

## استفاده از مگاترونیک در هوشمندسازی ماشین‌های کشاورزی

**عبدالله ایمان‌مهر<sup>۱</sup> و محسن حیدری سلطان‌آبادی<sup>۲</sup>**

<sup>۱</sup>–استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، اصفهان، ایران. (نویسنده مسئول). **رایانامه:** *imanmehr2000@yahoo.com*

<sup>۲</sup>– دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، اصفهان، ایران. **رایانامه:** *mheisol@gmail.com*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵

تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

صص: ۳۶–۲۵

### چکیده

مگاترونیک به سامانه‌های مهندسی اطلاق می‌شود که در آن‌ها رایانه‌ها، قطعات الکترونیکی و قطعات مکانیکی برای انجام عملیاتی مشخص با هم ترکیب

می‌شوند. علم مگاترونیک را می‌توان پیش‌نیاز خودکارکردن و هوشمندسازی تجهیزات دانست، که براساس تجمیع مهندسی مکانیک، الکترونیک، رایانه

و سامانه‌های نظارت شکل گرفته است. سامانه‌های مگاترونیک شامل سخت‌افزار الکترومکانیکی و نرم‌افزار نظارتی هستند که انجام عملیات را خودکار

می‌کنند. در مگاترونیک، اجزای مکانیکی و الکتریکی به همراه راهبرد نظارت، از ابتدا به‌صورت یک سامانه یکپارچه در نظر گرفته می‌شوند و این به معنای

مهندسی هم‌زمان در طراحی است. حسگرها به‌عنوان یک جزء مهم در یک سامانه مگاترونیک، وظیفه جمع‌آوری و ارسال اطلاعات موردنیاز برای پشتیبانی

از عملیات خودکار را به عهده دارند. سطح ارتباط بالا بین حسگرها و رایانه‌ها، توسعه خودکارسازی ماشین‌های کشاورزی را تسریع کرده است. عملگرها

در سامانه‌های مگاترونیک، قطعات الکترومکانیکی یا الکتروهیدرولیکی هستند که سیگنال‌های الکتریکی را دریافت می‌کنند و یک وسیله مکانیکی را

به حرکت درمی‌آورند. ازجمله مثال‌های استفاده از مگاترونیک در ماشین‌های کشاورزی می‌توان به تراکتورهای هدایت‌شونده خودکار، کودپاش یا

سمپاش‌های نرخ متغیر و سامانه فرمان تراکتور خودکار اشاره کرد. امروزه تلفیق فناوری اینترنت اشیاء، به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین، و مگاترونیک به

هوشمندسازی عملیات کشاورزی کمک به‌سزایی کرده است. ازجمله چالش‌های اصلی توسعه سامانه‌های مگاترونیکی در ایران می‌توان به کمبود زیرساخت

فناوری و تجهیزات پیشرفته، محدودیت‌های مالی و فقدان ارتباط مؤثر بین دانشگاه و صنعت برای تجاری‌سازی و بهره‌برداری از دستاوردهای پژوهشی اشاره

کرد. در این جهت، توانمندسازی نیروهای فنی ازطریق برنامه‌های آموزشی مشترک بین دانشگاه‌ها، مراکز فنی و صنعت کشاورزی می‌تواند زمینه‌ساز توسعه

کشاورزی هوشمند و متکی بر منابع داخلی شود.

**کلیدواژه‌ها:** مگاترونیک، سامانه‌های هوشمند، حسگرها، عملگرها، آدمواره‌های کشاورزی.

## مقدمه

یکی از راه‌های افزایش عملکرد کمی و کیفی محصولات کشاورزی، کاهش ضایعات و تلفات و انجام به‌هنگام و صحیح عملیات مختلف (از خاک‌ورزی تا برداشت)، استفاده از فناوری‌های نوین در کشاورزی دقیق و روزآمد از حوزه مهندسی مکاترونیک است (کفاشان و باقری، ۱۹۷۳). اصطلاح مکاترونیک برای اشاره به سامانه‌هایی استفاده می‌شود که در آن‌ها نظارت‌های رایانه‌ای، اجزای الکتریکی و قطعات مکانیکی ترکیب می‌شوند. راه‌حل مکاترونیک فقط اضافه کردن حسگرها و وسایل الکترونیکی به یک ماشین موجود نیست، بلکه ادغام متوازن همه آن‌ها به گونه‌ای است که هر جزء به‌صورت مجزا عملکرد سایرین را افزایش می‌دهد. این نتیجه تنها با در نظر گرفتن همه زیرسامانه‌ها به‌طور هم‌زمان در مراحل اولیه طراحی حاصل می‌شود (بولتون، ۱۹۹۱).<sup>۱</sup> بنابراین، مکاترونیک فناوری‌هایی را شکل می‌دهد که زیربنای حسگرها، سامانه‌های نظارت خودکار، پردازنده‌های محاسباتی و انتقال نیرو از طریق سازوکارهایی از جمله محرک‌های قدرت سیال هستند (نوفچ و خامسی، ۵۲۰۲).<sup>۲</sup>

در طول قرن بیستم، خودکارسازی کشاورزی سختی کار مزرعه را تا حد زیادی کاهش و در عین حال بهره‌وری، کارایی و کیفیت کار را افزایش داد (مایکلوی و همکاران، ۱۹۱۰).<sup>۳</sup> به مرور و با پیشرفت صنایع، اجزای الکترونیکی به واحدهای خودکارسازی اضافه شد به گونه‌ای که در حال حاضر از شبکه‌های بی‌سیم و حسگرها نیز برای سنجش اطلاعات کشاورزی استفاده می‌شود (جور و همکاران، ۱۹۱۰).<sup>۴</sup> امروزه بسیاری از چالش‌های پیرامون خودکارسازی کشاورزی ممکن است از طریق اتخاذ فناوری‌های مکاترونیک و سامانه‌های هوشمند بر روی ماشین‌های کشاورزی نوین برطرف و مدیریت را بهبود بخشیده و بهره‌وری در عملیات مزرعه‌ای را افزایش دهد.

در این نوشتار، مفاهیم اساسی مکاترونیک و سامانه‌های هوشمند مورد استفاده در ماشین‌های کشاورزی نوین از جمله آدمواره‌های کشاورز معرفی می‌شود و تعدادی از فناوری‌های

اصلی، اجزای کلیدی و چالش‌های معمول موجود در برخی از عملیات کشاورزی به‌طور خلاصه تشریح می‌شود.

