انگیزه اصلی آن در زمینه علوم کشاورزی فراهم کردن قدرت تصمیم‌گیری دقیق و پیش‌بینی به‌موقع برای بهبود بهره‌وری همراه با حفاظت از منابع محیطی است (Patel *et al.*, 2021). محاسبات شناختی، به خاطر پتانسیل درک، تفسیر و واکنش به وضعیت‌های متفاوت (بر اساس اصل یادگیری) موجب بهبود کارایی می‌شود؛ بر این اساس، هوش مصنوعی به سه شاخه اصلی قابل بخش‌بندی است: هوش مصنوعی باریک^۱: همواره آمادگی اجرای کاری دشوار را دارد، اما نمی‌تواند در بیرون از محدوده خود کار کند چرا که به‌صورت انحصاری فقط برای انجام همان کار برنامه‌ریزی شده است. هوش مصنوعی باریک اکنون در زمینه علوم رایانه رایج‌ترین است (Millar, 2000). هوش مصنوعی عمومی^۲: پتانسیل انجام هر کار فکری به سرعت یک فرد را داراست. نظریه اصلی آن تولید سامانه هوشمندی است که می‌تواند شبیه یک انسان عمل کند. ساخت این سامانه‌ها نیازمند تلاش و زمان زیادی است (Pilarski *et al.*, 2002). هوش مصنوعی فوق‌العاده^۳: درجه‌ای از هوش ماشینی که می‌تواند از تفکر بشری پیشی گرفته و هر عملی را مناسب‌تر از هر انسانی انجام دهد. یادگیری، قدرت استدلال، قضاوت، حل مشکلات، ارائه دلایل، برنامه‌ریزی و برقراری ارتباط، بخشی از توانمندی‌های شاخص هوش مصنوعی فوق‌العاده است.

ضرورت و دامنه گستردگی هوش مصنوعی در کشاورزی

اگرچه پیش از این فعالیت‌های زراعی محدود به حوزه تولیدات غذایی و گیاهی بود (fan *et al.*, 2012)، ولی طی دو دهه اخیر به‌سوی فراوری پس از برداشت و بازاریابی محصولات دامی و زراعی نیز سوق یافته است. در حال حاضر، این فعالیت‌های زراعی به‌عنوان پایگاه اصلی تأمین معیشت، کاهش بیکاری، تأمین منابع دیگر صنایع، تجارت ملی و بهبود اقتصاد جهانی شکل گرفته است (Awuse *et al.*, 2015). با این وجود، در حال حاضر کشاورزی با بحران‌های جدی روبه‌رو است. تولید غذای جهانی باید به میزان ۱۱۰ درصد افزایش یابد تا پاسخگوی جمعیت ۱۰ میلیارد نفری سال ۲۰۵۰ باشد (Rockström *et al.*, 2017). همچنین به جهت بروز چندین رسوایی در فرایند حفظ ایمنی صنایع غذایی مانند دیوکسین در جوجه‌ها و آنسفالوپاتی اسفنجی شکل گاو، ایجاد یک سامانه ردیابی مستند در زمینه کنترل کیفی زنجیره تأمین غذایی، به نیازی اساسی تبدیل گشته است. علاوه بر این، تغییرات اقلیمی مسئله انکارناپذیر بحران کمبود آب، از جمله چالش‌های بسیار مهم امروز و فردای زمین هستند. به همین دلیل کشاورزی مستلزم انتخاب‌ها و عدم قطعیت‌های زیادی است. بنابراین، کمک به تسهیل حرکت کشاورزان و صاحبان سرمایه جهت گزینش مدیریت کشاورزی پایدار و استفاده از فناوری‌های نوینی مثل رایانش ابری (CC^۴)، هوش مصنوعی و اینترنت اشیا (IoT^۵)، تصمیمی اثرگذار و بنیادین است. هوش مصنوعی همراه با زیر مجموعه‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق^۶ برای مبارزه با مشکلاتی نظیر کمبود نیروی کار متخصص، تغییرات آب و هوایی، کمبود قدرت تصمیم‌گیری سریع و افزایش دقت تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده می‌شوند (Gangwar, 2023). همچنین به صورت گسترده‌تر جمع‌آوری اطلاعات در سطح زمین زراعی به کمک ماهواره‌ها و پهپادها، ربات‌ها، حسگرهای راه دور و حسگرهای دما و رطوبت، کارآمدی نهاده‌ها از پیش از کاشت تا پس از برداشت را افزایش می‌دهد (Vishnu *et al.*, 2019). هوش مصنوعی سریعاً در حال ورود به بخش‌های مختلف دولتی و تجاری است و هسته مرکزی آن، دانشگاه‌هایی است که به‌عنوان مراکز

^۱ Narrow Artificial intelligence

^۲ Artificial general intelligence

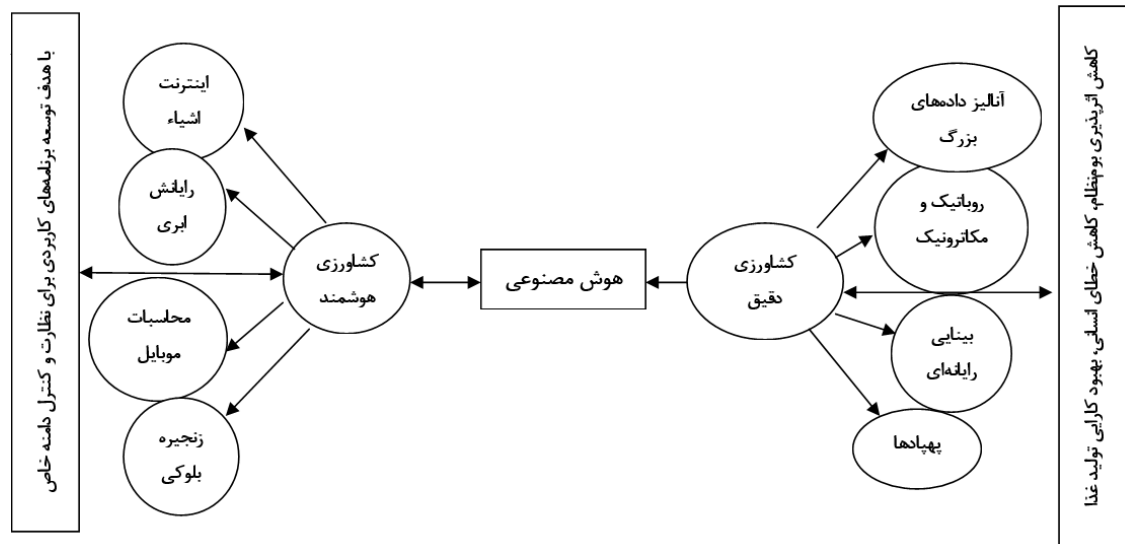
^۳ Artificial Super intelligence

^۴ Cloud Computing

^۵ Internet of Things

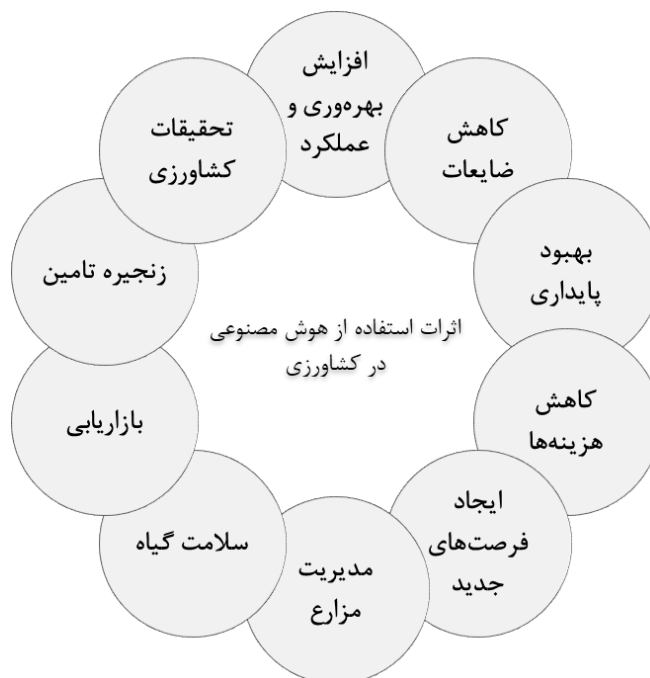
^۶ Deep Learning

منابع داده عمل می‌کنند (Goralski and Tan., 2020). از این‌رو، در یک دسته‌بندی کلی می‌توان خدمات ناشی از اثرگذاری هوش مصنوعی در کشاورزی را چنین بیان داشت: خدمات کاربردی تشخیصی (شناسایی نشانه‌های تنش آبی، آلودگی به بیماری‌ها و آفات)، خدمات تجویزی (بررسی خاک و پیشنهاد کود یا هر نهاد دیگر)، خدمات کاربردی مشاوره‌ای (برنامه‌ریزی آبیاری و مشاوره آب و هوا) و خدمات کاربردی پیش‌بینی کننده (پیش‌بینی عملکرد و حمله آفات و بیماری‌ها) (Sinha *et al.*, 2022).



شکل ۱- ارتباط هوش مصنوعی با کشاورزی هوشمند و کشاورزی دقیق (Channe *et al.*, 2015).

رشد فزاینده جمعیت جهان، تقاضای غذا را به طور بی‌سابقه‌ای افزایش داده است. در عین حال، صنعت کشاورزی با چالش‌های متعددی از جمله کمبود منابع آب، آفات و بیماری‌های گیاهی و تغییرات آب و هوایی روبرو است. برای غلبه بر این چالش‌ها و اطمینان از امنیت غذایی جهانی، ضروری است که روش‌های تولید کشاورزی را به طور چشمگیری ارتقا دهیم. برخی از دلایل کلیدی ضرورت هوش مصنوعی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- مزایای استفاده از هوش مصنوعی در مسیر کشاورزی پایدار

دلایل و ضرورت استفاده از هوش مصنوعی در کشاورزی به شرح زیر است:

۱. افزایش بهره‌وری و عملکرد: هوش مصنوعی با بهینه‌سازی مصرف نهاده‌هایی مانند آب، کود و آفت‌کش‌ها می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا عملکرد محصولات خود را افزایش دهند. این موضوع به‌ویژه در مناطق با منابع محدود آب و هوای نامناسب اهمیت زیادی دارد.
۲. کاهش ضایعات: سیستم‌های هوش مصنوعی می‌توانند برای شناسایی و جداسازی محصولات آسیب‌دیده یا ناسالم قبل از برداشت به کار روند و بدین ترتیب ضایعات را در مراحل بعدی زنجیره تأمین کاهش دهند. این موضوع به نفع کشاورزان، مصرف‌کنندگان و محیط زیست است.
۳. بهبود پایداری: با کمک هوش مصنوعی، کشاورزان می‌توانند از روش‌های کشاورزی پایدارتر مانند کشاورزی دقیق استفاده کنند و به حفظ محیط زیست کمک نمایند. این به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی آب و فرسایش خاک کمک می‌کند.
۴. کاهش هزینه‌ها: هوش مصنوعی با خودکارسازی وظایف و بهینه‌سازی فرایندها می‌تواند به کشاورزان در کاهش هزینه‌های تولید کمک کند. این امر به ویژه برای کشاورزان کوچک که حاشیه سود کمی دارند، مفید است.
۵. ایجاد فرصت‌های جدید: هوش مصنوعی می‌تواند منجر به توسعه محصولات و خدمات جدیدی مانند بازارهای آنلاین برای محصولات کشاورزی یا پلتفرم‌های کشاورزی هوشمند شود. این موضوع به کشاورزان کمک می‌کند تا به بازارهای جدید دسترسی پیدا کنند و سود خود را افزایش دهند.
۶. مدیریت مزارع: با استفاده از هوش مصنوعی برای جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها از حسگرها، پهپادها و تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان مصرف آب، کود و آفت‌کش‌ها را بهینه کرد.

۷. سلامت گیاه: هوش مصنوعی می‌تواند برای شناسایی بیماری‌ها، آفات و علف‌های هرز در محصولات زراعی و باغ‌ها به کار رود و به کشاورزان کمک کند تا قبل از ایجاد آسیب جدی، آنها را کنترل کنند.
۸. بازاریابی: با تجزیه و تحلیل داده‌های بازار و پیش‌بینی قیمت‌ها، هوش مصنوعی می‌تواند به کشاورزان در تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد زمان و نحوه فروش محصولاتشان کمک کند.
۹. زنجیره تأمین: هوش مصنوعی می‌تواند برای ردیابی و مدیریت محصولات در زنجیره تأمین، از مزرعه تا میز مصرف‌کننده، به کار گرفته شود.
۱۰. تحقیقات کشاورزی: با استفاده از هوش مصنوعی برای تجزیه و تحلیل داده‌های گسترده آزمایش‌های کشاورزی و شناسایی الگوهای جدید، می‌توان روش‌های کشاورزی مؤثرتری را توسعه داد.

الگوریتم‌های هوش مصنوعی در کشاورزی

یادگیری ماشین، بخشی از هوش مصنوعی و از جمله ابزارهای ویژه جهت درک، تجزیه و تحلیل و شناخت الگوی داده‌ها برای تصمیم‌گیری یا پیش‌بینی می‌باشد. زمینه تفکر اولیه برای یادگیری ماشین، برنامه‌ریزی رایانه‌ای جهت انجام وظایف انسانی مطابق با جریان یادگیری و حل مسئله است. یادگیری ماشین با کم‌ترین میزان دخالت انسانی، تصمیم‌گیری می‌کند؛ در واقع، داده‌های در دسترس را برای تغذیه الگوریتمی به کار می‌برد که توانایی درک مجموعه روابط ورودی-خروجی را داراست. هوش مصنوعی که بر مبنای اصول یادگیری ماشین عمل می‌کند، اساساً بر پایه حل مسائل مرتبط با مزارع تمرکز یافته که دربردارنده الگوی پیش‌بینی، الگوی تشخیصی و الگوی مدیریتی مزرعه می‌باشد (Dutt et al., 2020). بخشی از یادگیری ماشین، یادگیری عمیق است؛ نرم‌افزاری رایانه‌ای متشکل از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN¹) چند لایه و عمیق در مسیر فرایند یادگیری. این شبکه‌های عصبی به همراه منطق فازی^۲ از اصول اولیه یادگیری عمیق هستند (Dutt et al., 2020). شبکه عصبی، سامانه‌های محاسباتی برگرفته از شبکه‌های عصبی زیستی می‌باشند که توانایی شگفتی در یادگیری تطبیقی و همچنین خود-سازماندهی دارند (Pilarski et al., 2002).

جدول ۱- کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در زنجیره تأمین غذایی (Ahumada and Villalobos, 2009).

