تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵

نقش طیف‌سنجی به عنوان یک فناوری غیرمخرب اپتیکی در توسعه کشاورزی هوشمند

بهاره جمشیدی
دانشیار، مکانیک بیوسیستم، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
b.jamshidi@areeo.ac.ir

چکیده

طیف‌سنجی نوری به عنوان یک فناوری آزمونِ غیرمخرب توانمند و کاربردی قادر به حل بسیاری از مسایل بخش کشاورزی مبتنی بر ارزیابی کیفیت، ایمنی و سلامت نمونه (گیاه یا محصول کشاورزی، مواد غذایی، خاک، آب و غیره) است. این فناوری اپتیکیِ غیرمخرب می‌تواند به منظور توسعه حسگرها و سامانه‌های طیفی هوشمند که از مهم‌ترین اشیاء قابل اتصال به اینترنت با توانایی جمع‌آوری، ذخیره، پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها و اطلاعات طیفی، و کنترل یا ارتباط از راه دور هستند، استفاده شود. پیشرفت‌های اخیر فناوری غیرمخربِ طیف‌سنجی در تلفیق با فناوری‌های نوظهور و پیشرفته از قبیل اینترنت اشیاء، کلان داده، رایانش ابری و هوش مصنوعی نقش موثری در توسعه کشاورزی هوشمند و بهبود بهره‌وری کشاورزی دارد. این مقاله سعی دارد، نقش این فناوری آزمون غیرمخرب را در آینده کشاورزی هوشمند با معرفی مهم‌ترین کاربردهای آن در حل چالش‌های کلیدی بخش کشاورزی مبتنی بر ارزیابی کیفیت، ایمنی و سلامت نمونه ارائه کند.

واژگان کلیدی: آزمون غیرمخرب، طیف‌سنجی، اینترنت اشیاء، تصویربرداری طیفی، حسگرهای طیفی، سامانه‌های هوشمند

۱- مقدمه

کاربرد فناوری آزمون غیرمخرب[1] (NDT) که فرایند ارزیابی، بازرسی و آزمون به منظور کنترل کیفیت، ایمنی و یا سلامت مواد، محصولات، ترکیبات، قطعات و یا سازه‌ها و سامانه‌ها را شامل می‌شود [۱]، توسعه قابل توجهی در حوزه‌های مختلف علم و صنعت داشته که کشاورزی نیز از جمله این حوزه‌هاست.

طیف‌سنجی نوری[2] یک فناوری آزمون غیرمخرب اپتیکی و پرکاربرد در حوزه کشاورزیست که بر پایه اندازه‌گیری‌های بازتاب یا عبور نور و تحلیل و تفسیر طیف‌های جذبی و نشری به مطالعه تجربی برهم‌کنش نور و ماده می‌پردازد. این فناوری توانایی نمایش جزئیات ترکیبی مواد و اندازه‌گیری ترکیبات شیمیایی مواد بیولوژیک را به صورت سریع و غیرمخرب دارد. از تلفیق این فناوری با تصویربرداری، یا به عبارتی با تصویربرداری طیفی[3] می‌توان به طور همزمان اطلاعات شیمیایی و ویژگی‌های ظاهری نمونه مورد بررسی را به ترتیب از آنالیزهای طیفی و مکانی تصاویر دریافت کرد [۱].

پیشرفت‌های اخیر این فناوری آزمون غیرمخربِ اپتیکی در تلفیق با فناوری نوظهور اینترنت اشیاء[4] (IoT) (اینترنت ارتباط بین اشیاء شامل حسگرها، دستگاه‌ها و محرک‌هایی که قابلیت جمع‌آوری داده و کنترل از راه دور را دارند) و یکپارچه با فناوری‌های کلان داده[5]، رایانش ابری[6] و هوش مصنوعی[7] (AI) نقش موثری در توسعه الگوی جدید کشاورزی به نام کشاورزی هوشمند[8] دارد [۲] که به کمک آن بسیاری از مسایل این حوزه مبتنی بر ارزیابی کیفیت، ایمنی و سلامت نمونه به صورت هوشمند قابل حل خواهد بود. به عبارت دیگر، جمع‌آوری داده‌های کلانِ طیفی نمونه از طریق حسگرها، دستگاه‌ها و سامانه‌های هوشمند مبتنی بر فناوری آزمون غیرمخربِ طیف‌سنجی و انتقال آنها به یک فضای ابری یا فضاهای ذخیره‌سازی عادی و تجزیه و تحلیل آنها با روش‌های هوشمند برای کسب دانش، سبب

1 Nondestructive Testing
2 Optical Spectroscopy
3 Spectral Imaging
4 Internet of Things
5 Big Data
6 Cloud Computing
7 Artificial Intelligence
8 Smart Agriculture

www.SID.ir

هوشمندسازی و افزایش بهره‌وریِ کشاورزی در این زمینه می‌شود.

