



نقش فناوری سنجش از دور در پیشرفت کشاورزی هوشمند

پیام نوری

دانشجوی کارشناسی علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

payam.nouri2002@gmail.com

خلاصه

افزایش جمعیت، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع طبیعی، بخش کشاورزی را با چالش‌های جدی در تأمین امنیت غذایی مواجه کرده است. در این شرایط، توسعه کشاورزی هوشمند و به‌کارگیری فناوری‌های نوین به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش بهره‌وری و پایداری سامانه‌های کشاورزی مطرح شده است. سنجش از دور به‌عنوان یکی از ارکان اصلی کشاورزی هوشمند، با فراهم‌سازی داده‌های مکانی و زمانی گسترده، نقش مهمی در پایش دقیق محصولات و مدیریت بهینه منابع ایفا می‌کند.

هدف این مقاله مروری، بررسی نقش و کاربردهای سنجش از دور در بهبود عملکرد و پایداری کشاورزی هوشمند است. در این مطالعه، مهم‌ترین فناوری‌های سنجش از دور شامل حسگرهای راداری، چندطیفی، فراطیفی، حرارتی، فلورسانس و مرئی مورد بررسی قرار گرفته و کاربردهای عملی آن‌ها در حوزه‌هایی نظیر پایش تنش آبی و مدیریت آبیاری، برآورد تبخیر-تعرق، برآورد رطوبت خاک، پایش رشد و عملکرد محصولات، مدیریت تغذیه و کود و شناسایی بیماری‌های گیاهی مرور شده است.

نتایج مرور مطالعات نشان می‌دهد که سنجش از دور امکان پایش گسترده، سریع و غیرمخرب محصولات کشاورزی را فراهم کرده و نقش مؤثری در تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، کاهش مصرف منابع و افزایش بهره‌وری محصولات دارد. با این حال، چالش‌هایی نظیر محدودیت‌های دقت مکانی و زمانی، وابستگی به شرایط جوی، حجم بالای داده‌ها و نیاز به زیرساخت‌های پردازشی و تخصصی همچنان وجود دارد.

در نهایت، ترکیب سنجش از دور با فناوری‌های نوظهوری مانند اینترنت اشیا، پهپادها، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، چشم‌انداز روشنی برای توسعه کشاورزی دقیق و پایدار فراهم می‌کند و می‌تواند نقش کلیدی در بهبود مدیریت منابع و افزایش تاب‌آوری سامانه‌های کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی ایفا نماید.

کلمات کلیدی: کشاورزی دقیق، پایش محصولات کشاورزی، مدیریت منابع آب، تبخیر-تعرق، رطوبت خاک، تصاویر ماهواره‌ای

۱. مقدمه

کشاورزی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های بشری است که بقای انسان به آن وابسته است. این بخش علاوه بر تأمین غذا، نقش مهمی در رشد اقتصادی، توسعه روستایی، حفظ تنوع زیستی، شکل‌دهی به میراث فرهنگی و ارائه خدمات اکوسیستمی مانند تصفیه آب، گرده‌افشانی و ایجاد زیستگاه برای حیات وحش ایفا می‌کند. در چند دهه اخیر، افزایش جمعیت، تغییرات اقلیمی و آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر به کاهش و تخریب منابع طبیعی شده است. از این‌رو، بخش کشاورزی برای تأمین



امنیت غذایی با چالش‌های جدید و پیچیده‌ای مواجه است. بر اساس آمار، تولیدات کشاورزی باید تا سال ۲۰۵۰ حدود ۷۰ درصد افزایش یابد [1]. تأمین امنیت غذایی در شرایطی که رشد جمعیت، تغییر اقلیم و مهاجرت روستاییان به شهرها به‌طور هم‌زمان در حال افزایش است، نیازمند بازنگری در روش‌ها و رویکردهای تولید محصولات کشاورزی است [2]. روش‌های سنتی به‌تنهایی قادر به پاسخگویی به این نیازها نیستند و استفاده از فناوری‌های نوین اجتناب‌ناپذیر است. روش‌های کشاورزی با بهره‌گیری از پیشرفت‌های علمی و فناوری‌های نوین به تدریج تکامل یافته‌اند. فناوری‌های سنجش از دور نقش مهمی در کشاورزی نوین ایفا می‌کنند و با فراهم کردن داده‌های مکانی و زمانی گسترده، به افزایش بهره‌وری و پایداری سامانه‌های کشاورزی کمک می‌کنند. انواع مختلفی از فناوری‌های سنجش از دور وجود دارد که قابلیت به‌کارگیری در بخش کشاورزی را دارند [3,4].