مراحل	هدف	زیر شاخه‌ها	الگوریتم کاربردی	منبع
پیش تولید	برای پیش‌بینی عملکرد محصول، ویژگی‌های خاک و نیازهای آبیاری	پیش‌بینی مدیریت خاک	LS-SVM ³	Morellos et al., 2016
		تخمین دمای روزانه خاک	SaE ⁴	Nahvi et al., 2016
		انتخاب و بهبود عملکرد محصول	CSM ⁵	Kumar et al., 2015

¹ Artificial Neural Networks

² Fuzzy logic

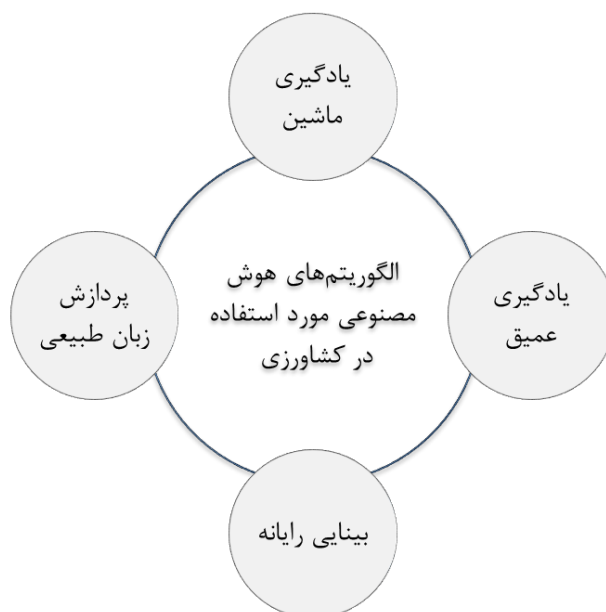
³ Least-Squares Support Vector Machine

⁴ Self-adaptive Evolutionary

⁵ Crop Selection Method

BenAyed <i>et al.</i> , 2017	شبکه بیزی	آنالیز بهره‌وری و محتوای روغن	
Saggi and Jain, 2019	یادگیری عمیق، درخت تصمیم، یادگیری مجموعه	شبیه‌سازی الگوی پیش‌بینی آب و هوا	
Singh <i>et al.</i> , 2018	خوشه‌بندی و رگرسیون	حفاظت از محصول	برای حفاظت در برابر تنش‌های زنده و غیر زنده، پیش‌بینی آب و هوا، کیفیت محصول و برداشت
Liakos <i>et al.</i> , 2018	ANN، درخت تصمیم و یادگیری مبتنی بر نمونه	تشخیص علف‌های هرز	تولید
Chlingaryan <i>et al.</i> , 2018	خوشه‌بندی و رگرسیون	مدیریت کیفیت محصول	
Sadgrove <i>et al.</i> , 2018	SVM و ANN، تکنیک‌های داده کاوی	مدیریت برداشت	
	الگوریتم ژنتیک، خوشه‌بندی و رگرسیون	ذخیره‌سازی و حمل و نقل	برای ارتباط بین تولید و فرآوری مواد غذایی و مصرف کننده
Dolgui <i>et al.</i> , 2018	یادگیری عمیق و ANN	تجزیه و تحلیل مصرف کننده	توزیع
	الگوریتم ژنتیک	مدیریت موجودی	مصرف کننده نهایی

الگوریتم‌های هوش مصنوعی (AI) در کشاورزی طیف گسترده‌ای از ابزارها را شامل می‌شوند که از یادگیری ماشین، بینایی رایانه و پردازش زبان طبیعی برای جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها، شناسایی الگوها و ارائه بینش برای کمک به کشاورزان در تصمیم‌گیری آگاهانه استفاده می‌کنند. در اینجا چند نمونه از رایج‌ترین الگوریتم‌های هوش مصنوعی که در کشاورزی استفاده می‌شوند، آورده شده است:



شکل ۳- رایج‌ترین الگوریتم‌های هوش مصنوعی در کشاورزی

الگوریتم های هوش مصنوعی در کشاورزی عبارتند از:

- ۱- یادگیری ماشین: الف- یادگیری نظارتی: در این نوع یادگیری، به الگوریتم مجموعه‌ای از داده‌های برچسب‌گذاری شده داده می‌شود و از آن خواسته می‌شود تا یاد بگیرد که چگونه بین ورودی و خروجی مورد نظر نگاشت ایجاد کند. به عنوان مثال، یک الگوریتم یادگیری نظارتی می‌تواند برای یادگیری نحوه شناسایی تصاویر گیاهان آلوده به بیماری از تصاویر گیاهان سالم آموزش ببیند. ب- یادگیری تقویتی: در این نوع یادگیری، الگوریتم در یک محیط قرار می‌گیرد و از طریق آزمون و خطا یاد می‌گیرد که چگونه برای به حداکثر رساندن پاداش یا به حداقل رساندن تنبیه عمل کند. به عنوان مثال، یک الگوریتم یادگیری تقویتی می‌تواند برای یادگیری نحوه کنترل یک ربات برای وجین کردن علف‌های هرز بدون آسیب رساندن به محصول آموزش ببیند.
- ۲- یادگیری عمیق: این نوع یادگیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده می‌کند که از ساختار مغز انسان الهام گرفته شده‌اند. شبکه‌های عصبی عمیق می‌توانند از حجم زیادی از داده‌ها برای یادگیری الگوهای پیچیده و انجام وظایف چالش‌برانگیز مانند تشخیص تصویر و پردازش زبان طبیعی استفاده کنند.
- ۳- بینایی رایانه: الف- تشخیص تصویر: الگوریتم‌های تشخیص تصویر می‌توانند برای شناسایی و دسته‌بندی اشیاء در تصاویر استفاده شوند. به عنوان مثال، می‌توان از آنها برای شناسایی آفات، بیماری‌ها یا علف‌های هرز در محصولات زراعی استفاده کرد. ب- تجزیه و تحلیل تصویر: الگوریتم‌های تجزیه و تحلیل تصویر می‌توانند برای استخراج اطلاعات از تصاویر مانند اندازه، شکل و رنگ اشیاء استفاده شوند. به عنوان مثال، می‌توان از آنها برای ارزیابی سلامت گیاه استفاده کرد.
- ۴- پردازش زبان طبیعی: الف- استخراج متن: الگوریتم‌های استخراج متن می‌توانند اطلاعات کلیدی را از متن استخراج کنند، مانند نام افراد، مکان‌ها و تاریخ‌ها. به عنوان مثال می‌توان از آنها برای استخراج اطلاعات از گزارش‌های مزرعه یا برچسب‌های محصول استفاده کرد. ب- طبقه‌بندی متن: الگوریتم‌های طبقه‌بندی متن می‌توانند متن را به دسته‌های مختلف مانند ایمیل‌های اسپم، نظرات مصرف‌کنندگان یا مقالات خبری طبقه‌بندی کنند. به عنوان مثال، می‌توان از آنها برای طبقه‌بندی نظرات مشتریان در مورد محصولات کشاورزی استفاده کرد. اینها تنها چند نمونه از الگوریتم‌های هوش مصنوعی متعددی هستند که در حال حاضر در کشاورزی استفاده می‌شوند. با ادامه توسعه تحقیقات هوش مصنوعی، می‌توان انتظار داشت که الگوریتم‌های جدید و نوآورانه‌ای ظهور کنند که می‌توانند به کشاورزان کمک کنند.

کاربردهای هوش مصنوعی در علوم زراعی

پایش سلامت خاک: نخستین مرحله زراعت، فرایند آماده‌سازی خاک جهت کاشت است. نوع خاک و تغذیه خاک عامل مهمی در نوع کشت و کیفیت محصول است زیرا با گذر زمان، سلامت خاک رو به افول می‌رود به گونه‌ای که کشاورزان را ناگزیر از نقل مکان به مزارع جدید می‌کند. ادراک کامل از انواع خاک‌ها و وضعیت متفاوت آن‌ها موجب افزایش عملکرد گیاهان زراعی و درعین حال حفاظت از منابع خاک می‌شود. همین‌طور از طریق بهبود مدیریت خاک، می‌توان عوامل منفی نظیر آلاینده‌های خاک و بیمارگرها را به کمترین میزان ممکن کاهش داد (Eli-Chukwu, 2019). در بررسی پایداری راهبردهای مدیریت مزرعه، با فهم این نکته که خاک‌ها پتانسیل مقاومت متفاوتی در برابر تغییر و بازیابی دارند، میزان حساسیت به تخریب خاک اهمیت بیشتری می‌یابد. فناوری‌های پیشرفته هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، ردیابی خصوصیات خاک مزارع نظیر کیفیت، حاصلخیزی، کمبود ریزموجودات خاکی و مواد مغذی را به واسطه ابزار بینایی رایانه‌ای امکان‌پذیر کرده‌اند. به کمک ابزار مبتنی بر یادگیری عمیق و بینایی رایانه، قادر است این اطلاعات را سریع‌تر از انسان تجزیه و تحلیل و تفسیر کند تا کمبود تغذیه‌ای محصولات را در راستای پیش‌بینی دقیق عملکرد و نظارت بر سلامت محصول برآورد کند (Gangwar, 2023).

می‌توان خاک‌های سالم و غنی را از طریق حسگرهای اینترنت اشیا (شامل سنجش مجاور و سنجش از راه دور) در جهت نظارت بر وضعیت شیمیایی آن‌ها ارزیابی کرد، برای سنجش از دور لازم است که حسگر در یک سیستم هوابرد یا ماهواره‌ای تعبیه شود، در حالی که در سنجش مجاور لازم است که حسگر در تماس با زمین یا در عمق سطحی باشد. قرائت داده‌های آن‌ها برای توصیف و آنالیز خاک زیرسطحی به لایه کنترل داده‌ها منتقل می‌شود و به تصمیم‌گیری در خصوص کود مورد نیاز کمک می‌کند (Cadavid *et al.*, 2018). Suchithra and Pai (2020) شاخص‌های حاصلخیزی خاک و سطوح pH خاک را با استفاده از روش یادگیری ماشین حداکثری (ELM¹) طبقه‌بندی و پیش‌بینی کردند. Li and Yost (2000) در پژوهشی بر اساس الگوی مدل‌سازی مدیریت محور (MOM²) با هدف بهبود مدیریت بهینه نیتروژن، با حداقل شستشوی نیترات، حداکثر تولید و سود را گزارش نمودند. هوش مصنوعی می‌تواند برای آماده‌سازی نقشه‌های خاک استفاده شود که منجر به نشان دادن لایه‌های متفاوت خاک در زیر زمین و روابط آنها می‌شود. برای مثال، بر مبنای خصوصیات حاصل از نقشه‌های خاک، یک الگوی شبکه عصبی مصنوعی بافت خاک را با وضوح بالا و با پارامترهای هیدروگرافی مشتق‌شده از یک مدل رقومی ارتفاع (DEM³) پیش‌بینی می‌کند (Zhao *et al.*, 2009). دینامیک رطوبت خاک نیز توسط یک دستگاه سنجش از دور تعبیه شده در یک شبکه عصبی مرتبه بالاتر (HONN⁴) مشخص و تخمین زده می‌شود (Elshorbagy and Parasuraman, 2008). بر این اساس، دانش مهندسی ساخت سامانه پشتیبانی تصمیم‌گیری شاخص ریسک خاک (SRC-DSS⁵) شامل سه مرحله است: کسب دانش، طراحی مفهومی و اجرای سامانه (López *et al.*, 2008).

تاریخ کاشت: باتوجه به افزایش آلودگی‌ها و تغییرات اقلیمی، مشخص کردن زمان مناسب جهت کاشت بذور مشکل است. با این حال کشاورزان با استفاده از فناوری هوش مصنوعی، شرایط اقلیمی را تجزیه و تحلیل می‌کنند تا نوع محصول قابل کاشت و تاریخ کاشت را مشخص نمایند (Ammulu, 2021). موفقیت در جهت دستیابی به داده‌های به‌موقع و ساده، جهت تعیین زمان مناسب کاشت می‌تواند بین از دست دادن محصول و موفقیت در کشت تفاوت ایجاد کند.

شرکت مایکروسافت با همکاری ICRISAT⁶ (مؤسسه تحقیقات بین‌المللی محصولات زراعی برای مناطق استوایی نیمه خشک) طرح کاشتی بر اساس هوش مصنوعی تولید کرده که توسط Microsoft Cortana Intelligence Suite برای افزایش بهره‌وری محصول ایجاد شده است (Goel *et al.*, 2021). این برنامه آزمایشی، از الگوریتم آنالیز پیش‌بینی‌کننده توانمندی استفاده می‌کند تا آماده سازی زمین قابل کشت، دوره کاشت بهینه، بهترین تاریخ کاشت، عمق کاشت ایده آل، انتخاب بذر و تیمار کوددهی بر اساس تجزیه و تحلیل خاک را به کشاورزان توصیه کند. این طرح از اطلاعات مربوط به وضعیت آب و هوایی، آمار بارش روزانه، میزان رطوبت خاک در لحظه مد نظر، برای ایجاد نمودارهای پیش‌بینی متناسب با بهترین زمان کاشت بهره می‌برد. در پایان، این داده‌ها به واسطه پیامک‌هایی برای کشاورزان فرستاده می‌شود تا میزان حاصلخیزی خاک و پتانسیل بهره‌وری مزرعه را افزایش دهند. کشاورزانی که در سال ۲۰۱۷، پیام‌های متنی برنامه کاشت هوش مصنوعی را دریافت کردند، ۱۰ تا ۳۰ درصد عملکرد بیشتر نسبت به دیگران داشتند (Agro-Pages, 2020).

¹ Extreme Learning Machine

² Management-Oriented Modelling

³ Digital elevation model

⁴ Higher-Order Neural Network

⁵ Soil Risk Characterization Decision Support System

⁶ International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics

شناسایی مخلوط بذر بهینه: راهبردهای شناختی جهت تسهیل بهترین انتخاب از گیاهان و بذور دورگ که بر پارامترهای متعددی نظیر نوع بذر، وضعیت خاک، آلودگی آفات و سنجش شرایط اقلیمی یک منطقه خاص استوار است، پیشنهاداتی را به کشاورزان عرضه می‌کنند. یک توصیه مطلوب را می‌توان بر مبنای شرایط بومی، نیازهای مزرعه، اطلاعات کشاورزی موفق در گذشته و عوامل خارجی مانند نیازهای مصرف کننده، قیمت محصولات و روند بازار، شخصی‌سازی کرد (Futane, 2022).

سامانه‌های آبیاری هوشمند: کم‌آبیاری و آبیاری زیاد، منجر به تأخیر در رشد محصولات می‌شود و اگر به درستی صورت نگیرد، آسیب‌پذیری گیاهان را در پی دارد. از طرفی تقریباً بیش از ۷۰ درصد از محتوای آب شیرین جهان جهت آبیاری کشاورزی مصرف می‌شود. با در نظر گرفتن اختلاف روز افزون تقاضا و عرضه آب، احتمالاً تا سال ۲۰۲۵ میلادی بیش از سه میلیارد انسان با تنش آبی روبه‌رو می‌شوند. به همین خاطر اتوماسیون زراعی به‌ناچار باید چالش‌های آبی را به‌صورت مسئولانه مدیریت کند (Popa, 2011). آبیاری هوشمند شامل تأمین مقدار مناسب آب در مکان مناسب و زمان مناسب برای محصول مناسب است تا عملکرد را بهبود بخشد. با بهره‌گیری از سامانه‌های آبیاری خودکار مبتنی بر حسگرها، مسائل پیرامون کاهش راندمان آبیاری به میزان زیادی قابل حل است. در این راستا با استفاده از تجهیزات آموزش‌دیده بر پایه الگوی داده‌های اقلیمی گذشته و بررسی وضعیت کیفی خاک منطقه، برنامه‌ریزی آبیاری خودکار جهت انواع گیاهان زراعی امکان‌پذیر است (Rajeswari, 2023). جهت دسترسی به سامانه آبیاری مؤثر (تصمیم بهتر در مورد زمان، مکان و میزان آبیاری)، پژوهشگران از داده‌های پیش‌بینی آب و هوا، رطوبت خاک و تبخیر و بارش به‌عنوان اطلاعات ورودی جهت شبیه‌سازی الگوهای مورد نظر استفاده می‌کنند. Arvind *et al.* (2017) مشخص نمودند که کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در ارتباط با دیگر فناوری‌ها نظیر حسگرها و ریزکنترل‌گرهای Zigbee و Arduino جهت مواجهه با وضعیت خشکی کارآمد هستند. همچنین، Dela Cruz *et al.* (2017) جهت بهینه‌سازی منابع آب یک مزرعه هوشمند از فناوری‌های ANN feed-forward و back-protation بهره‌برداری نمودند. به تازگی Gaurav *et al.* (2019) از PLSR¹ و دیگر الگوریتم‌های رگرسیون (به‌عنوان ابزارهای هوش مصنوعی ادغام شده با حسگرها) جهت گردآوری اطلاعات و افزایش کارایی و امکان‌سنجی اقتصادی استفاده کرده‌اند.

سامانه‌های مدیریت دقیق زراعی: راهبردهای تصویربرداری فراطیفی (اسکن لیزری سه‌بعدی) و سنجش از راه دور (RS²) در زمینه هوش مصنوعی، سامانه‌های پایش سلامت محصول را ایجاد کرده‌اند. اینها این قابلیت را دارند که روند نظارت بر مزارع کشاورزی را از نظر کار و زمان تغییر دهند (Liu, 2020). فناوری‌های هواپیماهای بدون سرنشین³ جهت مدیریت مطلوب سلامت گیاهان زراعی، راهبرد تصویربرداری مبتنی بر پهپاد را عرضه کرده است. با جمع‌آوری داده‌ها توسط پهپادها از مزارع و انتقال آن‌ها به رایانه‌ها، تجزیه و تحلیل داده توسط کارشناسان صورت می‌گیرد. در این مسیر، الگوریتم‌هایی جهت تجزیه و تحلیل تصاویر استفاده می‌شود و در پایان شرح مفصلی شامل وضعیت کنونی مزرعه و پیش‌بینی‌های آینده (شامل توصیه‌های لازم در زمینه فرایند کاشت، مدیریت بیماری‌ها و آفات و نیز چگونگی قیمت‌گذاری کالاها) در اختیار کشاورزان قرار می‌گیرد (Ammulu, 2021).

