



فراصوت در خدمت کشاورزی هوشمند: بررسی رویکردها و کاربردهای عملی

نگار هریوندی^۱، جلال برادران مطیع^{۲*}

۱. دانشجوی مقطع کارشناسی مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد (negar.harivandi@um.ac.ir)

۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد (j.baradaran@um.ac.ir)

چکیده

کشاورزی امروزی با چالش‌های متعددی شامل تغییرات اقلیمی، کاهش منابع آب، کاهش حاصل خیزی خاک و نیاز به تولید پایدار مواجه است. هدف این مطالعه بررسی کاربرد فناوری حسگرهای فراصوت در کشاورزی هوشمند برای افزایش بهره‌وری، کاهش مصرف منابع و ارتقای کشاورزی پایدار است. در این تحقیق، نحوه استفاده از فناوری فراصوت برای اندازه‌گیری رطوبت و بافت خاک، پایش رشد و ارتفاع گیاهان، ارزیابی کیفیت و سلامت محصولات، کنترل آفات و پرندگان و بهینه‌سازی مصرف کود و هدایت خودکار ماشین‌های کشاورزی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که فناوری فراصوت قادر است داده‌های دقیق و بلادرنگ فراهم کرده و امکان تصمیم‌گیری بهینه برای کشاورزان را ایجاد کند، که در نهایت منجر به افزایش بهره‌وری محصولات، کاهش مصرف آب و کود و کاهش اثرات محیطی می‌شود. با این حال، محدودیت‌هایی نیز مشاهده شد که شامل حساسیت تجهیزات نسبت به شرایط محیطی مانند باد، بارش و گرد و غبار، نیاز به نصب و نگهداری تخصصی، و هزینه‌های اولیه بالا برای اجرای فناوری است. برای کاهش این محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود سنسورها با مقاومت بالاتر در برابر شرایط محیطی طراحی شوند، فناوری فراصوت با سیستم‌های مدیریت هوشمند کشاورزی ادغام گردد و داده‌های جمع‌آوری شده به‌صورت هوشمند برای برنامه‌ریزی دقیق مصرف منابع و بهبود عملکرد محصولات مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فناوری فراصوت می‌تواند نقش مهمی در توسعه کشاورزی دقیق، افزایش بهره‌وری و مدیریت بهینه منابع ایفا کند و راهکاری عملی برای دستیابی به کشاورزی پایدار ارائه دهد.

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی میزان کود، پایش رشد گیاهان، حسگرهای فراصوت، کشاورزی دقیق، ناوبری خودکار.

*نویسنده مسئول: جلال برادران مطیع (j.baradaran@um.ac.ir)



مقدمه

کشاورزی در دهه‌های اخیر با چالش‌های بزرگی همچون تغییرات اقلیمی، کمبود منابع آبی، کاهش حاصل‌خیزی خاک و رشد سریع جمعیت جهان مواجه شده است. پاسخ به این چالش‌ها مستلزم گذار از روش‌های سنتی به سمت کشاورزی هوشمند است؛ رویکردی که با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، امکان مدیریت دقیق‌تر منابع و افزایش بهره‌وری را فراهم می‌کند. در این میان، فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، سنسورهای پیشرفته و امواج فراصوت^۱ نقش کلیدی در تحول کشاورزی ایفا می‌کنند. این ابزارها با پایش دقیق شرایط محیطی، بهینه‌سازی مصرف آب و کود، و بهبود فرآیندهای زیستی، نه تنها موجب افزایش تولید می‌شوند بلکه پایداری و سلامت اکوسیستم کشاورزی را نیز تضمین می‌کنند.

اکوستیک^۲ شاخه‌ای از فیزیک است که به مطالعه علمی تولید، انتشار، انتقال و دریافت امواج مکانیکی در محیط‌های گازی، مایع و جامد می‌پردازد. این امواج که عموماً به‌عنوان «امواج صوتی» شناخته می‌شوند، حاصل ارتعاش ذرات محیط بوده و با پارامترهایی نظیر فرکانس، طول موج، دامنه، سرعت انتشار و شدت مشخص می‌شوند. این دانش با هدف توصیف و مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها شکل گرفته و علاوه بر جنبه‌های نظری، زمینه‌ساز توسعه فناوری‌ها و ابزارهای نوین شده است [۱].

از سوی دیگر، ورود اکوستیک به حوزه‌های نوظهور، زمینه تحول در علوم و فناوری‌های گوناگون را فراهم کرده است. یکی از این حوزه‌ها، کشاورزی نوین و هوشمند است که در آن، فناوری‌های اکوستیکی به‌عنوان ابزار غیرمخرب برای پایش سلامت گیاهان، تشخیص آفات، ارزیابی کیفیت محصولات و حتی نظارت بر عملکرد ماشین‌آلات به کار گرفته می‌شوند. استفاده از روش‌های اکوستیکی در کشاورزی، به دلیل ماهیت دقیق، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست، رویکردی نوآورانه برای افزایش بهره‌وری و پایداری تولیدات کشاورزی به شمار می‌آید.

فناوری صوت فراصوت به امواج صوتی با فرکانس‌هایی بالاتر از محدوده شنوایی انسان اشاره دارد، یعنی معمولاً بالاتر از حدود ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد [۲]. این در حالی است که صوت اکوستیک یا قابل شنیدن در بازه فرکانسی تقریبی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز قرار دارد. به بیان دیگر، محدوده اکوستیک شامل صداهایی است که انسان‌ها می‌توانند بشنوند، اما فراصوت شامل امواجی است که بسیار سریع‌تر نوسان کرده و خارج از توان شنوایی انسان هستند. همچنین، فناوری فراصوت معمولاً به فرکانس‌هایی در بازه ۲۰ کیلوهرتز تا چند گیگاهرتز اشاره دارد؛ برای مثال، در کاربردهای صنعتی و پزشکی، از بازه‌های متوسط (مثلاً ۱۰۰ کیلوهرتز تا چند مگاهرتز) یا حتی تا محدوده گیگاهرتز استفاده می‌شود [۳].

فناوری فراصوت به‌عنوان یک ابزار غیرمخرب و بلادرنگ، در سال‌های اخیر توجه زیادی را در حوزه کشاورزی به‌خود جلب کرده است. این فناوری با استفاده از امواج صوتی با فرکانس بالا، قادر است ویژگی‌های داخلی گیاهان را بدون آسیب به ساختار آنها بررسی کند. این ویژگی، فراصوت را به ابزاری مناسب برای پایش سلامت گیاهان، کنترل کیفیت بذر، ارزیابی استرس، تشخیص آفات و بیماری‌ها، و ارزیابی رسیدگی میوه‌ها تبدیل کرده است. یکی از پیشرفت‌های اخیر در این حوزه، ادغام فناوری فراصوت با هوش مصنوعی (AI^۳) و اینترنت اشیا (IoT^۴) است. این ترکیب، دقت پایش را افزایش داده و امکان تشخیص زودهنگام تغییرات فیزیولوژیکی در گیاهان را فراهم می‌کند. با این حال، چالش‌هایی مانند اختلال اکوستیکی محیطی همچنان وجود دارند که نیازمند تحقیقات بیشتر برای غلبه بر آنها هستند [۴].

ویژگی بارز این فناوری، توانایی عملکرد در محیط‌های غیرشفاف و پیچیده است که سنسورهای نوری یا شیمیایی سنتی قادر به ارائه داده‌های دقیق در آن‌ها نیستند. علاوه بر این، ادغام فناوری فراصوت با هوش مصنوعی و زیرساخت‌های اینترنت اشیا موجب افزایش دقت پایش، تحلیل سریع داده‌ها و امکان تصمیم‌گیری خودکار در مدیریت مزرعه می‌شود. بنابراین، فناوری فراصوت نه تنها به

¹ Ultrasonic

² Acoustics

³ Artificial intelligence

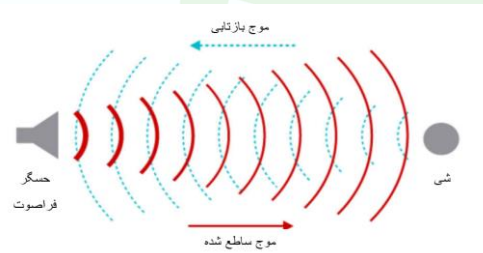
⁴ Internet of Things



عنوان یک ابزار پژوهشی ارزشمند، بلکه به‌عنوان یک فناوری کاربردی در کشاورزی هوشمند، نقشی اساسی در بهبود بهره‌وری محصولات، مدیریت منابع و ارتقای پایداری کشاورزی ایفا می‌کند [۴].

