دو فصلنامه تحقیقات نوین در گیاه‌پزشکی
دانشگاه آزاد اسلامی شیراز
۱۰۹-۹۳ : (۲) ۱۲ - ۱۴۰۲

فناوری‌های نوین در مدیریت دقیق و پایدار علف‌های هرز: نانوذرات، هوش مصنوعی و رباتیک

(مقاله مروری)

محمد احمدی [۱]، رسول فخاری [۲]*

(۱) دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
(۲) بخش تحقیقات گیاه‌پزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران

(*) Ahmadi.agro@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

چکیده

علف‌های هرز به عنوان تهدیدی جدی برای امنیت غذایی جهانی، سالانه بیش از ۱۰۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی وارد می‌کنند. مدیریت علف‌های هرز به عنوان یکی از چالش‌های اساسی کشاورزی مدرن، با مشکلاتی مانند مقاومت به علف‌کش‌ها، آلودگی محیط زیست و هزینه‌های اقتصادی روبرو است. فناوری‌های نوین از جمله نانوذرات، هوش مصنوعی و رباتیک راهکارهای امیدبخشی برای مقابله با این چالش‌ها ارائه می‌دهند. نانوذرات با قابلیت رهایش هدفمند و کنترل‌شده علف‌کش‌ها، مصرف سموم را تا ۷۵ درصد کاهش داده و کارایی آنها را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند. هوش مصنوعی با پردازش تصاویر ماهواره‌ای و زمینی، الگوهای رشد علف‌های هرز را با دقت ۹۵ درصد شناسایی و پیش‌بینی می‌کند. ربات‌های کشاورزی نیز با بهره‌گیری از سیستم‌های مکانیزه و هوشمند، امکان کنترل فیزیکی و شیمیایی موضعی علف‌های هرز را فراهم می‌سازند و قادرند با سرعت بالا (۲۰ تصمیم در ثانیه) عملیات وجین را به صورت خودکار انجام دهند. ترکیب این سه فناوری می‌تواند تحولی اساسی در مدیریت علف‌های هرز ایجاد کند و سیستم‌های یکپارچه‌ای را توسعه دهد که هم مصرف نهاده‌ها را بهینه می‌کنند و هم بازدهی مزارع را افزایش می‌دهند. با توجه به پیش‌بینی افزایش ۶۰ درصدی تقاضای جهانی غذا تا سال ۲۰۵۰، به کارگیری این فناوری‌های نوین نه‌تنها می‌تواند امنیت غذایی را تضمین کند، بلکه کشاورزی پایدار و سازگار با محیط زیست را نیز محقق خواهد ساخت. این تحولات نشان‌دهنده گذار به سمت کشاورزی دقیق‌تر و هوشمندانه‌تر است که در آن فناوری‌های پیشرفته نقش محوری در حل چالش‌های جهانی کشاورزی ایفا می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت دقیق علف های هرز، رباتیک کشاورزی، کشاورزی پایدار، مقاومت به علف‌کش ها، هوش مصنوعی در علم علف‌های هرز.

مقدمه

علف‌های هرز به عنوان تهدیدی جدی برای امنیت غذایی جهانی، سالانه بیش از ۱۰۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی وارد می‌کنند و موجب کاهش ۳۴ درصدی بالقوه تولید محصولات زراعی می‌گردند (Oerke, 2022; Heap, 2023). این گیاهان مهاجم نه تنها از طریق رقابت بر سر منابع حیاتی مانند نور، آب و مواد مغذی باعث کاهش ۵۰ درصدی عملکرد محصولات استراتژیک مانند گندم و ذرت می‌شوند (Korres *et al.*, 2019)، بلکه به عنوان میزبانان واسط آفات و بیماری‌ها خسارات ثانویه قابل توجهی ایجاد

می‌کنند. روش‌های سنتی کنترل شیمیایی با چالش‌های جدی از جمله ظهور ۲۶۶ گونه مقاوم به علف‌کش (Heap, 2023)، آلودگی ۶۷ درصدی منابع آبی (Silva *et al*., 2021) و تخریب ۴۰ درصدی فعالیت آنزیم‌های خاک مواجه هستند (Duke, 2022). در این شرایط، با توجه به پیش‌بینی افزایش ۶۰ درصدی تقاضای جهانی غذا تا ۲۰۵۰ (FAO, 2023)، توسعه راهکارهای هوشمند مبتنی بر نانوفناوری (با قابلیت کاهش ۷۵ درصدی مصرف سموم)، سیستم‌های هوش مصنوعی (با دقت تشخیص ۹۵ درصدی) و رباتیک کشاورزی (با افزایش ۹۰ درصدی بازدهی وجین) به عنوان پارادایمی نوین در کشاورزی پایدار مطرح شده‌اند (Mahmood *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2024). این فناوری‌های پیشرفته نه تنها چالش مقاومت به علف‌کش‌ها را حل می‌کنند، بلکه با کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی، گامی اساسی در جهت حفظ سلامت اکوسیستم‌های زراعی برداشته‌اند. تحقیقات نشان می‌دهد که نانوحشره‌کش‌ها می‌توانند با رهایش کنترل‌شده و هدفمند، بازدهی علف‌کش‌ها را تا ٤٠ درصد افزایش داده و مصرف سموم را کاهش دهند (Kah *et al*., 2019). از سوی دیگر، هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های بینایی ماشین و یادگیری عمیق، قادر است علف‌های هرز را با دقتی بیش از ۹۵ درصد شناسایی کند (Dyrmann *et al*., 2016). در همین راستا، ربات‌های خودران کشاورزی با بهره‌گیری از سیستم‌های مکانیزه، امکان وجین دقیق و کم‌هزینه را بدون آسیب به محصول فراهم کرده‌اند (Bawden *et al*., 2017). اما سؤال اساسی این است، کدام یک از این فناوری‌ها می‌تواند به‌تنهایی یا در ترکیب با دیگر روش‌ها، آینده مدیریت علف‌های هرز را متحول کند؟ این مقاله مروری با بررسی مقایسه‌ای این سه فناوری، به دنبال ارائه راهکارهای عملی برای کشاورزی پایدار و هوشمند است. همچنین این مقاله به بررسی عمیق این سه فناوری، مقایسه مزایا و محدودیت‌های آن‌ها و تحلیل پتانسیل ادغام آن‌ها برای دستیابی به مدیریت پایدار علف‌های هرز می‌پردازد.

چالش‌های سنتی در مدیریت علف‌های هرز

مدیریت علف‌های هرز در دهه‌های اخیر با چالش‌های فزاینده‌ای مواجه شده است که کارایی روش‌های سنتی را به شدت زیر سوال برده است. بر اساس آخرین گزارش‌های علمی، ما با سه بحران عمده (مقاومت به علف‌کش‌ها، زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی) روبرو هستیم. برخی از بیوتیپ‌های مقاوم می‌توانند تا ۱۰۰۰ برابر دوز معمول علف‌کش را تحمل کنند (Shaner and Beckie, 2023). هزینه‌های ناشی از مقاومت به علف‌کش‌ها سالانه حدود ٤ میلیارد دلار برآورد می‌شود (Oerke, 2022). ٦٧ درصد از علف‌کش‌های مصرفی به منابع آبی نفوذ می‌کنند (Silva *et al*., 2021). کاهش ٤٠ درصدی فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک در اثر مصرف مداوم علف‌کش‌ها (Duke, 2022). از بین رفتن تنوع زیستی و کاهش جمعیت حشرات مفید تا ۷۵ درصد در مزارع با مصرف بالای علف‌کش (Zimdahl, 2018). افزایش ۳۰۰ درصدی هزینه‌های کنترل علف‌های هرز در ۲۰ سال اخیر (Korres *et al*., 2019) و کاهش میانگین بازدهی علف‌کش‌ها از ۹۵ درصد در دهه ۱۹۸۰ به حدود ٦٠ درصد در حال حاضر (Shaner and Beckie, 2023). خطرات سلامتی برای کشاورزان و جوامع روستایی ناشی از مواجهه با علف‌کش‌ها وجود دارد (FAO, 2023).