سنجش از دور در جنبه‌های مختلف کشاورزی کاربرد دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها پایش محصولات کشاورزی است [5]. سامانه‌های سنجش از دور با استفاده از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات، حجم بالایی از داده‌های طیفی تولید می‌کنند و به دلیل نیاز کشاورزی دقیق به دقت مکانی، طیفی، رادیومتریک و زمانی بالا، از ابزارهای کارآمد در مدیریت بهینه عملیات کشاورزی محسوب می‌شوند [6]. کشاورزی هوشمند با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، از جمله سنجش از دور، اینترنت اشیا و تحلیل داده‌ها، به دنبال افزایش بهره‌وری، کاهش مصرف منابع و پایداری سامانه‌های کشاورزی است. در این میان، سنجش از دور به عنوان ابزار کلیدی کشاورزی هوشمند، امکان پایش دقیق محصولات، مدیریت منابع و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را فراهم می‌کند [3]. هدف این مقاله مروری، بررسی کاربردها و نقش سنجش از دور در بهبود عملکرد و پایداری کشاورزی هوشمند است.

۲. فناوری‌های نوین در کشاورزی و سنجش از دور

حسگرهای رادار با روزه مصنوعی (Synthetic Aperture Radar; SAR) به‌طور گسترده‌ای برای پایش رشد محصولات کشاورزی، برآورد رطوبت خاک و همچنین طبقه‌بندی مؤثر محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرند. این حسگرها به دلیل قابلیت تصویربرداری مستقل از شرایط نوری و ابرناکی، ابزار مناسبی برای پایش مستمر اراضی کشاورزی محسوب می‌شوند. در کنار آن‌ها، حسگرهای چندطیفی و ابرطیفی، با ثبت اطلاعات طیفی در باندهای مختلف، امکان استخراج ویژگی‌های زیستی گیاهان نظیر شاخص سطح برگ، محتوای نیتروژن و وضعیت فیزیولوژیکی پوشش گیاهی را فراهم می‌کنند. همچنین، حسگرهای طیف‌سنجی و تصویربرداری فلورسانس در ارزیابی فتوسنتز و سلامت گیاهان کاربرد گسترده‌ای دارند. حسگرهای مرئی (RGB) عمدتاً برای استخراج ویژگی‌های هندسی مانند ارتفاع گیاه، تراکم پوشش و ساختار تاج مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، باند نزدیک به مادون قرمز (Near Infrared; NIR) نقش مهمی در تحلیل رطوبت خاک، شمارش گیاهان و ارزیابی فرایندهایی نظیر فرسایش خاک ایفا می‌کند. ترکیب داده‌های حاصل از فناوری سنجش از دور با سایر فناوری‌های نوین نظیر اینترنت اشیا (IoT)، سامانه‌های رباتیک، فناوری‌های پیش‌بینی هوا و سامانه‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS)، بستر مناسبی برای توسعه کشاورزی دقیق و هوشمند فراهم کرده است [7,8]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که سنجش از دور در زمینه‌های مختلف کشاورزی کاربرد دارد و اطلاعات دقیق مکانی و زمانی را برای تصمیم‌گیری فراهم می‌کند. این فناوری نقش مهمی در کشاورزی هوشمند و پایدار ایفا می‌کند و در مدیریت آب، برآورد رطوبت خاک، پایش رشد و عملکرد محصولات، مدیریت تغذیه و کود، و شناسایی بیماری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه، مهم‌ترین کاربردهای این فناوری‌ها در کشاورزی هوشمند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. کاربردهای عملی سنجش از دور در کشاورزی