سیستم‌های فراصوت بر پایه اثر پیزوالکتریک عمل می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که کریستال‌های پیزوالکتریک با اعمال میدان الکتریکی ارتعاش کرده و امواجی بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز تولید می‌کنند. این امواج پس از برخورد به اجسام بازتاب یافته و دوباره توسط حسگر دریافت می‌شوند. با تبدیل امواج بازگشتی به سیگنال الکتریکی و تحلیل زمان رفت‌و برگشت، می‌توان فاصله، ابعاد یا ویژگی‌های جسم را به‌دست آورد. پردازش سیگنال شامل تقویت، فیلتر و حذف نویز است تا نتایج دقیق حاصل شود. این فناوری امکان اندازه‌گیری بدون تماس، تصویربرداری داخلی و شناسایی عیوب مواد را فراهم کرده و در پزشکی، تست غیرمخرب، سنجش جریان، جوشکاری فراصوت و رادارهای صنعتی کاربرد گسترده دارد. با این حال، کارایی آن تحت تأثیر عواملی مانند چگالی، دما و نویز محیطی قرار می‌گیرد [۵].

شکل ۲ بیانگر شماتیک یک سیستم فراصوت می‌باشد که نحوه عملکرد آن را به شکل ساده بیان می‌کند.



شکل (۱) شماتیک عملکرد یک حسگر فراصوت

مبدل‌های فراصوت و تولید سیگنال

امواج فراصوت، امواج مکانیکی با فرکانس بالاتر از محدوده شنوایی انسان هستند که می‌توانند در رسانه‌های مختلف مانند گازها، مایعات و جامدات انتشار یابند. تولید و دریافت این امواج معمولاً با استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک انجام می‌شود؛ این مبدل‌ها در اثر اعمال میدان الکتریکی ارتعاش کرده و امواج صوتی فراصوت تولید می‌کنند و حالت معکوس آن نیز صادق است، هنگامی که امواج به آن‌ها برخورد می‌کنند، ارتعاش‌ها به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند. امواج ارسالی با سرعت مشخص حرکت کرده و هنگام برخورد با سطوح یا تغییرات چگالی محیط، بخشی از انرژی آن‌ها بازتاب می‌شود و توسط همان مبدل یا مبدل‌های دیگر دریافت می‌گردد. با تحلیل زمان رفت و برگشت، دامنه، فاز و فرکانس بازتاب، می‌توان اطلاعات دقیقی درباره فاصله، ساختار و ویژگی‌های ماده به‌دست آورد. علاوه بر آن، پدیده‌هایی مانند کاویتاسیون، پراکندگی و نفوذپذیری امواج در محیط نقش مهمی در کاربردهای پزشکی، صنعتی و کشاورزی فراصوت دارند. به‌طور کلی، سیستم‌های فراصوت بر پایه تولید، انتشار، بازتاب و تحلیل امواج مکانیکی با فرکانس بالا طراحی می‌شوند و این اصول امکان کاربرد گسترده آن‌ها در تصویربرداری پزشکی، اندازه‌گیری غیرمخرب، پایش محیط و کشاورزی هوشمند را فراهم کرده است [۶].

انواع حسگرهای فراصوت

۱. حسگرهای فعال^۱

این دسته از حسگرها به‌صورت مستقل امواج فراصوت تولید می‌کنند و بازتاب آن‌ها از سطوح هدف را دریافت و تحلیل می‌کنند. مکانیزم تولید و دریافت امواج عمدتاً مبتنی بر مبدل‌های پیزوالکتریک است که انرژی الکتریکی را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل نموده و امواج صوتی با فرکانس بالا منتشر می‌کنند. تحلیل زمان رفت و برگشت، دامنه و فاز امواج بازتابی امکان تعیین دقیق فاصله، هندسه سطح و خصوصیات محیط را فراهم می‌آورد. این نوع حسگرها به دلیل دقت بالا، توان عملیاتی گسترده و قابلیت کارکرد در محیط‌های متغیر، در کاربردهایی نظیر اندازه‌گیری فاصله، تشخیص موانع و تصویربرداری صنعتی و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷].

¹ Active Ultrasonic Sensors



۲. حسگرهای غیرفعال^۱

برخلاف حسگرهای فعال، این نوع حسگرها تولید امواج صوتی مستقل ندارند و صرفاً به دریافت و پردازش امواج فراصوت موجود در محیط می‌پردازند. حساسیت و دقت آن‌ها وابسته به قدرت و جهت‌گیری منابع صوتی محیط است و عمدتاً در پایش ارتعاشات، تحلیل اختلال و سیستم‌های امنیتی کاربرد دارند. این حسگرها برای کاربردهایی که نیاز به تولید امواج مستقل وجود ندارد و تحلیل تغییرات طبیعی یا ناشی از فعالیت‌های محیطی مورد نظر مناسب می‌باشند [۸].

۳. حسگرهای ترکیبی یا دو منظوره^۲

این دسته از حسگرها قادر به انتشار و دریافت همزمان امواج فراصوت هستند و ضمن اندازه‌گیری فاصله، قادر به جمع‌آوری داده‌های کیفی از سطح هدف نیز می‌باشند. کاربرد آن‌ها در محیط‌های پیشرفته پزشکی، صنعتی و کشاورزی هوشمند قابل توجه است، به‌ویژه در پایش رطوبت خاک، ارزیابی رشد گیاهان و تشخیص زودهنگام آفات، نقطه‌ای که نیاز به همزمانی سنجش کمی و کیفی داده‌ها ضروری است [۸].

طبقه‌بندی بر اساس باند فرکانسی

حسگرهای فراصوت همچنین می‌توانند بر اساس محدوده فرکانسی خود دسته‌بندی شوند:

- فرکانس پایین (۲۰-۲۰۰ کیلوهرتز): مناسب برای اندازه‌گیری فاصله‌های بلند و کاربردهای صنعتی و رباتیک.
- فرکانس متوسط (۲۰۰ کیلوهرتز-۱ مگاهرتز): کاربرد در تصویربرداری صنعتی و پزشکی، با تعادل بین نفوذپذیری و وضوح داده.
- فرکانس بالا (۱-۱۰ مگاهرتز و بالاتر): کاربرد در تصویربرداری پزشکی دقیق، پایش مواد حساس و کاربردهای پیشرفته کشاورزی.

تکنیک‌های فراصوت تماسی و غیرتماسی

در تکنیک‌های تماسی فراصوت که در تشخیص‌های پزشکی و بسیاری از کاربردهای تست غیرمخرب متداول است، استفاده از یک واسطه (ژل یا مایع) برای کاهش فاصله هوا و کاهش تلفات انعکاسی در مرزها ضروری است. این روش سیگنال قوی و نسبت سیگنال به نویز بالایی را فراهم می‌کند. این روش، به دلیل کاهش بازتاب در مرز هوا-جامد، موجب افزایش نسبت سیگنال به نویز و تقویت دامنه موج دریافتی می‌شود. فرکانس‌های کاری رایج در این تکنیک معمولاً در بازه ۱ تا ۲۰ مگاهرتز برای تصویربرداری پزشکی (مانند اکوکاردیوگرافی) و بین ۵۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز برای آزمون‌های غیرمخرب (NDT^۳) هستند [۸].

در مقابل، فراصوت غیرتماسی زمانی که تماس مستقیم امکان‌پذیر یا مطلوب نباشد، مانند سطوح داغ، قطعات متحرک یا اسکن در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. رایج‌ترین روش، فراصوت هوا-کوپل است، اما به دلیل اختلاف زیاد امپدانس بین مواد مبدل و هوا، تنها بخش کوچکی از انرژی منتقل می‌شود. برای کاهش تضعیف، مبدل‌های هوا-کوپل با فرکانس پایین‌تر، ولتاژ تحریک بالا و حساسیت بیشتر طراحی می‌شوند [۹ و ۱۰].