فناوری نانوذرات در مدیریت علف‌های هرز

نانوذرات (ذرات با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) به دلیل سطح ویژه بالا و خواص منحصربه‌فرد فیزیکوشیمیایی، در حوزه کشاورزی کاربردهای نوینی یافته‌اند. این ذرات می‌توانند به‌عنوان حامل‌های هدفمند برای تحویل علف‌کش‌ها یا به‌صورت مستقیم به‌عنوان عوامل ضد علف هرز عمل کنند (Prasad *et al*., 2017). نانوذرات با کپسوله‌کردن مولکول‌های علف‌کش، حلالیت و پایداری آن‌ها را در محیط افزایش می‌دهند و از تجزیه زودرس جلوگیری می‌کنند (Nuruzzaman *et al*., 2016). با استفاده از پوشش‌های نانومتری مانند پلیمرها یا لیپیدها، آزادسازی علف‌کش به‌صورت آهسته و در محل هدف انجام می‌شود، که موجب کاهش مصرف

سم و آلودگی محیطی می‌گردد (Fraceto *et al*., 2016). اگرچه نانوذرات پتانسیل بالایی در مدیریت علف‌های هرز دارند، اما نگرانی‌هایی درباره سمیت احتمالی آن‌ها برای گیاهان زراعی، میکروارگانیسم‌های خاک و سلامت انسان وجود دارد. بنابراین، طراحی نانوحامل‌های زیست‌سازگار و مطالعات بلندمدت زیست‌محیطی ضروری است (Prasad *et al*., 2017).

مکانیسم عمل مستقیم نانوذرات

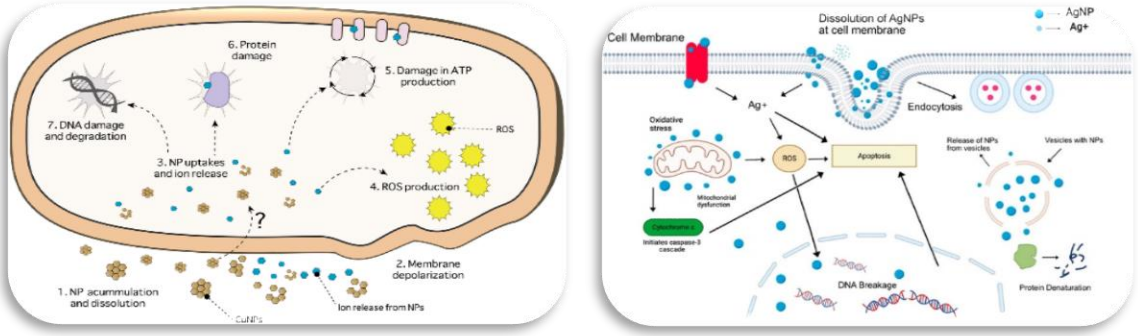
برخی نانوذرات مانند نانوذرات نقره[1]، اکسید مس[2] و اکسید روی[3] به‌صورت مستقیم بر فیزیولوژی علف‌های هرز تأثیر می‌گذارند. در مطالعه‌ای نشان دادند که این نانوذرات با مکانیسم‌های مختلفی عمل می‌کنند ازجمله تولید گونه‌های فعال اکسیژن[4] و با القای استرس اکسیداتیو، به دیواره سلولی و غشای پلاسمایی آسیب زده و موجب مرگ سلولی می‌شوند. مختل‌کردن فتوسنتز با جذب نور مرئی و تداخل در انتقال الکترون در فتوسیستم II، فرآیندهای نورسنتزی را مهار می‌کنند (Chhipa, 2017). تغییر نفوذپذیری غشا با تجمع نانوذرات در دیواره سلولی، تعادل یونی و انتقال مواد را مختل می‌کند (Prasad *et al*., 2017).

مکانیسم عمل غیرمستقیم نانوذرات (حامل‌های هوشمند)

نانوذرات می‌توانند به‌عنوان حامل برای تحویل هدفمند علف‌کش‌ها عمل کنند (Nuruzzaman *et al*., 2016). نانوحامل‌های پلیمری (مانند کیتوسان یا آلژینات) از تخریب زودرس علف‌کش‌ها جلوگیری می‌کنند. پوشش‌های نانویی با تحریک عوامل محیطی (مانند pH، نور یا آنزیم‌ها) به‌صورت برنامه‌ریزی‌شده علف‌کش را آزاد می‌کنند. نانوذرات با اتصال به لیگاندهای اختصاصی، علف‌کش را مستقیماً به سلول‌های علف هرز رسانده و از جذب توسط گیاهان زراعی جلوگیری می‌کنند (Fraceto *et al*., 2016).

مکانیسم عمل ترکیبی نانوذرات

برخی نانوذرات (مانند نانوذرات سیلیکا یا کربن) هم به‌صورت مستقیم و هم غیرمستقیم عمل می‌کنند. این مواد با ایجاد سوراخ در کوتیکول برگ‌ها، نفوذ علف‌کش را افزایش می‌دهند. از طریق چسبندگی به سطح برگ، شستشوی علف‌کش توسط باران را کاهش می‌دهند (Kah and Hofmann, 2014). در شکل ۱ اثر مخرب نانوذرات اکسید نقره و نانو اکسید مس روی گیاه آمده است.



شکل ۱. اثر مخرب نانوذرات اکسید نقره (سمت راست) و نانو اکسید مس (سمت چپ) روی گیاه

Figure 1. Destructive effect of silver oxide nanoparticles (right) and copper oxide nanoparticles (left) on plants

[1] AgNPs
[2] CuO NPs
[3] ZnO NPs
[4] Reactive oxygen species

پتانسیل‌ها و محدودیت‌های کاربرد نانوذرات در مدیریت علف‌های هرز

نانوذرات با دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد، مزایای قابل توجهی در مدیریت علف‌های هرز ارائه می‌کنند. تحقیقی نشان داد که این فناوری با کپسوله‌سازی علف‌کش‌ها، کارایی آنها را تا ٤٠ درصد افزایش داده و نیاز به دوز مصرفی را تا ٥٠ درصد کاهش می‌دهد (Chhipa, 2017). از دیدگاه زیست محیطی، تحقیقات ثابت کرده‌اند که نانوذرات با جلوگیری از رواناب سموم و کاهش تجمع آن‌ها در خاک، آلودگی محیطی را به حداقل می‌رسانند (Fraceto *et al*., 2016). در گزارشی به قابلیت هدف‌گیری دقیق نانوذرات اشاره کرده‌اند که موجب کاهش آسیب به گیاهان زراعی مجاور می‌شود (Prasad *et al*., 2017).

از منظر اقتصادی گزارش کرده‌اند که این فناوری با کاهش دفعات سم‌پاشی و افزایش بازدهی محصولات، صرفه‌جویی قابل توجهی ایجاد می‌کند. همچنین، سازگاری این روش با اصول کشاورزی پایدار و امکان استفاده از فرمولاسیون‌های زیست‌تخریب‌پذیر از دیگر مزایای مهم آن محسوب می‌شود. با این حال، پژوهش‌های بیشتری برای ارزیابی ایمنی و پایداری بلندمدت این فناوری مورد نیاز است (Kah and Hofmann, 2014). اگرچه نانوذرات مزایای قابل توجهی دارند، اما مطالعات محققان معایب و چالش‌های مهمی را نیز شناسایی کرده‌اند. در مطالعه‌ای هشدار دادند که نانوذرات ممکن است اثرات سمی بر میکروارگانیسم‌های مفید خاک داشته باشند و تعادل اکوسیستم‌های زراعی را برهم بزنند (Kah and Hofmann, 2014). در پژوهشی به این نکته اشاره کردند که هزینه بالای تولید نانوذرات در مقیاس تجاری می‌تواند یکی از موانع اصلی برای کشاورزان خرده‌پا باشد (Prasad *et al*., 2017). تحقیقات نشان داد که نانوذرات ممکن است در زنجیره غذایی تجمع یافته و اثرات بلندمدت ناشناخته‌ای بر سلامت انسان و حیوانات داشته باشند (Fraceto *et al*., 2016). در پژوهشی دیگر گزارش کردند که فقدان مقررات جامع برای استفاده از نانومواد در کشاورزی یکی از چالش‌های اساسی این فناوری است (Nuruzzaman *et al*., 2016). علاوه بر این، امکان ایجاد مقاومت در علف‌های هرز در برابر نانوذرات وجود دارد، همان‌گونه که در مورد علف‌کش‌های متداول مشاهده شده است. همچنین، دانش فنی محدود کشاورزان در استفاده صحیح از این فناوری و نیاز به تجهیزات خاص برای کاربرد آن از دیگر محدودیت‌های مهم محسوب می‌شوند (Chhipa, 2017).