پایش تنش آبی و مدیریت آبیاری

محصولات سنجش از دور، چه در باندهای نوری، حرارتی و مایکروویو، به طور گسترده‌ای برای توسعه و ارزیابی شاخص‌ها و تکنیک‌های مختلف در مدیریت دقیق منابع آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر تصاویر نوری، مانند شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI) و شاخص پوشش گیاهی تنظیم شده خاک (SAVI)، ابزارهای مؤثری برای تشخیص تنش آبی و ارزیابی شرایط رطوبت خاک در طیف وسیعی از محصولات کشاورزی هستند. این شاخص‌ها با بهره‌گیری از تغییرات بازتاب نور در طول موج‌های مختلف، امکان پایش سلامت گیاه و شناسایی مناطق دچار کم‌آبی را فراهم می‌آورند [9].

علاوه بر شاخص‌های نوری، داده‌های حرارتی سنجش از دور نیز نقش مهمی در پایش وضعیت آبی گیاهان دارند. شاخص تنش آبی محصولات (Crop Water Stress Index; CWSI)، که بر اساس دمای سطحی گیاه استخراج می‌شود، یکی از شاخص‌های پرکاربرد برای تخمین نیاز آبیاری و زمان‌بندی بهینه آن محسوب می‌شود. استفاده ترکیبی از شاخص‌های نوری و حرارتی، همراه با مدل‌های پیش‌بینی شرایط محیطی و خاک، امکان مدیریت دقیق منابع آب، کاهش مصرف غیرضروری و بهینه‌سازی عملکرد محصول را فراهم می‌کند. این روش‌ها به ویژه در کشاورزی هوشمند، به تولیدکنندگان اجازه می‌دهند تا تصمیمات مبتنی بر داده اتخاذ کرده و به شکل مؤثری تنش‌های آبی را کاهش دهند [10].

پایش تبخیر-تعرق (ET)

تبخیر-تعرق (Evapotranspiration; ET) بزرگ‌ترین جریان آب از سطح زمین به جو و یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی است که نقش کلیدی در تعادل آب، رشد محصولات کشاورزی و پایداری اکوسیستم‌های زراعی ایفا می‌کند. اندازه‌گیری دقیق تبخیر-تعرق برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری ضروری است، اما روش‌های سنتی مانند لایسیمتر وزنی و تکنیک‌های کوواریانس ادی معمولاً هزینه‌بر، زمان‌بر و محدود به مقیاس‌های کوچک هستند و نمی‌توانند تغییرات مکانی ناشی از تفاوت در کاربری زمین، نوع خاک، توپوگرافی و فرآیندهای هیدرولوژیکی را به خوبی پوشش دهند [11]. در این زمینه، سنجش از دور ابزار قدرتمندی برای برآورد تبخیر-تعرق ارائه می‌دهد. داده‌های ماهواره‌ای و پهپادی امکان اندازه‌گیری پیوسته و مکانی تبخیر-تعرق را در مقیاس‌های وسیع فراهم می‌کنند و محدودیت‌های روش‌های سنتی را برطرف می‌سازند. استفاده از تصاویر نوری، حرارتی و مایکروویو به تحلیل دما، شاخص‌های پوشش گیاهی و رطوبت خاک کمک کرده و امکان تخمین دقیق تبخیر-تعرق محصولات را فراهم می‌آورد. این اطلاعات، در کنار مدل‌های هیدرولوژیکی و پیش‌بینی‌های هواشناسی، پایه‌ای برای مدیریت بهینه منابع آب و زمان‌بندی آبیاری دقیق در کشاورزی هوشمند ایجاد می‌کنند [12]. به علاوه، ترکیب داده‌های سنجش از دور با فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء (IoT)، سیستم‌های رباتیک و سامانه‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) اجازه می‌دهد تا تبخیر-تعرق به صورت لحظه‌ای و مکان‌محور پایش شود. این رویکرد، علاوه بر افزایش دقت در تخمین نیاز آبی گیاه، به کاهش مصرف غیرضروری آب و افزایش بهره‌وری محصولات کمک می‌کند و یک ابزار کلیدی برای کشاورزی پایدار و مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم به شمار می‌رود.