روش‌های غیرتماسی فراصوت که توسعه یافته‌اند به شرح ذیل می‌باشد:

- **فراصوت هوا-کوپل:** به دلیل اختلاف زیاد امپدانس صوتی بین مبدل (سرامیک پیزوالکتریک) و هوا، تنها حدود 10^{-4} انرژی منتقل می‌شود. برای کاهش این تلفات، مبدل‌ها در بازه ۲۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز طراحی می‌شوند، که در آن تضعیف در هوا کمتر است [۱۱]. توان تحریک در این روش معمولاً در سطح چند ده ولت تا صدها ولت پیک-به-پیک است.
- **میکرو-مبدل‌های خازنی فراصوت:** این مبدل‌ها امکان کار در فرکانس‌های بالاتر (۱-۲۰ مگاهرتز) با پهنای بلند وسیع و حساسیت بالا را فراهم می‌کنند و برای تصویربرداری غیرتماسی با رزولوشن بالا در محیط‌های بیولوژیکی یا صنعتی به کار می‌روند [۱۲].

¹ Passive Ultrasonic Sensors

² Dual/Combined Sensors

³ Non-Destructive Testing



- **مبدل‌های الکترومغناطیسی صوتی:** این روش خاص مواد رسانا است و بر اساس اثر نیروی لورنتز یا تنگش مغناطیسی کار می‌کند. فرکانس کاری معمولاً در بازه ۱۰۰ کیلوهرتز تا چند مگاهرتز است، اما بازده آن به‌طور محسوسه پایین‌تر از مبدل‌های پیزوالکتریک است و نیازمند سیگنال‌های تحریک قوی (تا صدها ولت) می‌باشد [۱۳].
- **فراصوت لیزری:** تولید امواج از طریق انبساط حرارتی یا تخریب سطح توسط سیگنال لیزری صورت می‌گیرد و آشکارسازی با لیزر تداخلی انجام می‌شود. این روش می‌تواند در بازه فرکانسی بسیار گسترده (تا چند صد مگاهرتز) کار کند و برای تصویربرداری غیرتماسی از سطوح بزرگ و مواد حساس به کار می‌رود. محدودیت آن هزینه بالا و نیاز به تجهیزات اپتیکی دقیق است [۱۴].

روش‌های غیرپیزوالکتریک مانند میکرو-مبدل‌های خازنی فراصوت ($CMUTs^1$) و روش‌های نوری/لیزری نیز پیشرفت کرده‌اند و امکان اندازه‌گیری غیرتماسی با پهنای باند وسیع‌تر یا حساسیت بالاتر را فراهم می‌کنند [۱۵ و ۱۶]. همچنین، مبدل‌های الکترومغناطیسی صوتی ($EMATs^2$) گزینه‌ای غیرتماسی برای مواد هادی ارائه می‌دهند که امواج فراصوت را از طریق نیروهای الکترومغناطیسی ایجاد می‌کنند [۱۷]. هرچند بازده آن‌ها معمولاً کمتر از مبدل‌های پیزوالکتریک است و نیاز به سیگنال‌های تحریک قوی دارد. لیزر فراصوت نیز از سیگنال لیزری برای تولید موج فراصوت از طریق انبساط حرارتی استفاده می‌کند و یک لیزر جداگانه تغییرات سطح را شناسایی می‌کند [۱۸]. این روش بدون واسطه عمل می‌کند و می‌تواند از فواصل دور کار کند، اما نیازمند تجهیزات نوری حساس و پرهزینه است. در جدول ۱ ویژگی‌های تکنیک تماسی و غیرتماسی با یکدیگر مقایسه شده است [۱۸].

جدول ۱) مقایسه تکنیک تماسی و غیرتماسی

ویژگی	فراصوت تماسی	فراصوت غیرتماسی
وضوح	وضوح بالا به دلیل تماس مستقیم	وضوح پائین به دلیل عدم تطابق امپدانس
نفوذ	عمق نفوذ خوب	عمق نفوذ محدود
محیط اتصال	نیاز به محیط اتصال	بدون نیاز به محیط اتصال
کاربردها	به‌طور گسترده در تصویربرداری پزشکی	در موارد صنعتی، تخصصی پزشکی
مزایا	کیفیت تصویر بالا، کاربرد گسترده	غیرتهاجمی، مناسب برای نواحی حساس
محدودیت‌ها	نیاز به تماس با پوست دارد و برای زخم‌های باز مناسب نمی‌باشد	وضوح پائین‌تر، نفوذ محدود

تصویربرداری و تکنیک‌های اندازه‌گیری اولتراسونیک

با توجه به کاربرد، روش‌های مختلف اولتراسونیک مانند پالس-اکو^۳، انتقال مستقیم^۴ و توموگرافی برای دستیابی به اطلاعات دقیق از ماده مورد بررسی استفاده می‌شوند [۱۹ و ۲۰]. در حالت پالس-اکو، مبدل امواج کوتاه اولتراسونیک را به ماده ارسال کرده و اکوهای بازگشتی را دریافت می‌کند. زمان پرواز و دامنه اکو برای اندازه‌گیری ویژگی‌های داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش پایه تصویربرداری پزشکی و شناسایی نقص‌های غیرمخرب است. سیستم‌های مدرن مبتنی بر آرایه می‌توانند با تأخیرهای الکترونیکی پرتو تشکیل دهند و وضوح جانبی و امکان اسکن بدون حرکت فیزیکی پروب را بهبود بخشند [۱۹].

¹ Capacitive micromachined ultrasonic transducer

² Electromagnetic Acoustic Transducers

³ Pulse-Echo

⁴ Through-Transmission



در حالت انتقال مستقیم، فرستنده و گیرنده در دو طرف جسم قرار می‌گیرند و میزان عبور موج اولتراسونیک از ماده اندازه‌گیری می‌شود. این روش برای شناسایی نقص‌های بزرگ یا مناطق با تضعیف بالا کاربرد دارد، گرچه اطلاعات عمق به‌صورت مستقیم ارائه نمی‌شود مگر اینکه با اسکن یا توموگرافی ترکیب شود [۱۹].

روش‌های توموگرافی با ترکیب اندازه‌گیری‌های متعدد از زوایای مختلف، نقشه‌های دوبعدی یا سه‌بعدی از خواص آکوستیکی ماده ایجاد می‌کنند. در توموگرافی انتقالی، زمان پرواز و تضعیف در مسیرهای متعدد اندازه‌گیری و با استفاده از الگوریتم‌های معکوس توزیع فضایی سرعت صوت و تضعیف محاسبه می‌شود. توموگرافی بازتابی با جمع‌آوری داده‌های اکو از زوایای متعدد، نقشه بازتاب‌پذیری ایجاد می‌کند. روش‌های ترکیبی سیگنال‌های انتقالی و بازتابی را با یکدیگر ثبت می‌کنند [۱۹].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فناوری فراصوت در حوزه کشاورزی عمدتاً بر کاربردهای محدود مانند اندازه‌گیری رطوبت خاک، پایش رشد گیاهان و کنترل آفات متمرکز بوده است. با وجود پیشرفت‌های اولیه، این تحقیقات غالباً محدود به محیط‌های آزمایشگاهی یا نمونه‌های کوچک بوده‌اند و کاربرد در مقیاس مزرعه و تعامل با سایر فناوری‌های هوشمند کشاورزی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، کمبود مطالعات جامع در زمینه مدیریت مصرف آب، بهینه‌سازی کوددهی و پایش سلامت محصولات با استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان یکی از خلاءهای پژوهشی اصلی به شمار می‌رود.

به‌منظور انجام این مطالعه مروری، جستجوی نظام‌مند منابع علمی در پایگاه‌های داده معتبر شامل الزویر^۱، وایلی^۲، MDPI و موتور جستجوی گوگل اسکولار^۳ صورت گرفت. بازه زمانی جستجو سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ را دربر می‌گرفت تا ضمن مطالعات بنیادی، پژوهش‌های به‌روز پوشش داده شوند. کلیدواژه‌های مورد استفاده در جستجو عبارت بودند از: *Ultrasound in Agriculture*، *Ultrasonic Sensors*، *Smart Farming* و *Precision Agriculture* در مرحله نخست حدود ۸۰ مقاله شناسایی گردید. سپس بر اساس معیار ورود (ارتباط مستقیم با کاربرد فناوری فراصوت در حوزه کشاورزی هوشمند) و معیار خروج (مقالات تکراری، غیرمرتبط، یا فاقد نتایج کاربردی)، تعداد ۳۹ مقاله برای تحلیل و مرور نهایی انتخاب شد. این فرآیند امکان اطمینان از جامعیت نسبی، به‌روز بودن و اعتبار نتایج گردآوری‌شده را فراهم ساخت. هدف این مقاله، ارائه یک بررسی گسترده و سیستماتیک از کاربردهای فناوری فراصوت در کشاورزی است تا ضمن جمع‌بندی یافته‌های قبلی، افق‌های نوین پژوهشی و فرصت‌های عملی برای توسعه کشاورزی هوشمند شناسایی شود.