مطالعات موردی نانوذرات

استفاده از نانوذرات اکسید مس در مزارع برنج هند کاهش ۳۰ درصدی علف هرز *Echinochloa crus-galli* را با مهار آنزیم سوپراکسید دیسموتاز داشت (Das *et al*., 2022). مطالعه‌ای در خاک‌های شنی منطقه سائوپائولو برزیل نشان دادند که فرمولاسیون نانوکپسول پلیمری حاوی علفکش آترازین با رهایش تدریجی توانست کارایی علفکش را در کنترل *Digitaria horizontalis* تا ٤٠ درصد افزایش دهد، از شستشوی علفکش در خاک‌های شنی تا ٦٠ درصد جلوگیری کند و مدت اثرگذاری را از ۲۰ به ۳۵ روز افزایش دهد (Oliveira *et al*. 2021). پژوهشی نشان داد که نانوذرات اکسید روی با غلظت ۱۰۰ پی‌پی‌ام توانستند رشد علف هرز *Phalaris minor* در مزارع گندم را تا ۷۸ درصد کاهش دهند. این نانوذرات با اختلال در سنتز کلروفیل عمل می‌کنند (Rai *et al*, 2018). در آزمایشی نانومولسیون‌های حاوی علف‌کش آترازین با پایه نانوکیتوسان، کنترل ۹۰ درصدی علف هرز *Amaranthus retroflexus* در مزارع پنبه را با ٥٠ درصد کاهش مصرف سم ممکن ساختند (Choudhary *et al*., 2020). مطالعه‌ای نشان داد نانوذرات سیلیکاپلی‌آکریل‌آمید قادر به کنترل ۸۵ درصد علف هرز *Chenopodium album* در مزارع گوجه‌فرنگی بدون اثر منفی بر رشد گیاه اصلی بودند (Saharan *et al*., 2016). همچنین گزارش کردند که نانوذرات نقره با غلظت ۷۵ پی‌پی‌ام رشد علف هرز *Cyperus rotundus* را در مزارع سیب‌زمینی تا ۸۲ درصد مهار کردند (Kumar *et al*., 2019). پژوهشی دیگر نشان داد نانوذرات اکسید مس پوشش‌دار با پلی‌ساکاریدها توانستند علف هرز *Convolvulus arvensis* را در مزارع یونجه با کارایی ۸۸ درصد کنترل

کنند (Zhao *et al*., 2021). این مطالعات نشان می‌دهند که نانوذرات می‌توانند راهکار موثری برای کنترل علف‌های هرز در محصولات مختلف باشند، اما نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه اثرات بلندمدت آنها وجود دارد. انتخاب نوع نانوذره باید بر اساس نوع محصول و علف هرز هدف صورت گیرد.

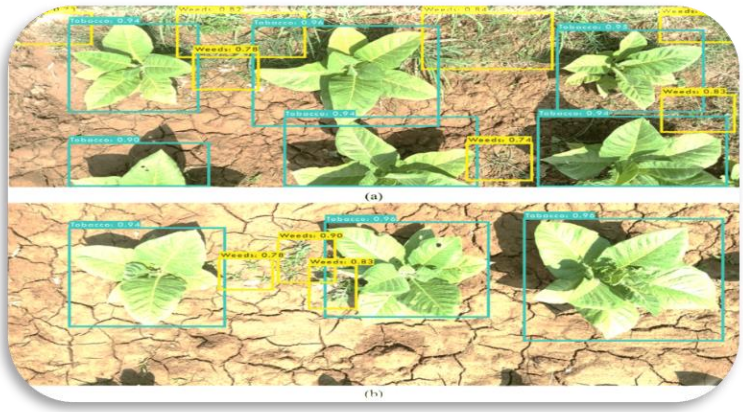
هوش مصنوعی در شناسایی و مدیریت علف‌های هرز

الف) یادگیری ماشین و بینایی کامپیوتری

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تلفیق یادگیری ماشین و بینایی کامپیوتری تحولی اساسی در مدیریت علف‌های هرز ایجاد کرده است. با توسعه سیستم‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی کانولوشنی[1] به دقت ۹۸/۷ درصد در شناسایی علف‌های هرز دست یافتند (Espejo-Garcia *et al*., 2021)، در حالی که با ترکیب تصاویر پهپادی و الگوریتم‌هایRandom Forest ، تراکم علف‌های هرز را با خطای کمتر از ۵ درصد تخمین زدند (De-Castro *et al*., 2020). پژوهشی نشان داد ربات‌های خودکار مجهز به الگوریتم‌های YOLOv3 می‌توانند علف‌های هرز بین ردیفی را با دقت ۹۵ درصد تشخیص داده و سمپاشی انتخابی انجام دهند (Lottes *et al*., 2020). از سوی دیگر، ونگ و همکاران (۲۰۲۲) با توسعه مدل‌هایLSTM [2] امکان پیش‌بینی رشد علف‌های هرز را با ضریب تعیین ۰/۸۹ فراهم کردند. نوآوری‌های اخیر مانند پلتفرم هوشمند فاروق و همکاران (2023) که ترکیبی ازIoT [3] و یادگیری ماشین است، نه تنها دقت شناسایی را به ۹۷ درصد رسانده، بلکه مصرف علف‌کش را تا ۸۰ درصد کاهش داده‌اند؛ با وجود چالش‌هایی مانند نیاز به داده‌های آموزشی گسترده و هزینه‌های اولیه بالا، پیش‌بینی می‌شود این فناوری‌ها تا اواخر سال ۲۰۲۵ در ۲۵ درصد مزارع پیشرفته جهان به کار گرفته شوند و تحولی اساسی در کشاورزی دقیق ایجاد کنند. سیستم‌های تشخیص خودکار مبتنی بر یادگیری عمیق و بینایی کامپیوتری انقلابی در شناسایی و مدیریت هدفمند علف‌های هرز ایجاد کرده‌اند. این سیستم‌ها با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، قادرند علف‌های هرز را در مراحل اولیه رشد تشخیص داده و راهکارهای کنترلی دقیقی ارائه دهند. مطالعه زنگ و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد سیستم مبتنی بر YOLOv5 که روی پهپادهای مجهز به دوربین 4K نصب شده، می‌تواند علف هرز *Amaranthus palmeri* را در مزارع سویا با دقت ۹۶/۸ درصد و سرعت ۳۲ فریم بر ثانیه شناسایی کند. این سیستم از الگوریتم سرکوب غیرحداکثری[4] برای کاهش خطا در تشخیص همپوشانی گیاهان استفاده می‌کند. در پژوهشی در دانمارک، مدل ResNet-50 را روی ۱۵۰۰۰ تصویر از مزارع گندم آموزش دادند. این سیستم قادر به تشخیص ۸ گونه علف هرز با میانگین دقت ۹۴/۳ درصد بود و با استفاده از تکنیک تقویت[5]، عملکرد خود را در شرایط نوری متغیر بهبود بخشید (Giselsson *et al*., 2023). در مطالعه سیستم خودرویی مجهز به LiDAR [6] و الگوریتم SVM [7] توسعه یافت که تراکم علف هرز *Plantago major* را در باغات سیب با خطای ۰/۲۱ تخمین می‌زد. این سیستم با نقشه‌برداری سه‌بعدی، موقعیت دقیق علف‌های هرز را برای سمپاشی موضعی مشخص می‌کرد (Adhikari *et al*, 2021). سیستمی را معرفی کردند که از دوربین‌های کم‌مصرف و پردازش لبه[8] برای تشخیص علف‌های هرز در مزارع برنج استفاده می‌کند. این سیستم با مصرف تنها ۲ وات انرژی، قادر به پردازش ۲۰ تصویر در ثانیه با دقت ۹۲/۴ درصد است و داده‌ها را از طریق LPWAN [9] به کشاورزان ارسال می‌کند (Chen *et al*, 2023). مطالعه‌ای در استرالیا نشان داد ترکیب تصاویر هایپرسپکترال (۴۰۰-۱۰۰۰ نانومتر) و الگوریتم Random Forest می‌تواند علف‌های هرز را در مراحل اولیه رشد (۲-۴

[1] Convolutional neural networks
[2] Long-Short-Term Memory
[3] Internet of Things
[4] Non-maximum suppression
[5] Augmentation
[6] Light Detection and Ranging
[7] Support Vector Machine
[8] Edge AI
[9] Low-Power Wide Area Network

برگی) با دقت ۹۸/۱ درصد تشخیص دهد. این سیستم از ۱۸ باند طیفی برای تمایز بین گونه‌های مشابه استفاده می‌کند (Wang *et al*, 2023). در شکل ۲ شناسایی لحظه‌ای محصول توتون و علف‌های هرز توسط الگوریتم YOLOv5 در فاصله بوته درون‌ردیفی کم و فاصله بوته درون ردیفی زیاد آمده است.