برآورد رطوبت خاک

داده‌های سنجش از دور به دست آمده در باندهای مختلف، از جمله نوری، حرارتی و مایکروویو، به طور گسترده‌ای برای برآورد رطوبت خاک در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی استفاده می‌شوند. این داده‌ها امکان پایش شرایط رطوبتی خاک را بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های زمینی پیچیده و پرهزینه فراهم می‌کنند و با ارائه اطلاعات مکانی و زمانی دقیق، دیدگاهی جامع از وضعیت خاک در سطح مزارع و اکوسیستم‌های وسیع ارائه می‌دهند [13].

استفاده از داده‌های نوری و حرارتی به تحلیل تغییرات دما و بازتاب سطح زمین کمک می‌کند و امکان ارزیابی رطوبت خاک را با دقت نسبی بالا فراهم می‌آورد. به علاوه، سنجش از دور قابلیت پوشش گسترده و پایش مداوم مناطق دشوار و

دورافتاده را دارد که روش‌های سنتی قادر به پوشش آن‌ها نیستند. این ویژگی‌ها، سنجش از دور را به ابزاری کاربردی و مؤثر برای برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت کشاورزی و تحلیل شرایط محیطی تبدیل کرده است [14].

پایش رشد و عملکرد محصولات کشاورزی

نظارت بر رشد و عملکرد محصولات کشاورزی برای درک واکنش آن‌ها به شرایط محیطی و روش‌های مدیریت مزرعه، و همچنین توسعه برنامه‌های مدیریتی مؤثر، اهمیت زیادی دارد. شاخص‌هایی مانند سطح برگ (LAI) و مقدار زیست‌توده گیاهی از جمله معیارهای کلیدی برای ارزیابی سلامت و رشد گیاهان زراعی محسوب می‌شوند. سطح برگ همچنین به عنوان داده ورودی در بسیاری از مدل‌های رشد گیاه و پیش‌بینی عملکرد محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد [15].

روش‌های سنتی اندازه‌گیری سطح برگ و مقدار گیاهان، اغلب زمان‌بر، نیازمند نیروی انسانی زیاد و در برخی موارد مخرب هستند و نمی‌توانند نقشه‌ای از تغییرپذیری مکانی رشد گیاهان ارائه دهند. داده‌های سنجش از دور با ارائه اطلاعات گسترده مکانی و زمانی، امکان پایش رشد محصولات و تخمین میزان زیست‌توده گیاهی را فراهم می‌کنند و به کشاورزان و پژوهشگران کمک می‌کنند تا اثر عوامل محیطی، مدیریت مزرعه و فشارهای زیستی و غیرزیستی مانند کمبود آب، مواد مغذی، بیماری‌ها و علف‌های هرز را بهتر درک کنند [16].

علاوه بر این، داده‌های سنجش از دور می‌توانند برای ارزیابی اثرات روش‌های کشاورزی مختلف، از جمله شخم و مدیریت بقایای محصول، و تأثیر آن‌ها بر رشد و عملکرد گیاهان به کار گرفته شوند. این قابلیت‌ها، سنجش از دور را به ابزاری قدرتمند برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و کشاورزی هوشمند تبدیل کرده است [17].

پایش وضعیت تغذیه‌ای محصولات و مدیریت کود

استفاده به موقع و مناسب از کودها برای بهینه‌سازی رشد و عملکرد محصولات و در عین حال کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از دست رفتن مواد مغذی به آب‌های زیرزمینی و سطحی، اهمیت زیادی دارد. معمولاً مقدار توصیه‌شده‌ای از کود به صورت یکنواخت در زمان کاشت و مراحل بعدی رشد محصول اعمال می‌شود. با این حال، نیاز کود محصولات در طول فصل رشد و بین مناطق مختلف مزارع متفاوت است که این تفاوت ناشی از ویژگی‌های خاک، مدیریت مزرعه، توپوگرافی، شرایط آب و هوایی و هیدرولوژی است [18].