کاربرد فناوری فراصوت در کشاورزی

علاوه بر انتشار و دریافت امواج فراصوت، گیاهان قادرند اطلاعات محیطی و بین‌گونه‌ای را از طریق این امواج تبادل کنند [۱۹]. امواج فراصوت می‌توانند حاوی اطلاعاتی درباره شرایط تنش محیطی، وضعیت آب، حضور آفات یا گیاهان و حیوانات هم‌محیط باشند. به این ترتیب، گیاهان با شنیدن این سیگنال‌ها می‌توانند وضعیت متابولیکی، هورمونی و اپی‌ژنتیکی خود را از پیش آماده کنند و وارد حالت «آمادگی» شوند [۲۱ و ۲۲].

انتشار فراصوت می‌تواند به نقشه‌برداری محیطی و هدایت رشد گیاهان کمک کند. برای مثال، گیاهان می‌توانند با تشخیص صدای آب، حضور گرده‌افشان‌ها یا فعالیت گیاهان و حیوانات هم‌محیط، جهت یا شدت رشد خود را تغییر دهند تا منابع محیطی را بهتر استفاده کنند [۲۱].

بنابراین، گیاهان می‌توانند با ادراک و انتشار امواج صوتی و فراصوت، حتی بدون داشتن اندام‌های حسی خاص، یک سیستم ارتباطی سریع، کم‌هزینه و مؤثر داشته باشند. این سیستم به آن‌ها کمک می‌کند تا رشد، توسعه و مقاومتشان در برابر تنش‌ها بهبود یابد. این سیستم نه تنها توانایی واکنش به تهدیدات محیطی را افزایش می‌دهد، بلکه گیاهان را قادر می‌سازد تا اطلاعات محیطی را به دیگر گیاهان و موجودات زنده منتقل کنند و پاسخ‌های هماهنگ ایجاد نمایند [۲۲ و ۲۳].

¹ Elsevier

² Wiley

³ Google Scholar



این بخش به بررسی کاربردهای این فناوری در کشاورزی اختصاص دارد. در این چارچوب، جنبه‌های مختلفی همچون پایش شرایط خاک، ارزیابی کیفیت بذر، سنجش سلامت گیاه، شناسایی آفات و بیماری‌ها و همچنین ارزیابی میزان رسیدگی میوه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند. به کارگیری این روش می‌تواند دیدگاه‌های نوینی در زمینه افزایش دقت و کارایی در فرآیندهای کشاورزی فراهم آورد و نقشی مؤثر در توسعه راهکارهای غیرمخرب و پایدار ایفا کند.

اندازه‌گیری رطوبت: اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در کشاورزی دقیق و مدیریت بهینه منابع آب شناخته می‌شود. فناوری فراصوت، به‌عنوان روشی غیرمخرب و بدون تماس، با انتشار امواج صوتی با فرکانس بالا در داخل خاک و تحلیل رفتار بازتاب یا سرعت انتشار این امواج، امکان تخمین دقیق میزان رطوبت را فراهم می‌آورد. Orhan و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که ویژگی‌های امواج فراصوت، نظیر انرژی و دامنه، با رطوبت خاک رابطه‌ای مستقیم دارند و با بهره‌گیری از مدل‌های آماری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توان نتایج قابل اعتماد و با دقت بالا به دست آورد [۲۴].

مزیت بارز این روش نسبت به سنسورهای سنتی مقاومتی یا خازنی، عدم نیاز به تماس مستقیم با خاک و امکان پایش مداوم و بلادرنگ رطوبت است. این ویژگی باعث افزایش دقت اندازه‌گیری و کاهش اثرات ناشی از تغییرات فیزیکی، دما و شوری خاک می‌شود. به همین دلیل، فناوری فراصوت به‌عنوان ابزاری پیشرفته در مدیریت بهینه آبیاری، کاهش مصرف آب و پایش سلامت محصولات کشاورزی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲۴].

تحلیل بافت خاک: در حوزه کشاورزی و مدیریت منابع خاک، فناوری فراصوت به‌عنوان ابزاری نوین برای تحلیل بافت خاک مورد توجه قرار گرفته است. Kilinc و Orhan (۲۰۲۵) با استفاده از آنالایزر دیجیتال بافت خاک مبتنی بر فراصوت، قادر به برآورد نسبت‌های شن، سیلت و رس در مخلوط خاک-آب شدند. این سیستم با تحلیل تغییرات زمان‌بندی امواج فراصوت، به‌طور مؤثر ویژگی‌های فیزیکی خاک را شناسایی می‌کند. مزیت اصلی این فناوری حذف نیاز به فرآیندهای زمان‌بر آزمایشگاهی مانند هیدرومتری و الک کردن است و در عین حال دقت و تکرارپذیری بالایی ارائه می‌دهد. در گام‌های بعدی توسعه، داده‌های تکمیلی نظیر pH و هدایت الکتریکی به این سامانه‌ها افزوده شد و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، توانایی سیستم در طبقه‌بندی و پیش‌بینی کیفیت خاک به شکل قابل توجهی افزایش یافت. به‌طور خاص، این فناوری می‌تواند کشاورزان را در انتخاب الگوی کشت بهینه، بهبود مدیریت آبیاری، و پایش مداوم کیفیت خاک یاری کند. افزون‌براین، یکپارچه‌سازی آن با سامانه‌های اینترنت اشیاء و سنسورهای بی‌سیم، زمینه‌ساز ایجاد شبکه‌های هوشمند نظارت بر خاک در مقیاس مزرعه و حتی منطقه‌ای خواهد بود [۲۵].

این سیستم با افزودن داده‌های pH و هدایت الکتریکی و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دقت پیش‌بینی پیش‌بینی ترکیب خاک (شن، سیلت و رس) را به‌طور قابل توجهی افزایش داده است. این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای فناوری فراصوت در ارائه راهکارهای سریع، دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای تحلیل بافت خاک در کشاورزی مدرن هستند [۲۵].

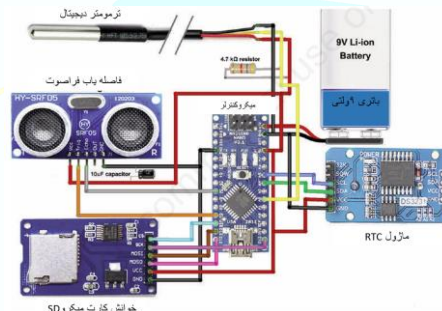
اندازه‌گیری تخلخل: در حوزه کشاورزی و علوم خاک، اندازه‌گیری تخلخل خاک از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این ویژگی تأثیر مستقیم بر ویژگی‌های هیدرولیکی و زیستی خاک دارد. در این راستا، Bradley و Ghimire (۲۰۲۴) سامانه‌ای غیرتماسی مبتنی بر فناوری فراصوت برای اندازه‌گیری تخلخل خاک طراحی کرده‌اند. این روش با استفاده از اندازه‌گیری‌های هم‌زمان و چندزاویه‌ای از انعکاس‌های امواج فراصوت از سطح خاک، امکان ارزیابی تخلخل خاک را در زمان واقعی فراهم می‌کند. این سامانه به‌ویژه برای کاربردهای کشاورزی در مقیاس مزرعه مناسب است و می‌تواند به‌صورت غیرمخرب و با دقت بالا، ویژگی‌های فیزیکی خاک را تحلیل کند. در طراحی این سامانه، از آرایه‌های فرستنده و گیرنده فراصوت با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز استفاده شده است. این سیستم قادر است با دقتی در حدود ۰.۰۴، میزان تخلخل خاک را اندازه‌گیری کند. با توجه به سطوح پایین اختلال تصادفی، این روش برای اندازه‌گیری‌های میدانی مناسب است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در کشاورزی دقیق مورد استفاده قرار گیرد [۲۶].