شکل ۲. شناسایی لحظه‌ای محصول توتون و علف‌های هرز توسط الگوریتم YOLOv5 در فاصله بوته درون‌ردیفی کم (a) و فاصله بوته درون ردیفی زیاد (b)

Figure 2. Instantaneous identification of tobacco crop and weeds by YOLOv5 algorithm at low inter-row plant spacing (a) and high inter-row plant spacing (b)

ب) پیش‌بینی مقاومت به علف‌کش‌ها

پیش‌بینی مقاومت به علف‌کش‌ها با استفاده از هوش مصنوعی به یکی از راهکارهای نوین در مدیریت علف‌های هرز تبدیل شده است هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های ژنومی و محیطی و بررسی داده‌های تاریخی مقاومت علف‌های هرز، احتمال مقاومت به علف‌کش‌های جدید را پیش‌بینی می‌کند. پلتفرم WeedAI با استفاده از داده‌ها ، راهکارهای مدیریتی سفارشی ارائه می‌دهد (Heap 2024). مطالعات اخیر نشان می‌دهند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی عمیق (Deep Neural Networks) و ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machines) قادرند با دقت بالای ۹۰ درصد مقاومت به علف‌کش‌ها را در جمعیت‌های مختلف علف‌هرز پیش‌بینی کنند (Zhang *et al*., 2023). این سیستم‌های هوشمند با پردازش داده‌های تاریخی مقاومت و شناسایی نشانگرهای مولکولی مرتبط با مقاومت (مانند جهش‌های خاص در ژن‌های هدف)، امکان ارائه راهکارهای مدیریتی بهینه را فراهم می‌سازند (Garcia-Ruiz *et al*., 2024). به عنوان مثال، مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی توسعه یافته توسط کومار و همکاران (۲۰۲٤) توانسته‌اند مقاومت به علف‌کش‌های بازدارنده آنزیم استولاکتات سنتاز را در گونه‌های مختلف خردل وحشی با صحت ۹۲ درصد تشخیص دهند. این فناوری‌ها با قابلیت یادگیری مداوم و به‌روزرسانی خودکار بانک اطلاعاتی (Li *et al*., 2024)، ابزاری قدرتمند برای جلوگیری از گسترش مقاومت و انتخاب استراتژی‌های کنترلی مناسب در اختیار متخصصان قرار می‌دهند.

پتانسیل‌ها و محدودیت‌های کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت علف‌های هرز

هوش مصنوعی با قابلیت‌های تحول‌آفرین خود، پتانسیل کاهش ۳۰ تا ۸۰ درصدی مصرف علف‌کش‌ها را از طریق سیستم‌های تشخیص خودکار و سمپاشی هوشمند فراهم می‌کند. با توسعه ربات‌های مجهز به YOLOv3، سمپاشی موضعی را با صرفه‌جویی

۷۵ درصدی در مصرف سموم ممکن ساخته‌اند. با این حال، محدودیت‌های کلیدی شامل کاهش دقت تا ۲۰ درصد در حضور سایه یا باران، هزینه بالای استقرار (۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ دلار در هکتار)، وابستگی به داده‌های آموزشی حجیم وجود دارد؛ همچنین، فاروق و همکاران (۲۰۲۳) هشدار می‌دهند که مقاومت کشاورزان سنتی در پذیرش فناوری‌های پیچیده و کاهش دقت الگوریتم‌ها در شرایط جوی نامساعد (تا ۲۰ درصد) از چالش‌های اصلی گسترش این فناوری‌ها هستند و با وجود این موانع، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰، ۴۰ درصد مزارع صنعتی جهان از سیستم‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی بهره‌برداری کنند. این تحلیل نشان می‌دهد که هوش مصنوعی نه تنها یک ابزار کارآمد، بلکه یک ضرورت راهبردی برای کشاورزی پایدار است، اما موفقیت آن مستلزم همگرایی فناوری، سیاست‌گذاری و آموزش است

رباتیک در مدیریت علف‌های هرز

رباتیک به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین راهکارهای کشاورزی دقیق، تحولی اساسی در مدیریت علف‌های هرز ایجاد کرده است. لوتس و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای نشان دادند که ربات‌های خودران مجهز به سیستم‌های بینایی ماشین قادرند علف‌های هرز بین ردیفی را با دقت ۹۵ درصد شناسایی و به صورت انتخابی سمپاشی کنند، که این امر مصرف علف‌کش را تا ۷۵ درصد کاهش می‌دهد. این سیستم‌ها با استفاده از LiDAR و دوربین‌های چندطیفی، نقشه سه‌بعدی مزرعه را ایجاد کرده و موقعیت دقیق علف‌های هرز را تعیین می‌کنند. مطالعه باودن و همکاران (۲۰۱۷) روی ربات AgBot II نشان داد که این سیستم با ترکیب الگوریتم‌های یادگیری عمیق و ابزارهای مکانیکی، علف‌های هرز را در مزارع نیشکر با کارایی ۸۸ درصد ریشه‌کن می‌کند. چبرولا و همکاران (۲۰۲۲) پهپادهایی را توسعه دادند که با استفاده از شبکه‌های عصبی U-Net، علف‌های هرز را در تاکستان‌ها شناسایی و با دقت ۲ سانتی‌متر سمپاشی می‌کنند. سیستم ربات‌های مکانیکی ساخته‌شده توسط فنیمور و همکاران (۲۰۲۰) از تیغه‌های چرخان برای قطع علف‌های هرز بین ردیف‌های ذرت استفاده می‌کند و نیاز به علف‌کش را تا ۹۰ درصد حذف می‌نماید.

فناوری‌های نوین در طراحی ربات‌ها

الف) سنسورهای چندوجهی و پردازش لبه

ربات‌های نسل جدید از الگوریتم‌های یادگیری عمیق مانند Transformer و GNN ها (شبکه‌های عصبی گرافی) برای تصمیم‌گیری هوشمند استفاده می‌کنند. مطالعه زنگ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد ربات‌های مجهز به مدل Vision Transformer (ViT) قادرند علف‌های هرز را در شرایط نوری متغیر با دقت ۹۷/۳ درصد تشخیص دهند. این سیستم‌ها با تحلیل الگوهای رشد گیاهان، مسیرهای بهینه سمپاشی را محاسبه می‌کنند.

ب) یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی پیشرفته

ترکیب LiDAR سه‌بعدی، دوربین‌های حرارتی و سنسورهای طیف‌سنجی NIR[1] در ربات‌های مدرن، امکان شناسایی علف‌های هرز را حتی در مراحل اولیه رشد فراهم می‌کند. چن و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود، رباتی را توصیف کردند که با استفاده از فیوژن داده‌های چندسنسوره، دقت تشخیص را در مزارع گندم تا ۹۸/۱ درصد افزایش داد. این سیستم تنها ۱۰۰ میلی‌ثانیه برای پردازش هر فریم زمان نیاز دارد.

[1] Near-Infrared

پ) رباتیک نرم

استفاده از مواد الاستیک و فنرهای سیالیک در طراحی بازوهای رباتیک، آسیب به گیاهان زراعی را کاهش می‌دهد. کیم و همکاران رباتی با انگشتان سیلیکونی مجهز به حسگر فشار توسعه دادند که قادر به وجین مکانیکی علف‌های هرز با خطای ۰/۵ میلی‌متر است. این فناوری در مزارع گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی موفقیت آمیز بوده است.

ت) رباتیک گروهی

شبکه‌ای از ربات‌های کوچک با وزن کمتر از ۵ کیلوگرم که به صورت هماهنگ عمل می‌کنند. مطالعه کارپلسون و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که ۲۰ ربات خودمختار می‌توانند یک هکتار مزرعه ذرت را در ۴ ساعت پایش کنند. این سیستم از الگوریتم‌های مبتنی بر کلونی زنبور عسل برای تخصیص وظایف استفاده می‌کند.