از مهم‌ترین خصوصیات انتخاب در میان کشت‌های جایگزین؛ تشخیص زمان‌بندی، شدت و قابلیت پیش‌بینی خشکسالی است. همچنین ادراک درست الگوهای اقلیمی فرایند تصمیم‌گیری را بهبود می‌بخشد و منجر به عملکرد محصول باکیفیت بالا می‌شود. زبان

¹ Partial Least Squares Regression

² Remote Sensing

³ SkySquirrel Technologies

برنامه‌نویسی هوش مصنوعی¹ از مجموعه داده‌های آب و هوایی، اطلاعات اپراتورهای اولویت‌بندی شده و ظرفیت مکانیزاسیون جهت سنجش رفتار عملیاتی در یک نظام زراعی استفاده می‌کند. همین‌طور فرایندهای تولید محصولات، میزان درآمد ناخالص و سود خالص را برای کل مزرعه و همچنین برای مزارع جداگانه پیش‌بینی می‌کند (Liakos *et al.*, 2018). در این راستا Fente and Singh (2018) با جمع‌آوری پارامترهای متعدد آب و هوایی (نظیر سرعت باد، فشار، رطوبت و نقطه شبنم، دما و بارش) یک الگوی سنجش آب و هوا را به کمک شبکه عصبی بازگشتی (RNN²) با تکنیک حافظه بالایی کوتاه مدت (LSTM³) اجرا کردند.

علف‌های هرز و سم‌پاشی هوشمند: رقابت بر سر دریافت منابعی چون نور خورشید، آب و مواد مغذی مابین گیاهان زراعی و علف‌های هرز منجر به افزایش هزینه تولید، تداخل در برداشت، کاهش کیفیت محصول و کاهش عملکرد می‌شود. در این راستا، کاهش ۵۰ درصدی عملکرد لوبیا خشک و ذرت، ۴۸ درصدی عملکرد گندم، حدود ۸ تا ۵۵ درصدی عملکرد سویا و حدود ۵۰ تا ۷۵ درصدی عملکرد کنجد در حضور علف‌های هرز گزارش شده است (Eli-Chukwu, 2019). هوش مصنوعی به کمک سامانه حسگرهای از راه دور و حسگرهای مجاور، علف‌های هرز را شناسایی و مورد هدف قرار می‌دهد. بسیاری از سازمان‌ها روبات‌هایی تولید کرده‌اند که از شبکه‌های عصبی مصنوعی و بینایی رایانه‌ای جهت اسپری کردن علف‌کش‌ها استفاده می‌کنند. کاربرد سم‌پاش‌های هوشمند همراه با کاهش مصرف آفت‌کش‌های مزارع (حدود ۸۰ درصد)، تعداد مواد شیمیایی به کار رفته را شدیداً کاهش می‌دهد و در عین مقرون به صرفه بودن، از آلودگی محیطی نیز جلوگیری می‌کند (Subeesh and Mehta, 2021). به دلیل اینکه گیاهان زراعی معمولاً به صورت ردیفی کشت می‌شوند، کاربرد الگوریتمی که بتواند ردیف‌های محصول را تشخیص دهد و پتانسیل تفکیک دقیق علف‌های هرز از محصولات را داشته باشد، الزامی است؛ بنابراین مدیریت علف‌های هرز در گیاهانی چون ذرت، چغندرقد، گندم زمستانه و جو زمستانه را می‌توان به کمک مشاهده مبتنی بر تصویر توسط پهپادها، تصمیم‌گیری مبتنی بر رایانه و سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS⁴) تحت کنترل قرار داد (Ortiz *et al.*, 2016).

سامانه شناسایی آفات: حملات آزاردهنده‌هایی مانند مگس‌های سفید، تریپس‌ها، شته‌ها و ... می‌توانند به گیاهان زراعی آسیب‌های مهلکی وارد کرده و در نتیجه عملکرد محصول را به شدت کاهش دهند. از هوش مصنوعی جهت تطابق داده‌های موجود از الگوریتم‌ها و از تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص نوع آفت و چگونگی مهار استفاده می‌کنند (Anbarasan and Jayalakshmi, 2022). این امر همچنین امکان شناسایی سطوح تنش‌های مختلف و ادغام داده‌ها به واسطه حسگرهای متعدد و تصاویر باکیفیت را فراهم می‌کند. برای کمک به کشاورزان جهت انجام اقدامات پیشگیرانه‌ای که حمله آفات را کنترل می‌کنند، برنامه‌ای تحت عنوان پیش‌بینی خطر آزاردهنده‌ها شروع شده است. مایکروسافت با همکاری United Phosphorus Limited یک رابط برنامه‌نویسی پیش‌بینی خطر آفات را ایجاد کرده که دارای اولویت مدیریتی هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی جهت پیام‌رسانی وقوع خطرات بالقوه است (Rajeswari, 2023).

شناسایی بیماری‌های گیاهی: بیماری‌های گیاهی تهدیدی بالقوه برای امنیت غذایی، اقتصاد و محیط‌زیست هستند. جهت مهار اثر بیماری‌ها و کاهش تلفات ناشی از آن، لازم است یک الگوی مدیریتی یکپارچه اتخاذ شود که دربرگیرنده راهکارهای فیزیکی، زیستی

¹ PROLOG

² Recurrent Neural Network

³ Long short-term memory

⁴ Global Positioning System

و شیمیایی باشد (BEA, 2018). با این حال، امکان دستیابی به چنین مواردی زمان بر است و صرفه اقتصادی ندارد (WSSA, 2022). سامانه‌های هوش مصنوعی مبتنی بر تشخیص تصاویر می‌توانند با دقت بالایی برخی از بیماری‌های گیاهی را شناسایی کنند؛ به همین سبب مسیر جدیدی جهت تشخیص‌های میدانی به کمک تلفن‌های هوشمند ایجاد شده است (O'Brien *et al.*, 2021). براین اساس در سنجش تصاویر، برگ گیاه به نواحی سطحی شامل پس‌زمینه، ناحیه بیمار و ناحیه غیر بیمار بخش‌بندی می‌شود. در مرحله بعد، نمونه‌ای از قسمت‌های آلوده تهیه و جهت شناسایی بهتر به مراکز آزمایشگاهی ارسال می‌شود. این موضوع در تشخیص کمبود مواد مغذی و آفات نیز مؤثر بوده است (Dharmaraj and Vijayanand, 2018). اخیراً عملکرد رویکردهای یادگیری ماشین و یادگیری عمیق جهت شناسایی بیماری‌های برگ مرکبات انجام شده است. بهترین نتیجه از نظر میزان دقت در دسته‌بندی بیماری‌ها، از روش شبکه یادگیری عمیق VGG-16¹ بود (Munirah *et al.*, 2013).

Ballea *et al.* (2014) یک سامانه هوشمند جهت جلوگیری از بیماری‌ها و آفات گندم و برنج ارائه دادند. پس از انجام آزمایش‌های گوناگون و ایجاد محیط شبیه‌سازی شده، معلوم شد فرایند توصیه یا گزینش AgPest² سازگار، منظم و تکامل یافته است. در پژوهشی دیگر سامانه هوشمندی جهت شناسایی راحت، به‌موقع و سریع بیماری‌های قارچ صدفی (ناشی از ویروس‌ها، باکتری‌ها، کپک‌ها) به کمک شیوه‌ای مبتنی بر یک سامانه برخط ایجاد شد (Munirah *et al.*, 2013). این فناوری همچنین از طریق رویکردهای اینترنتی، بیماری‌های قارچی را تشخیص داده و پیشنهادهای سودمندی را ارائه می‌دهد (Ahngar *et al.*, 2022).

برداشت مناسب و پیش‌بینی عملکرد: فرایند برداشت محصولات نیازمند کار و نیروی انسانی زیادی است. الگوی بینایی رایانه‌ای بر مبنای هوش مصنوعی در نظارت و پیش‌بینی رسیدگی محصول برای کاهش نیروی کارگری، سودمند است و باعث کاهش ضایعات مواد غذایی، هزینه‌ها و پیامدهای زیست‌محیطی می‌شود. براین اساس تجهیزات هوش مصنوعی، سرعت و دقت بیشتری در مقایسه با کارگران مزارع دارند (Gangwar, 2023). به‌عنوان نمونه حدود ۹۵ درصد از تولید خیارهای گلخانه‌ای از طریق شناخت میزان بلوغ و مقدار وزن، به کمک فناوری دید سه بعدی صورت می‌پذیرد. همچنین روش برش حرارتی مانع از انتقال ویروس‌های بیماری‌زا به گیاهان مجاور می‌شوند (Li and Yost., 2000). به‌علاوه، تصاویری که از زمین‌های زراعی مختلف زیر نور سفید و نور UVA³ به‌دست آمده، جهت ارزیابی کیفیت بلوغ میوه‌های نارس به‌کار می‌رود (Dharmaraj and Vijayanand, 2018).

تشخیص عملکرد محصول و برآورد قیمت‌ها جهت راهبردهای بازاریابی به مزرعه‌داران کمک می‌کند تا سود بیشتری را با برداشت نهایی بیشتر و قیمت بالاتر کسب کنند. کشاورزان به جهت بی‌ثباتی قیمت‌ها هیچگاه نمی‌توانند الگوی تولید معینی را مشخص کنند. این امر به خصوص در گیاهانی با قدرت ماندگاری نسبتاً کمتر مثل گوجه فرنگی متداول است. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تعامل با فناوری‌های کلان داده، به کسب‌وکارها این اجازه را می‌دهند تا قیمت محصول و سلامت گیاه را در بازار ارزیابی و خروجی را پیش‌بینی کنند. در حقیقت به کمک الگوهای آمار تجربی و شیوه‌های تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های مبتنی بر تولید، عملکرد محصول پیش‌بینی می‌شود تا میزان بهره‌وری برای هزینه واقعی سنجش شود (Kumar and Vats, 2018). از این‌رو دولت و کشاورزان می‌توانند جهت تصمیم‌گیری خردمندانه راجع به تقاضای مصرف‌کننده، میزان نیاز بازار و روند قیمت‌گذاری آینده، استفاده کرده و روش خود را هم‌زمان با کاهش هزینه‌های ورودی، به‌سوی کارآمدی بازار مدیریت کنند (Raj *et al.*, 2022). از دیگر سو، زنجیره‌های

¹ VGG-16 Deep Neural Network

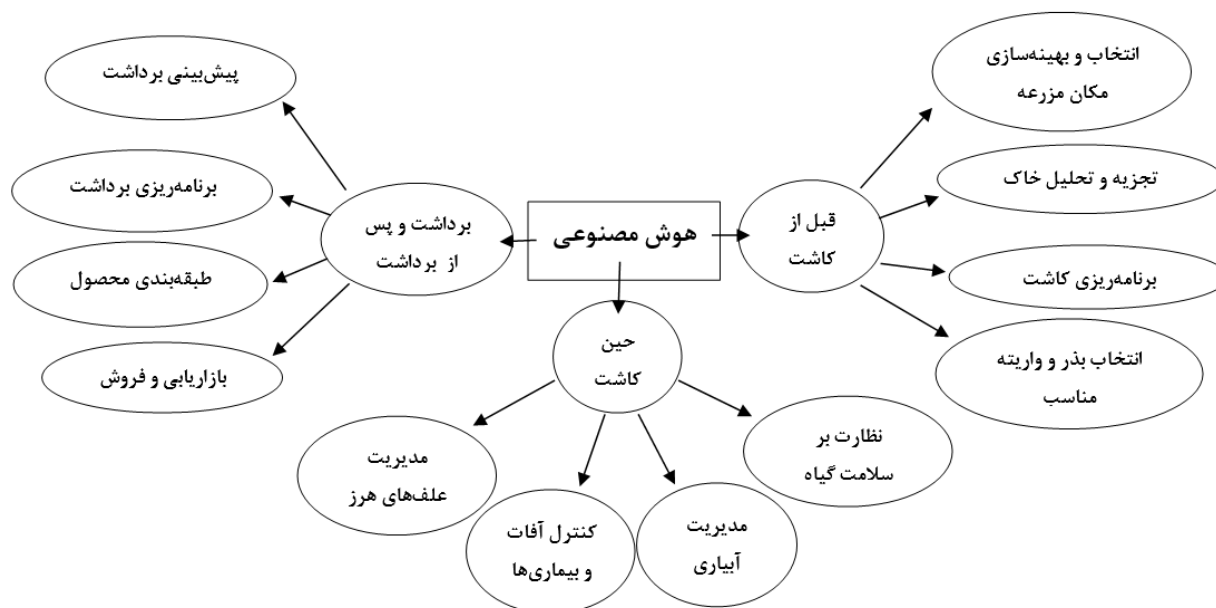
² Agricultural Pest Control Services

³ UltraViolet A

تأمین مبتنی بر هوش مصنوعی قادرند با کاهش تعداد زیادی از واسطه‌ها و کاهش هزینه‌های توزیع، باعث افزایش سود شرکت‌ها شوند.

مدیریت پس از برداشت: صنعت کشاورزی اکنون به سرعت در حال رشد و توسعه است و از پیشرفت‌های فناوریانه جهت تقویت عملکرد کلی محصولات بهره می‌برد. فارغ از کنترل بیماری‌ها و آفات، فرایندهای تمیز کردن، نگهداری، خشک کردن، درجه‌بندی، بسته‌بندی، خنک‌سازی و حمل و نقل محصولات برداشت شده نیز از وجوه ضروری کشاورزی محسوب می‌شوند. این قسمت به تعداد زیادی از سازوکارهای کنترل داخلی و نگهداری مواد غذایی می‌پردازد که از بینایی رایانه‌ای برای بهبود کیفی در تهیه محصولات، ذخیره‌سازی و توزیع اقلام غذایی استفاده می‌کنند. امکان دستیابی به بسیاری از فناوری‌ها و تجهیزات نوین مانند ربات‌ها و سامانه‌های نظارت هوشمند این بخش را به‌طور کامل متحول نموده است (Anbarasan and Jayalakshmi, 2022).

قبل از کاشت تا بعد از برداشت، هوش مصنوعی پتانسیل متحول کردن صنعت کشاورزی را در تمام مراحل، از آماده‌سازی خاک تا برداشت و فروش محصولات نهایی، دارد (شکل ۴).



شکل ۴- پتانسیل ایجاد تحول در صنعت کشاورزی توسط هوش مصنوعی

۱- قبل از کاشت: الف- انتخاب و بهینه‌سازی مکان مزرعه: هوش مصنوعی می‌تواند با تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به آب و هوا، خاک، توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای به کشاورزان در انتخاب بهترین مکان برای کشت محصولات خاص کمک کند. ب- تجزیه و تحلیل خاک: الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند برای تجزیه و تحلیل نمونه‌های خاک و ارائه توصیه‌هایی در مورد اصلاحات لازم برای افزایش حاصلخیزی خاک و سلامت گیاه استفاده شوند. ج- برنامه‌ریزی کاشت: هوش مصنوعی می‌تواند با در نظر گرفتن عواملی مانند آب و هوا، آفات و بیماری‌ها و تقاضای بازار به کشاورزان در برنامه‌ریزی زمان و نحوه کاشت محصولات کمک کند. د- انتخاب

بذر و وارسته مناسب: هوش مصنوعی می‌تواند با تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به عملکرد، مقاومت در برابر بیماری و کیفیت محصول به کشاورزان در انتخاب بذر و وارسته مناسب برای شرایط خاص خود کمک کند.

۲- حین کاشت: الف- نظارت بر سلامت گیاه: هوش مصنوعی می‌تواند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، پهپادها و حسگرهای میدانی برای نظارت بر سلامت گیاهان در حین رشد و شناسایی زودهنگام علائم تنش، آفات و بیماری‌ها استفاده شود. ب- مدیریت آبیاری: هوش مصنوعی می‌تواند با تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به آب و هوا، رطوبت خاک و نیاز گیاه به آب به کشاورزان در بهینه‌سازی مصرف آب و جلوگیری از هدر رفتن آن کمک کند. ج- کنترل آفات و بیماری‌ها: هوش مصنوعی می‌تواند برای شناسایی آفات و بیماری‌ها در مزارع و ارائه توصیه‌هایی در مورد اقدامات کنترلی مناسب استفاده شود. د- مدیریت علف‌های هرز: هوش مصنوعی می‌تواند برای شناسایی علف‌های هرز و هدف‌گیری آنها با سم‌پاشی‌های دقیق به منظور کاهش استفاده از علف‌کش‌ها و محافظت از محیط زیست استفاده شود.

۳- برداشت و پس از برداشت: الف- پیش‌بینی برداشت: هوش مصنوعی می‌تواند با تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به سلامت گیاه، آب و هوا و شرایط رشد به کشاورزان در پیش‌بینی زمان مناسب برداشت محصولات کمک کند. ب- برنامه‌ریزی برداشت: هوش مصنوعی می‌تواند با بهینه‌سازی مسیرها و زمان‌های برداشت به منظور کاهش ضایعات و افزایش کارایی به کشاورزان در برنامه‌ریزی برداشت کمک کند. ج- طبقه‌بندی و دسته‌بندی محصول: هوش مصنوعی می‌تواند برای دسته‌بندی محصولات بر اساس کیفیت، اندازه و رنگ آنها و جداسازی محصولات نامرغوب استفاده شود. د- بازاریابی و فروش: هوش مصنوعی می‌تواند با تجزیه و تحلیل داده‌های بازار و تقاضای مشتری به کشاورزان در یافتن بهترین قیمت و کانال‌های بازاریابی برای محصولات خود کمک کند.