پایداری خاک شیل: خاک‌های شیل به دلیل ذرات ریز و ساختار لایه‌ای، مقاومت مکانیکی پایینی دارند و مستعد نشست و ترک هستند؛ بنابراین پایدارسازی آن‌ها برای کاربردهای مهندسی اهمیت دارد. یکی از روش‌های نوین و زیست‌محیطی برای افزایش مقاومت این خاک‌ها، رسوب کربنات کلسیم القاشده توسط میکروب‌ها است؛ در این فرآیند، باکتری‌های تولیدکننده آنزیم اوره‌آز اوره را تجزیه کرده و دی‌اکسید کربن تولید می‌کنند که با یون‌های کلسیم واکنش داده و منجر به رسوب کربنات کلسیم می‌شود. این رسوب فضای



بین ذرات خاک را پر و آن‌ها را به هم متصل می‌کند، مشابه عملکرد سیمان، و مقاومت فشاری خاک را افزایش می‌دهد [۲۷]. برای ارزیابی تأثیر این رسوب، سرعت موج فراصوت به‌عنوان شاخصی غیرمخرب و سریع مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ افزایش محتوای CaCO_3 موجب تراکم و چسبندگی بیشتر ذرات و افزایش سرعت موج فراصوت می‌شود. مطالعات Kai و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که سرعت موج فراصوت با مقاومت فشاری و محتوای CaCO_3 همبستگی مثبت دارد و تصاویر میکروسکوپی، تشکیل شبکه‌ای پایدار از رسوب کربنات کلسیم بین ذرات را تأیید می‌کنند [۲۷].

مدیریت آبیاری و اندازه‌گیری سطح مایعات: استفاده از سنسورهای فراصوت به‌عنوان ابزار غیرمخرب و دقیق در مدیریت آبیاری و اندازه‌گیری سطح مایعات اهمیت ویژه‌ای دارد. این سنسورها با ارسال امواج فراصوت و اندازه‌گیری زمان بازگشت آن‌ها، فاصله تا سطح مایع را محاسبه می‌کنند و در کانال‌ها، مخازن، چاه‌ها و سایر منابع آب به‌طور مؤثر کاربرد دارند. در پروژه‌های کشاورزی، از جمله در کالیفرنیا و انگلستان، سنسورهای فراصوت امکان اندازه‌گیری دقیق سطح آب و ارسال داده‌ها به‌صورت بی‌سیم را فراهم کرده و مدیریت منابع آب را از راه دور امکان‌پذیر می‌سازند. در پژوهش منتشر شده در Journal of Agricultural Engineering (۲۰۲۴)، دستگاه کم‌هزینه ArduHydro شکل ۲ با استفاده از سنسور فراصوت و میکروکنترلر آردوینو طراحی شد و در آزمایش‌های آزمایشگاهی و فضای باز عملکرد آن با سنسور فراصوت سنتی مقایسه شد. نتایج نشان داد اندازه‌گیری‌های ArduHydro با دقت بالا با سنسور سنتی همخوانی دارند و قادر به ارائه اطلاعات مکانی-زمانی دقیق از عمق آب در مسیر آبیاری هستند. در شکل ۳، نمایی از مزرعه کشاورزی با چهار بخش مشخص نشان داده شده است؛ نقاط آبی محل ورود آب و نقاط زرد، موقعیت حسگرها در بخش دوم را مشخص می‌کنند. تصویر سمت راست نصب یک حسگر در مزرعه را نمایش می‌دهد [۲۸]. بنابراین، کاربرد سنسورهای فراصوت به کشاورزان و مدیران منابع آب امکان مدیریت دقیق، کم‌هزینه و مؤثر منابع آب و افزایش بهره‌وری را می‌دهد [۲۸].



شکل ۲) نمودار سیم‌کشی اجزای دستگاه ArduHydro



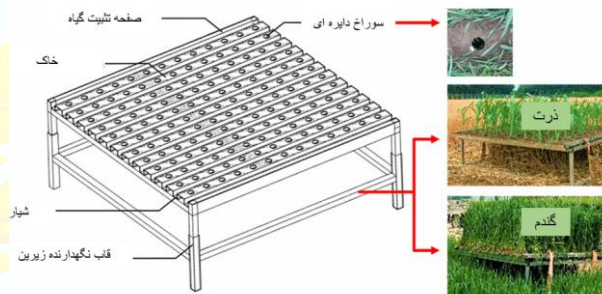
شکل ۳) نمودار سیم‌کشی اجزای دستگاه ArduHydro

بهینه‌سازی مصرف کود: استفاده از فناوری فراصوت در بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی و زیستی، به‌عنوان روشی نوین و کارآمد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. امواج فراصوت با ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی، می‌توانند جذب و کارایی کودها را در گیاهان افزایش دهند. یکی از کاربردها، تولید نانوکودها با کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح تماس آن‌هاست که رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاهان را بهبود می‌بخشد (Wei و همکاران، ۲۰۲۰) [۲۹]. علاوه بر این، فراصوت می‌تواند ساختار و ویژگی‌های فیزیکی



خاک را اصلاح کند؛ به‌ویژه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مانند کادمیوم و آرسنیک، که منجر به کاهش pH و غلظت فلزات و فراهم شدن شرایط بهتر برای رشد گیاهان می‌شود [۲۹]. در مجموع، فناوری فراصوت با بهبود ساختار کود و خاک، امکان بهینه‌سازی مصرف کود، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری در کشاورزی را فراهم می‌آورد، هرچند تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی کاربرد آن در مزارع مختلف ضروری است.

پایش رشد و ارتفاع گیاه: در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری فراصوت برای پایش رشد گیاهان و اندازه‌گیری ارتفاع آن‌ها به‌عنوان روشی دقیق و غیرمخرب مورد توجه قرار گرفته است. سنسورهای فراصوت با ارسال امواج و اندازه‌گیری زمان بازگشت آن‌ها قادر به ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی گیاهان، از جمله ارتفاع تاج و تراکم بوته هستند و می‌توانند در مدیریت بهینه منابع آب و کود مؤثر باشند [۳۰ و ۳۱]. به‌عنوان مثال، Zhang و همکاران (۲۰۲۴) با توسعه یک مدل کالیبراسیون دو ورودی نشان دادند که زاویه مشاهده و تراکم کاشت تأثیر قابل‌توجهی بر دقت اندازه‌گیری ارتفاع تاج در گندم و ذرت دارند (شکل ۴)، در حالی که عوامل محیطی کمتر مؤثر بودند. همچنین، Montazeaud و همکاران (۲۰۲۱) دستگاه فراصوت کم‌هزینه و متن‌باز برای پایش رشد گیاه ارائه کردند که امکان اندازه‌گیری مداوم و دقیق ارتفاع گیاهان در شرایط محیطی مختلف را فراهم می‌کند [۳۰ و ۳۱].



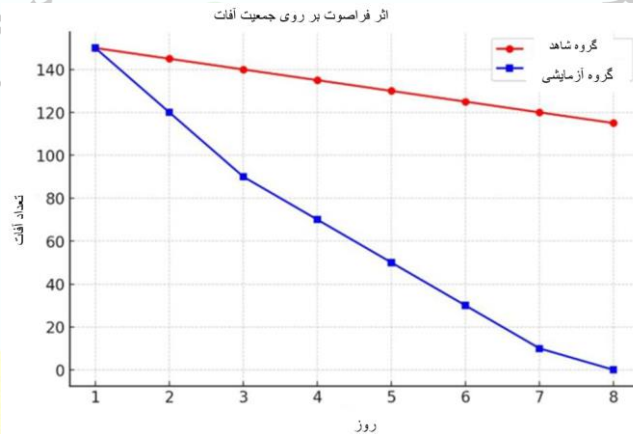
شکل ۴) تصویر شماتیک و عکس واقعی از سکوی ثابت‌سازی محصول

تشخیص کیفیت و سلامت محصولات: در سال‌های اخیر، فناوری فراصوت به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی کیفیت و سلامت محصولات کشاورزی و غذایی مطرح شده است. این تکنیک غیرمخرب، با استفاده از امواج فراصوت، امکان تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری محصولات را فراهم می‌آورد. علاوه بر کاربردهای ارزیابی کیفیت، فراصوت در فرآیندهای تولید و بسته‌بندی مواد غذایی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ برای نمونه، Chemat و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که در فرآیند خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات، استفاده از فراصوت موجب افزایش سرعت خشک‌شدن و بهبود کیفیت محصول نهایی می‌شود [۳۲]. بنابراین، فناوری فراصوت با ارائه روشی دقیق، سریع و غیرمخرب، ابزاری کارآمد در پایش کیفیت و سلامت محصولات کشاورزی و غذایی محسوب می‌شود و می‌تواند در تشخیص زودهنگام مشکلات کیفی، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و بسته‌بندی، و افزایش رضایت مصرف‌کنندگان نقش مهمی ایفا کند.