## مکاترونیک

مکاترونیک علمی است که با تلفیق مهندسی مکانیک، برق، الکترونیک و رایانه، بر طراحی و ساخت سامانه‌ها و دستگاه‌های هوشمند و خودکار با عملکرد دقیق و کارآمد نظارت می‌شود. این علم در حوزه‌های مختلفی از جمله در ساخت آدمواره‌ها، ماشین‌های نظارت رقمی رایانه‌ای<sup>۵</sup>، پهپادها، سامانه‌های خودکارسازی صنعتی و نیز در توسعه ماشین‌های کشاورزی نوین مانند تراکتورهای خودگردان، سمپاش‌های هوشمند و دروگرهای خودکار کاربرد دارد. مکاترونیک با یکپارچه‌سازی فناوری‌ها، راه‌حل‌هایی نوآورانه برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها ارائه می‌دهد. ترکیب مهندسی مکانیک، الکترونیک، نظارت و فناوری اطلاعات در قالب سامانه‌های مکاترونیکی، دقت انجام کار را افزایش داده، مصرف نهاده‌ها را کاهش و عملکرد ماشین‌های کشاورزی را بهینه‌سازی کرده است. به‌عنوان مثال، تحقیقات نشان داده است که کاربرد سامانه‌های مکاترونیکی در کشاورزی، مصرف کود، علف‌کش و سوخت را به ترتیب به میزان ۷، ۹ و ۶ درصد کاهش داده است. همچنین گزارش‌ها از بهبود عملکرد محصولات بین ۱ تا ۲۵ درصد و کاهش هزینه‌ها تا ۱۵ درصد حکایت دارد (جی ای او، ۱۹۲۰).<sup>۶</sup>

## حسگرها در سامانه‌های مکاترونیک

حسگرها دستگاه‌هایی هستند که با استفاده از انواع پدیده‌های فیزیکی، شاخص‌های مهم را اندازه‌گیری می‌کنند. حسگرها اجزای مهمی در یک سامانه مکاترونیک هستند، زیرا اطلاعات موردنیاز برای پشتیبانی از عملیات خودکار را فراهم

1. Bolton
2. Nofech and Khamesee
3. Myklevy et al
4. Gore et al
5. Computer Numerical Control (CNC)

می‌کنند. در ماشین‌های کشاورزی نوین، می‌توان خروجی‌های دیجیتال حسگر را بر روی صفحه نمایش نشان داد. سطح ارتباط بالا بین حسگرها و رایانه‌ها، توسعه خودکارسازی ماشین‌های کشاورزی را تسریع کرده است. گاهی ممکن است جمع‌آوری داده‌های موردنیاز برای اجرای یک عمل خاص با استفاده از حسگرها کافی نباشد زیرا محیط تولید محصول کشاورزی متنوع و پیچیده است. برای مثال، روشنایی در طول روز تغییر می‌کند، و شرایط نامساعد جوی ممکن است عملکرد حسگرها را مختل کند. در این شرایط، بسته به نیازهای خاص، مهندسان اغلب از افزایش تعداد یا ترکیب حسگرها برای حل چنین مشکلاتی استفاده می‌کنند.

## عملگرها در سامانه‌های مکاترونیک

عملگرها به‌عنوان قطعات یکپارچه الکترومکانیکی شناخته می‌شوند که سیگنال‌های الکتریکی را دریافت کرده و برای به‌حرکت درآوردن بخش‌های مکانیکی استفاده می‌شوند. در میان این دستگاه‌ها، می‌توان به موتورهای الکتریکی اشاره کرد که از آن‌ها برای تبدیل جریان الکتریکی به چرخش شفت استفاده می‌شود، یا شیرهای برقی که در نازل‌های با نرخ پاشش متغیر به کار می‌روند. از آن‌جا که از سامانه‌های هیدرولیکی، به‌طور گسترده، در ماشین‌های کشاورزی استفاده می‌شود، معمولاً از قطعات الکتروهیدرولیکی، مانند محرک‌های برقی متناسب یا سروموتورها<sup>۱</sup>، بیشتر استفاده می‌شود تا موتورهای الکتریکی. با این حال، با رشد روزافزون استفاده از آدمواره‌ها<sup>۲</sup> در کشاورزی، پیش‌بینی می‌شود که کاربرد موتورهای الکتریکی در ماشین‌های کشاورزی نوین، به‌ویژه در نمونه‌های هوشمند و آدمواره‌ای، افزایش یابد.

## سامانه‌های نظارت خودکار در مکاترونیک

سامانه‌های نظارت خودکار، دستگاه‌هایی هستند که بدون دخالت انسان، وضعیت یک فرآیند یا ماشین را به‌صورت خودکار تنظیم و نظارت می‌کنند. این سامانه‌ها با دریافت اطلاعات از حسگرها، تصمیم می‌گیرند و از طریق عملگرها تغییرات لازم

را اعمال می‌کنند. هدف اصلی آن‌ها حفظ عملکرد مطلوب و پایدار سامانه در شرایط مختلف است. در مکاترونیک، سامانه‌های نظارت نقش مرکزی و حیاتی دارند، چون عملکرد هماهنگ بین اجزای مکانیکی، الکتریکی و الکترونیکی را ممکن می‌سازند. این سامانه‌ها با دریافت اطلاعات از حسگرها و ارسال فرمان به عملگرها، باعث می‌شوند تا دستگاه‌ها به‌صورت خودکار و دقیق عمل کنند. بدون سامانه نظارت، اجرای فرآیندهای پیچیده و خودکار در آدمواره‌ها، ماشین‌های صنعتی و ماشین‌های کشاورزی نوین امکان‌پذیر نخواهد بود. یکی از نمونه‌های سامانه‌های نظارت خودکار، سامانه هدایت خودکار در تراکتور است (شکل ۱). در این سامانه، از یک دوربین برای تصویربرداری از مسیر پیش‌رو استفاده می‌شود. با تحلیل تصاویر و شناسایی انحراف تراکتور از خط مرکزی ردیف‌های درختان انگور، زاویه مناسب فرمان محاسبه و اعمال می‌شود تا تراکتور به‌درستی در تاکستان حرکت کرده (شکل ۱) و با درختان برخورد نکند (اجی و همکاران، ۲۰۲۰).<sup>۳</sup>