کاربردهای هوش مصنوعی در بهنژادی گیاهی

بهنژادی گیاهی با استفاده از هوش مصنوعی، به معنی تمرین استفاده از روش‌ها و ابزارهای هوش مصنوعی در زمینه بهنژادی گیاهی است. جهت افزایش کارایی و تاثیر فرایند بهنژادی، استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و رویکردهای محاسباتی برای تجزیه و تحلیل حجم قابل‌توجهی از داده‌های ژنتیکی، فنوتیپی و محیطی گیاهان لازم است. کاربردهای هوش مصنوعی در بهنژادی گیاهی عبارتند از:

۱- تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی از روی داده‌ها: ممکن است سیستم‌های هوش مصنوعی از داده‌های ژنتیکی برای یافتن الگوها و همبستگی‌های مرتبط با صفات موردنظر استفاده کنند. بهنژادگران ممکن است از این کار برای پیش‌بینی عملکرد انواع مختلف گیاهان استفاده کرده و امیدبخش‌ترین ژنوتیپ‌ها را برای بهنژادی بیشتر انتخاب کنند.

۲- انتخاب ژنومی: قبل از اینکه گیاهی بهبود داده شود، ممکن است از نشانگرهای ژنتیکی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تعیین ارزش ژنتیکی آن استفاده شود. به منظور مؤثرتر و متمرکز کردن تلاش‌های بهنژادی، ممکن است بهنژادگران در اوایل فرایند بهنژادی از این کار برای ایجاد گیاهان با ویژگی‌های مطلوب استفاده کنند.

۳- پیش‌بینی صفت و بهینه‌سازی: با استفاده از رویکردهای هوش مصنوعی، می‌توان برخی از ویژگی‌های گیاه مانند عملکرد، مقاومت در برابر بیماری‌ها، تحمل به خشکی و محتوای مواد مغذی را پیش‌بینی و بهینه کرد. مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند به بهنژادگران کمک کنند تا گیاهانی با ویژگی‌های موردنیاز را انتخاب و با بررسی داده‌های موجود و نشانگرهای ژنتیکی، روند بهنژادی را سرعت بخشند.

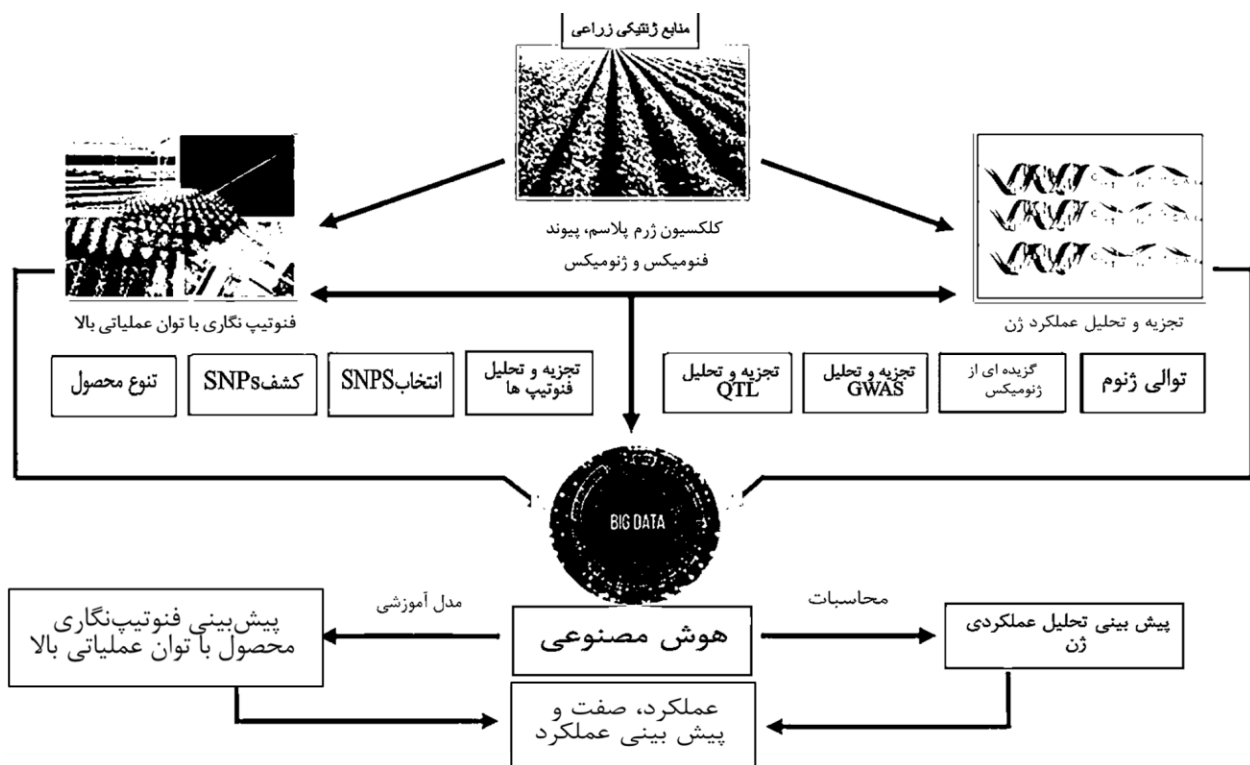
۴- فنوتیپ نگاری مبتنی بر تصویر: الگوریتم‌های هوش مصنوعی ممکن است عکس‌های تهیه شده از گیاهان توسط دوربین‌ها یا هواپیماهای بدون سرنشین را برای ارزیابی تعدادی از ویژگی‌های فنوتیپی از جمله سطح برگ، ارتفاع گیاه، زمان گلدهی و علائم

بیماری استفاده کنند. با خودکارسازی و ساده‌سازی فرایند فنوتیپ نگاری، بهنژادگران می‌توانند سریع‌تر و دقیق‌تر حجم عظیمی از داده‌ها را جمع‌آوری کنند.

۵- مدل‌سازی گیاه زراعی و بهینه‌سازی: مدل‌های هوش مصنوعی که از نرم‌افزار شبیه‌سازی گیاه زراعی نیز استفاده می‌کنند، می‌توانند رشد گیاه را شبیه‌سازی کرده و عملکرد محصول را تحت شرایط مختلف محیطی پیش‌بینی کنند. این مدل‌ها بواسطه دربرداشتن پارامترهایی مانند دما، بارندگی و کیفیت خاک در جهت به حداکثر رساندن بهنژادی انواع گیاهان جدید که به خوبی با زیستگاه‌های خاص سازگار شده‌اند، از بهنژادگران گیاهی حمایت می‌کنند.

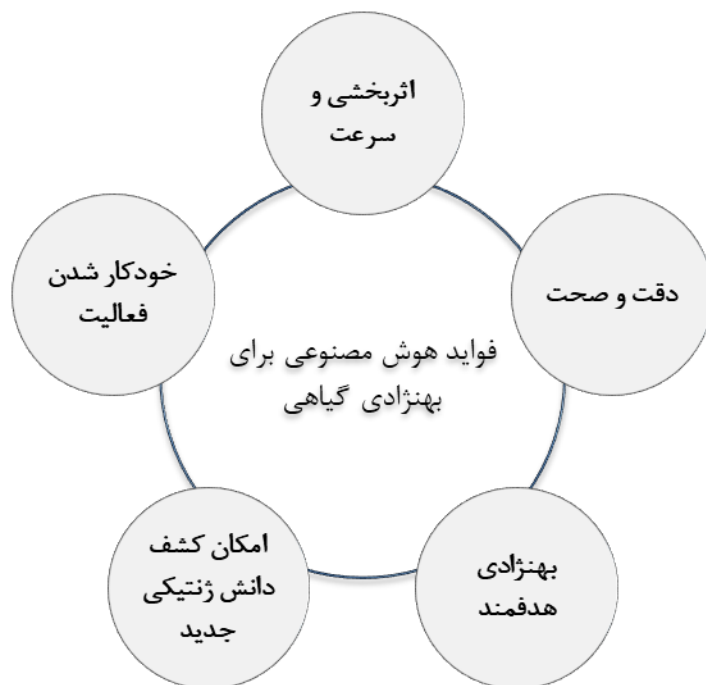
۶- سیستم‌های پشتیبانی تصمیم: با استفاده از انواع داده ورودی، سیستم‌های پشتیبانی تصمیم مبتنی بر هوش مصنوعی، ایده‌ها و پیشنهاداتی را به بهنژادگران ارائه می‌دهند. این سیستم‌ها می‌توانند ترکیبات دورگه محتمل را شناسایی کرده، بهترین روش‌های بهنژادی را توصیه کرده و منابع کارآمد تخصیص دهند.

در شکل ۵، نحوه به کارگیری فناوری هوش مصنوعی برای ارتباط دادن ژنومیکس و فنومیکس با کارایی بالا را خلاصه کرده که می‌تواند منجر به تولید استراتژی‌های بهنژادی بهتر شود (Sampath et al., 2023).



شکل ۵- هوش مصنوعی به عنوان ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی فنوتیپ نگاری با توان بالای گیاه زراعی و تجزیه و تحلیل عملکرد ژن در بهنژادی گیاهان زراعی مدرن استفاده می‌شود. داده‌های فنوتیپی و ژنوتیپی با کارایی بالا از ژرم پلاسماهای گیاهان زراعی بزرگ و جمعیت‌های اصلاحی جمع‌آوری می‌شوند. پایگاه داده‌ای گسترده می‌تواند داده‌های منابع مختلف را با فناوری هوش مصنوعی ادغام کند، مانند تنوع فنوتیپی گیاهان زراعی، چندشکلی‌های SNPs، تجزیه و تحلیل QTL، تجزیه و تحلیل GWAS، انتخاب ژنومیک و توالی ژنوم. فن‌آوری‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی فنوتیپ گیاه زراعی از پیش‌بینی کل ژنوم استفاده می‌کند و استراتژی‌های بهنژادی جدید از طریق هوش مصنوعی در ارتباط با مدل‌های محاسباتی و آموزشی تولید می‌شوند.

با استفاده از تکنیک‌ها و فناوری هوش مصنوعی، بهنژادگران گیاهی ممکن است دقت، سرعت و کارایی فرایند بهنژادی را افزایش دهند. هوش مصنوعی در بهنژادی گیاهی این پتانسیل را دارد که به توسعه انواع ارقام برتر که برای مقابله با مشکلات امنیت غذایی، تغییرات آب و هوایی و کشاورزی پایدار مجهزتر هستند، کمک کند (Sampath et al., 2023).



شکل ۶- فواید هوش مصنوعی برای بهنژادی گیاهی (Sampath et al., 2023).

فواید هوش مصنوعی برای بهنژادی گیاهی

بهنژادی گیاهی با استفاده از هوش مصنوعی چندین مزیت داشته و ممکن است تأثیر زیادی در زمینه بهنژادی گیاهان داشته باشد. هوش مصنوعی به دلایل زیر مفید است:

- ۱- **اثر بخشی و سرعت:** سیستم‌های هوش مصنوعی می‌توانند حجم عظیمی از داده‌ها را به سرعت پردازش کرده و تجزیه و تحلیل‌های پیچیده را انجام دهند. این امر روند بهنژادی را سرعت بخشیده و زمان مورد نیاز برای تولید ارقام جدید گیاهی را کاهش می‌دهد و به بهنژادگران این امکان را می‌دهد تا حجم عظیمی از داده‌های ژنومی و فنوتیپی را بطور موثرتر تجزیه و تحلیل نمایند.
- ۲- **دقت و صحت:** هوش مصنوعی می‌تواند ارتباطات و الگوهای را در بین داده‌ها پیدا کند که شناسایی آنها برای انسان دشوار است. سیستم‌های هوش مصنوعی با بررسی داده‌های ژنتیکی و فنوتیپی می‌توانند ویژگی‌های گیاه را با دقت بالا پیش‌بینی کرده و به بهنژادگران این امکان را بدهند که تصمیمات آنها در مورد گزینش آگاهانه باشد.
- ۳- **بهنژادی هدفمند:** هوش مصنوعی با یافتن گیاهانی که دارای صفات موردنظر هستند، بهنژادی برای اهداف خاص را آسان‌تر می‌کند. با تمرکز تلاش بهنژادگران روی گیاهانی که احتمال بیشتری برای نشان دادن صفات مطلوب دارند، بهنژادگران می‌توانند شانس موفقیت خود را افزایش داده و از منابع کمتری استفاده نمایند.
- ۴- **ممکن است با بررسی داده‌های ژنومی گسترده، هوش مصنوعی دانش ژنتیکی مهمی را برملا کند:** بهنژادگران می‌توانند نشانگرهای ژنتیکی مرتبط با صفات مورد نظر را کشف کنند که این کار به آنها کمک می‌کند تا پس زمینه ژنتیکی فنوتیپ‌های متنوع را درک کنند. چنین دانشی می‌تواند برنامه‌های بهنژادی را هدایت کرده و اثر بخشی بهبود و انتخاب صفت را افزایش دهند.

۵- خودکار شدن فعالیت: فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند فرایندهای کاری فشرده و تکراری موجود در بهنژادی گیاهان را خودکار کنند. به عنوان مثال می‌توان به سیستم‌های رباتیک و فنوتیپ‌نگاری مبتنی بر تصویر اشاره کرد. این کار به بهنژادگران کمک می‌کند تا وقت بیشتری جهت تمرکز روی تصمیمات مهم و سایر کارهای وقت‌گیر اختصاص دهند. علیرغم این مزایا، در نظر داشتن محدودیت‌ها یا مشکلات احتمالی مرتبط با هوش مصنوعی در بهنژادی گیاه بسیار مهم است. این محدودیت‌ها شامل نیاز به داده‌های با کیفیت بالا و متنوع، مسائل مربوط به حریم خصوصی و مالکیت، انحراف‌های بالقوه داده‌ها و الگوریتم‌ها و لزوم ایجاد تعادل بین تکنیک‌های بهنژادی مرسوم و رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی است. ضمن رسیدگی به این مسائل، ادغام و پیاده سازی دقیق هوش مصنوعی در بهنژادی گیاهی می‌تواند مزایای آن را به حداکثر رسانده و به ایجاد انواع بهتر گیاهان زراعی کمک کند (Sampath et al., 2023).

نحوه استفاده از هوش مصنوعی در بهنژادی گیاهی

الف- هوش مصنوعی با پتانسیل تغییر کامل نحوه ایجاد انواع گیاهان زراعی جدید، به سرعت در حال تغییر فرایند بهنژادی گیاهان است. بهنژادگران گیاهی با استفاده از ابزارهای مجهز به هوش مصنوعی می‌توانند گیاهان با ویژگی‌های مطلوب را سریع‌تر و موثرتر شناسایی و انتخاب کنند. ممکن است از هوش مصنوعی برای تجزیه و تحلیل پایگاه‌های داده ای عظیم ژنتیکی و فنوتیپی جهت یافتن گیاهانی که پتانسیل داشتن ویژگی‌های خاص مانند مقاومت در برابر آفات و بیماری‌ها یا تحمل به خشکی یا تنش گرمایی را دارند، استفاده شود. این کار می‌تواند بهنژادی را تسریع کرده و زمان لازم برای ایجاد انواع جدید را کوتاه کند.

ب- اجرای برنامه‌های بهنژادی که موفقیت‌آمیزتر هستند. ممکن است از هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی پیامدهای روش‌های مختلف بهنژادی روی نتایج یک برنامه بهنژادی استفاده شود. این کار می‌تواند بهنژادگران گیاهی را در اتخاذ ابتکاراتی که احتمال موفقیت بیشتری در دستیابی به اهداف خود دارند، کمک کند.

ج- توسعه روش‌های بهنژادی نوین: روش‌های بهنژادی جدید مانند انتخاب ژنومی و انتخاب به کمک نشانگر را می‌توان با استفاده از هوش مصنوعی پیش برد. این روش‌ها می‌توانند به افزایش دقت انتخاب کمک کرده و امکان انتخاب ویژگی‌هایی را فراهم کنند که ارزیابی مستقیم آنها چالش برانگیز یا غیرممکن است.

د- با تمرکز روی مواد اصلاحی موجود که پتانسیل تولید ویژگی‌های ایده‌آل را دارند، هوش مصنوعی می‌تواند احتمال شناسایی ژنوتیپ‌هایی را که واقعاً سودمند هستند، افزایش دهد. هوش مصنوعی می‌تواند به بهنژادگران کمک کند تا به سرعت تعیین کنند در یک آب و هوای خاص کدام گیاهان سریع‌تر رشد می‌کنند، کدام ژن به گیاهان کمک می‌کند تا در آنجا رشد کنند و کدام گیاهان در صورت تلاقی، بهترین ترکیب ژن‌ها را برای یک مکان مشخص تولید می‌کنند (Sampath et al., 2023).