به این ترتیب، حسگرها و سامانه‌های طیفی (مبتنی بر طیف‌سنجی) با هدف ارزیابی غیرمخرب کیفیت، ایمنی و سلامت نمونه مورد بررسی (گیاه یا محصول، مواد و محصولات کشاورزی و غذایی، خوراک دام، خاک، آب، چوب، کود، سم، سازه‌ها و تجهیزات کشاورزی و غیره) از مهم‌ترین اشیاء در توسعه کشاورزی هوشمند هستند که در تلفیق با راه‌حل‌های هوشمند اینترنت اشیاء می‌توانند در زمینه‌های مختلف از قبیل نظارت و کنترل شرایط گیاه، محصول، دام و طیور و آبزیان مبتنی بر ارزیابی غیرمخرب کیفیت، ایمنی و سلامت؛ نظارت و کنترل کیفیت نورِ محیط تولید یا نگهداری (مزرعه، باغ، گلخانه، دامداری، مرغداری و استخرهای پرورش آبزیان، انبار، سیلو و غیره)؛ ارزیابی و کنترل سریع و غیرمخرب کیفیت، سلامت و ایمنی مواد و محصولات کشاورزی و غذایی در کل زنجیره تولید (از تولید مواد اولیه گرفته تا محصول نهایی آماده مصرف)؛ همچنین تجزیه و تحلیل‌ها و ارزیابی سریع کیفیت و ایمنی آب، ارزیابی سریع و غیرمخرب کیفیت و ایمنی خاک و نهاده‌های کشاورزی، ارزیابی سریع و غیرمخرب کیفیت و سلامت قطعات و سازه‌های مورد استفاده در دستگاه‌ها، ماشین‌ها و تجهیزات کشاورزی به‌کار گرفته شوند. در مقایسه با روش‌های مخرب ارزیابی کیفیت، ایمنی و سلامت نمونه که سبب تخریب آن می‌شوند و بسیار پرهزینه، زمان‌بر، درون‌آزمایشگاهی، نیازمند تجهیزاتِ گران‌قیمت و در بسیاری موارد آلاینده هستند؛ حسگرها و سامانه‌های مبتنی بر روش غیرمخرب طیف‌سنجی دارای مزایای بیشمارند. از مزایای این حسگرها و سامانه‌ها، افزون بر غیرمخرب بودن و عدم آسیب‌رسانی به نمونه مورد سنجش یا ارزیابی، دقت و سرعت عمل بالا، کم‌هزینه بودن، قابلیت هوشمند و کنترل شدن از راه دور همچنین ناآلاینده‌بودن و سازگاری با شرایط زیست محیطی است که در کنار سایر توانمندی‌های فنی و گستردگی کاربرد، سبب محبوبیت آنها در کشاورزی هوشمند با هدف توسعه پایدار و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی شده است. این مقاله به بررسی نقش فناوری غیرمخرب طیف‌سنجی نوری و حسگرها و سامانه‌های طیفی در توسعه کشاورزی هوشمند با ارائه برخی کاربردهای مهم در هر زمینه می‌پردازد و امید است مطالب ارائه‌شده برای صنعتگران و علاقمندان به پژوهش در حوزه توسعه و کاربرد این فناوری غیرمخرب در کشاورزی و طراحی و ساخت حسگرها و سامانه‌های هوشند طیفی مفید واقع شود.