نظارتی که بر پایش و ردیابی پیوسته متغیرهای تحت نظارت



شکل ۱. سامانه هدایت خودکار در تراکتور (اجی و همکاران، ۲۰۲۰)

1. Servomotors  
2. Robot  
3. Aghi et al

(مانند دما یا زاویه چرخ) متکی است، «نظارت حلقه بسته» نامیده می‌شود و عملکردی پایدار و دقیق را برای سامانه‌های خودکار فراهم می‌کند. در این نوع نظارت، میزان خطای سامانه به صورت برخط تخمین زده شده و برای کاهش خطا، یک دستور اصلاحی از سوی نظارت کننده صادر می‌شود. این دستور به عملکرد ارسال می‌شود تا اصلاحات لازم به صورت خودکار انجام شود. برای پیاده‌سازی نظارت‌های پیشرفته‌تر، از روش‌هایی استفاده می‌شود که تصمیم‌گیری نظارتی را به رفتار انسان نزدیک‌تر می‌کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به سامانه‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی اشاره کرد که از ابزارهایی مانند شبکه‌های عصبی، منطق فازی، الگوریتم‌های ژنتیک و یادگیری ماشین بهره می‌برند.

#### ماشین‌های کشاورزی هوشمند و آدمواره‌های کشاورزی

ماشین‌های کشاورزی هوشمند، تجهیزاتی هستند که با استفاده از حسگرها، سامانه‌های نظارت خودکار و فناوری‌های نوین مانند سامانه موقعیت‌یابی جهانی<sup>۱</sup> و هوش مصنوعی، عملیات کشاورزی را دقیق، بهینه و خودکار انجام می‌دهند. این ماشین‌ها با تحلیل داده‌های محیطی، تصمیم‌گیری لحظه‌ای دارند و عملکرد را در شرایط متغیر مزرعه تنظیم می‌کنند. برای انجام خودکار عملیات مزرعه‌ای، ماشین‌های کشاورزی هوشمند باید از سه قابلیت کلیدی برخوردار باشند: (۱) درک و تشخیص شرایط واقعی حین عملیات؛ (۲) توانایی تصمیم‌گیری و اعمال اصلاحات تطبیقی متناسب با شرایط دائماً در حال تغییر؛ و (۳) اجرای این اصلاحات به صورت مؤثر در میدان و با تکیه بر یک سامانه مکانیکی مناسب. دستیابی به این قابلیت‌ها معمولاً از طریق الگوهایی انجام می‌شود که نظارت ماشین‌های هوشمند را از قوانین منطقی ساده تا الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی پوشش می‌دهند. این الگوریتم‌های پیچیده ممکن است با بهره‌گیری از روش‌های رایج مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی، استدلال احتمالی و الگوریتم‌های ژنتیک توسعه داده شوند (راسل و نورویگ، ۲۰۰۲).

ماشین‌های آدمواره‌ای دستگاه‌هایی هستند که با ترکیب

فناوری‌های مکانیک، الکترونیک، حسگرها و نرم‌افزارهای نظارتی طراحی شده‌اند تا وظایف مشخصی را به صورت خودکار و با حداقل دخالت انسان انجام دهند. این ماشین‌ها می‌توانند محیط پیرامون خود را درک و تصمیم‌گیری کرده و براساس آن عمل کنند. این ویژگی‌ها آن‌ها را در کاربردهای صنعتی، پزشکی، کشاورزی و خدماتی بسیار کارآمد می‌سازند. تفاوت ماشین‌های آدمواره‌ای با تجهیزاتی که اجزاء الکترونیکی، مکانیکی و رایانه‌ای دارند و حتی از هوش مصنوعی استفاده می‌کنند، به شرح زیر است:

- تجهیزاتی آدمواره‌ای معمولاً دستگاه‌هایی هستند که به طور مشخص طراحی شده‌اند تا وظایف فیزیکی معینی را به صورت خودکار و مستقل انجام دهند، یعنی معمولاً شامل عملگرها (مکانیکی)، حسگرها، و سامانه‌های نظارتی هستند که به یک آدمواره هویت می‌دهند؛

- وسایل مجهز به قطعات الکترونیکی، مکانیکی، رایانه‌ای ممکن است لزوماً یک آدمواره نباشند؛ این تجهیزات می‌توانند دستگاه‌های هوشمند یا سامانه‌های خودکار پیچیده‌ای باشند که فقط برخی از ویژگی‌های آدمواره‌ها را دربر دارند اما لزوماً یک واحد فیزیکی متحرک یا مستقل نیستند؛

- آدمواره‌ها معمولاً توانایی حرکت، تعامل فیزیکی با محیط و انجام وظایف پیچیده را دارند. هوش مصنوعی در آدمواره‌ها باعث افزایش قابلیت تصمیم‌گیری و انطباق با شرایط محیطی می‌شود. سایر تجهیزات هوشمند ممکن است صرفاً داده‌ها را پردازش یا بهینه‌سازی کنند، بدون اینکه الزاماً عمل فیزیکی مستقل داشته باشند؛

- تجهیزات آدمواره‌ای بیشتر بر انجام عملیات مکانیکی و فیزیکی متمرکز هستند. تجهیزاتی که فقط اجزای الکترونیکی - رایانه‌ای دارند، ممکن است بیشتر بر پردازش اطلاعات، تحلیل داده‌ها یا نظارت بر سامانه‌ها تمرکز کنند و در آن‌ها حرکت فیزیکی ضرورت ندارد.