از جمله کاربردهای هوش مصنوعی در زیست فناوری گیاهی موارد زیر می‌باشند (Khan et al., 2022):

۱- فناوری‌های هوش مصنوعی در خدمت غلبه بر گلوگاه‌های فنومیکس

در سال‌های اخیر فنومیکس گیاهی به سرعت پیشرفت کرده و امکان بهنژادی دقیق را فراهم کرده است. این پیشرفت را می‌توان به افزایش اختراعات و ایجاد فناوری‌های جدید نسبت داد چرا که امکان فنوتیپ‌نگاری^۱ با توان بالا برای صفات پیچیده گیاهی را فراهم کرده اند. هوش مصنوعی به توسعه نرم‌افزارها و ابزارهایی برای جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها در زمینه فنوتیپ‌نگاری کمک کرده است. این دستگاه‌ها و پلتفرم‌ها با استفاده از داده‌های آزاد، تحقیق مبتنی بر جامعه و اشتراک‌گذاری اطلاعات را تسهیل می‌کنند و داده‌های

¹ Phenotyping

حجیمی را که برای تحقیقات قابل اعتماد فنوتیپ‌نگاری ضروری هستند، فراهم می‌آورند. هوش مصنوعی در سه بخش کلیدی مدیریت داده‌های فنومیک به کار می‌رود: طراحی الگوریتم‌ها و برنامه‌هایی برای تبدیل داده‌های حسی به اطلاعات فنوتیپی، توسعه مدل‌هایی برای فهم روابط میان ژنوتیپ و فنوتیپ در تعامل با محیط، و مدیریت پایگاه‌های داده به منظور اشتراک‌گذاری اطلاعات و منابع. آزمایش‌های متعددی که در شرایط مختلف تکرار می‌شوند، برای غربالگری گیاهان بر اساس صفات مطلوب (مانند اندازه دانه، تحمل به تنش‌های غیر زنده، کیفیت محصول یا پتانسیل عملکرد) ضروری هستند. اندازه‌گیری گیاهان منفرد در شرایط کنترل‌شده، موضوع مهمی در بحث فنوتیپ‌نگاری است. با این حال، رشد و نمو گیاهان در شرایط طبیعی دقیقاً مشابه محیط‌های کنترل‌شده نیست. به همین دلیل، شکاف بزرگی بین عملکرد گیاهان در محیط‌های آزمایشگاهی و مزارع مشاهده می‌شود. ادغام مستمر هوش مصنوعی در فناوری‌های مختلف، حرکت به سمت راه‌حل‌های هوشمندتر، سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر را نوید می‌دهد. با اینکه فنوتیپ‌نگاری مزرعه‌ای یک نیاز عملی در بهنژادی گیاهان زراعی است، اما هنوز فنوتیپ‌نگاری با توان بالا در شرایط مزرعه از امکانات بررسی فنوتیپی موجود عقب‌تر است. بنابراین، تلاش بیشتری برای توسعه این امکانات و کشف جنبه‌های عملی فنومیکس مورد نیاز است. برای افزایش دقت فناوری‌های هوش مصنوعی، جمع‌آوری حجم بالایی از داده‌ها از منابع متعدد ضروری است.

مطالعات اخیر نشان داده است که فنوتیپ‌نگاری گیاهان زراعی از طریق هوش مصنوعی باعث بهبود فنوتیپ‌نگاری‌ها و پیش‌بینی‌ها در گیاهان زراعی می‌شود. به عنوان مثال، سلواراج و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین، برای پیش‌بینی عملکرد ریشه کاساوا (*Manihot esculenta* Crantz) بهترین بازده را با بالاترین دقت نشان داده‌اند. علاوه بر این، سیستم‌های فنوتیپ‌نگاری با توان عملیاتی بالا، به کمک هوش مصنوعی با موفقیت در موارد زیر به کار گرفته شده‌اند (Selvaraj et al., 2020): در گندم و ذرت برای شناسایی مرحله رشد گیاه و بخش‌بخش سازی تصویر گیاه، در گیاهان دانه روغنی برای بخش‌بخش کردن معناشناسانه گیاهان زراعی و علف‌های هرز، فنوتیپ‌نگاری مقاومت گیاهان زراعی به بیماری و بهبود بهره‌وری گیاه (Khan et al., 2022).

۲- پتانسیل هوش مصنوعی در تجزیه و تحلیل عملکرد ژن

در دهه‌های اخیر توسعه سریع فناوری‌های با توان بالا در علوم زیستی، منجر به تولید داده‌های عظیم شده است. رشته‌هایی که تلاش می‌کنند حجم عظیمی از داده‌های زیستی را جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل کنند، اغلب به عنوان "Omics" شناخته می‌شوند. تجزیه و تحلیل داده‌های "Omics" با استفاده از روش‌های بصری یا با استفاده از همبستگی‌های آماری، بسیار سخت و پیچیده است. این امر لزوم استفاده از هوش ماشینی یا هوش مصنوعی را تحریک کرده چرا که مقادیر زیادی داده را مدیریت می‌کند و در عین حال اطلاعاتی را استخراج می‌کند که فراتر از درک فعلی ما از سیستم است و مهمتر از همه، بهبود خودکار بر اساس داده‌های موجود را انجام می‌دهد.

در حال حاضر، هوش مصنوعی به طور گسترده در ژنومیکس گیاهی استفاده می‌شود و در آینده نیز کاربردهای بیشتری برای کاوش عمیق ژنوم خواهد داشت. تعدادی از ابزارها و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای انواع مختلف آنالیز بیوانفورماتیک مانند شناسایی ژن کدکننده پروتئین، شناسایی عنصر تنظیم‌کننده سیس، بیان ژن، مکان درون سلولی، برهمکنش پروتئین-پروتئین، هستی‌شناسی ژن، مسیرهای متابولیک، فنوتیپ‌ها و پیش‌بینی ژنومی بررسی شده‌اند. در آینده نه چندان دور، احتمالاً از هوش مصنوعی برای رفع انواع نگرانی‌های علم ژنومیکس گیاهی استفاده خواهد شد. الگوریتم‌های هوش مصنوعی ممکن است به طور بالقوه برای انجام تحقیقات ژنومی مقایسه‌ای یا انتقال اطلاعات یک گیاه مدل به گیاه زراعی موردنظر استفاده شوند. DeepSEA و DeepBind دو مدلی هستند که در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ژنتیکی ایجاد شده‌اند. انواع مختلفی از بیان ژن‌ها یا تجزیه و تحلیل داده‌های توالی‌یابی را می‌توان با هدف پیش‌بینی عملکردهای ژن یا اثرات متفاوت بیان ژن روی یک صفت در نظر گرفت.

اگرچه در نتیجه پیشرفت‌های جدید در فناوری توالی‌یابی با توان بالا مقدار قابل توجهی داده‌های ژنومی تولید شد، با اینحال حجم عظیم داده‌های تولید شده مشکل بزرگی برای ذخیره‌سازی و بررسی آنها ایجاد کرده است. فناوری هوش مصنوعی در بیوانفورماتیک اندازه‌گیری بیان همزمان تعداد زیادی ژن، یا حتی هر ژنی که در ژنوم در محدوده وسیعی از موقعیت‌ها قرار دارد را ممکن می‌سازد. همه این فناوری‌ها ترکیب می‌شوند تا به زیست‌شناسان «ارتباط» بیشتر داده‌ها و توانایی ادغام آن‌ها را نمایش دهند. همچنین زیست‌شناسان را قادر می‌سازد تا داده‌های ژنومی خود را بررسی کرده، فرضیات خود را در چرخه آزمایشی بررسی و تأیید کنند و در نهایت تحقیقات خود را بهبود بخشند (Khan et al., 2022).

۳- ارتباط دادن ژنوم گیاه زراعی با فنوم با استفاده از هوش مصنوعی

در حال حاضر، رویکردهای بهنژادی مدرن روی ارتباط دادن درست و دقیق ژنوتیپ با فنوتیپ گیاه زراعی متمرکز شده است. در بهنژادی پیشرفته، ارتباط دادن کل اطلاعات ژنوم به فنوتیپ‌ها با توان عملیاتی بالا، همچنان یک چالش بزرگ است و مانع از کاربرد بهینه فنوتیپ‌نگاری در مزرعه و Omic می‌شود. کلکسیون ژرم پلاسما و جمعیت‌های نقشه برداری با استفاده از هوش مصنوعی می‌توانند داده‌های فنومیکس و ژنومیکس را به طور موثر از هم متمایز کنند. تنوع گیاه زراعی، شناسایی و انتخاب چندشکلی‌های تک نوکلئوتیدی (SNP¹s)، تجزیه و تحلیل مکان‌های ژنی صفات کمی (QTL²)، تجزیه و تحلیل مطالعه پیوستگی مرتبط با گسترده ژنوم (GWAS³) و انتخاب ژنومی و توالی‌ها مقدار زیادی داده تولید می‌کنند. هوش مصنوعی می‌تواند داده‌های بزرگ فنومیکس و ژنومیکس را تحلیل و ارتباطات میان آن‌ها را برای بهبود رویکردهای بهنژادی گیاهان بررسی کند. این فناوری قادر است عملکرد ژن‌ها را تجزیه و تحلیل کرده و پیش‌بینی‌هایی درباره فنوتیپ‌نگاری گیاهان زراعی با توان عملیاتی بالا ارائه دهد و کارایی عملکرد و صفات گیاهان را پیش‌بینی کند. بنابراین، ادغام هوش مصنوعی با ابزارهای فنومیکس و ژنومیکس می‌تواند امکان شناسایی سریع ژن‌های مرتبط با فنوتیپ‌های مطلوب را فراهم کند و در نهایت سرعت برنامه‌های بهبود گیاهان زراعی را افزایش دهد. تحقیقات روی ژنومیکس گیاهی نه تنها به فهم سازوکارهای مولکولی فنوتیپ‌ها کمک کرده است، بلکه استفاده از داده‌های فنی و تکنیک‌های بیوانفورماتیک برای تجزیه و تحلیل و درک این سازوکارها را نیز تسهیل می‌کند. تا به امروز، هوش مصنوعی به طور اجتناب‌ناپذیری به عنوان یک رویکرد جذاب برای این تحلیل‌ها شناخته شده است. هوش مصنوعی بستری را برای تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های عظیم و متنوع فنومیکس و ژنومیکس، مانند توالی‌یابی ژنوم و داده‌های تصویری، فراهم می‌کند که فراتر از استراتژی‌های تحلیلی مرسوم عمل می‌کند. اخیراً، از رویکردهای هوش مصنوعی به وضوح در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی فنومیکس و ژنومیکس استفاده شده است، مانند تجزیه و تحلیل مجموعه‌های ژنوم، الگوریتم‌های خاص ژنومی، تجزیه و تحلیل داده‌های عظیم برای کاهش پیچیدگی‌های چندگانه در متابولومیکس، پروتئومیکس، ژنومیکس، ترانسکریپتومیکس و زیست‌شناسی سامانه‌ای. همچنین این فناوری برای تفسیر آبشارهای بیان ژن، شناسایی SNP‌های قابل توجه در گیاهان پلی‌پلوئید، و فنوتیپ‌نگاری گیاهان زراعی تحت تنش با عملکرد بالا به کار گرفته شده است.

دانشمندان از هوش مصنوعی و مدل‌های توسعه‌یافته آن برای تلفیق جریان اطلاعات از DNA به فنوتیپ‌های مبتنی بر ژنتیک جهت بررسی انواع بالقوه در جمعیت‌های طبیعی استفاده کرده‌اند. علاوه بر این، می‌توان هوش مصنوعی را به طور منسجم با بیوانفورماتیک و تجزیه و تحلیل توالی ژنوم ترکیب کرد تا مجموعه‌های مولکولی مختلف مانند مکان‌های اتصال فاکتور رونویسی، RNA‌های طولانی

1. Single Nucleotide Polymorphisms

2. Quantitative Trait Loci

3. Genome-Wide Association

غیر کد شونده (lncRNAs)، microRNA (miRNAs)، تغییرات اپیستاتیک و ژن‌های کدشونده، مکان‌های پلی آدنیلایسیون موردنظر و همچنین عناصر سیس تنظیم کننده (CRE¹s) را تفسیر کرد.

پایگاه‌های داده‌ای مرتبط با گیاهان زراعی مختلف، حجم عظیمی از داده‌های فنوتیپی و ژنوتیپی را ایجاد می‌کنند که اطلاعات مهمی درباره تنوع ژنتیکی ارائه می‌دهد. این اطلاعات به تازگی به عنوان منابع بالقوه‌ای برای به‌نژادگران مفید بوده و دیدگاه‌هایی فراهم کرده‌اند که امکان شناسایی ژن‌های کاندید برای صفات جدید را بهبود می‌بخشد. استفاده از هوش مصنوعی برای استنتاج برهمکنش بین ژن‌های کاندید و عناصر تنظیمی (CRE) ها، به‌عنوان رویکردی نوآورانه در دسته‌بندی و شناسایی ژن‌های ناشناخته قبلی به منظور بهبود ویژگی‌های گیاهان زراعی، شناخته می‌شود. علاوه بر این، استراتژی‌های هوش مصنوعی می‌توانند عملکرد گیاهان زراعی را تحت شرایط مختلف اقلیمی تفسیر کرده و در ارزیابی تفاوت‌های محیطی مؤثر باشند. این شامل فنوتیپ‌نگاری گیاهان تحت تنش، بررسی اثرات دمای اقلیم، تابش فرابنفش (UV)، باد و تگرگ می‌شود، که همگی پتانسیل زیادی برای افزایش دقت و کارایی این تجزیه و تحلیل‌ها دارند. نقش هوش مصنوعی در کسب، تجزیه و تحلیل، یکپارچه‌سازی و مدیریت داده‌های ژنومی و فنومی بسیار حیاتی است، زیرا این نقش می‌تواند به افزایش انعطاف‌پذیری کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی کمک کند.

روش‌های ژنوتیپ‌نگاری مبتنی بر توالی‌یابی نسل جدید (NGS²) به بهبود وضوح نقشه برداری و شناسایی ژن کمک کرده و از ژنوتیپ‌نگاری مبتنی بر NGS برای تجزیه و تحلیل GWAS در جهت بهبود گیاهان زراعی استفاده شده است. به عنوان مثال، این نوع مطالعات در سویا به طور گسترده برای شناسایی مکان‌های ژنتیکی و ژن‌های کاندید برای وزن دانه، محتویات پروتئین و روغن دانه، باز شدگی غلاف، تثبیت نیتروژن، ارتفاع گیاه سویا و شاخه‌های اولیه، صفات زراعی، مقاومت به بیماری و غلظت توکوفرول استفاده شده است. در حال حاضر تجزیه و تحلیل تفکیک بالک (BSA³) و روش‌های اصلاح شده آن در مورد بسیاری از گیاهان زراعی استفاده می‌شود. BSA مبتنی بر NGS در حال تبدیل شدن به یک رویکرد محبوب برای شناسایی ژن‌های کاندید برای صفات مختلف مانند مقاومت به ویروس موزاییک سویا، مقاومت در برابر پوسیدگی زغالی، زمان گلدهی، مقاومت به فیتوفتورا و مقاومت در برابر کپک پودری است. اخیراً الگوریتم یادگیری عمیق BSA (DeepBSA) جهت نقشه برداری QTL و شبیه سازی عملکرد ژن در ذرت توسعه یافته است (Khan et al., 2022).

۴- هوش مصنوعی باعث می‌شود در به‌نژادی گیاهان زراعی به داده‌های محیط‌نگاری^۴ دسترسی داشته باشیم.