نقشه‌برداری از تغییرپذیری مکانی نیازهای تغذیه‌ای گیاهان برای کشاورزی دقیق با ابزارهای سنتی، مانند دستگاه‌های اندازه‌گیری کلروفیل، می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی، مانند NDVI و SAVI، امکان ارزیابی وضعیت مواد مغذی گیاه و فعالیت فتوسنتزی آن را فراهم می‌کنند. این شاخص‌ها با وضعیت کلروفیل و بهره‌وری گیاه همبستگی قابل توجهی دارند و نقشه‌برداری آن‌ها می‌تواند درک تغییرات مکانی وضعیت تغذیه‌ای محصولات را بهبود بخشد. این اطلاعات، پایه‌ای برای تصمیم‌گیری دقیق در مدیریت کود و افزایش بهره‌وری محصولات در کشاورزی هوشمند محسوب می‌شوند [19].

پایش بیماری‌های گیاهی

بیماری‌های گیاهی می‌توانند به طور قابل توجهی تولید محصولات کشاورزی و سود مزرعه را کاهش دهند. شناسایی زودهنگام بیماری‌ها و تعیین گستردگی مکانی آن‌ها، نقش مهمی در مهار شیوع بیماری و کاهش خسارات تولید دارد. روش‌های سنتی تشخیص بیماری، مانند بازدید میدانی، زمان‌بر، پرهزینه و مستعد خطای انسانی هستند و تشخیص بیماری در مراحل اولیه که علائم هنوز واضح نیستند را دشوار می‌کنند. علاوه بر این، برخی بیماری‌ها هیچ علائم قابل مشاهده‌ای نشان نمی‌دهند یا اثر آن‌ها تا زمانی که بسیار پیشرفت کرده است، آشکار نمی‌شود. همچنین با روش‌های سنتی، نقشه‌برداری

گسترده‌گی و شدت شیوع بیماری بسیار چالش برانگیز است [20].

حسگرهای سنسجش از دور می‌توانند ابزار مؤثری برای پایش بیماری‌های گیاهی باشند، به ویژه در مراحل اولیه توسعه بیماری که تشخیص علائم با بازدید میدانی مشکل است. تکنیک‌های متنوعی، از جمله تصویربرداری RGB، چندطیفی، فراطیفی، حرارتی و فلورسانس، برای شناسایی و پایش بیماری‌ها در انواع محصولات کشاورزی به کار گرفته شده‌اند. استفاده از این فناوری‌ها امکان بررسی سریع، دقیق و گسترده بیماری‌ها را فراهم می‌کند و به کشاورزان و پژوهشگران کمک می‌کند تا اقدامات مدیریتی مناسب را به موقع اجرا کنند [21].

۴. چالش‌ها و محدودیت‌ها در کاربرد سنسجش از دور در کشاورزی هوشمند

با وجود مزایای فراوان سنسجش از دور در کشاورزی هوشمند، کاربرد عملی آن با چالش‌ها و محدودیت‌هایی همراه است. برخی از محدودیت‌ها مربوط به روش‌های سنتی اندازه‌گیری و پایش هستند، مانند اندازه‌گیری تبخیر-تعرق با لایسیمتر و روش‌های همبستگی گردابی که زمان‌بر، پرهزینه و محدود به مقیاس‌های کوچک می‌باشند. همچنین روش‌های سنتی برای پایش رشد محصول، سطح برگ و زیست‌توده گیاهی، نیازمند نیروی انسانی زیاد، زمان‌بر و گاهی مخرب هستند و نمی‌توانند نقشه تغییرپذیری مکانی محصولات را ارائه دهند.

پایش بیماری‌ها نیز با روش‌های سنتی بازدید میدانی با محدودیت‌هایی مانند تشخیص دشوار در مراحل اولیه بیماری، هزینه و زمان بالا و خطای انسانی مواجه است. از سوی دیگر، داده‌های سنسجش از دور با وجود ارائه اطلاعات گسترده، خود با محدودیت‌هایی نظیر دقت مکانی و زمانی وابسته به شرایط آب و هوایی، توپوگرافی و پوشش ابری مواجه هستند.