1. Global Positioning System (GPS)

خودکار برنج را نشان می‌دهد که سازمان ملی تحقیقات کشاورزی و غذا ژاپن آن را ساخته است (روویرا و همکاران، ۲۰۲۰). بازار آدمواره‌های کشاورزی در دو دهه آینده با رشد سریع و گسترده‌ای مواجه خواهد شد. این فناوری‌ها با استفاده از هوش مصنوعی و سامانه‌های پیشرفته، بهره‌وری، دقت و کیفیت تولید



ب

شکل ۲ دو آدمواره چمن‌زنی و نشاکار را نشان می‌دهد. هنگامی که آدمواره چمن‌زنی خودکار (شکل ۲الف) در یک زمین چمن‌کار می‌کند، معمولاً دارای مهارت‌های ناوبری و برنامه‌ریزی مسیر اولیه است که باعث می‌شود ماشین چمن‌زنی به خوبی در رده ماشین‌های آدمواره‌ای قرار گیرد. شکل ۲ب یک آدمواره نشاکار



الف

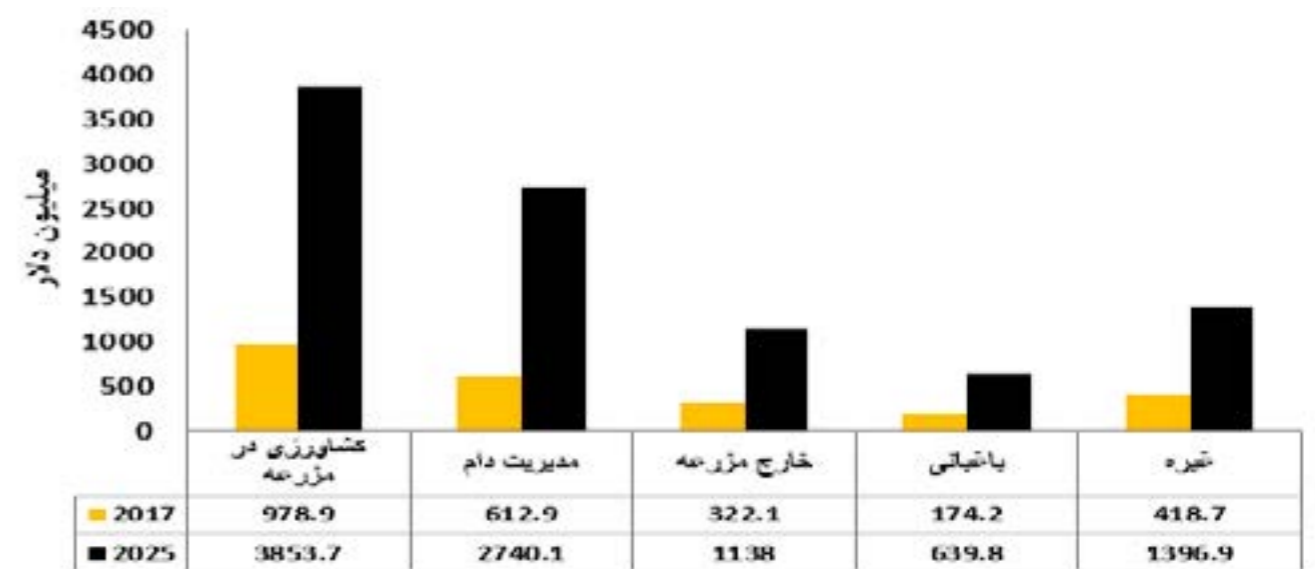
شکل ۲. الف): ماشین چمن‌زنی خودکار (تراستد ریویو، ۲۰۲۲)، ب): نشاء برنج خودکار بر پایه سامانه موقعیت‌یابی جهانی (روویرا و همکاران، ۲۰۲۰)

است. بیشترین رشد مربوط به کشاورزی در مزرعه و مدیریت دام است که نشان‌دهنده تمرکز سرمایه‌گذاری بر خودکارسازی در این بخش‌ها است. همچنین، حوزه‌های کشاورزی گلخانه‌ای، باغبانی و کاربردهای دیگر نیز رشد قابل توجهی دارند که بیانگر گسترش استفاده از فناوری‌های هوشمند در تمام ابعاد کشاورزی است.

محصولات را به طور چشمگیری افزایش و هزینه‌های کشاورزی را کاهش می‌دهند. آدمواره‌های تولید محصولات ویژه مانند میوه‌های درختی، انگور و سبزیجات به سرعت در بازار حضور یافته و انتظار می‌رود در سال‌های آینده پیشرو باشند (روویرا و همکاران، ۲۰۲۰). این تحول دیجیتال، کشاورزی را از کارگری سنتی به مدیریتی هوشمند و داده‌محور تبدیل می‌کند و می‌تواند نسل جوان را به سوی مشاغل کشاورزی جذب کند.

شکل ۳ رشد مورد انتظار بازار ایالات متحده برای آدمواره‌های کشاورزی را بر اساس نوع محصول نشان می‌دهد. این شکل نشان‌دهنده رشد چشمگیر بازار جهانی آدمواره‌های کشاورزی بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ در حوزه‌های مختلف کاربردی

1. Rovira-Más et al



شکل ۳ رشد مورد انتظار بازار آدمواره‌های کشاورزی در ایالات متحده برای سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۲۵ (وریفاید مارکت ریسرچ، ۲۰۱۲)

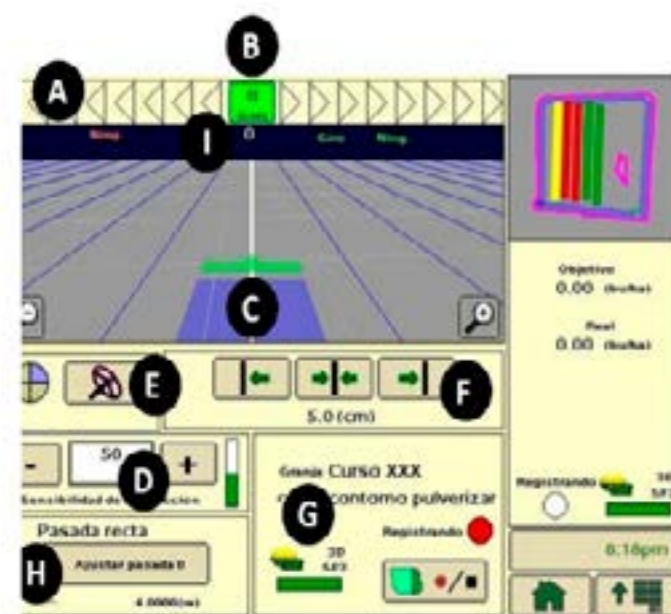
### برخی از کاربردهای مکترونیک در ادوات کشاورزی