تغییرات اقلیمی تأثیر زیادی روی محیط زیست و تولید گیاهان زراعی در حال و آینده دارد. محیط نگاری به عنوان سومین فناوری، همراه با فناوری‌های فنوتیپ‌نگاری و ژنوتیپ‌نگاری جهت رمزگشایی تأثیرات محیطی در به‌نژادی گیاهی پیشنهاد شده است. محیط نقش کلیدی در مدل‌سازی گیاهان زراعی و پیش‌بینی فنوتیپ‌ها از طریق اجزای کارآمد آن از جمله برهمکنش ژنوتیپ با محیط (GEI^۵)، پیام‌های محیطی، ژن‌های پاسخ‌دهنده، تنش‌های زیستی و غیرزیستی و همچنین فنوتیپ‌نگاری یکپارچه دارد. کورتس و همکاران (۲۰۲۲) وضعیت حوزه مطالعاتی نوظهور معروف به "روابط ژنوم-محیط" را مورد بحث قرار داده‌اند که در آن داده‌های اقلیمی اکولوژیکی با داده‌های ژنومیک تکاملی (GEA^۶s) ترکیب می‌شوند. محققین از شروع جمع‌آوری "مقادیر سازگاری تخمین

¹ . Cis-Regulatory Elements

² . Next Generation Sequencing

³ . Bulk Segregant Analysis

⁴ . Envirotyping

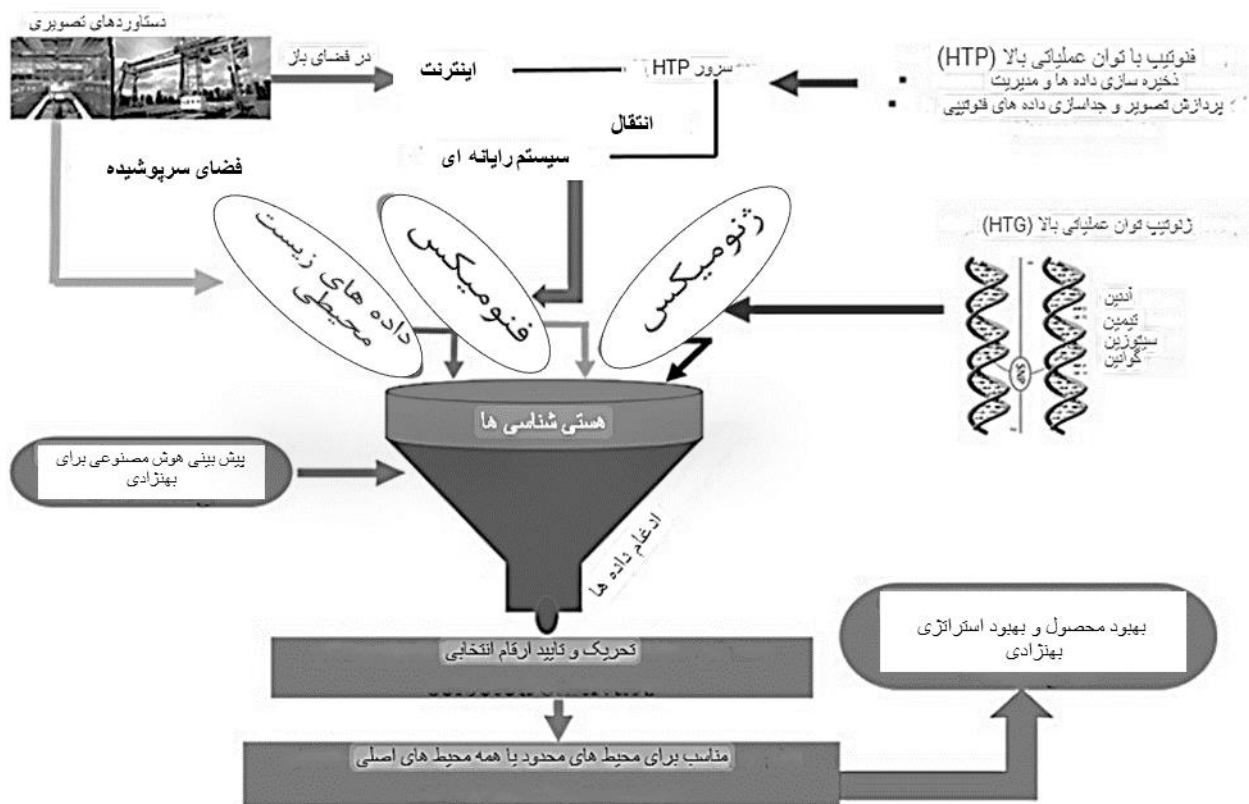
⁵ . Genotype-by-Environment Interaction

⁶ . Genome-Environment Associations

زده ژنومی" (GEAV^{1s}) جهت پیش بینی ژنومی (GP²) و نیز مدل‌های چند بعدی یادگیری ماشین حمایت می‌کنند تا سازگاری تکاملی چند ژنی مدنظر قرار گیرد. ژو و همکاران (۲۰۲۲) اخیراً یک طرح بهنژادی پیش‌بینی ژنومی-محیطی یکپارچه با استفاده از اطلاعات چند Omic ی یکپارچه، فناوری داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی پیشنهاد کرده‌اند.

کورتس و همکاران (۲۰۲۱) همچنین یک نقشه راه برای استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، پیش‌بینی ژنوم و ویرایش ژن چند صفتی برای انتقال تنوع‌های جدید تحمل به تنش غیرزیستی از خویشاوندان وحشی گیاه زراعی به آنها برای ایجاد گیاهان مقاوم به خشکی ارائه کرده‌اند.

طرح بهنژادی پیشنهادی ما (شکل ۷) اطلاعات ژنوتیپی، فنوتیپی و محیطی را برای بهبود کارایی ادغام می‌کند. داده‌های فنوتیپی گیاهان زراعی مربوط به محیط‌های داخلی و بیرونی توسط سیستم‌های رباتیک با کارایی بالا جمع‌آوری می‌شوند و اطلاعات فنوتیپی بدست آمده از محیط‌های مختلف از طریق اینترنت به سرور فنوتیپ با توان عملیاتی بالا (HTP³) منتقل می‌شوند. مجموعه داده‌های چندگانه اطلاعات ژنوتیپی، فنوتیپی و محیطی را با هم دریافت کرده و برهمکنش ژنوتیپ و محیط (GEI) بر اساس محیط‌های متعدد کمی خواهد شد. فناوری هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری ماشین و یادگیری عمیق (DL⁴)، در انتخاب رقم برای محیط‌های خاص یا چندگانه استفاده می‌شود. این رویکرد ما را قادر می‌سازد تا در مورد ارقام انتخابی تصمیم گیری کنیم که آیا برای کشت در محیط‌های محدود است یا برای همه محیط‌های اصلی مناسب هستند (Khan et al., 2022).



¹. Genomic Estimated Adaptive Values

². Genomic Prediction

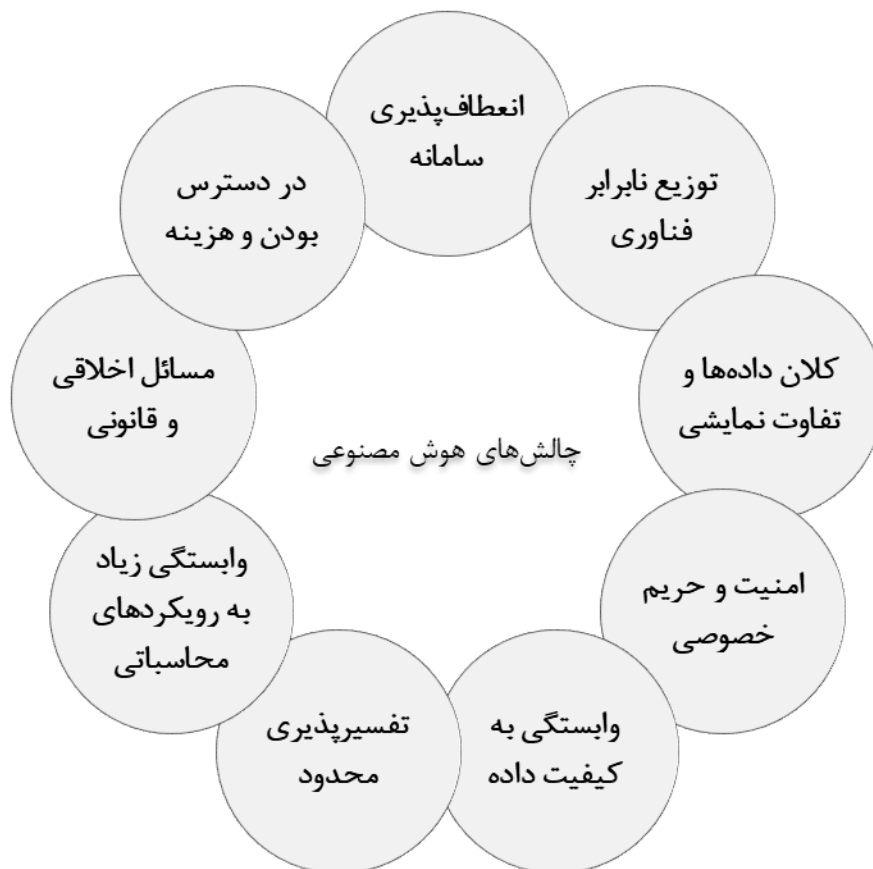
³. High- Throughput Phenotyping

⁴. Deep Learning

شکل ۷. یکپارچه سازی و مدیریت داده‌های ژنومیکس، فنومیکس و محیط توسط هوش مصنوعی برای بهنژادی گیاهان زراعی. داده‌های فنوتیپی گیاهان زراعی از هر دو محیط داخلی و خارجی جمع آوری شده و اطلاعات فنوتیپی، ژنوتیپی و محیطی با فناوری هوش مصنوعی تلفیق می‌شوند. با مدل سازی ریاضی، استنتاج منطقی و تصمیم گیری، سیستم بهنژادی با کمک هوش مصنوعی ارقام انتخاب شده را شبیه سازی و تأیید می‌کند که آیا برای کشت در محیط‌های محدود یا برای کشت در همه محیط‌های اصلی مناسب هستند (Khan et al., 2022).

چالش‌های استفاده از هوش مصنوعی در علوم زراعی و بهنژادی گیاهی

شیوه‌های هوش مصنوعی نه تنها به محیط زیست کمک می‌کنند بلکه با کاهش استفاده از منابع و مواد شیمیایی از آسیب به طبیعت جلوگیری می‌کنند. این فناوری باعث کاهش هزینه‌های آموزش کارکنان، تسریع در حل مشکلات، کاهش نیاز به مداخله انسانی و خطاها شده و امکان تصمیم‌گیری‌های دقیق و به موقع را با تلاش کمتری فراهم می‌آورد. با وجود این مزایا، پیاده‌سازی هوش مصنوعی در کشاورزی و به طور کلی ورود فناوری‌های نوین به این حوزه همواره با چالش‌ها و محدودیت‌هایی همراه بوده است. این چالش‌ها به خودی خود مانع موفقیت فناوری نمی‌شوند، اما در پیش‌بینی و تبیین کامل تأثیرات آن ناکام مانده و ممکن است باعث ایجاد پیچیدگی شوند. بنابراین، ارزیابی جامع ریسک و ایجاد چارچوب‌های حکمرانی مناسب برای این فناوری‌ها می‌تواند از بروز مشکلات آینده جلوگیری کرده و به تسریع گسترش هوش مصنوعی در کشاورزی به شیوه‌ای پایدار کمک کند.



شکل ۸. چالش‌های استفاده از هوش مصنوعی در علوم زراعی و بهنژادی گیاهی

۱- **انعطاف پذیری سامانه:** موضوع مهم در فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، اتصال زیرسامانه‌ها به یک محیط یکپارچه است. این امر نیاز به انعطاف‌پذیری خود زیرسامانه‌ها دارد. دانش بشری در این عصر دیجیتال بسیار سریع در حال تغییر است؛ از این‌رو تغییر سریع دستگاه‌ها و حسگرها با پیشرفت فناوری‌های اتخاذ شده، برای کشاورزان کوچک مقرون‌به‌صرفه نیست (Rajeswari, 2023). همچنین هزینه بالای این برنامه‌ها، ممکن است قیمت‌ها و هزینه‌های ورودی را افزایش دهد. از طرف دیگر، کمبود بودجه برای نگهداری زیرساخت‌های موجود (شامل جمع‌آوری، انتقال، ذخیره‌سازی، پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها)، عدم سرمایه‌گذاری عمومی برای پر کردن شکاف‌ها در علوم مهندسی داده، عدم آگاهی و شفافیت در مورد بازگشت سرمایه در سامانه‌های هوش مصنوعی، عدم وجود طرح‌های کمک مالی برای مزارع کوچک، ضعف شبکه‌های مخابراتی و عملکرد کند شبکه از دیگر مشکلات موجود می‌باشد (Eli-Chukwu, 2019). علاوه بر این، تهدید بیکاری بزرگ‌ترین چالش اجتماعی است. در واقعیت ماشین‌های هوشمند می‌توانند اکثر مشاغل و وظایف تکراری را بر عهده بگیرند. در نتیجه مشارکت انسانی در حال کاهش است و استانداردهای اشتغال را با چالش جدی مواجه خواهد کرد. افراد و شیوه‌های موجود در مرکز سامانه‌های کشاورزی بومی، علی‌رغم سهم آنها در امنیت غذایی محلی، اغلب در داده‌ها کمتر نشان داده می‌شوند (Lugo-Morin, 2020). به‌عنوان مثال، مجموعه داده‌های کشاورزی معمولی به‌اندازه کافی شیوه‌های چندکشتی مانند جنگل زراعی را در نظر نگرفته‌اند (Jose, 2009). داده‌های جزئی، مغرضانه یا نامربوط ممکن است منجر به عملکرد ضعیف ¹DSS (سامانه پشتیبانی تصمیم‌گیری) کشاورزی شود، در نتیجه اعتماد خرده‌مالک‌ها و کشاورزان بومی را به خدمات توسعه دیجیتال و سامانه‌های هوشمند کاهش می‌دهد و حتی امنیت غذایی را به خطر می‌اندازد (Tzachor et al., 2022).

۲- **توزیع نابرابر فناوری:** به دلایل خاص جغرافیایی، اجتماعی یا سیاسی، توزیع فناوری مدرن نابرابر است که نشان می‌دهد کاربرد هوش مصنوعی در مناطق خاصی محدودیت‌های خود را خواهد داشت. برای مثال استفاده از سامانه‌های هوش مصنوعی مبتنی بر اینترنت در مناطق دورافتاده یا روستایی با عدم وجود سرویس وب و آشنایی با عملیات هوش مصنوعی محدود می‌شود (Eli-Chukwu, 2019). در مکانیزاسیون کشاورزی همگام با یکپارچه‌سازی زمین، کشاورزان کوچک مقیاس که بخش‌های بزرگی از جنوب جهان را تغذیه می‌کنند، اغلب فاقد ابزار سرمایه‌گذاری در ماشین‌آلات پیشرفته و رقابت با زمین‌داران بزرگی هستند که از صرفه‌جویی در مقیاس بالا بهره می‌برند. افزایش اندازه مزارع و مکانیزاسیون مزایای قابل توجهی برای عملکرد کشاورزی و سودآوری داشته است، اما درعین حال منجر به جابه‌جایی نیروی کار، کاهش دستمزد و تغییرات مضر در جوامع روستایی شده است (Tzachor et al., 2022). افزون بر این، نقش فرهنگ جامعه هدف در میزان ریسک‌گریزی و مقاومت در برابر تغییر، عدم اعتماد به فناوری، آموزش و مهارت ناکافی و در نتیجه شکاف دیجیتالی موجود، بسیار حیاتی و حائز اهمیت است. از طرف دیگر، اگر کشاورزی از طریق هوش مصنوعی بیشتر حمایت شود و عملکرد بر یکپارچگی زیست‌محیطی اولویت داده شود، ممکن است اجتناب از کاهش تنوع زیستی و افزایش آلودگی دشوار باشد. همچنین بدون طراحی فناوری فراگیر، نابرابری‌های اجتماعی، اقتصادی از جمله تبعیض‌های جنسیتی، طبقاتی و قومیتی و کار کودک خارج از مدل‌های یادگیری ماشین اعمال شده باقی می‌ماند (Palacios-Lopez et al., 2017). با افزایش ایجاد شکاف بین کشاورزان بزرگ و خرده مالکان، نقاط شکست متمرکز شده و حملات عمدی می‌تواند باعث آسیب نامتناسب شود. به‌ویژه، این پویایی‌ها خطر گسترش آسیب‌پذیری زنجیره‌های تأمین مواد غذایی کشاورزی را در برابر حملات سایبری، از جمله حملات بدافزار افزایش می‌دهد (Tzachor et al., 2022). بنابراین، باید انتظار داشت روند پذیرش هوش مصنوعی کندتر و نابرابر باشد، درعین حال اینکه آیا پذیرش تولید غذا را فراتر از محدوده‌های طبیعی خاصی از زمین افزایش می‌دهد یا خیر، نامشخص باقی می‌ماند (Popa, 2011).