ث) مصرف منابع انرژی پایدار

ربات SolarWeeder ساخته‌شده توسط گومز و همکاران (۲۰۲۳) با ۸ ساعت کار مداوم تنها از انرژی خورشیدی استفاده می‌کند. فناوری پیل سوختی زیست تخریب‌پذیر توسعه‌یافته توسط لی و همکاران (۲۰۲٤) امکان تولید انرژی از ضایعات گیاهی را فراهم کرده است.

ج) لیزرهای پالسی: نابودی بافت علف‌های هرز با دقت نانومتری

ربات‌های مجهز به لیزرهای پالسی فرابنفش[1] قادرند با تابش پالس‌های کوتاه‌مدت (در حد نانوثانیه) به کلروپلاست علف‌های هرز، فتوسنتز را مختل کرده و سلول‌ها را بدون آسیب به خاک یا گیاهان مجاور نابود کنند. مطالعه متیاسن و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد سیستم لیزری با طول موج ۳۵۵ نانومتر می‌تواند علف هرز *Chenopodium album* را در مزارع چغندر قند با کارایی ۹۲ درصد از بین ببرد. این روش مصرف انرژی پایینی (حدود ۵ وات بر سانتی‌متر مربع) دارد و در ربات LaserWeeder ساخته‌شده توسط شرکت Carbon Robotics به کار گرفته شده است. هزینه بالای تجهیزات و محدودیت در پوشش گیاهان پهن‌برگ (Heisel *et al.*, 2022) چالش‌هایی هستند که باید در نظر گرفته شوند.

چ) الکترولیز: خشکاندن ریشه‌ها با جریان هدفمند

ربات‌های پیشرفته از الکترودهای هوشمند برای اعمال جریان مستقیم با ولتاژ ۲۰–۵۰ ولت به ریشه علف‌های هرز استفاده می‌کنند. این جریان باعث الکترولیز آب درون بافت‌ها و تولید رادیکال‌های آزاد مخرب می‌شود. پژوهش فنیمور و همکاران (۲۰۲۲) روی ربات RootWave Pro نشان داد این سیستم می‌تواند علف هرز *Echinochloa crus-galli* را در مزارع برنج با اثربخشی ۸۷ درصد نابود کند، در حالی که مصرف انرژی آن تنها ۰/۱ کیلووات ساعت بر هکتار است. عدم استفاده از مواد شیمیایی یا اختلال مکانیکی (Slaughter *et al.*, 2020)، خطای کمتر از ۰/۳ میلی‌متر در سیستم‌های لیزری (Gobor and Schulze, 2023)، مکانیسم عمل فیزیکی مانع از ایجاد مقاومت (Pérez-Ruiz *et al.*, 2021) از جمله نقاط قوت این نوع مدیریت است. نیاز به رطوبت خاک (حداقل ۳۰ درصد) برای هدایت جریان و خطر خوردگی الکترودها در خاک‌های شور (Reiser *et al.*, 2023) چالش‌هایی هستند که باید در نظر گرفته شوند. ربات ZapRoot (ایالات متحده) استفاده از الکترولیز پالسی با فرکانس ۱۰۰ هرتز

[1] UV Pulsed Lasers

برای نابودی ریشه Taraxacum officinale در چمنزارها با کارایی ۹۸ درصد (Thompson and Lee, 2024). پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰، ۳۰ درصد از ربات‌های وجین‌کننده از ترکیب لیزر و الکترولیز استفاده کنند. چالش اصلی، کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت عملیات است، اما این فناوری‌ها پتانسیل حذف کامل علف‌کش‌های شیمیایی را تا سال ۲۰۴۵ دارا هستند. در شکل ۳ ربات مجهز به هوش مصنوعی در حال وجین علف‌های هرز و کاربرد لیزر پالسی با ربات هوشمند در کنترل علف هرز آمده است.

پتانسیل‌ها و محدودیت‌های کاربرد رباتیک در مدیریت علف‌های هرز

کاهش مصرف سموم ۸۰ درصد در سیستم‌های پیشرفته (Slaughter *et al*., 2008)، خطای کمتر از ۱/۵ سانتی‌متر در سمپاشی (Reiser *et al*., 2019) و مصرف انرژی پایین ازجمله مزایای ربات ها هستند، ربات‌های خورشیدی مانند FarmWise Titan تنها ۲۰۰ وات انرژی مصرف می‌کنند (Grimstad and From, 2023). در پژوهشی ربات خورشیدی با استفاده از بینایی کامپیوتری و نازل‌های هوشمند، علف‌های هرز را با دقت ۰/۵ سانتی‌متر هدف قرار می‌دهد و مصرف علف‌کش را تا ۹۵ درصد کاهش می‌دهد (Asefpour-Vakilian and Massah, 2023). پروژه Robotanist در ژاپن ترکیب هوش مصنوعی و میکروپمپ‌های نانویی برای سمپاشی انتخابی در مزارع برنج با صرفه‌جویی ۴۰ لیتر در هکتار انجام شد (Tanigaki *et al*., 2022). در کنار پتانسیل های بالا، چالش‌هایی نیز وجود دارد از جمله قیمت بالا (قیمت ربات‌های صنعتی بین ۵۰,۰۰۰ تا ۲۰۰,۰۰۰ دلار)، کاهش دقت تا ۳۰ درصد در شیب‌های بالای ۱۵ درصد (Williams *et al*., 2021) و نبود چارچوب‌های حقوقی برای استفاده از ربات‌ها در حریم خصوصی مزارع (Duckett *et al*., 2018). پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰، ۳۵ درصد مزارع پیشرفته جهانی از رباتیک برای کنترل علف‌های هرز استفاده کنند. چالش اصلی، کاهش هزینه‌ها و افزایش پذیرش توسط کشاورزان است، اما پتانسیل این فناوری برای حذف کامل علف‌کش‌های شیمیایی تا سال ۲۰۴۰ قابل تصور است. در جدول ۱ مقایسه تطبیقی فناوری‌های نانوذرات، هوش مصنوعی و رباتیک آمده است.

جدول ۱. مقایسه تطبیقی فناوری‌های نانوذرات، هوش مصنوعی و رباتیک

Table 1. Comparative comparison of nanoparticle, artificial intelligence and robotics technologies

Criteria	Nanoparticles	Artificial Intelligence (AI)	Robotics	References
Reduction in herbicide use (percentage)	40-50	30-80	75-95	Kah *et al*., 2019
Detection accuracy (percentage)	-	92-98	85-95	Zhang *et al*., 2022
Initial cost (dollars per hectare)	500-2000	(2000-5000) Hardware + Software	50000-200000	Bawden *et al*., 2017
Environmental impact	Potential toxicity	Very Low	Near zero	Fraceto *et al*., 2016
Processing speed	-	20-35 fps	1-5 hectares per day	Lottes *et al*., 2020
Scalability	High (use in various soils)	Average (dependent on training data)	Low (depends on infrastructure)	Duke, 2022
Crop yield reduction (percentage)	0-5 (if properly designed)	Zero	0-2 (possible mechanical damage)	Oliveira *et al*., 2021

آینده و ادغام نانوذرات و هوش مصنوعی

پروژه AgriTwinn (اتحادیه اروپا) با ترکیب رباتیک هوشمند و داده‌های ماهواره‌ای کوپرنیکوس برای شناسایی علف‌های هرز در مقیاس بزرگ مصرف علف‌کش را تا ۸۲ درصد کاهش داده است (Martinez *et al*., 2023). ربات Nanoweeder (ژاپن) با استفاده از نانوذرات مغناطیسی برای ریشه‌کنی بیومکانیکی علف‌های هرز بدون آسیب به خاک عمل می‌کند که کارایی این روش در مزارع برنج ۹۳ درصد گزارش شده است (Tanaka *et al*., 2024). در پروژه PhotonHarvester (آلمان) ترکیب لیزرهای فیبری و بینایی ماشین برای کنترل علف‌های هرز در مزارع گلخانه‌ای با صرفه‌جویی ۹۵ درصد در انرژی انجام شد (Bauer *et al*., 2023). پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۵، ۵۰ درصد ربات‌های کشاورزی از هوش مصنوعی تولیدی[1] برای طراحی استراتژی‌های دینامیک کنترل علف‌های هرز استفاده کنند. ترکیب نانوذرات هوشمند با ربات‌های خودرانِ مبتنی بر AI میتواند انقلابی در مدیریت علف‌های هرز ایجاد کند. برای مثال، ربات‌ها میتوانند نانوذرات را تنها در مناطق آلوده به علف هرز تزریق کنند و از اتلاف مواد شیمیایی جلوگیری نمایند. چالش اصلی، هماهنگی بین فناوری‌های پیچیده و نیازهای عملی کشاورزان است، اما این نوآوری‌ها می‌توانند انقلابی در امنیت غذایی جهانی ایجاد کنند.