الف) سامانه‌های مکترونیک در تراکتورهای هدایت‌شونده خودکار امروزه سامانه‌های مکترونیک در ماشین‌های کشاورزی نوین، به‌ویژه در وسایل نقلیه هوشمند و آدمواره‌ای، نقش اساسی دارند. برای مثال، اولین تراکتورهای هدایت‌شونده خودکار در اواخر قرن بیست و یکم وارد بازار شدند. از دیدگاه ناوبری، تولیدکنندگان تجهیزات کشاورزی حدود دو دهه از صنعت خودرو جلوتر بودند. اگر تراکتورها به سامانه‌های مکترونیک پیشرفته‌ای شامل حسگرها، نظارت‌کننده‌ها و عناصر محرک الکترومکانیکی (یا الکتروهیدرولیک) مجهز نمی‌شدند، تولید چنین تراکتورهای هدایت‌شونده خودکاری امکان‌پذیر نبود. یکی از معروف‌ترین قطعاتی که قبلاً در تراکتورهای مکانیکی معمولی دیده نشده است، گیرنده سامانه موقعیت‌یابی جهانی با دقت بالا است که برای هدایت تراکتورها در مسیرهای تعیین شده، قابلیت مکان‌یابی می‌دهد (روویراماس و همکاران، ۲۰۱۲).<sup>۱</sup> روش‌های ناوبری اولیه که به‌صورت تجاری در دسترس بودند، عملاً سامانه فرمان تراکتور را نظارت نمی‌کردند. بلکه آن‌ها به رانندگان تراکتور مسیرهای اصلاحی جانبی را نشان می‌دادند، به‌طوری که با دنبال کردن این اصلاحات، وسیله نقلیه به‌راحتی

تا مسیرهای موردنظر را به موازات یک خط مرجع بین دو نقطه، مثلاً خط الف - ب، به کمک سامانه موقعیت‌یابی جهانی دنبال کند. این خطوط مرجع حتی می‌توانند شامل بخش‌های منحنی باشند. شکل ۴ ب، صفحه نظارت یک سامانه هدایت خودکار تجاری را نشان می‌دهد. هدایت دقیق وسیله در خطوط مورد نظر، در مصرف بذر، کود و سوخت و همچنین کاهش خستگی کاربر صرفه‌جویی قابل توجهی دارد. کشاورزان تنها در چند سال شاهد بازگشت سرمایه خواهند بود (روویراماس و همکاران، ۲۰۱۰).<sup>۱</sup>



الف



ب

شکل ۴. سامانه‌های هدایت خودکار (روویراماس و همکاران، ۲۰۱۲): الف) - کیت نوار نور (ب) - صفحه نظارت ردیابی موازی، که در آن A نشانگر دقت مسیر است، B خطای خارج از مسیر است، C نشان‌دهنده نماد راهنمایی است، D حساسیت فرمان‌دهی را ارائه می‌دهد، E فرمان روشن/خاموش را اجباری می‌کند، F دکمه‌های جابجایی مسیر را نشان می‌دهد، G نشانگر وضعیت سامانه موقعیت‌یابی جهانی، H دکمه مسیر B-A (+) است و I شماره مسیر را نشان می‌دهد.

دقیق هستند که به کشاورز اجازه می‌دهند مقدار نهاده‌هایی مثل بذر، کود، یا سم را در نقاط مختلف مزرعه متناسب با نیاز واقعی آن بخش، به‌صورت متغیر و هدفمند استفاده کند (اردلی و جانوسی، ۲۰۱۷).<sup>۲</sup>

مکترونیک، با تلفیق مهندسی مکانیک، الکترونیک، نظارت و فناوری اطلاعات، نقش اساسی در توسعه و عملکرد سامانه‌های نرخ متغیر ایفا می‌کند. در این سامانه‌ها، برای اندازه‌گیری نیازهای

خاک و گیاه، واحدهای نظارت بر تحلیل داده‌ها و اجزای مکانیکی و الکترونیکی برای اجرای دقیق دستورات، از حسگرهای دقیق استفاده می‌شود. به کمک مکترونیک، دستگاه‌های کشاورزی می‌توانند به‌طور هوشمند و خودکار، مقدار نهاده‌ها را در هر نقطه از زمین تنظیم کنند. این موضوع باعث افزایش دقت، صرفه‌جویی

1. Rovira-Más et al  
2. Precision Agriculture  
3. Variable Rate Application (VRA)  
4. Erdélyi and János

1. Rovira-Más et al

در منابع، و بهره‌وری بالاتر در کشاورزی می‌شود (داکت و همکاران، ۲۰۱۸).<sup>۱</sup>

دقت عملیات در کشاورزی دقیق با استفاده از گیرنده‌های سامانه موقعیت‌یابی جهانی فراهم می‌شود که موقعیت لحظه‌ای ادوات کشاورزی را در مزرعه ثبت کرده و نمایش می‌دهند. برای اندازه‌گیری دقیق عملکرد محصول، وسایل نقلیه کشاورزی به نظارت‌کننده‌های خودکار نیاز دارند که اطلاعات را به‌طور بلادرنگ تحلیل و پردازش کنند. در برخی از ادوات، مقدار نهاده‌های مصرفی در هر بخش از زمین با استفاده از نقشه‌های از پیش بارگذاری‌شده در رایانه ماشین مشخص می‌شود، یا به‌صورت لحظه‌ای با کمک حسگرهای سلامت گیاه<sup>۲</sup> تخمین زده می‌شود. این حسگرها، بخش مهمی از سامانه‌های کاربرد نرخ متغیر هستند. برای مثال، در سمپاش‌های هوشمند، تنظیم خودکار مقدار آفت‌کش براساس نیاز واقعی هر درخت یا بخشی از مزرعه، نیازمند دانستن دقیق موقعیت مکانی و اطلاعات محصول است. همچنین تخصیص بهینه کود می‌تواند براساس نقشه‌های خاک‌شناسی (شامل رطوبت، مواد آلی، عناصر غذایی) یا اطلاعات پوشش گیاهی (شاخص جوانه‌زنی، تنش گیاهی، وجود علف‌های هرز، دما و غیره) انجام شود. در بسیاری از سمپاش‌های نوین، فشار و دبی جریان سموم (مایع یا گاز) با استفاده از سامانه‌های نظارت خودکار پایش می‌شود تا دقت در مصرف حفظ شود.