¹ Decision Support System

۳- **کلان داده‌ها و تفاوت نمایشی:** تفاوت ویژگی‌های فیزیولوژیکی نمونه‌ها در محیط‌های کنترل شده و آزمایشی، پیچیدگی پردازش متغیرها را افزایش می‌دهد و بنابراین، مجموعه داده‌های کنترل شده بزرگ برای بهبود دقت طبقه‌بندی فعلی مورد نیاز است. با این وجود، با کمک بینایی رایانه‌ای، الگوریتم‌هایی مانند ¹DBN (شبکه‌های باور عمیق) و ²CNN (شبکه عصبی Convolution)، کاربردهای امیدوارکننده‌ای برای پردازش مجموعه داده‌های پیچیده وجود دارد (Patrício and Rieder, 2018). توانایی یک سامانه برای اجرای دقیق وظایف، به دوره زمانی کوتاه در تصمیم‌گیری وابسته است؛ زیرا آنچه کشاورزان بیشتر در نظر دارند، حداقل تلاش با حداکثر دقت است (Eli-Chukwu, 2019). بنابراین مدیریت و تفسیر دقیق و سریع داده‌ها دو چالش اصلی هستند که برای فعال کردن برنامه‌ها باید مورد توجه قرار گیرند. سامانه باید بسیاری از داده‌های دریافتی را فیلتر کند. با این حال، باید به رویدادهای مهم یا غیرمنتظره پاسخ دهد. توسعه یک سامانه هوشمند کشاورزی مستلزم تلاش ترکیبی متخصصان بسیاری از زمینه‌های کشاورزی است و باید با همکاری تولیدکنندگانی که از آنها استفاده خواهند کرد، توسعه یابد.

۴- **امنیت و حریم خصوصی:** حمله سایبری سال ۲۰۲۱ به JBS (بزرگترین پردازشگر گوشت جهان) و حمله بدافزاری در همان سال به تعاونی NEW، که برای ۱۱ میلیون حیوان مزرعه در ایالات متحده خوراک غلات فراهم می‌کرد، خطرات احتمالی ناشی از معرفی فناوری‌های دیجیتال در زنجیره‌های تأمین محصولات کشاورزی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد (Rstechnica, 2021; Reuters, 2021). انتشار سریع ماشین‌های هوشمند در سامانه‌های چندجزئی و چندعاملی، مانند کشاورزی، ممکن است خطرات تصادفی را نیز تشدید کند. به عنوان مثال، اگر تک‌کشت‌ها (کشت یک ژنوتیپ از یک گونه گیاهی) توسط مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها بررسی شوند، یک خطای الگو یا سنسورهای کالیبره‌شده ضعیف ممکن است منجر به کوددهی بیش از حد و تخریب میکروبیوم خاک شود. خرابی‌های پیش‌بینی نشده سامانه زمانی رخ می‌دهد که فعل و انفعالات بین سامانه‌های دورگ انسان و ماشین، سریع‌تر از انسان قادر به پاسخگویی باشد (Rahwan et al., 2019).

خدمات مبتنی بر مکان در معرض حمله قرار دارند زیرا با استخراج و پیاده‌سازی رمزنگارها می‌توان به داده‌های ذخیره شده دسترسی نامحدود داشت. همین‌طور سرورهای ابری در برابر دست‌کاری داده‌ها آسیب‌پذیر هستند که می‌تواند در عملیات خودکار مزرعه تداخل ایجاد کند. در این راستا سیاست‌های امنیتی شامل الگوریتم‌های رمزنگاری، سیاست‌های کنترل جریان داده و ساختارهای احراز هویت لازم می‌باشند (Zha, 2020). نیاز به چارچوب‌های بهبود یافته برای شفافیت، حقوق مالکیت و نظارت بر داده‌ها در تمام مراحل زنجیره ارزش کشاورزی، الزامی است. پرداختن به مسائل مالکیت از طریق دموکراتیک کردن دسترسی به داده‌ها و استفاده از طریق مخازن منطبق با استانداردها، احتمالاً یکی از جنبه‌های اساسی این رویکرد است (Gold, 2021). در این زمینه، ابزارها باید از حقوق مالکیت کشاورزان محافظت کنند، اطمینان حاصل کنند که می‌توان به داده‌ها اعتماد کرد، نحوه استفاده از داده‌ها را تعیین کنند و داده‌کاوی مؤثر را امکان‌پذیر کنند (Majumdar et al., 2017).

تعاونی‌های داده، مدلی جدید و پاسخی بالقوه به مدیریت شفاف‌تر و دموکراتیک‌تر داده‌های کشاورزان است. دو نمونه در ایالات متحده شامل Ag Data Coalition (ADC) و Grower Information Services Cooperative (GiSC) می‌باشند. برخی از تعاونی‌های داده مانند ADC راه‌حل‌های امنی برای بانک داده‌ها ارائه می‌کنند که در آن کشاورزان می‌توانند داده‌های خود را ذخیره کنند و تصمیم بگیرند که با کدام آژانس‌ها یا نهادهای تحقیقاتی به اشتراک بگذارند. GiSC، "حوزه‌های داده" را با منابع داده مشترک و خدمات تحلیلی ارائه می‌کند تا بینش بهتری نسبت به شیوه‌های کشاورزی خود به هم‌تایان ارائه دهند. یکی از گزینه‌هایی که باید در نظر گرفته شود، ساختار صدور مجوز است که بین استفاده تجاری و غیرتجاری از داده‌ها تفاوت قائل می‌شود. جایگزین دیگر این است

¹ Deep Belief Network

² Convolutional Neural Network

که داده‌ها را فقط در میان گروه‌هایی که همگی از اشتراک‌گذاری سود می‌برند، به اشتراک بگذارند، مانند مالکان خرد در سامانه‌های چندکشتی. تعاونی‌های داده می‌توانند یک ساختار حاکمیتی برای بررسی گزینه‌های مختلف و تصمیم‌گیری‌هایی فراهم کنند که با منافع کشاورزان هماهنگ باشد (Tzachor et al., 2022).

۵- وابستگی به کیفیت داده‌ها: برای کارورزی و تجزیه و تحلیل، الگوریتم‌های هوش مصنوعی تا حد زیادی به داده‌های دقیق و با کیفیت بالا وابسته هستند. داده‌های بی‌کیفیت، ناقص و دارای انحراف هنگام استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند پیش‌بینی‌ها و قضاوت‌های غیر قابل اعتمادی را موجب شوند. موفقیت بهنژادی گیاهی مبتنی بر هوش مصنوعی به اطمینان از صحت و اطمینان به داده‌ها بستگی دارد (Khan et al., 2022).

۶- عدم تخصص در حوزه: برای اطمینان از اینکه عوامل و پارامترهای مناسبی در طول تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده است، سیستم‌های هوش مصنوعی نیازمند ورود و راهنمایی متخصصان موضوع مانند بهنژادگران گیاهی دارند. برون‌دادهای تولید شده توسط مدل‌های هوش مصنوعی ممکن است بدون داشتن دانش و درک لازم از حوزه بهنژادی گیاهی به درستی ارزیابی یا اجرا نشوند (Khan et al., 2022).

۷- تفسیرپذیری محدود: مدل‌های یادگیری عمیق (زیرمجموعه‌ای از الگوریتم‌های هوش مصنوعی) به دلیل ویژگی «جعبه سیاه» بودن که به محدودیت‌های تفسیرپذیری مکرر آن‌ها اشاره دارد، به خوبی شناخته شده‌اند. با اینکه آنها قادر به انجام پیش‌بینی‌های دقیق هستند ولی ممکن است درک علل و انگیزه‌های اساسی موجود در پس‌چنین پیش‌بینی‌هایی دشوار باشد. ممکن است بهنژادگران درک و اعتماد کامل به قضاوت‌های انجام شده توسط الگوریتم‌های هوش مصنوعی را به دلیل عدم تفسیرپذیری، دشوار بدانند.

۸- وابستگی بیش از حد به رویکردهای محاسباتی: ممکن است در اثر اتکای شدید به هوش مصنوعی و فناوری‌های رایانه ای، شیوه‌های دستی و عملی بهنژادی کاهش یابند. مشاهده مستقیم و کار با گیاهان در موقعیت‌های مختلف بخشی از روش‌های بهنژادی مرسوم است که می‌تواند اطلاعات روشنی را بدست دهد. این توانایی‌های عملی و دانش تجربی ممکن است در صورت استفاده زیاد از هوش مصنوعی از بین بروند.

۹- مسائل اخلاقی و قانونی: استفاده از هوش مصنوعی در بهنژادی گیاهی باعث بروز مسائل قانونی و اخلاقی می‌شود که می‌تواند با وجود مقررات سختگیرانه، مورد ادعا قرار گیرند. برای اطمینان از استفاده ایمن و اخلاقی از هوش مصنوعی در بهنژادی گیاهی، نگرانی در مورد حقوق مالکیت معنوی، مسائل مربوط به حریم خصوصی در به اشتراک گذاری داده‌های ژنتیکی، و هرگونه پیامد غیرمنتظره اصلاح ژنتیکی باید مورد توجه قرار گیرند.

۱۰- در دسترس بودن و هزینه: انتخاب فناوری‌های هوش مصنوعی و حفظ زیرساخت‌های محاسباتی موردنیاز، بخصوص برای برنامه‌های بهنژادی کوچکتر یا سازمان‌هایی با بودجه محدود، می‌تواند گران باشد. برخی از بهنژادگران ممکن است به دلیل هزینه‌های مربوط به جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های عظیم، ایجاد و آموزش مدل‌های هوش مصنوعی و به روز ماندن با استفاده از جدیدترین پیشرفت‌های هوش مصنوعی، اجرای این فناوری‌ها را از نظر مالی دشوار بدانند (Khan et al., 2022).

راهبردهای استفاده از هوش مصنوعی در علوم زراعی و بهنژادی گیاهی

در بهره‌گیری از هوش مصنوعی (AI) در کشاورزی و بهنژادی گیاهی، اتخاذ راهبردهای هوشمندانه و جامع برای تضمین بهره‌وری و توسعه پایدار بسیار حیاتی است. این راهبردها را می‌توان به چندین حوزه کلیدی تقسیم کرد:

بهینه‌سازی مدیریت منابع طبیعی: استفاده از AI برای مدیریت دقیق منابعی مانند آب، خاک و کود می‌تواند مصرف آنها را به حداقل برساند و در عین حال بهره‌وری را افزایش دهد. سیستم‌های هوش مصنوعی قادر به تجزیه و تحلیل شرایط محیطی و ارائه توصیه‌های دقیق برای آبیاری، تغذیه گیاهان و زمان مناسب برداشت هستند. این راهبرد می‌تواند هم به حفظ منابع کمک کند و هم به کاهش هزینه‌های کشاورزان.

افزایش دقت و کارایی در بهنژادی گیاهی: در بهنژادی گیاهی، AI می‌تواند فرایند انتخاب و تلاقی ژنوتیپ‌های مناسب را تسریع کند. یادگیری ماشینی به بهنژادگران کمک می‌کند تا ژن‌هایی را شناسایی کنند که مقاومت در برابر شرایط نامطلوب اقلیمی یا عملکرد بالا را فراهم می‌کنند. این روش می‌تواند تعداد سال‌های لازم برای تولید ارقام جدید مقاوم و پربازده را به‌طور چشمگیری کاهش دهد.

اتخاذ رویکرد کشاورزی دقیق: AI می‌تواند به‌طور مداوم داده‌های مزرعه، از جمله اطلاعات آب و هوایی، شرایط خاک، رشد گیاه و وقوع آفات را رصد کرده و از طریق کشاورزی دقیق به کشاورزان کمک کند تا تصمیمات بهتری در زمان واقعی بگیرند. این راهبرد می‌تواند به کاهش استفاده از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی کمک کرده و عملکرد کلی مزارع را بهبود بخشد.

پیش‌بینی و مدیریت ریسک: هوش مصنوعی از طریق تحلیل داده‌های گذشته و حال، می‌تواند الگوهای اقلیمی و تغییرات آب و هوایی را پیش‌بینی کرده و از این طریق ریسک‌های مرتبط با نوسانات جوی، شیوع بیماری‌ها و تنش‌های محیطی را کاهش دهد. این راهبرد به کشاورزان امکان می‌دهد تا از پیش آمادگی داشته و تصمیم‌گیری‌های موثرتری انجام دهند.

افزایش پایداری و کاهش اثرات زیست‌محیطی: AI در جهت پایداری کشاورزی با کاهش مصرف منابع، بهینه‌سازی استفاده از ورودی‌ها، و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند کمک شایانی کند. با این روش، هم کارایی اقتصادی و هم حفاظت از محیط‌زیست به عنوان راهبردهای کلیدی مد نظر قرار می‌گیرد.

آموزش و توانمندسازی کشاورزان: یکی از مهمترین راهبردها برای موفقیت AI در کشاورزی، آموزش کشاورزان در استفاده از این فناوری‌ها است. بدون آموزش مناسب و آگاهی از ظرفیت‌های AI، پذیرش این تکنولوژی‌ها در مناطق روستایی با چالش روبرو خواهد شد. برنامه‌های آموزشی و ایجاد دسترسی به زیرساخت‌های دیجیتال ضروری است تا کشاورزان بتوانند از هوش مصنوعی بهره‌برداری کنند.

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

در طول دهه‌ها، شیوه‌های سنتی کشاورزی با تغییرات چشمگیری مواجه شده است. افزایش جمعیت و کمبود زمین باعث شده است که انسان‌ها برای بقا به نوآوری و افزایش کارایی روی آورند. در حالی که در گذشته تمایل چندانی به پذیرش فناوری‌های جدید وجود نداشت، اکنون ضرورت سازگاری با این پیشرفت‌ها در صنعت اجتناب‌ناپذیر شده است. فناوری هوش مصنوعی در بخش‌های مختلف کشاورزی به افزایش بهره‌وری کمک می‌کند و با ارائه راه‌حل‌های هوشمندانه، چالش‌های متعددی را در این صنعت رفع می‌نماید. هوش مصنوعی به کشاورزان امکان می‌دهد تا به‌طور آنی از شرایط مزارع آگاه شوند و نیازهای مختلف مانند آبیاری، کوددهی و مبارزه با آفات را شناسایی کنند. این پیشرفت‌ها نه تنها کارایی را افزایش می‌دهند، بلکه به کاهش کار دستی و بهبود کیفیت محصولات کمک می‌کنند. مهم‌ترین جنبه پیاده‌سازی هوش مصنوعی در کشاورزی این است که فرایندها را بهبود می‌بخشد بدون اینکه کار کشاورزان را جایگزین کند.

دانش مصنوعی پتانسیل ایجاد یک تحول انقلابی در صنعت کشاورزی را دارد و می‌تواند به تغذیه جمعیت رو به رشد جهان کمک کند. با بهره‌گیری از قدرت داده‌ها، هوش مصنوعی می‌تواند سناریوها را تجزیه و تحلیل کرده، خطرات را پیش‌بینی و برای مقابله با بحران‌های احتمالی، مانند کمبود غذا، پیش از بروز آن‌ها اقدام کند. در نتیجه، این فناوری به رشد و توسعه کشورها نیز یاری می‌رساند، چرا که غذا اساسی‌ترین نیاز هر انسان است. آینده کشاورزی وابسته به پذیرش این راه‌حل‌های نوین شناختی خواهد بود. با این حال، اگر بخواهیم واقع‌بینانه با مشکلات روبه‌رو شویم، هنوز کشاورزی در مراحل ابتدایی استفاده از این فناوری‌ها قرار دارد. برنامه‌ها باید به گونه‌ای توسعه یابند که تغییرات محیطی مکرر را مدیریت کرده، تصمیم‌گیری‌های آنی را امکان‌پذیر سازند و داده‌ها را به طور کارآمد جمع‌آوری کنند. همچنین، این فناوری‌ها باید مقرون به صرفه باشند تا کشاورزان بیشتری بتوانند از آن‌ها بهره‌مند شوند. با این حال، تجربه تاریخی نشان داده است که تمرکز صرف بر افزایش تولید می‌تواند به تشدید نابرابری و تخریب محیط زیست منجر شود. بنابراین، برای جلوگیری از مشکلات مشابه فناوری‌های پیشین، هوش مصنوعی در کشاورزی نیازمند ارزیابی‌های جامع ریسک و دستورالعمل‌های مناسب است.

در مراحل جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها و توسعه و استقرار فناوری، باید اصول مسئولانه، مشارکتی و منطبق با چالش‌های محلی و جهانی رعایت شود. نادیده گرفتن این اصول ممکن است باعث ایجاد ناامنی در تغذیه، استثمار نیروی کار و کاهش منابع محیطی شود. به همین دلیل، رویکردی متعادل به نوآوری لازم است، به طوری که ارزیابی ریسک و رویه‌های تحقیق و توسعه به گونه‌ای انجام شود که نوآوری را در این سامانه حیاتی متوقف نکند. از جمله اقدامات کاهش ریسک می‌توان به همکاری با مردم‌شناسان روستایی، بوم‌شناسان و دانشمندان در طراحی فناوری، استفاده از چارچوب‌های نوآوری انسان‌محور و ایجاد تعاونی‌های داده برای شفافیت و حقوق مالکیت اشاره کرد. این نوآوری‌های دیجیتال می‌توانند علوم زراعی و به‌نژادی گیاهی را متحول کنند، به شرط آنکه کاربران و سیاست‌گذاران به درستی متقاعد شوند که فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در کشاورزی از پتانسیل قابل توجهی برخوردار هستند.