علاوه بر این، مدیریت تغییرپذیری مکانی و زمانی نیاز کود و آب در طول فصل، نیازمند تلفیق داده‌ها با زیرساخت‌های IoT، مدل‌های مدیریتی و تحلیل‌های پیچیده است. حجم بالای داده‌های سنسجش از دور نیز نیازمند زیرساخت محاسباتی و مهارت‌های تخصصی برای تحلیل و تصمیم‌گیری است. چالش‌ها و محدودیت‌های اصلی سنسجش از دور در کشاورزی هوشمند در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- چالش‌ها و محدودیت‌های اصلی سنسجش از دور در کشاورزی هوشمند

منبع	توضیح	چالش‌ها و محدودیت‌ها	حوزه کاربرد
[11,12]	لایسیمترها و روش‌های کوواریانس ادی پرهزینه، زمان‌بر و مقیاس محدود	محدودیت روش‌های سنتی اندازه‌گیری ET	مدیریت آب و آبیاری
[15,16,17]	زمان‌بر، نیازمند نیروی انسانی زیاد، نقشه تغییرپذیری مکانی ارائه نمی‌دهد	اندازه‌گیری سطح برگ و زیست‌توده به روش سنتی	پایش رشد محصول
[20]	پرهزینه، زمان‌بر، مستعد خطای انسانی، تشخیص اولیه دشوار	بازدید میدانی	پایش بیماری‌ها
[7,8]	ابری، مه، شرایط آب و هوایی و توپوگرافی می‌تواند دقت را کاهش دهد	دقت مکانی و زمانی محدود	داده‌های سنسجش از دور
[18,19]	نیاز به ترکیب داده‌ها با زیرساخت‌های IoT و مدل‌های مدیریتی پیچیده	تغییرپذیری مکانی و زمانی نیاز گیاه	مدیریت کود و تغذیه
[7,8]	تحلیل داده‌های سنسجش از دور نیازمند مهارت و زیرساخت محاسباتی است	حجم بالای داده‌ها	پردازش داده‌ها



۵. فناوری‌های نوین و تکمیلی در کشاورزی هوشمند

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های سنجش از دور همراه با سایر فناوری‌های نوین، امکان پایش دقیق، سریع و گسترده محصولات کشاورزی را فراهم کرده است. حسگرهای رادار با روزه مصنوعی (Synthetic Aperture Radar; SAR) به دلیل توانایی تصویربرداری مستقل از شرایط نوری و ابرناکی، ابزار موثری برای پایش مداوم اراضی کشاورزی محسوب می‌شوند. همچنین حسگرهای چندطیفی و فراطیفی، با ثبت بازتاب نور در باندهای مختلف، امکان استخراج شاخص‌های زیستی گیاهان مانند سطح برگ، وضعیت فتوسنتزی و محتوای مواد مغذی را فراهم می‌آورند. حسگرهای طیف‌سنجی و فلورسانس نیز کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی سلامت گیاهان و تحلیل فرآیندهای فتوسنتزی دارند، در حالی که حسگرهای مرئی (RGB) و باند نزدیک به مادون قرمز (NIR) برای بررسی ویژگی‌های هندسی گیاه، تراکم پوشش، رطوبت خاک و تحلیل فرسایش خاک استفاده می‌شوند. ترکیب داده‌های سنجش از دور با فناوری‌های تکمیلی مانند اینترنت اشیا (IoT)، سامانه‌های رباتیک، پهپادها، سامانه‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و مدل‌های پیش‌بینی هوا، بستر مناسبی برای کشاورزی دقیق و هوشمند فراهم کرده است. این تلفیق فناوری‌ها امکان مدیریت منابع آب و کود، پایش سلامت و رشد محصول، و شناسایی زود هنگام بیماری‌ها را در مقیاس وسیع فراهم می‌کند و به تولیدکنندگان کمک می‌کند تا تصمیمات مبتنی بر داده اتخاذ کنند و بهره‌وری و پایداری سامانه‌های کشاورزی را افزایش دهند [7,8].