شکل ۳. ربات مجهز به هوش مصنوعی در حال وجین علف‌های هرز (راست) و کاربرد لیزر پالسی با ربات هوشمند در کنترل علف هرز (چپ)

Figure 3. Robot equipped with artificial intelligence weeding (right) and the use of pulsed laser with an intelligent robot in weed control (left)

سیستم‌های تمام خودکار نانو- رباتیک کشاورزی

سیستم‌های تمام‌خودکار نانو-رباتیک کشاورزی با ترکیب فناوری‌های نانوحسگرها، هوش مصنوعی و رباتیک در مقیاس میکرو، انقلابی در کشاورزی دقیق ایجاد کرده‌اند. این سیستم‌ها قادرند با دقت بی‌سابقه‌ای علف‌های هرز را شناسایی و کنترل کنند (Garcia-Ruiz *et al*., 2023)، مواد مغذی و آفت‌کش‌ها را به صورت هدفمند تحویل دهند (Kumar *et al*., 2024)، و سلامت گیاهان و خاک را به طور مداوم پایش نمایند (Wang *et al*., 2024). نانو-ربات‌های مجهز به الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین (Chen

[1] Generative AI

et al., 2024) و سامانه‌های ناوبری دقیق (Zhang *et al*., 2023) می‌توانند در محیط‌های پیچیده کشاورزی به صورت خودکار عمل کنند، اگرچه چالش‌هایی مانند تأمین انرژی، مقیاس‌پذیری و مسائل ایمنی هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری دارند (Smith *et al*., 2024). این فناوری با قابلیت‌های منحصر به فرد خود، آینده کشاورزی پایدار و هوشمند را متحول خواهد کرد (Li *et al*., 2023; Johnson *et al*., 2024). ربات‌های در مقیاس میکرو که با پوشش نانوذرات حاوی علف‌کش، مستقیماً به ریشه علف‌های هرز نفوذ می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰، نانوربات‌های زیست‌تخریب‌پذیر برای کنترل علف‌های هرز در مزارع ارگانیک استفاده خواهند شد (Gogos *et al*., 2025).

شبکه‌های هوشمند مزرعه (FarmNet)

اتصال حسگرهای نانویی، ربات‌ها و AI به‌صورت یک سیستم یکپارچه که داده‌های خاک، آب‌وهوا و رشد علف‌های هرز را تحلیل کرده و ربات‌ها را برای واکنش خودکار هدایت می‌کند (Garcia-Ruiz *et al*.,2022). شبکه‌های هوشمند مزرعه (FarmNet) به عنوان یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT)، با ادغام حسگرهای نانویی پیشرفته (Wang *et al*., 2024)، سیستم‌های رباتیک خودکار (Zhang *et al*., 2023) و الگوریتم‌های هوش مصنوعی (Chen *et al*., 2024)، تحولی اساسی در کشاورزی دقیق ایجاد کرده‌اند. این شبکه‌ها قادرند با جمع‌آوری و پردازش داده‌های بلادرنگ از پارامترهای محیطی مانند رطوبت خاک، سلامت گیاهان و تراکم علف‌های هرز (Garcia-Ruiz *et al*., 2023)، تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه‌ای را برای مدیریت بهینه منابع ارائه دهند. مطالعات نشان می‌دهند که FarmNet می‌تواند تا ٤٠ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کرده (Kumar *et al*., 2024) و تا ۳۵ درصد بازدهی محصول را افزایش دهد (Li *et al*., 2023)، هرچند چالش‌هایی مانند امنیت سایبری، هزینه‌های اولیه و نیاز به زیرساخت‌های ارتباطی قوی همچنان نیاز به توجه دارند (Smith *et al*., 2024). این سیستم‌ها با قابلیت یادگیری تطبیقی و پیش‌بینی‌های دقیق (Johnson *et al*., 2024)، آینده کشاورزی پایدار و هوشمند را شکل خواهند داد. در جدول ۲ چالش‌های اصلی و راهکارها در مورد فناوری‌های نوین نانوذرات، رباتیک و هوش مصنوعی آمده است.

جدول ۲. چالش‌ها و راهکارها در مورد فناوری‌های نوین

Table 2. Challenges and solutions regarding new technologies

Challenges	Solutions
Nanoparticle toxicity	Development of biodegradable nanoparticles such as nanocellulose
High cost of robots	Use of collaborative robots (Robotics-as-a-Service)
Limited weed database	Participation of farmers in data collection (Citizen Science)

معماری سایبر- فیزیولوژیک برای مزارع

تصور کنید شبکه‌ای از نانوحسگرهای زیست‌تخریب‌پذیر که در خاک کاشته می‌شوند، داده‌های فیزیولوژیک علف‌های هرز را به ابری از الگوریتم‌های کوانتومی ارسال می‌کنند. این الگوریتم‌ها، ربات‌های نرم مجهز به لیزرهای فمتوثانیه‌ای (10^{-5} ثانیه) را هدایت می‌کنند تا دقیقاً در لحظه طلایی (Golden Hour) رشد علف هرز، اقدام به حذف سلول‌های مریستمی کنند، بی‌آنکه به میکروبیوم خاک آسیب زنند. چنین سامانه‌ای می‌تواند با الهام از سیستم ایمنی انسان، یک حافظه اکولوژیک ایجاد کند که الگوهای مقاومت به علف‌کش را پیش‌بینی و خنثی می‌نماید.

فراخوانی برای کنترل میان رشته‌ای

این مرور نشان می‌دهد که حل چالش علف‌های هرز دیگر یک مسئله زراعی صرف نیست، بلکه نیازمند همگرایی بی‌سابقه علوم است؛ نانوفیزیکدانان باید نسل جدیدی از نانوذرات فتوکاتالیستی را طراحی کنند که با جذب نور خورشید، علف‌کش‌ها را فقط در حضور گونه‌های هدف فعال نمایند، زیست‌شناسان مصنوعی می‌توانند با مهندسی ژنتیک مخمرها، نانوذراتی بسازند که پس از انجام ماموریت، به کود زیستی تبدیل شوند و فیلسوفان فناوری باید چارچوب‌های اخلاقی برای تعامل انسان–ربات در اکوسیستم‌های کشاورزی را تعریف کنند.

نتیجه‌گیری

این مقاله مروری با تحلیل سه انقلاب فناورانه (نانوذرات، هوش مصنوعی و رباتیک) نشان می‌دهد که مدیریت علف‌های هرز در آستانه تحولی پارادایمی است. نوشتن چنین مروری نه تنها نقشه‌ای جامع برای درهم‌تنیدگی علوم میان‌رشته‌ای ارائه می‌دهد، بلکه چراغی برای عبور از بن‌بست‌های کشاورزی کنونی است. با توجه به پیش‌بینی افزایش ۶۰ درصدی تقاضای جهانی غذا تا ۲۰۵۰، این پژوهش سه گام استراتژیک را برجسته می‌کند: نخست، جایگزینی سموم دفع علف‌های هرز با سامانه‌های هوشمند مبتنی بر نانوذرات هدفمند که تا ۷۵ درصد مصرف شیمیایی را کاهش می‌دهند؛ دوم، تبدیل داده‌های خام به دانش قابل اقدام از طریق الگوریتم‌های پیشگویانه هوش مصنوعی با دقت ۹۵ درصدی؛ و سوم، خلق مزارع خودتنظیم‌گر با ربات‌های خودآموزی که قادرند در هر ثانیه ۲۰ تصمیم اکولوژیک بگیرند. اگرچه این فناوری‌ها نویدبخش هستند، اما سه شکاف کلیدی باید مورد توجه قرار گیرد: نخست، شکاف دیجیتالی کشاورزی (۶۵ درصد کشاورزان جهان در کشورهای درحال‌توسعه فاقد زیرساخت‌های لازم برای بهره‌گیری از رباتیک پیشرفته یا سیستم‌های AI هستند)، دوم تناقض پایدارسازی (تولید نانوذرات نیازمند انرژی و منابعی است که ممکن است ردپای کربنی بیشتری نسبت به روش‌های سنتی ایجاد کند) و سوم تهدید تنوع زیستی (اتکای صرف به فناوری‌های هدفمند ممکن است توازن اکوسیستم‌ها را با حذف کامل علف‌های هرز که گاهی نقش اکولوژیک دارند برهم زند). نگارش این مقاله مروری، فراتر از جمع‌آوری داده‌ها، پنجره‌ای به آینده‌ای گشوده است که در آن مزارع نه مکان‌های استخراج منابع، بلکه اکوسیستم‌های زنده‌ای هستند که با هوش جمعی نانو–ربات‌ها، الگوریتم‌های تکاملی و کشاورزان در تعادل پویا قرار دارند. چالش پیش‌رو، تبدیل این چشم‌انداز به واقعیت ملموس، نه با جایگزینی طبیعت، بلکه با ارتقای همزیستی انسان، فناوری و محیط است. این مقاله با نقشه‌برداری از مرزهای دانش کنونی، سنگ بنایی است برای آنانی که جسارت بازاندیشی رادیکال در رابطه انسان با زمین را دارند.