نظارت‌گرها که معمولاً از ریزناظرها تشکیل شده‌اند، داده‌های حسگرها یا نقشه‌های بارگذاری‌شده را پردازش و نرخ مصرف بهینه مواد را لحظه‌ای محاسبه می‌کنند. سپس این اطلاعات را به عملگرهای سامانه مکترونیک ارسال می‌کنند. این عملگرها (الکترومکانیکی یا الکتروهیدرولیکی) سیگنال‌های دریافتی را اجرا کرده و میزان مصرف نهاده‌ها را با تنظیم سرعت پمپ، جریان خروجی یا فشار نظارت می‌کنند. با این حال، تغییر فشار ممکن است اندازه قطرات سم را تغییر دهد که برای نظارت برآفات مطلوب نیست. به همین دلیل، در این شرایط استفاده از

نازل‌های هوشمند با فناوری نظارت از طریق مدولاسیون پهنای پالس<sup>۳</sup> توصیه می‌شود که امکان تنظیم نرخ جریان بدون تغییر در اندازه قطرات فراهم شود (موستاک و همکاران، ۲۰۲۰).<sup>۴</sup>

با پیشرفت سریع فناوری سامانه‌های نرخ متغیر، عملگرهای هوشمند نیز به‌صورت تجاری برای محصولات و عملیات مختلف در دسترس قرار گرفته‌اند. این سامانه‌ها می‌توانند به‌طور خودکار مقدار مواد توزیعی را متناسب با نیاز واقعی هر بخش از مزرعه تنظیم کنند. برای مثال، یک بذرکار هوشمند مبتنی بر سامانه‌های نرخ متغیر می‌تواند براساس شرایط متغیر خاک، تراکم بذر را تنظیم کند. این شرایط، یا از طریق نقشه‌های تجویزی از پیش تعیین‌شده یا به‌واسطه حسگرهای داخلی شناسایی می‌شوند. نظارت مقدار بذر با فعال‌سازی دقیق دهانه‌های موزع انجام می‌شود که اغلب با سامانه‌های نظارت بازخورد برای تنظیم پیوسته و دقیق نرخ مصرف ترکیب می‌شود. در کاربرد مواد شیمیایی مایع، نرخ توزیع می‌تواند تحت تأثیر سرعت حرکت ماشین یا شرایط محیطی تغییر کند. به همین دلیل، برخی سمپاش‌های هوشمند طوری طراحی شده‌اند که با تغییر سرعت پیشروی، میزان ماده مصرفی را به‌طور خودکار و دقیق تنظیم می‌کنند. این کار معمولاً با استفاده از شیرهای الکترونیکی نصب‌شده روی نازل‌ها انجام می‌شود. علاوه بر آن، سامانه‌های مکترونیک پیشرفته می‌توانند با کمک گیرنده‌های سامانه موقعیت‌یابی جهانی، فشار و دبی جریان را در مدار توزیع پایش و نظارت و تغییرات لحظه‌ای در خروجی نازل‌ها را با جبران خودکار تغییرات فشار یا الگوی جریان اصلاح کنند.

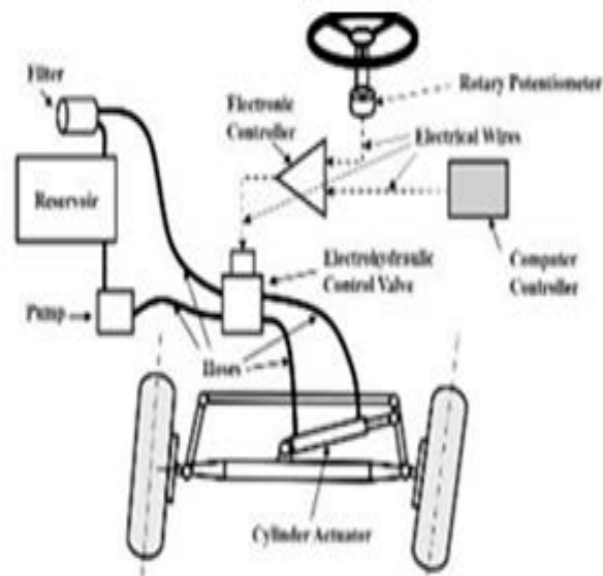
### ج) مکترونیک در طراحی سامانه فرمان تراکتور

با استفاده از مکترونیک و با ادغام حسگرها، نظارت‌کننده‌های الکترونیکی و عملگرهای هیدرولیکی، می‌توان فرمان هیدرولیکی تراکتور را به یک سامانه الکتروهیدرولیکی خودکار تبدیل کرد

که می‌تواند براساس ورودی‌های لحظه‌ای، میزان عملکرد را به روشی دقیق و سریع تنظیم کند. این فناوری باعث افزایش دقت، کاهش خطاهای انسانی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در عملکردهای تراکتور می‌شود. اجرای قابلیت هدایت خودکار در تراکتور به نظارت الکترونیکی سامانه فرمان برای چرخش خودکار چرخ‌های جلو نیازمند است. بنابراین، سامانه فرمان هیدرولیک سنتی باید با یک سامانه الکتروهیدرولیکی جایگزین شود. برای این کار باید شیر نظارت فرمان دستی معمولی (شکل ۵ الف) را با یک سامانه نظارت الکتروهیدرولیکی تعویض کرد. این سامانه (شکل ۵ ب) شامل یک پتانسیومتر دوار برای ردیابی حرکت فرمان، یک نظارت‌کننده الکترونیکی که سیگنال فرمان را به سیگنال نظارت تبدیل می‌کند، و یک شیر نظارت

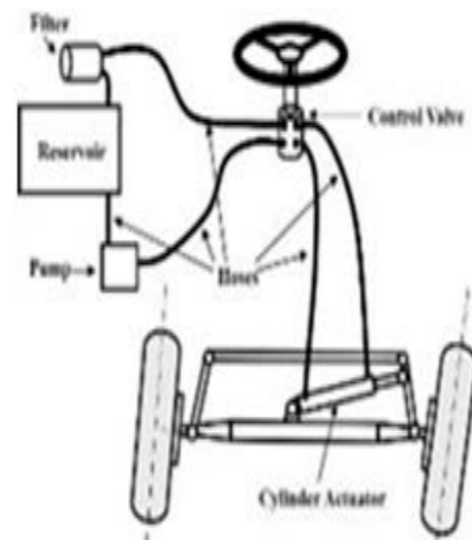
الکتروهیدرولیکی سلونوئیدی برای اجرای فرمان است. سامانه ارتقاء‌یافته فرمان الکتروهیدرولیکی می‌تواند سیگنال‌های نظارت را از یک نظارت‌کننده رایانه‌ای دریافت کند و ناوبری بدون دخالت راننده را ممکن کند. از آنجا که اجزای اصلی این سامانه با سیم به هم متصل هستند، به این فناوری «تحرک با سیم» نیز گفته می‌شود (بی‌ستو و همکاران، ۲۰۲۵).<sup>۱</sup>

نقش مکترونیک در این سامانه، تلفیق حسگرها (مثل پتانسیومتر برای ردیابی حرکت فرمان)، نظارت‌کننده‌های الکترونیکی برای پردازش و تبدیل سیگنال‌ها، و عملگرهای الکتروهیدرولیکی (شیرهای سلونوئیدی) است که با همکاری هم، فرمان هیدرولیکی سنتی را به یک سامانه خودکار و دقیق تبدیل می‌کنند.