منابع:

1. Agro-Pages (2020, January). Artificial Intelligence in Agriculture in India. Retrieved from <http://news.agropages.com/News/NewsDetail---33761.htm>
2. Ahngar, T. A., Bahar, F. A., Singh, L., Bhat, M. A., Singh, P., Mahdi, S. S., Bhat, T. A., Rashid, Z., Lone, B. A., Raja, W., Saad A. A. and Ahmad. L. (2022). Artificial intelligence in agriculture, applications, benefits and challenges: A review. The Pharma Innovation Journal, 11(3S): 1407-1414.
3. Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. European journal of Operational research, 196(1), 1-20.
4. Ammulu, K. (2021). The Impact of Artificial Intelligence in Agriculture. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT), 4 (1): 157-161.
5. Anbarasan, V. and Jayalakshmi, v. (2022). Artificial Intelligence in Agriculture and its Application. INTERNATIONAL JOURNAL OF CREATIVE RESEARCH THOUGHTS – IJCRT, 10 (6): 533-537.
6. Arora, M., & Mangipudi, P. (2021). A computer vision-based method for classification of red meat quality after nitrosamine appendage. International Journal of Computational Intelligence and Applications, 20(01), 2150005.
7. Arvind, G., Athira, V. G., Haripriya, H., Rani, R. A. and Aravind, S. (2017). "Automated irrigation with advanced seed germination and pest control," in Proceedings of the 2017 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), pp. 64–67, Chennai, India, April 2017.

8. Awokuse, T. O., & Xie, R. (2015). Does agriculture really matter for economic growth in developing countries?. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, 63(1), 77-99.
9. Baker, D. N., Lambert, J. R., & McKinion, J. M. (1983). GOSSYM: A simulator of cotton crop growth and yield. South Carolina. Agricultural Experiment Station. Technical bulletin, 1089.
10. Ballela, K., Satyanvesh, D., Sampath, N. V. S. S. P., Varma, K. T. N., & Baruah, P. K. (2014, January). Agpest: An efficient rule-based expert system to prevent pest diseases of rice & wheat crops. In 2014 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO) (pp. 262-268). IEEE.
11. Bannerjee, G., Sarkar, U., Das, S., & Ghosh, I. (2018). Artificial Intelligence in Agriculture: A Literature Survey. *International Journal of Scientific Research in Computer Science Applications and Management Studies*, 7(3), 1-6.
12. BEA. (2018). Value Added by Industry as a Percentage of Gross Domestic Product, available at: <https://apps.bea.gov/iTable/iTable.cfm?ReqID=51&step=1#reqid=51&step=51&isuri=1&5114=a&5102=5>.
13. Ben Ayed, R., & Hanana, M. (2021). Artificial intelligence to improve the food and agriculture sector. *Journal of Food Quality*, 2021, 1-7.
14. BenAyed, R., & Hanana, M. (2021). Artificial intelligence to improve the food and agriculture sector. *Journal of Food Quality*, 2021, 1-7.
15. Ben Ayed, R., Ennouri, K., Ben Amar, F., Moreau, F., Triki, M. A., & Rebai, A. (2017). Bayesian and phylogenic approaches for studying relationships among table olive cultivars. *Biochemical genetics*, 55, 300-313.
16. Bhat, S. A., & Huang, N. F. (2021). Big data and ai revolution in precision agriculture: Survey and challenges. *Ieee Access*, 9, 110209-110222.
17. Cadavid, H., Garzón, W., Pérez, A., López, G., Mendivelso, C., & Ramírez, C. (2018, August). Towards a smart farming platform: from IoT-based crop sensing to data analytics. In *Colombian Conference on Computing* (pp. 237-251). Cham: Springer International Publishing.
18. Channe, H., Kothari, S., & Kadam, D. (2015). Multidisciplinary model for smart agriculture using internet-of-things (IoT), sensors, cloud-computing, mobile-computing & big-data analysis. *Int. J. Computer Technology & Applications*, 6(3), 374-382.
19. Chlingaryan, A., Sukkari, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and electronics in agriculture*, 151, 61-69.
20. Cortés, A.J.; López-Hernández, F. Harnessing crop wild diversity for climate change adaptation. *Genes* 2021 , 12 , 783.
21. Cortés, A.J.; López-Hernández, F.; Blair, M.W. Genome–environment associations, an innovative tool for studying heritable evolutionary adaptation in orphan crops and wild relatives. *Front. Genet.* 2022 , 13 , 910386.
22. Cyber-attack hits JBS meat works in Australia, North America. Reuters <https://www.reuters.com/technology/cyber-attack-hits-jbs-meat-works-australia-north-america-2021>
23. Dela Cruz, J. R., Baldovino, R. G., Bandala, A. A. and Dadios, E. P. (2017) .Water usage optimization of smart farm automated irrigation system using artificial neural network, in *Proceedings of the 2017 5th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT7)*, pp. 1–5, Melaka, Malaysia, May 2017.
24. Dharmaraj, V. and Vijayanand, C. (2018). Artificial Intelligence (AI) in Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(12); 2122-2128.
25. Dobrev, D. (2012). A Definition of Artificial Intelligence. *arXiv preprint arXiv:1210.1568*, 2012.

26. Dolgui, A., Tiwari, M. K., Sinjana, Y., Kumar, S. K., & Son, Y. J. (2018). Optimising integrated inventory policy for perishable items in a multi-stage supply chain. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 902-925.
27. Dutta, S., Rakshit, S. and Chatterjee, D. (2020). Use of Artificial Intelligence in Indian Agriculture. *Food and Scientific Reports*, 1 (4): 65-72.
28. Eli-Chukwu, N. C. (2019). Applications of artificial intelligence in agriculture: A review. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(4):4377-4383.
29. Elshorbagy, A., & Parasuraman, K. (2008). On the relevance of using artificial neural networks for estimating soil moisture content. *Journal of Hydrology*, 362(1-2), 1-18.
30. esculenta Crantz). *Plant Methods* 2020 , 16 , 87.
31. Fan, M., Shen, J., Yuan, L., Jiang, R., Chen, X., Davies, W. J., & Zhang, F. (2012). Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China. *Journal of experimental botany*, 63(1), 13-24.
32. Farah, J. S., Cavalcanti, R. N., Guimarães, J. T., Balthazar, C. F., Coimbra, P. T., Pimentel, T. C., ... & Cruz, A. G. (2021). Differential scanning calorimetry coupled with machine learning technique: An effective approach to determine the milk authenticity. *Food Control*, 121, 107585.
33. Fente, D. N. and Singh, D. K. (2018). "Weather forecasting using artificial neural network," in *Proceedings of the 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, Coimbatore, India, April 2018.
34. Futane, N. V. (2022). Role of AI in Agriculture. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 3 (11), 2570-2572.
35. Gangwar, P. (2023). Artificial Intelligence in Agriculture. *Justagriculture*, 3(8): 578-583.
36. Gaurav, V., Choudhary, S. Singh, A. and Agarwal, S. (2019). Autonomous crop irrigation system using artificial intelligence. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 8.
37. Goel, N., Kumar, Y., Kaur, S., Sharma, M., & Sharma, P. (2022). Machine learning-based remote monitoring and predictive analytics system for monitoring and livestock monitoring. In *Application of Machine Learning in Agriculture* (pp. 47-67). Academic Press.
38. Gold, E. R. (2021). The fall of the innovation empire and its possible rise through open science. *Research Policy*, 50(5), 104226.
39. Goralski, M. A., & Tan, T. K. (2020). Artificial intelligence and sustainable development. *The International Journal of Management Education*, 18(1), 100330.
40. Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*, 76, 1-10.
41. Khan, M. H. U., Wang, S., Wang, J., Ahmar, S., Saeed, S., Khan, S. U., Xu, X., Chen, H., Bhat, J. A., & Feng, X. (2022). Applications of Artificial Intelligence in Climate-Resilient Smart-Crop Breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19). <https://doi.org/10.3390/ijms231911156>
42. Kok, J. N., Boers, E. J., Kusters, W. A., Van der Putten, P., & Poel, M. (2009). Artificial intelligence: definition, trends, techniques, and cases. *Artificial intelligence*, 1(270-299), 51.
43. Kumar, A. and Vats, V. (2018) . Efficient crop yield prediction using machine learning algorithms. 5 (6), pp.2395-0072.
44. Kumar, R., Singh, M. P., Kumar, P., & Singh, J. P. (2015, May). Crop Selection Method to maximize crop yield rate using machine learning technique. In *2015 international conference on smart technologies and management for computing, communication, controls, energy and materials (ICSTM)* (pp. 138-145). IEEE.
45. Li, M., & Yost, R. S. (2000). Management-oriented modeling: optimizing nitrogen management with artificial intelligence. *Agricultural Systems*, 65(1), 1-27.

46. Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.
47. Liu, S. Y. (2020). Artificial Intelligence (AI) in Agriculture. Institute of Electrical and Electronics Engineers, ISSN: 1520-9202.
48. Loizou, E., Karelakis, C., Galanopoulos, K., & Mattas, K. (2019). The role of agriculture as a development tool for a regional economy. *Agricultural Systems*, 173, 482-490.
49. López, E. M., García, M., Schuhmacher, M., & Domingo, J. L. (2008). A fuzzy expert system for soil characterization. *Environment international*, 34(7), 950-958.
50. Lugo-Morin, D. R. (2020). Indigenous communities and their food systems: a contribution to the current debate. *Journal of Ethnic Foods*, 7(1), 1-10.
51. Ma, X., Wang, S., & Bai, Q. (2019). RETRACTED ARTICLE Coordination of production scheduling and vehicle routing problems for perishable food products. *International Journal of Internet Manufacturing and Services*, 6(1), 79-96.
52. Majeed, M. T., & Mazhar, M. (2019). Environmental degradation and output volatility: A global perspective. *Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences (PJCSS)*, 13(1), 180-208.
53. Majumdar, J., Naraseeyappa, S., & Ankalaki, S. (2017). Analysis of agriculture data using data mining techniques: application of big data. *Journal of Big data*, 4(1), 20.
54. McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. (2006). A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence, august 31, 1955. *AI magazine*, 27(4), 12-12.
55. McKinion, J.M., & Lemmon, H. E. (1985). Expert systems for agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 1(1), 31-4.
56. Millar, K. M. (2000). Respect for animal autonomy in bioethical analysis: the case of automatic milking systems (AMS). *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 12, 41-50.
57. Morellos, A., Pantazi, X. E., Moshou, D., Alexandridis, T., Whetton, R., Tziotzios, G., ... & Mouazen, A. M. (2016). Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 152, 104-116.
58. Munirah, M. Y., Rozlini, M. and Siti, Y. M. (2013). "An Expert System Development: Its Application on Diagnosing Oyster Mushroom Diseases". 13th International Conference on Control, Automation and Systems, Gwangju, South Korea, October 20-23, 2013.
59. Nahvi, B., Habibi, J., Mohammadi, K., Shamshirband, S., & Al Razgan, O. S. (2016). Using self-adaptive evolutionary algorithm to improve the performance of an extreme learning machine for estimating soil temperature. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 150-160.
60. Nearing, M. A., Xie, Y., Liu, B., & Ye, Y. (2017). Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(2), 77-84.
61. O'Brien, P., Kral-O'Brien, K., & Hatfield, J. L. (2021). Agronomic approach to understanding climate change and food security. *Agronomy Journal*, 113(6), 4616-4626.
62. Ortiz, M. P., Gutierrez, P. A., Pena, J. M., Sanchez, J. T., Granados, F. L. and Martinez, C. H. (2016). "Machine Learning Paradigms for Weed Mapping Via Unmanned Aerial Vehicles", Symposium Series on Computational Intelligence, Athens, Greece, December 6-9, 2016.
63. Palacios-Lopez, A., Christiaensen, L., & Kilic, T. (2017). How much of the labor in African agriculture is provided by women?. *Food policy*, 67, 52-63.
64. Patel, G. S., Rai, A., Das, N. N., & Singh, R. P. (Eds.). (2021). Smart agriculture: emerging pedagogies of deep learning, machine learning and internet of things. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1st edition.
65. Patrício, D. I., & Rieder, R. (2018). Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and electronics in agriculture*, 153, 69-81.

66. Pilarski, T., Happold, M., Pangels, H., Ollis, M., Fitzpatrick, K., & Stentz, A. (2002). The demeter system for automated harvesting. *Autonomous Robots*, 13, 9-20.
67. Popa, C. (2011). Adoption of Artificial Intelligence in Agriculture. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary*.
68. Rahwan, I., Cebrian, M., Obradovich, N., Bongard, J., Bonnefon, J. F., Breazeal, C., & Wellman, M. (2019). Machine behaviour. *Nature*, 568(7753), 477-486.
69. Raj, E. F. I., Appadurai, M., & Athiappan, K. (2022). Precision farming in modern agriculture. In *Smart Agriculture Automation Using Advanced Technologies: Data Analytics and Machine Learning, Cloud Architecture, Automation and IoT* (pp. 61-87). Singapore: Springer Singapore.
70. Rajeswari, N. (2023). Agriculture Field Using In Artificial Intelligence A Literature Survey. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 64-68.
71. Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., & Smith, J. (2017). Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio*, 46, 4-17.
72. Sadgrove, E. J., Falzon, G., Miron, D., & Lamb, D. W. (2018). Real-time object detection in agricultural/remote environments using the multiple-expert colour feature extreme learning machine (MEC-ELM). *Computers in Industry*, 98, 183-191.
73. Saggi, M. K., & Jain, S. (2019). Reference evapotranspiration estimation and modeling of the Punjab Northern India using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 387-398.
74. Sampath L., Venna S., Himakara Datta M., & Tushar A. M. 2023. "What Is Artificial Intelligence in Plant Breeding?" *Just Agriculture* 3(11): 352–85.
75. Saunders, M. E. (2018). Insect pollinators collect pollen from wind-pollinated plants: implications for pollination ecology and sustainable agriculture. *Insect conservation and diversity*, 11(1), 13-31.
76. Selvaraj, M. G., Valderrama, M., Guzman, D., Valencia, M., Ruiz, H., & Acharjee, A. (2020). Machine learning for high-throughput field phenotyping and image processing provides insight into the association of above and below-ground traits in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Plant Methods*, 16(87).
77. Singh, A., Shukla, N., & Mishra, N. (2018). Social media data analytics to improve supply chain management in food industries. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 114, 398-415.
78. Sinha, N, K., Kumar, J., Kumar, D., Mishra, R., Thakur, J. K., Shinoge, K. C., Somasundaram, J. and Mohanty, M. (2022). Application of Artificial Intelligence (AI) in Agriculture An Indian Perspective. *HARIT DHARA*, 5(2): 9-11.
79. Subeesh, A., & Mehta, C. R. (2021). Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 278-291.
80. Suchithra, M. S., & Pai, M. L. (2020). Improving the prediction accuracy of soil nutrient classification by optimizing extreme learning machine parameters. *Information processing in Agriculture*, 7(1), 72-82.
81. Tzachor, A., Devare, M., King, B., Avin, Sh. And hÉigeartaigh, S. Ó. (2022). Responsible artificial intelligence in agriculture requires systemic understanding of risks and externalities. *Nature Machine Intelligence*, 4, 104-109.
82. Vishnu, S., Gupta, J., & Subash, S. P. (2019). Social network structures among the livestock farmers vis a vis calcium supplement technology. *Information processing in agriculture*, 6(1), 170-182.
83. Warwick, K. (2013). *Artificial intelligence: the basics*. Routledge.
84. Weed Science Society of America, (2022). Facts About Weeds, available at: <http://wssa.net/wp-content/uploads/WSSA-Fact-SheetFinal.pdf>.
85. World Health Organization. (2020). The state of food security and nutrition in the world 2020: transforming food systems for affordable healthy diets (Vol. 2020). (FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, 2020).

86. Xu, Y.; Zhang, X.; Li, H.; Zheng, H.; Zhang, J.; Olsen, M.S.; Varshney, R.K.; Prasanna, B.M.; Qian, Q. Smart breeding driven by big data, artificial intelligence and integrated genomic-enviromic prediction. *Mol. Plant* 2022, in press. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.09.001>.
87. Yue, Q., Xu, X., Hillier, J., Cheng, K., & Pan, G. (2017). Mitigating greenhouse gas emissions in agriculture: From farm production to food consumption. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1011-1019.
88. Zha, J. (2020). Artificial Intelligence in Agriculture. *Journal of Physics: Conference Series*, 1-6.
89. Zhao, Z., Chow, T. L., Rees, H. W., Yang, Q., Xing, Z., & Meng, F. R. (2009). Predict soil texture distributions using an artificial neural network model. *Computers and electronics in agriculture*, 65(1), 36-48.