۲- نقش طیف‌سنجی در ارزیابی کیفیت گیاه یا محصول از نظر تغییرات فیزیولوژیکی و نظارت و کنترلِ کیفیت نور محیط

کیفیت گیاه یا محصول تا حد زیادی متاثر از تغییرات فیزیولوژیکی آن است. نور مهم‌ترین عامل محیطی است که بر فیزیولوژی گیاه اثر دارد. گیاهان دارای گیرنده‌های نوری (فتوسیستم های I و II) هستند که نور فرابنفش[1](UV) نوع A (۳۱۵ تا ۴۰۰ نانومتر) و نوع B (۲۸۰ تا ۳۱۵ نانومتر)، همچنین نور قرمز (۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) و آبی (۴۲۰ تا ۴۵۰ نانومتر) را حس می‌کنند و پاسخ‌های متنوعی به کمیت، کیفیت، جهت و مدت زمان نشانه‌های نور در محیط خود می‌دهند. بر این اساس، هورمون‌ها و سایر متابولیت[2]های ثانویه‌ای تولید می‌کنند که بر عملکرد تولید، کیفیت مواد غذایی و طعم آنها تأثیر می‌گذارند [۳ و ۴]. بنابراین، ارزیابی سریع کیفیت گیاه یا محصول از نظر تغییرات فیزیولوژیکی و به تبع آن نظارت و کنترل شرایط و کیفیت نور محیط (به ویژه در محیط‌های سرپوشیده مانند گلخانه) نقش موثری در رشد بهینه آن و افزایش عملکرد کمّی و کیفی محصول دارد که به عنوان یکی از اهداف کشاورزی هوشمند مد نظر است.

طیف‌سنجی به عنوان یک فناوری آزمون غیرمخرب با ارزیابی سریع کیفیت گیاه یا محصول از نظر تغییرات فیزیولوژیکی مانند تغییر هورمون‌ها یا تغییرات کلروفیل و دیگر رنگدانه‌های فتوسنتزی آن که سبب تغییر در طیف‌های جذبی می‌شود، قادر به درک سریع پاسخ‌های گیاه به نشانه‌های نور و فرایند فتوسنتز است که نسبت به روش‌های معمولِ بررسی این تغییرات مزایای بسیار دارد و می‌تواند مبنای کار حسگرها و سامانه‌های هوشمندِ کنترل نور محیط باشد.

1 Ultraviolet
2 Metabolite

www.SID.ir

جدول ۱ مزایای فناوری آزمون غیرمخرب طیف‌سنجی را به عنوان مثال در مقایسه با روش معمول اندازه‌گیری هورمون‌های گیاهی (کروماتوگرافی مایع[1])، نشان می‌دهد.

به این ترتیب، طراحی و توسعه حسگرها و سامانه‌های طیفی هوشمند (مبتنی بر طیف‌سنجی) که قادر به نظارت و کنترل شرایط نور محیط باشند، نقش بسزایی در رشد و نمو بهینه گیاهان دارند. به طوری‌که، توسعه اسپکترومتر[2]های توانمند (شکل ۱) برای مطالعات سریع چندین طول موج و کنترل شدت نور با لامپ هوشمند، می‌تواند نمونه‌ای از این کاربردها باشد که قادر است چندین طول موج مختلف را به صورت زمان-واقعی[3] و در مقیاس زمانی میکروثانیه جمع‌آوری کند. بنابراین، نظارت غیرمخرب بر هر واکنش فتوسنتزی در نمونه با یک بار تنظیم امکان‌پذیر خواهد بود. این اسپکترومترهای هوشمند از طریق یک مرورگر وب که به اینترنت محلی متصل می‌شود، قابل کنترل هستند (به طور مستقیم یا از راه دور با استفاده از شبکه ارتباطی)[۵].

جدول ۱- فناوری آزمون غیرمخرب طیف‌سنجی در مقایسه با روش معمول اندازه‌گیری هورمون‌های گیاهی

طیف‌سنجی نوری	کروماتوگرافی مایع (HPLC)
غیرمخرب	مخرب
عدم نیاز به نمونه‌گیری یا آماده‌سازی نمونه	نیازمند نمونه‌گیری و آماده‌سازی نمونه (استخراج، خالص‌سازی، تزریق به دستگاه)
سریع (کسری از ثانیه)	زمان‌بر (حداقل ۲ روز)
بسیار کم‌هزینه (دستگاه نسبتاً ارزان‌قیمت بدون هزینه مواد آزمایشگاهی یا آماده‌سازی نمونه است)	پرهزینه (هزینه زیاد آماده‌سازی و مواد و تجهیزات آزمایشگاهی + گران‌قیمت بودن دستگاه)
عدم نیاز به آزمایشگاه (قابل کاربرد در خارج از آزمایشگاه)	درون‌آزمایشگاهی
کاربری آسان	مشکل و نیازمند متخصص
ناآلاینده	نیازمند مواد شیمیایی
قابل کاربرد در توسعه حسگرها و سامانه‌های هوشمند پرتابل، دستی، یا قابل نصب در محیط رشد	غیرقابل کاربرد در توسعه حسگرها و سامانه‌های هوشمند پرتابل، دستی، یا قابل نصب در محیط رشد