ب

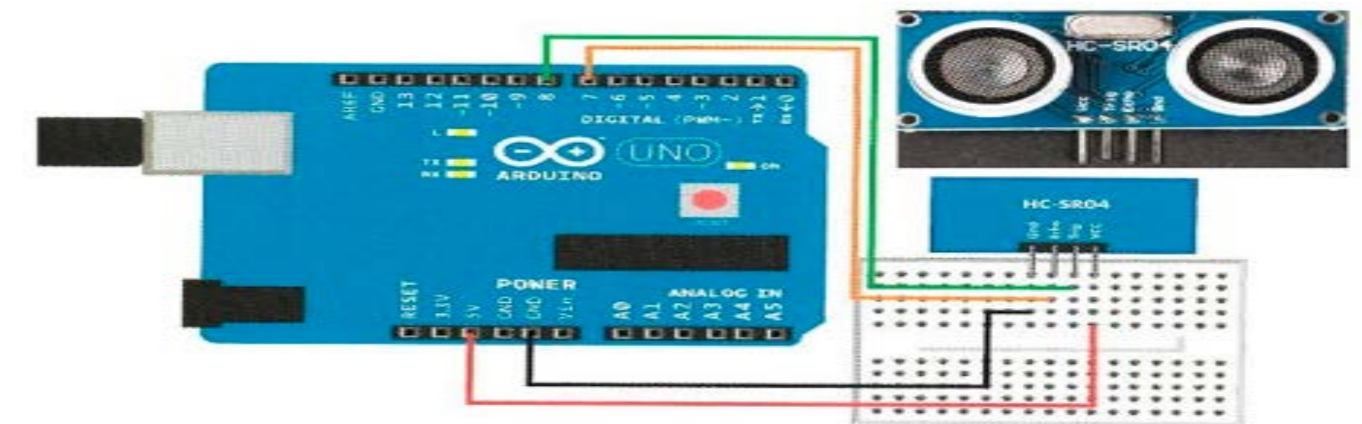
شکل ۵. سامانه‌های فرمان تراکتور (بی‌ستو و همکاران، ۲۰۲۵): (الف) سامانه فرمان هیدرولیک معمولی و (ب) سامانه فرمان الکتروهیدرولیکی



الف

### ۵) مکاترونیک در اندازه‌گیری فاصله

مکاترونیک با ترکیب حسگرهای دقیق (مثل حسگرهای صوت<sup>۱</sup>، لیزری یا مادون قرمز)، واحدهای پردازش سیگنال و سامانه‌های نظارتی، اندازه‌گیری فاصله را به صورت دقیق و سریع ممکن می‌سازد. این سامانه‌ها با تحلیل داده‌های حسگر و تنظیم واکنش‌های مناسب، کاربردهای گسترده‌ای در ماشین‌های آدمواره‌ای، خودگردان، خودران و سامانه‌های خودکار سازی صنعتی دارند. ماشین‌های کشاورزی برای انجام عملیات دقیق باید به موقعیت اشیاء اطراف و همچنین مکان خود ماشین آگاه باشند. برای این منظور، اغلب از حسگرهای صوت (شکل ۶) استفاده می‌شود (والورد گاسپارینو و همکاران، ۲۰۲۳)<sup>۲</sup>.



شکل ۶. مونتاژ یک فاصله‌یاب اولتراسونیک RS-CH ۴۰ با استفاده از یک ریزپردازنده آردوینو ۳ (والورد گاسپارینو و همکاران، ۲۰۲۳)

از سوی دیگر، اینترنت اشیاء با اتصال این دستگاه‌ها به شبکه‌های اینترنتی، امکان جمع‌آوری داده‌های دقیق از وضعیت خاک، هوا، رشد گیاهان و مصرف آب را فراهم می‌آورد. این داده‌ها به کشاورزان کمک می‌کند تا تصمیم‌گیری‌های بهینه‌تری برای افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف منابع طبیعی داشته باشند و در نتیجه کشاورزی هوشمند و پایدارتری را تجربه کنند.

### نتایج و توصیه‌ها

با توجه به مطالب ارائه‌شده، مکاترونیک نقشی اساسی در

### مکاترونیک و اینترنت اشیاء

اینترنت اشیاء<sup>۳</sup> شبکه‌ای از دستگاه‌ها و حسگرهای متصل به اینترنت است که می‌تواند داده‌ها را به صورت خودکار جمع‌آوری کرده و آن‌ها را مبادله کند. این فناوری امکان نظارت و نظارت هوشمند بر محیط‌های مختلف را فراهم می‌کند و به بهبود کارایی و تصمیم‌گیری‌های سریع‌تر کمک می‌کند. امروزه مکاترونیک و اینترنت اشیاء با هم ترکیب شده و انقلابی در کشاورزی نوین ایجاد کرده‌اند. مکاترونیک با ادغام حسگرها، عملگرها و سامانه‌های نظارت، امکان ساخت ماشین‌ها و تجهیزات هوشمند کشاورزی را فراهم می‌کند که می‌توانند به طور خودکار عملیات مختلفی مانند کاشت، آبیاری و برداشت را انجام دهند.