۶. چشم‌انداز و تحقیقات آینده

با توجه به چالش‌های فزاینده تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و محدودیت منابع آب و خاک، توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین در کشاورزی دقیق و هوشمند اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های ارائه‌شده در این بخش بر اساس کاربردها و فناوری‌های مطرح‌شده در بخش‌های پیشین است و نشان‌دهنده مسیر احتمالی تحقیقات آینده در این حوزه می‌باشد.

استفاده از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی پتانسیل بالایی برای تحلیل داده‌های پیچیده سنجش از دور و پیش‌بینی دقیق عملکرد محصولات دارد. ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، پهپادی و حسگرهای IoT امکان افزایش پوشش مکانی و دقت پایش را فراهم می‌کند و می‌تواند مدیریت منابع آب و کود، پایش سلامت محصولات و شناسایی بیماری‌ها را در مقیاس وسیع بهبود بخشد.

افزایش رزولوشن فضایی و زمانی داده‌های سنجش از دور و کاهش هزینه‌های جمع‌آوری آن‌ها، استفاده از این فناوری‌ها در مناطق دورافتاده را ممکن می‌سازد و خطای تخمین‌های عملکرد محصول و نیازهای آبی و غذایی را کاهش می‌دهد. توسعه مدل‌های پیش‌بینی سازگار با تغییرات اقلیمی نیز به کشاورزان اجازه می‌دهد تا برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای مدیریت مزرعه و منابع خود داشته باشند.

ترکیب فناوری‌های نوظهور با مدل‌های مدیریتی و ابزارهای تحلیلی می‌تواند بهره‌وری محصولات را افزایش داده، مصرف منابع را کاهش دهد و کشاورزی پایدارتری را در مواجهه با چالش‌های محیطی فراهم کند. انتظار می‌رود این رویکردها در آینده نزدیک نقش کلیدی در ارتقای کشاورزی هوشمند و پایدار ایفا کنند و مسیر تحقیقات آینده را به سمت توسعه الگوریتم‌ها و مدل‌های دقیق‌تر، تلفیق داده‌های چندمنبع و بهبود دقت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی هدایت کنند.

۷. نتیجه‌گیری

سنجش از دور نقش کلیدی در توسعه کشاورزی هوشمند و پایدار ایفا می‌کند و امکان پایش دقیق، بهینه‌سازی منابع و افزایش بهره‌وری محصولات را فراهم می‌سازد. این فناوری‌ها در مدیریت آب و آبیاری، پایش رشد و عملکرد محصولات، مدیریت تغذیه و کود، و شناسایی بیماری‌ها کاربرد گسترده دارند و به تولیدکنندگان کمک می‌کنند تا تصمیمات مبتنی بر داده اتخاذ کنند.



با وجود چالش‌ها و محدودیت‌های موجود، فناوری‌های نوین سنسجش از دور همراه با ابزارهای تکمیلی مانند اینترنت اشیا، پهپادها و مدل‌های پیش‌بینی، فرصت‌های جدیدی برای بهبود دقت، کاهش مصرف منابع و ارتقای کشاورزی دقیق فراهم می‌کنند. چشم‌انداز آینده نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، داده‌های چندمنبع و تحلیل هوشمند می‌تواند بهره‌وری محصولات را افزایش داده و کشاورزی پایدارتری را رقم بزند. در مجموع، سنسجش از دور به‌عنوان یک ابزار قدرتمند و ضروری، مسیر پیشرفت کشاورزی هوشمند را هموار می‌کند و تحقیقات آینده باید به توسعه مدل‌ها و فناوری‌های نوظهور با هدف بهینه‌سازی منابع و ارتقای عملکرد محصولات متمرکز شوند.