کنترل آفات و پرندگان: با کمک امواج فراصوت بازدارنده: استفاده از امواج اولتراسونیک به‌عنوان روشی غیرمخرب و زیست‌سازگار برای کنترل آفات و پرندگان در محیط‌های کشاورزی و صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. این فناوری با تولید امواج صوتی در فرکانس‌های بالا (بالتر از شنوایی انسان)، شرایط نامطلوبی برای حضور پرندگان و برخی گونه‌های آفات ایجاد می‌کند و نقش بازدارنده دارد. Dmello و همکاران (۲۰۲۵) نشان داده‌اند که پرندگان در محدوده فرکانسی ۱۳.۵ تا ۴۵.۵ کیلوهرتز حساسیت دارند و ترکیب دستگاه‌های فراصوت با محرک‌های دیداری مانند نورهای چشمک‌زن، می‌تواند حضور آن‌ها در مزارع، فرودگاه‌ها و کارخانه‌ها به‌طور مؤثر کاهش دهد [۳۳]. در مطالعه‌ای توسط Eshpulatov و همکاران (۲۰۲۵)، تأثیر امواج فراصوت با فرکانس ۲۰ تا ۵۰ کیلوهرتز بر کنترل آفات گلخانه‌ای بررسی شد. نتایج تجربی نشان داد که این روش توانست به طور میانگین ۲۵٪-۴۰٪ کاهش جمعیت مگس سفید، تریپس و شته‌ها را در طول دوره ۱۴ روزه فراهم کند. این داده‌های عددی امکان مقایسه مستقیم اثربخشی فراصوت با روش‌های دیگر کنترل آفات و ارائه چارچوب تحلیلی برای کاربردهای کشاورزی را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که علی‌رغم اثرات مثبت،



محدودیت‌هایی در کارایی این فناوری وجود دارد [۳۴]. در شکل ۵ جمعیت آفات تحت تاثیر فناوری فراصوت، در شرایط متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. گروهی از این آفات تحت عنوان گروه شاهد بدون هیچ مداخله‌ای آزمایش شدند و گروهی آزمایشی تحت تاثیر امواج فراصوت قرار گرفتند. این نمودار به خوبی بیانگر آن است که بهره‌گیری از این فناوری به کاهش موثر آفات کمک می‌کند [۳۴]. با این حال، امکان عادت پرندگان به این اصوات و کاهش اثر بازدارندگی در طول زمان وجود دارد. به‌طور کلی، فناوری فراصوت می‌تواند بخشی از یک رویکرد یکپارچه مدیریت آفات و پرندگان باشد و با حداقل آسیب به محیط زیست، از خسارت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی جلوگیری کند.

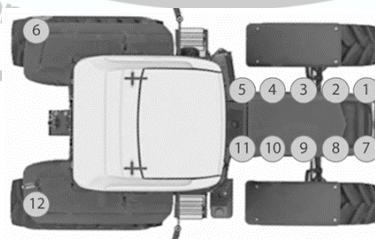


شکل ۵) تاثیر امواج فراصوت بر کاهش جمعیت حشرات آفات

تشخیص موانع و ناوبری در اتوماسیون ماشین کشاورزی: در حوزه کنترل خودکار و ناوبری در ماشین‌های کشاورزی، فناوری امواج فراصوت به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای تشخیص موانع و ناوبری دقیق شناخته شده است. این سنسورها با ارسال امواج صوتی با فرکانس بالا و اندازه‌گیری زمان بازگشت بازتاب، فاصله تا اشیای پیش‌رو را تعیین می‌کنند؛ رویکردی که دقیق و درعین حال غیرمخرب است. در کنار مزایای صرفه‌جویی در هزینه، عملکرد مناسب در شرایط دشوار محیطی (مانند گردوغبار، مه یا نور کم) از ویژگی‌های برجسته این سنسورها به شمار می‌آیند [۳۵].

فناوری هدایت خودکار تراکتور در تاکستان‌ها

فناوری فراصوت به‌عنوان ابزاری مؤثر و کم‌هزینه برای ناوبری تراکتورها در باغ‌ها و تاکستان‌ها معرفی شده است [۳۶]. حسگرهای فراصوت روی تراکتور نصب می‌شوند و با ارسال امواج و دریافت بازتاب، فاصله تا ردیف‌های گیاهان را اندازه‌گیری می‌کنند. داده‌ها با الگوریتم فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) پردازش شده و موقعیت و زاویه حرکت تراکتور به‌طور دقیق تخمین زده می‌شود. برای افزایش دقت، داده‌های نامعتبر حذف می‌شوند و تنها مقادیر قابل اعتماد استفاده می‌شوند. آزمایش‌های میدانی نشان دادند این سیستم فاصله تراکتور از ردیف‌ها را با دقت حدود ۱۶ سانتی‌متر و زاویه حرکت را با خطای کمتر از ۳ درجه تخمین می‌زند و زمان همگرایی الگوریتم تنها چند ثانیه است. نتایج نشان می‌دهند حسگرهای فراصوت با پردازش مناسب، راهکاری عملی، دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای ناوبری خودکار ماشین‌های کشاورزی در محیط‌های پیچیده فراهم کرده و امکان بهینه‌سازی عملیات و کاهش خطاهای انسانی را می‌دهند.



شکل ۶) مانیتورینگ تراکتور به وسیله ۱۲ سنسور فراصوت



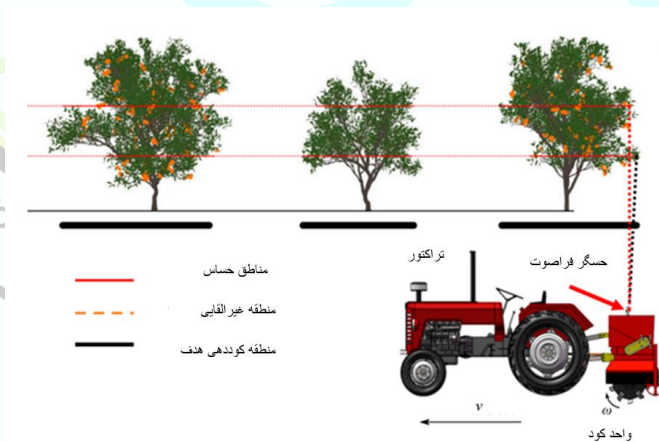
شکل (۷) وضعیت تاکستان در فصول متفاوت (از راست: تابستان، بهار، زمستان)

حسگرهای فراصوت و شبکه عصبی در ناوبری خودکار خودروهای زمینی بدون سرنشین (UGV¹)

یکی از کاربردهای پیشرفته حسگرهای فراصوت در کشاورزی و محیط‌های صنعتی، ناوبری خودکار خودروهای زمینی بدون سرنشین است [۳۷]. در این روش، مجموعه‌ای از حسگرهای فراصوت در بخش جلویی و کناره‌های وسیله نقلیه نصب می‌شوند تا فاصله آن با موانع و اشیاء مسیر اندازه‌گیری شود. داده‌های جمع‌آوری شده سپس به یک شبکه عصبی آموزش‌دیده منتقل می‌شوند که قادر است انواع اشیاء مانند مخروط‌ها، استوانه‌ها و سایر موانع را با دقت بالای ۹۸٪ تشخیص دهد و مسیر حرکت وسیله نقلیه را به صورت بلادرنگ اصلاح کند. پردازش سیگنال‌های فراصوت و تحلیل تصمیمات شبکه عصبی، امکان حرکت ایمن و انتخاب مسیر بهینه را فراهم می‌آورد. مزیت اصلی این رویکرد در ترکیب حسگرهای ساده و ارزان فراصوت با الگوریتم‌های هوش مصنوعی است؛ حسگرها اطلاعات فاصله‌ای دقیق ارائه می‌دهند و شبکه عصبی با تحلیل آن‌ها، ناوبری سریع، دقیق و مقرون‌به‌صرفه در محیط‌های پیچیده و تغییرپذیر مانند مزارع با موانع پراکنده را امکان‌پذیر می‌کند [۳۸].