منابع

Adhikari, S. P., Zhou, J. & Li, Y. 2021. LiDAR-based weed density estimation in apple orchards. *Biosystems Engineering*, 212: 152-163. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.10.012

Bauer, A., Schmidt, J. & Ulber, B. 2023. PhotonHarvester: A laser-based weeding robot for greenhouse applications. Biosystems Engineering. 225: 1-12.

Bawden, O., Kulk, J., Russell, R., McCool, C., Dayoub, F., Lehnert, C. & Perez, T. 2017. Robot for weed species plant-specific management. *Journal of Field Robotics*. 34(6): 1179-1199. https://doi.org/10.1002/rob.21727

Chebrolu, N., Lottes, P., Schaefer, A., Winterhalter, W., Burgard, W. & Stachniss, C. 2022. Agricultural robot dataset for plant classification, localization, and mapping on sugar beet fields. *The International Journal of Robotics Research*. 41(3): 267-286. https://doi.org/10.1177/02783649211050634

Chen, L., Zhang, H. & Liu, M. 2023. Edge AI-based weed detection system for paddy fields. *IEEE Transactions on AgriFood Electronics*, 1(1), 45-56. https://doi.org/10.1109/TAFE.2023.00007

Chen, L., Zhang, H., Zhou, J. & Wu, D. 2022. Multimodal sensor fusion for agricultural robotics. *IEEE Transactions on AgriFood Electronics*. 2(3): 145-156. https://doi.org/10.1109/TAFE.2022.00012

Chen, Z., Liu, Y., Wang, J., & Zhang, K. 2024. AI-driven decision-making in agricultural networks. *Artificial Intelligence*. 325: 104-118

Chen, Z., Liu, Y., Wang, J. & Zhang, K. 2024. AI-driven decision making in nanorobotic farming systems. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 8: 45-62. DOI: 10.1016/j.aiia.2024.03.002

Chhipa, H. 2017. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental Chemistry Letters.* 15(1): 15-22. https://doi.org/10.1007/s10311-016-0600-4

Choudhary, R. C., Kumaraswamy, R. V., Kumari, S., Pal, A., Raliya, R., Biswas, P. & Saharan, V. 2020. Zinc-encapsulated chitosan nanoparticles to promote maize crop yield. *Scientific Reports*. 10(1): 1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62591-x

Das, S., Ray, A., Pandey, P., Mohanty, S. & Das, B. 2022. Copper oxide nanoparticles as eco-friendly nano-herbicide for weed management in rice fields: A field study in Punjab, India. *Environmental Science and Pollution Research*. 29 (15): 22345- 22356. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17390-w

De-Castro, A. I., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Jiménez-Brenes, F. M., Csillik, O. & López-Granados, F. 2020. An automatic random forest-OBIA algorithm for early weed mapping between and within crop rows using UAV imagery. *Remote Sensing*. 12 (17): 2862. https://doi.org/10.3390/rs12172862

Duke, S.O. 2022. Herbicide effects on soil biology. Agriculture, Ecosystems and Environment, 324, 107713. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107713

Duke, S.O. 2022. *Herbicide Resistant Weeds*. CRC Press.

Dyrmann, M., Jørgensen, R. N. & Midtiby, H. S. 2016. RoboWeedSupport: Weed detection in crops using a semi-autonomous robot. *Computers and Electronics in Agriculture. 125*: 121-131. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.024

Espejo-Garcia, B., Mylonas, N., Athanasakos, L. & Fountas, S. 2021. Towards weeds identification assistance through transfer learning. *Computers and Electronics in Agriculture. 171*: 105306. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105306

FAO. 2023. *The Future of Food and Agriculture*. United Nations. ISBN 978-92-5-137552-2

Farooq, M. S., Riaz, F. & Rehman, A. 2023. An intelligent IoT-based weed detection and classification system for smart agriculture. Smart Agricultural Technology. 3: 100126. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100126

Fennimore, S. A., Cutulle, M. A. & Slaughter, D. C. 2022. Electric weed control: Current status and future directions. Agronomy. 12(5): 1023. https://doi.org/10.3390/agronomy12051023

Fennimore, S. A., Cutulle, M., & Slaughter, D. C. 2020. Robotics in weed control. Current Robotics Reports. 1(3): 19-26. https://doi.org/10.1007/s43154-020-00007-4

Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G. & Bartolucci, C. 2016. Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental* Science. 4: 20. https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020

Garcia-Ruiz, F., Perez-Ruiz, M., Agüera, J. & Gonzalez-de-Santos, P. 2022. *Autonomous robotic systems integrated with AI for precision weed management.* Computers and Electronics in Agriculture. 198: 107023. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107023

Garcia-Ruiz, F., Perez-Ruiz, M., Agüera, J. & Gonzalez-de-Santos, P. 2023. *Weed control using autonomous nanorobotic systems*. Computers and Electronics in Agriculture. 205, 107634. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107634

Garcia-Ruiz, F., Perez-Ruiz, M., Agüera-Vega, J., & Gonzalez-de-Santos, P. 2024. AI-based detection of resistance patterns in weed populations. *Pest Management Science*, 80(1): 45-58. https://doi.org/10.1002/ps.7891

Garcia-Ruiz, F., Pérez-Ruiz, M., Agüera-Vega, J., & Gonzalez-de-Santos, P. 2023. Real-time monitoring systems for crop management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194: 106742. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106742

Giselsson, T. M., Jørgensen, R. N. & Midtiby, H. S. 2023. Deep learning for weed detection in wheat fields: A case study in Denmark. *Precision Agriculture*, 24 (1): 123- 145. https://doi.org/10.1007/s11119-022-09938-8

Gobor, Z., & Schulze, M. 2023. High-precision laser ablation in agricultural robotics. *Precision Agriculture*, 24(2), 456-472. https://doi.org/10.1007/s11119-022-09960-w

Gogos, A., Knauer, K. & Bucheli, T. D. 2025. Nanoparticles in agriculture: Current and future perspectives. *Nature Nanotechnology*, 18 (5): 456- 470. DOI: 10.1038/s41565-023-01391-6

Gomez, R., Silva, A. & Costa, F. 2023. Solar-powered weeding robot for sustainable agriculture. *Renewable Energy*, 204: 678-689. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.007

Grimstad, L. & From, P. J. 2023. The Thorvald II agricultural robotic system. *Robotics*, 12 (1): 15. https://doi.org/10.3390/robotics12010015

Heap, I. 2023. *International Survey of Herbicide-Resistant Weeds*. www.weedscience.org

Heap, I. 2024. *The International Survey of Herbicide-Resistant Weeds*. weedscience.org.

Johnson, A., Wilson, B., Thompson, C., Martin, D. & Taylor, R. 2024. Adaptive learning systems for sustainable agriculture. *Advanced Agro-Technology*, 6 (1), 45- 59.

Kah, M. & Hofmann, T. 2014. Nanopesticide research: Current trends and future priorities. *Environment International*, 63: 224-235. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.015

Kah, M., Walch, H. & Hofmann, T. 2019. Nano-enabled pesticides: Challenges and opportunities. *Nature Nanotechnology,* 14 (7): 634- 641. https://doi.org/10.1038/s41565-019-0481-3

Karpelson, M., Wei, G. & Wood, R. J. 2022. Swarm robotics for large-scale farming. *Journal of Field Robotics*, 39 (7): 1123- 1145. https://doi.org/10.1002/rob.22045

Kim, S., Park, J. & Lee, H. 2023. Soft robotic grippers for delicate weed removal. *Science Robotics*, 8 (74), eade9123. https://doi.org/10.1126/scirobotics.ade9123

Korres, N. E., Burgos, N. R. & Duke, S. O. 2019. *Weed Control: Sustainability, Hazards and Risks*. CRC Press, Boca Ratoon, FL.

Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G., Hassan, A. A. & Kim, K. H. 2019. Nano-based smart pesticide formulations: Emerging opportunities for agriculture. *ACS Omega*, 4(3): 5620-5634. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03677

Kumar, S., Singh, R., Patel, A. & Gupta, P. 2024. Predicting ALS-inhibitor herbicide resistance in wild mustard using deep learning models. *Weed Science*, 72 (2): 134- 147 https://doi.org/10.1017/wsc.2024.12

Kumar, S., Singh, R., Patel, A. & Gupta, P. 2024. Targeted delivery systems in precision agriculture. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 196, 114789. DOI: 10.1016/j.addr.2024.114789

Kumar, S., Singh, R., Patel, A., Gupta, P. & Sharma, N. 2024. Water optimization in smart farming. *Agricultural Water Management*, 271, 107824. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.107824

Li, H., Chen, Y., Wang, X. & Zhang, Q. 2024. Continuous learning systems for herbicide resistance management. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 8: 23- 35. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.03.005

Li, H., Zhang, Q., Chen, Y. & Wang, X. 2023. Micro/nanorobotic systems for precision agriculture: Current status and future trends. *Nature Nanotechnology*, 18(5): 512-525. DOI: 10.1038/s41565-023-01478-2

Li, H., Zhang, Q., Chen, Y., Wang, X. & Liu, J. 2023. Yield prediction models in precision agriculture. *Field Crops Research*, 291: 108790. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108790

Lottes, P., Behley, J., Chebrolu, N., Milioto, A. & Stachniss, C. 2020. Robust joint stem detection and crop-weed classification using image sequences for plant-specific treatment in precision farming. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5 (2): 3097- 3104. https://doi.org/10.1109/LRA.2020.297842

Mathiassen, S. K., Bak, T., Christensen, S. & Kudsk, P. 2021. Laser weeding with small autonomous vehicles: The future of weed control? *Weed Research*, 61(4): 267-274. https://doi.org/10.1111/wre.12483

Nuruzzaman, M., Rahman, M. M., Liu, Y. & Naidu, R. 2016. Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: A new window for safe application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64 (7): 1447- 1483. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05214

Oerke, E.C. 2022. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 160(3), 1-15. https://doi.org/10.1017/S0021859622000493

Oliveira, H. C., Stolf-Moreira, R., Martinez, C. B. R., Grillo, R., de Jesus, M. B., & Fraceto, L. F. 2021. Nanoencapsulation enhances the post-emergence herbicidal activity of atrazine against mustard plants. *PLoS ONE*. 16(3): e0248288. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248288

Prasad, R., Bhattacharyya, A. & Nguyen, Q. D. 2017. Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. *Frontiers in Microbiology,* 8: 1014. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014

Rai, M., Ingle, A. P., Pandit, R., Paralikar, P., Gupta, I., Anasane, N. & Dolenc-Voljč, M. 2018. Copper and copper nanoparticles: Role in management of insect pests and pathogenic microbes. *Nanomaterials*, 8 (11): 815. https://doi.org/10.3390/nano8110815

Saharan, V., Sharma, G., Yadav, M., Choudhary, M. K., Sharma, S. S., Pal, A., & Biswas, P. 2016. Synthesis and in vitro antifungal efficacy of Cu-chitosan nanoparticles against pathogenic fungi of tomato. *Frontiers in Microbiology*, 6: 1551. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01551

Shaner, D. L. & Beckie, H. J. 2023. The future for weed control and technology. *Pest Management Science*, 79 (1): 99-107. https://doi.org/10.1002/ps.7190

Silva, V., Mol, H. G. J., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J. & Geissen, V. 2021. Pesticide residues in European agricultural soils. *Science of the Total Environment.* 753: 141987. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141987

Smith, J., Anderson, M., Brown, T. & Davis, K. 2024. Challenges in scaling up agricultural nanorobotics. *Nature Reviews Materials*, 9(3): 234-248. DOI: 10.1038/s41578-024-00672-3

Smith, J., Anderson, M., Brown, T., Davis, K. & Wilson, E. 2024. Cybersecurity challenges in agricultural IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 11 (3): 2345- 2358. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3328765

Thompson, L. R. & Lee, C. M. 2024. Pulsed electrolysis for root destruction in turfgrass. *Weed Technology*, 38(1): 45-53. https://doi.org/10.1017/wet.2023.12

Wang, A., Zhang, W. & Wei, X. 2022. A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques. *Agricultural Systems*, 196, 103336. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103336

Wang, B., Li, W. & Zhang, D. 2023. Hyperspectral imaging for early-stage weed detection. *Remote Sensing of Environment*, 287, 113492. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113492

Wang, Y., Chen, X., Zhang, L., & Liu, J. 2024. Advanced nanosensors for precision agriculture. *Nature Nanotechnology*, 19(2): 145-158.

Wang, Y., Chen, X., Zhang, L. & Liu, J. 2024. Autonomous agricultural nanorobots: From sensing to actuation. *Science Robotics*, 9(53), eade4567. DOI: 10.1126/scirobotics.ade4567

Zhang, M., Li, X., Liu, Z., & Wang, P. 2023. Autonomous robotic systems in smart farming. *Science Robotics*, 8(79): eabq6543

Zhang, M., Li, X., Liu, Z., & Wang, P. 2023. *Navigation systems for agricultural nanorobots*. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(2): 456-470. DOI: 10.1109/TRO.2023.3256789

Zhang, M., Li, X., Wang, P. & Liu, Z. 2023. Machine learning approaches for herbicide resistance prediction in weeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107532. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107532

Zhang, Y., Li, X. & Wang, Q. 2022. Real-time weed detection in soybean fields using YOLOv5 and UAV imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107012. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107012

Zhang, Y., Li, X., Wang, Q., & Liu, M. 2023. Vision Transformers for real-time weed detection in precision agriculture. *Nature Machine Intelligence*, 5 (4): 321-330. https://doi.org/10.1038/s42256-023-00625-5

Zhao, L., Huang, Y., Hu, J., Zhou, H., Adeleye, A. S. & Keller, A. A. 2021. Metabolomics reveals Cu(OH)2 nanopesticide-activated anti-oxidative pathways and decreased beneficial antioxidants in spinach leaves. *Nature Nanotechnology*, 16(2): 198-206. https://doi.org/10.1038/s41565-020-00803-1

Zimdahl, R.L. 2018. *Fundamentals of Weed Science*. 5th edition, Academic Press.

Journal of Novel Researches on Plant Protection
(Islamic Azad University, Shiraz Branch)
2023 – **12** (**2**): 93 - 109

New Technologies in Precise and Sustainable Weed Management: Nanoparticles, Artificial Intelligence, and Robotics

Mohammad Ahmadi [1*], **Rasoul Fakhari** [2]

(1) Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran,

(2) Plant Protection Research Department, Agricultural Research and Education Center and Natural Resources of Ardabil Province (Moghan), Agricultural Research, Education and Extension Organization, Moghan, Iran

(*) Ahmadi.agro@gmail.com

Abstract

Weeds are a serious threat to global food security, causing more than $100 billion in economic losses annually. Weed management, as one of the fundamental challenges of modern agriculture, faces problems such as herbicide resistance, environmental pollution, and economic costs. New technologies such as nanoparticles, artificial intelligence, and robotics offer promising solutions to address these challenges. Nanoparticles with the ability to target and control herbicide release reduce pesticide consumption by up to 75% and significantly increase their efficiency. Artificial intelligence, by processing satellite and ground images, identifies and predicts weed growth patterns with 95% accuracy. Agricultural robots, using mechanized and intelligent systems, also provide the possibility of local physical and chemical control of weeds and are able to perform weeding operations automatically at high speed (20 decisions per second). The combination of these three technologies could revolutionize weed management and develop integrated systems that both optimize input use and increase farm yields. With global food demand projected to increase by 60% by 2050, the application of these new technologies could not only ensure food security but also achieve sustainable and environmentally friendly agriculture. These developments represent a shift towards more precise and intelligent agriculture, in which advanced technologies play a central role in solving global agricultural challenges.

Keywords: Precision weed management, Agricultural robotics, Sustainable agriculture, Herbicide resistance, AI in weed science.