به کارگیری فناوری‌های نوین کشاورزی، به ویژه در سامانه‌های نرخ متغیر، هدایت خودکار ماشین‌ها و استفاده از حسگرهای هوشمند ایفا می‌کند. تحقیقات نشان داده است که ترکیب مهندسی مکانیک، الکترونیک، نظارت و فناوری اطلاعات در قالب سامانه‌های مکاترونیکی، موجب افزایش دقت، کاهش مصرف نهاده‌ها و بهینه‌سازی عملکرد ماشین‌های کشاورزی شده است. همچنین ادغام مکاترونیک با اینترنت اشیاء، امکان

1. Ultrasonic sensors
2. Valverde Gasparino et al
3. Arduino
4. Internet of things (IOT)

مدیریت داده‌محور و هوشمند مزرعه را فراهم می‌کند. از جمله چالش‌های اصلی توسعه سامانه‌های مکاترونیکی در ایران می‌توان به کمبود زیرساخت فناوری و تجهیزات پیشرفته، محدودیت‌های مالی و تحریم‌های بین‌المللی در تأمین قطعات و فقدان ارتباط مؤثر بین دانشگاه و صنعت برای تجاری‌سازی و بهره‌برداری از دستاوردهای پژوهشی اشاره کرد. با توجه به چالش‌های موجود در کشور توصیه می‌شود متخصصان و کارشناسان کشاورزی ضمن آشنایی با مفاهیم و کاربردهای مکاترونیک، آموزش‌های عملی و بومی‌شده در این زمینه را فراگیرند. توانمندسازی نیروهای فنی از طریق برنامه‌های آموزشی مشترک بین دانشگاه‌ها، مراکز فنی و صنعت کشاورزی می‌تواند زمینه‌ساز توسعه کشاورزی هوشمند و متکی بر منابع داخلی شود. همچنین گسترش همکاری میان مهندسان کشاورزی و متخصصان مکاترونیک در طرح‌های پژوهشی و اجرایی، به ویژه در طراحی و ساخت تجهیزاتی متناسب با نیازهای بومی، گامی مؤثر برای هوشمندسازی واقعی و پایدار کشاورزی کشور خواهد بود.

### منابع

کفاشان، جلال و باقری، نیکروز. (۷۹۳۱). کاربرد مهندسی مکاترونیک در توسعه فناوری ماشین‌آلات کشاورزی صنعتی (چالش‌ها و راه‌کارها). فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی.

۶۱(۱۳): ۸۶-۵۵.

Aghi, D., Mazzia, V., & Chiaberge, M. 2020. Local motion planner for autonomous navigation in vineyards with a RGB-D camera-based algorithm and deep learning Synergy. *Machines*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.12815>

Bolton, W. 1999. *Mechatronics* (2nd ed). New York: Addison Wesley Longman Publishing.

Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., & Grieve, B. 2018. *Agricultural robotics: the future of robotic agriculture*. Arxiv preprint arxiv: 1806.06762.

Erdélyi, V., & János, L. 2017. *Mechatronics in Agriculture*. Scientific Bulletin SeriesC: Fascicle Mechanics, Tribology, *Machine Manufacturing Technology*. 31: 31-35.

Gore, T. H., Kote, M. P., Varpe, P. B., & Jagtap, M. T. 2016. *Crop monitoring analysis and controlling system*, 6(2), 138-141.

Mustak, A., Lepeng, S., Ying, J., & Hongbin, M. 2022. Embedded Design of Automatic Pesticide Spraying Robot Control System. *Computer Science*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.13689>

Myklevy, M., Doherty, P., & Makower, J. 2016. *The new grand strategy*. New York: St. Martin's Press.

Nofech, J. & Khamesee, M. B. 2025. Machine learning for automation of 3-DoF control of magnetically-levitated microrobot. *Mechatronics*, 110.

Rovira-Más, F., Zhang, Q., & Hansen, A. C. 2010. *Mechatronics and intelligent systems for off-road vehicles*. London: Springer-Verlag.

Rovira-Más, F., Zhang, Q., & Saiz-Rubio, V. 2020. *Mechatronics and Intelligent Systems in Agricultural Machinery*. In Holden, N. M., Wolfe, M. L., Ogejo, J. A., & Cummins, E. J. Ed.) , Introduction to Biosystems Engineering.

Valverde Gasparino, M., Higuti, V., Narenthiran V Siva-kumar, A., Velasquez, A., Becker, M., & Chowdhary, G. 2023. CropNav: a Framework for Autonomous Navigation in Real Farms. Conference: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*

Verified Market Research. 2018. *Global agriculture robots market size by type (driverless tractors, automated harvesting machine, others), by application (field farming, dairy management, indoor farming, others)*, by geography scope and forecast. Report ID: 3426. Verified Market Research Inc.: Boonton, NJ, USA, pp. 78.

Yi-Seo, M., Yong-Joo, K., Seungyun, B., Seung-Min, B., & Wan-Soo, K. 2025. Development of electrohydraulic proportional valve model for precise steering control in autonomous tractors. *Machines*. 3(2), 138; <https://doi.org/10.3390/machines13020138>.

GAO-24-105962, Precision Agriculture. 2024. *Precision Agriculture*. Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use.

## Using of Mechatronics in the Smart Automation of Agricultural Machinery

**Abdollah Imanmehr<sup>1</sup> and Mohsen Heidarisoltanabadi<sup>2</sup>**

*1. Assistant professor, Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran. Iran (Corresponding author). Email: imanmehr2000@yahoo.com*

*2. Associate professor, Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.*

### Abstract

*Mechatronics refers to engineering systems in which computers, electronic components, and mechanical parts are integrated to perform specific operations. This interdisciplinary field is considered a prerequisite for the automation and intelligent control of equipment, formed by the integration of mechanical engineering, electronics, computer science, and control systems. Mechatronic systems consist of electromechanical hardware and control software that automate operations. In mechatronics, mechanical and electrical components, along with control strategies, are considered from the outset as a unified system, reflecting the concept of concurrent engineering in design. Sensors play a critical role in a mechatronic system by collecting and transmitting the information necessary to support automated operations. The high level of communication between sensors and computers has accelerated the development of automation in agricultural machinery. Actuators in mechatronic systems are electromechanical or electrohydraulic components that receive electrical signals and drive mechanical movement. Examples of mechatronics applications in agricultural machinery include autonomously guided tractors, variable-rate fertilizer or pesticide applicators, and automatic tractor steering systems. Today, the integration of the Internet of Things (IOT) as one of the emerging technologies with mechatronics has significantly contributed to the smart automation of agricultural operations, including mechanization. Among the main challenges in the development of mechatronic systems in Iran are the lack of technological infrastructure and advanced equipment, financial constraints, and the lack of effective communication between universities and industry for commercialization and exploitation of research achievements. In this regard, empowering technical forces through joint training programs between universities, technical centers, and the agricultural industry can pave the way for the development of smart agriculture that relies on domestic resources.*

**Keywords:** Mechatronics, Intelligent Systems, Sensors, Actuators, Agricultural Robotics