بهینه‌سازی کوددهی در باغات

استفاده از حسگرهای فراصوت در کوددهی دقیق، یکی از کاربردهای نوین و موفق فناوری فراصوت در کشاورزی است [۳۸]. در این روش، حسگرها فاصله تا تاج درخت یا حجم پوشش گیاهی را اندازه‌گیری کرده و داده‌های جمع‌آوری شده به الگوریتم کنترلی ارسال می‌شوند تا زمان، مقدار و محل پاشش کود به طور هدفمند تعیین گردد. سیستم معمولاً شامل سه بخش اصلی است: حسگرهای فراصوت برای پایش دقیق پوشش گیاهی، الگوریتم کنترلی برای تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری، و مکانیزم پاشش قابل کنترل مانند موتورهای سروو یا نازل‌های هدفمند. این فرآیند امکان مصرف بهینه کود را فراهم می‌کند، هدررفت منابع را کاهش می‌دهد و اثرات زیست‌محیطی ناشی از شستشوی کود به زمین و منابع آبی را کم می‌کند. به این ترتیب، دقت مصرف، رشد و عملکرد محصول افزایش می‌یابد و بهره‌وری کشاورزی بهبود می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، حسگر عرض تاج درخت را اندازه‌گیری کرده و زمان شروع و توقف موتور کوددهی را تنظیم می‌کند، که دقت و کارایی کل فرآیند را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۳۸].



شکل (۸) نحوه کوددهی متناوب در درختان میوه

¹ Unmanned Ground Vehicle



انجمن مهندسی ماشین‌های
کشاورزی و مکانیزاسیون ایران

۳۰ مهر تا ۲ آبان ۱۴۰۴، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

هفدهمین کنگره ملی و دومین کنگره بین‌المللی
مهندسی مکانیک بیوسیستم
و مکانیزاسیون کشاورزی



جدول ۲ مقایسه‌ای از روش‌های مختلف کاربرد فراصوت در کشاورزی هوشمند ارائه می‌دهد و شباهت‌ها، تفاوت‌ها و محدودیت‌های هر روش را نشان می‌دهد.

جدول ۲) مقایسه کاربردهای فراصوت در کشاورزی

روش کاربردی فراصوت	شباهت‌ها	تفاوت‌ها	محدودیت‌ها
پایش خاک (رطوبت، تخلخل)	غیرمخرب، بلادرنگ، دقیق	اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات خاک	حساس به نوع خاک و رطوبت زیاد
پایش گیاه (ارتفاع، رشد)	غیرمخرب، کم‌هزینه	قابلیت اندازه‌گیری رشد و سلامت گیاه	باد و لرزش می‌تواند داده‌ها را مختل کند
بهینه‌سازی کوددهی	استفاده از داده‌ها برای تصمیم‌گیری	کمک به مدیریت منابع و کاهش مصرف	نیاز به مدل‌سازی دقیق و داده‌های پیشین
کنترل آفات و پرندگان	غیرمخرب و ایمن برای گیاه	جایگزین روش‌های شیمیایی یا مکانیکی	تأثیر کمتر در شرایط محیطی پر سر و صدا
ناوبری خودکار تراکتور و UGV	استفاده از سنسورهای فراصوت برای تشخیص محیط	هدایت دقیق وسایل نقلیه بدون تماس مستقیم	نیاز به الگوریتم‌های پردازش سیگنال پیچیده

مزایای فناوری اولتراسونیک در کشاورزی دقیق

فناوری اولتراسونیک به‌عنوان یک ابزار غیرمخرب و کم‌هزینه، امکان پایش بلادرنگ و دقیق ویژگی‌های گیاهان و خاک را فراهم می‌آورد. این سنسورها قادرند ارتفاع گیاهان، تراکم تاج پوشش و حتی شرایط رطوبتی خاک را بدون تماس مستقیم و با دقت بالا اندازه‌گیری کنند. استفاده از این اطلاعات، به کشاورزان کمک می‌کند تا برنامه‌های آبیاری و کوددهی را بهینه‌سازی کرده و در نتیجه مصرف منابع کاهش یافته و عملکرد محصول افزایش یابد. علاوه بر این، ترکیب فناوری فراصوت با الگوریتم‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء، امکان مدیریت هوشمند مزرعه و تصمیم‌گیری بلادرنگ را تقویت کرده است [۴۳۹].

محدودیت‌های فناوری اولتراسونیک در کشاورزی دقیق

با وجود مزایای متعدد فناوری فراصوت در کشاورزی، این فناوری با محدودیت‌هایی نیز مواجه است که می‌تواند کاربرد و دقت آن را تحت تأثیر قرار دهد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها حساسیت فناوری به شرایط محیطی است؛ عواملی مانند باد، باران، رطوبت و گردوغبار می‌توانند کیفیت سیگنال بازگشتی را کاهش داده و دقت اندازه‌گیری‌های فراصوتی را محدود کنند [۴۳۹]. علاوه بر این، نبود استانداردهای یکپارچه برای کالیبراسیون و پردازش داده‌ها باعث ناسازگاری نتایج بین سیستم‌های مختلف شده و اعتمادپذیری داده‌ها را کاهش می‌دهد. این مسئله به ویژه زمانی اهمیت پیدا می‌کند که داده‌ها باید برای تحلیل‌های دقیق یا ترکیب با سایر فناوری‌های کشاورزی مانند سیستم‌های هوشمند و اینترنت اشیاء مورد استفاده قرار گیرند. از سوی دیگر، هزینه‌های نسبتاً بالای خرید و استقرار سامانه‌های فراصوت در مقیاس وسیع، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مانعی جدی برای پذیرش عمومی و گسترش استفاده از این فناوری است [۴۳۹]. علاوه بر این، نیاز به آموزش و تخصص فنی برای راه‌اندازی، نگهداری و تحلیل داده‌ها نیز می‌تواند محدودیت دیگری در کاربرد عملی فناوری فراصوت باشد. به همین دلایل، با وجود پتانسیل بالای این فناوری در کشاورزی دقیق، اجرای موفق و گسترده آن نیازمند رفع چالش‌های محیطی، استانداردسازی فرآیندها و کاهش هزینه‌های عملیاتی است.

نتیجه‌گیری کلی

کشاورزی نوین برای مقابله با چالش‌های امنیت غذایی، بهره‌وری منابع و پایداری محیطی نیازمند فناوری‌های پیشرفته است. این مقاله کاربردهای فناوری فراصوت در کشاورزی دقیق را بررسی می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند فراصوت با انتشار و بازتاب امواج صوتی



فرکانس بالا، اندازه‌گیری غیرمخرب و بلادرنگ ویژگی‌های محیطی و زیستی مانند رطوبت و بافت خاک، مدیریت آبیاری، بهینه‌سازی کوددهی و پایش رشد گیاهان را امکان‌پذیر می‌سازد و می‌تواند بهره‌وری را به‌طور ملموس افزایش دهد با وجود دقت و قابلیت یکپارچه‌سازی با سامانه‌های هوشمند، محدودیت‌هایی مانند حساسیت به شرایط محیطی، هزینه تجهیزات و نبود استانداردهای مشخص، توسعه آن را محدود کرده است. همچنین، بیشتر مطالعات در شرایط آزمایشگاهی انجام شده و شواهد کافی از کاربرد گسترده در مزرعه در دسترس نیست.

پژوهش‌های آینده باید به طراحی تجهیزات ساده و کم‌هزینه، استانداردسازی، بررسی اثرات زیست‌محیطی، آزمایش‌های میدانی طولانی‌مدت و ادغام فراصوت با اینترنت اشیا و هوش مصنوعی توجه کنند. چارچوب پیشنهادی شامل چهار محور اصلی است: بهینه‌سازی تجهیزات، استانداردسازی و تضمین ایمنی، ادغام با فناوری‌های نوین، و ارزیابی اثرات بلندمدت اقتصادی و زیست‌محیطی. این مسیر می‌تواند توسعه پایدار کاربرد فراصوت در کشاورزی هوشمند را تسهیل کند.