مراجع

1. World Bank Group. *World Development Report*. Available online: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9122> (accessed on 21 May 2020).
۲. کفاشان، جلال؛ باقری، نیکروز. (۱۳۹۷). کاربرد مهندسی مکترونیک در توسعه فناوری ماشین‌آلات کشاورزی صنعتی (چالش‌ها و راهکارها). توسعه تکنولوژی صنعتی، ۱۶(31)، 68.۵۵-
Available online: <https://sid.ir/paper/212908/fa>
3. Zhang, Z.; Zhu, L. A review on unmanned aerial vehicle remote sensing: Platforms, sensors, data processing methods, and applications. *Drones* 2023, 7(6), Art. no. 398.
4. Zhou, G.; et al. Development of a lightweight single-band bathymetric LiDAR. *Remote Sensing* 2022, 14(22), Art. no. 5880.
5. Wu, B.; et al. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review. *National Science Review* 2023, 10(4), Art. no. nwac290.
6. Huang, Y.; Chen, Z.; Yu, T.; Huang, X.; Gu, X. Agricultural remote sensing big data: Management and applications. *Journal of Integrative Agriculture* 2018, 17, 1915–1931.
7. Karunathilake, E.; Le, A.T.; Heo, S.; Chung, Y.S.; Mansoor, S. The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture* 2023, 13(8), Art. no. 1593.
8. Luo, J.; Zhao, C.; Chen, Q.; Li, G. Using deep belief network to construct the agricultural information system based on Internet of Things. *Journal of Supercomputing* 2022, 78(1), 379–405.
9. Khanal, S.; Fulton, J.; Shearer, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 2017, 139, 22–32.
10. Amani, M.; Parsian, S.; MirMazloumi, S.M.; Aieneh, O. Two new soil moisture indices based on the NIR–red triangle space of Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2016, 50, 176–186.
11. Barker, J.B.; Neale, C.M.; Heeren, D.M.; Suyker, A.E. Evaluation of a hybrid reflectance-based crop coefficient and energy balance evapotranspiration model for irrigation management. *Transactions of the ASABE* 2018, 61, 533–548.

12. Calera, A.; Campos, I.; Osann, A.; D'Urso, G.; Menenti, M. Remote sensing for crop water management: From evapotranspiration modelling to services for end users. *Sensors* 2017, 17, Art. no. 1104.
13. Zhou, L.; Chen, N.; Chen, Z.; Xing, C. ROSSC: An efficient remote sensing observation-sharing method based on cloud computing for soil moisture mapping in precision agriculture. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 2016, 9, 5588–5598.
14. Zhang, D.; Zhou, G. Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review. *Sensors* 2016, 16, Art. no. 1308.
15. Peng, Y.; Li, Y.; Dai, C.; Fang, S.; Gong, Y.; Wu, X.; Zhu, R.; Liu, K. Remote prediction of yield based on LAI estimation in oilseed rape under different planting methods and nitrogen fertilizer applications. *Agricultural and Forest Meteorology* 2019, 271, 116–125.
16. Kang, Y.; Özdoğan, M.; Zipper, S.C.; Román, M.O.; Walker, J.; Hong, S.Y.; et al. How universal is the relationship between remotely sensed vegetation indices and crop leaf area index? A global assessment. *Remote Sensing* 2016, 8, Art. no. 597.
17. Yeom, J.; Jung, J.; Chang, A.; Ashapure, A.; Maeda, M.; Maeda, A.; Landivar, J. Comparison of vegetation indices derived from UAV data for differentiation of tillage effects in agriculture. *Remote Sensing* 2019, 11, Art. no. 1548.
18. Hendricks, G.S.; Shukla, S.; Roka, F.M.; Sishodia, R.P.; Obreza, T.A.; Hochmuth, G.J.; Colee, J. Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions. *Journal of Soil and Water Conservation* 2019, 74, 160–171.
19. Ali, M.M.; Al-Ani, A.; Eamus, D.; Tan, D.K.Y. Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques: A review. *Journal of Plant Nutrition* 2017, 40, 928–953.
20. Ehsani, R.; Maja, J.M. The rise of small UAVs in precision agriculture. *Resource Magazine* 2013, 20, 18–19.
21. Mahlein, A.K. Plant disease detection by imaging sensors: Parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease* 2016, 100, 241–251.