منابع

- [1] Blackstock, D. T. (2000). *Fundamentals of Physical Acoustics*. Wiley.
- [2] Britannica. (2024). Ultrasonics. In *Encyclopaedia Britannica*. Retrieved August 21, 2025, from <https://www.britannica.com/science/ultrasonics>
- [3] Lv, N., Wu, R., Guo, R., Wu, L., Zhang, H., Guo, C., & Xu, J. (2025). Exploring the progress and challenges of ultrasonic technology in environmental remediation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 112, 107175.
- [4] Sattar, M. A., & Laila, D. S. (2025). A review of ultrasound monitoring applications in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1620868.
- [5] Toa, M., & Whitehead, A. (2020). Ultrasonic sensing basics. *Dallas: Texas Instruments*, 53-75.
- [6] Taskila, L. (2025). High Power Operational Amplifier Stability in Piezo Driving Circuits.
- [7] Wasylowski, D., Ditler, H., Sonnet, M., Falkenstein, T., Leogrande, L., Ronge, E., ... & Sauer, D. U. (2024). Operando visualisation of lithium plating by ultrasound imaging of battery cells. *Nature Communications*, 15(1), 10237.
- [8] Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (2013). *Ultrasonic testing of materials*. Springer Science & Business Media.
- [9] Yuan, J., Li, Z., Ma, Q., Li, J., Li, Z., Zhao, Y., ... & Jiang, Z. (2023). Noninvasive fluid bubble detection based on capacitive micromachined ultrasonic transducers. *Microsystems & Nanoengineering*, 9(1), 20.
- [10] Song, J., Xue, C., He, C., Zhang, R., Mu, L., Cui, J., ... & Zhang, W. (2015). Capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUTs) for underwater imaging applications. *Sensors*, 15(9), 23205-23217.
- [11] Hillger, W., Bühling, L., & Ilse, D. (2014, October). Air-coupled ultrasonic testing-method, system and practical applications. In *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)* (pp. 6-10).
- [12] Khuri-Yakub, B. T., & Oralkan, Ö. (2011). Capacitive micromachined ultrasonic transducers for medical imaging and therapy. *Journal of micromechanics and microengineering*, 21(5), 054004.
- [13] Masahiko, H., & Hirotsugu, O. (2003). EMATs for science and industry non-contacting ultrasonic measurements.
- [14] Drain, L. E. (2019). *Laser ultrasonics techniques and applications*. Routledge.
- [15] Jiang, C., Li, Z., Zhang, Z., & Wang, S. (2023). A new design to Rayleigh wave EMAT based on spatial pulse compression. *Sensors*, 23(8), 3943.



- [16] Narumanchi, V. V., Pourahmadian, F., Lum, J., Townsend, A., Tringe, J. W., Stobbe, D. M., & Murray, T. W. (2023). Laser ultrasonic imaging of subsurface defects with the linear sampling method. *Optics express*, 31(5), 9098-9111.
- [17] Zhang, Y., & Cegla, F. (2023). Co-located dual-wave ultrasonics for component thickness and temperature distribution monitoring. *Structural Health Monitoring*, 22(2), 1090-1104.
- [18] Singh, J., Tant, K., Curtis, A., & Mulholland, A. (2022). Real-time super-resolution mapping of locally anisotropic grain orientations for ultrasonic non-destructive evaluation of crystalline material. *Neural Computing and Applications*, 34(6), 4993-5010.
- [19] Demey, M. L., Mishra, R. C., & Van Der Straeten, D. (2023). Sound perception in plants: from ecological significance to molecular understanding. *Trends in Plant Science*, 28(7), 825-840.
- [20] Dobránszki, J., Agius, D. R., Berger, M. M., Moschou, P. N., Gallusci, P., & Martinelli, F. (2025). Plant memory and communication of encounters. *Trends in Plant Science*.
- [21] Gagliano, M., Mancuso, S., & Robert, D. (2012). Towards understanding plant bioacoustics. *Trends in plant science*, 17(6), 323-325.
- [22] Hardie, M. (2020). Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. *Sensors*, 20(23), 6934.
- [23] Woo, D. K., Do, W., Hong, J., & Choi, H. (2022). A novel and non-invasive approach to evaluating soil moisture without soil disturbances: Contactless ultrasonic system. *Sensors*, 22(19), 7450.
- [24] Orhan, U., Kilinc, E., Albayrak, F., Aydin, A., & Torun, A. (2022). Ultrasound penetration-based digital soil texture analyzer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(8), 10751-10767.
- [25] Kilinc, E., & Orhan, U. (2025). Improving the accuracy of soil texture determination using pH and electro conductivity values with ultrasound penetration-based digital soil texture analyzer. *PeerJ Computer Science*, 11, e2663.
- [26] Bradley, S., & Ghimire, C. (2024). Design of an ultrasound sensing system for estimation of the porosity of agricultural soils. *Sensors*, 24(7), 2266.
- [27] Xu, K., Huang, M., Xu, C., Zhen, J., Jin, G., & Gong, H. (2023). Assessment of the bio-cementation effect on shale soil using ultrasound measurement. *Soils and Foundations*, 63(1), 101249.
- [28] Galli, A., Peruzzi, C., Gangi, F., & Masseroni, D. (2024). ArduHydro: a low-cost device for water level measurement and monitoring. *Journal of Agricultural Engineering*, 55(1), 110-122.
- [29] Zhou, W., Lu, X., Qi, C., & Yang, M. (2020). Utilisation of ultrasonic treatment to improve the soil amelioration property of coal fly ash. *Journal of Environmental Management*, 276, 111311.
- [30] Zheng, Y., Hui, X., Cai, D., Shoukat, M. R., Wang, Y., Wang, Z., ... & Yan, H. (2024). Calibrating ultrasonic sensor measurements of crop canopy heights: a case study of maize and wheat. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1354359.
- [31] Montazeaud, G., Langrume, C., Moinard, S., Goby, C., Ducanhez, A., Tisseyre, B., & Brunel, G. (2021). Development of a low cost open-source ultrasonic device for plant height measurements. *Smart Agricultural Technology*, 1, 100022.
- [32] Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 34, 540-560.
- [33] Dmello, D. A., Guru, B. R., & Acharya, S. (2025). A comprehensive review of ultrasonic patent strategies for mosquito repellence: a landscape analysis. *International Journal of Sustainable Engineering*, 18(1), 2543114.



دانشگاه گیلان

هفدهمین کنگره ملی و دومین کنگره بین‌المللی
مهندسی مکانیک بیوسیستم
و مکانیزاسیون کشاورزی



۳۰ مهر تا ۲ آبان ۱۴۰۴، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

- [34] Evaluation of the Efficiency of Ultrasonic Technology in Controlling Pest Insects in Greenhouse Conditions. (2025). *Texas Journal of Engineering and Technology*, 42, 29-31.
- [35] Ma, J. (2023). Obstacle Detection and Avoidance Using Ultrasonic Sensors in Autonomous Robots. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 71, 68-78.
- [36] Corno, M., Furioli, S., Cesana, P., & Savaresi, S. M. (2021). Adaptive ultrasound-based tractor localization for semi-autonomous vineyard operations. *Agronomy*, 11(2), 287.
- [37] De Simone, M. C., Rivera, Z. B., & Guida, D. (2018). Obstacle avoidance system for unmanned ground vehicles by using ultrasonic sensors. *Machines*, 6(2), 18.
- [38] Yin, H., Jing, P., Ma, C., Cao, L., Li, C., & Wang, L. (2024). An Intermittent Fertilization Control System for Fruit Tree Crown Detection. *Agriculture*, 14(11), 1867.
- [39] Wei, Y. (2024). Applications of ultrasonic sensors: A review. *Applied and Computational Engineering*, 99.



Ultrasound in Smart Agriculture: Approaches and Practical Applications

Negar Harivandi¹, Jalal Baradaran Motie^{2*}

1. Undergraduate Student, Department of Biosystems Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, E-mail address: negar.harivandi@um.ac.ir
2. Faculty Member, Department of Biosystems Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, E-mail address: j.baradaran@um.ac.ir

Abstract

Modern agriculture faces multiple challenges, including climate change, decreasing water resources, declining soil fertility, and the need for sustainable production. This study aims to investigate the application of ultrasonic sensor technology in smart agriculture to increase productivity, reduce resource consumption, and promote sustainable farming. In this research, the use of ultrasonic technology for measuring soil moisture and texture, monitoring plant growth and height, assessing product quality and health, controlling pests and birds, optimizing fertilizer use, and guiding agricultural machinery autonomously is examined. The results indicate that ultrasonic technology can provide accurate and real-time data, enabling optimal decision-making for farmers, which ultimately leads to increased crop productivity, reduced water and fertilizer consumption, and minimized environmental impact. However, some limitations were observed, including the sensitivity of equipment to environmental conditions such as wind, rainfall, and dust, the need for specialized installation and maintenance, and high initial implementation costs. To mitigate these limitations, it is suggested that sensors be designed with higher resistance to environmental conditions, ultrasonic technology be integrated with smart agricultural management systems, and collected data be used intelligently for precise resource planning and crop performance improvement. The findings of this study demonstrate that ultrasonic technology can play a significant role in the development of precision agriculture, increasing productivity, and optimizing resource management, offering a practical solution for achieving sustainable farming.

Keywords

Autonomous navigation, Fertilizer optimization, Plant growth monitoring, Precision agriculture, Ultrasonic sensors.

***Corresponding authors name and email:** Jalal Baradaran Motie, j.baradaran@um.ac.ir