به عنوان یک نمونه بارز دیگر می‌توان به نوعی از دیودهای نشر نور[4] (LED) هوشمند اشاره کرد که کنترل انرژی را تسهیل و خودکارسازی را در فضاهای بسته کشاورزی امکان‌پذیر می‌کنند (شکل ۲). به این ترتیب، با استفاده از فناوری اینترنت اشیاء و استفاده از LEDهای هوشمند مبتنی بر فناوری طیف‌سنجی غیرمخرب در کنار سایر حسگرها، به عنوان مثال در یک گلخانه، امکان نظارت و کنترل نور LED، مقدار CO2، رطوبت، سلامت گیاهان و تجزیه و تحلیل داده‌ها برای حفظ یک محیط پایدار به وجود می‌آید. بر این اساس، می‌توان انتظار عملکرد ۱۰ برابری نسبت به یک محیط باز سنتی داشت [۶].

شکل ۱- اسپکترومتر هوشمند فتوسنتز [۵]

شکل ۲- خودکارسازی گلخانه‌ها با LEDهای هوشمند [۶]

به طور کلی، اسپکترومترها و سامانه‌های طیفی هوشمند (مبتنی بر آزمون غیرمخرب طیف‌سنجی) در محیط‌های گلخانه‌ای برای بررسی ویژگی‌های طیفیِ نور مصنوعی و بهینه‌سازی ترکیب‌های نوری، همچنین کنترل خودکار سامانه‌های روشنایی هوشمند مبتنی بر LEDها که نور را

1 Liquid Chromatography
2 Spectrometer
3 Realtime
4 Light Emitting Diodes

www.SID.ir

در یک طیف باریک از محدوده فرابنفش تا فروسرخ نزدیک[1] (NIR) (۷۸۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) فراهم می‌کنند و اجازه تغییر طیف نور را برای ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی گیاه می‌دهند، به منظور تضمین این که هر قسمت از گلخانه مقدار مناسبی نور دریافت کند، استفاده می‌شوند. کاربرد این تجهیزات همچنین برای کنترل خودکار سامانه‌های سایه‌انداز هوشمند به منظور تنظیم انتگرال نور روزانه[2] (DLI) که مقدار کل نور دریافت شده توسط یک گیاه در یک دوره ۲۴ ساعته است، نقش موثری دارد و سبب رشد و نمو بهینه گیاه و افزایش بهره‌وری کشاورزی می‌شود.

از سوی دیگر، کاربرد حسگرها و سامانه‌های طیفی هوشمند (مبتنی بر فناوری طیف‌سنجی غیرمخرب) در سایر حوزه‌های کشاورزی نیز مانند دامداری‌ها و مرغداری‌ها می‌تواند با هدف نظارت و کنترل شرایط و کیفیت نور محیط مورد استفاده قرار گیرد.

۳- نقش طیف‌سنجی در نظارت و پایش وضعیت گیاه یا محصول از نظر کیفیت، ایمنی و سلامت

از مهم‌ترین زمینه‌های مورد توجه در کشاورزی هوشمند، دستیابی به حسگرها، تجهیزات یا سامانه‌های سنجش و پایش وضعیت گیاه یا محصول از نظر کیفیت، ایمنی و سلامت بدون آسیب‌رسانی به آن است. فناوری غیر مخرب طیف‌سنجی نوری برای این منظور کاملاً مناسب و ایده‌آل است. این فناوری نیاز به تجهیزات سخت‌افزاری کم دارد و می‌تواند با سرعت بسیار بالا (به عنوان مثال ۶۰۰ طیف در ثانیه) عمل کند.

با توجه به این‌که بیماری‌های گیاهی و تنش‌های محیطی زنده یا غیرزنده روی فیزیولوژی گیاه مانند رشد و نمو، تنفس و مقدار عناصر تغذیه‌ای (مانند نیتروژن) تاثیر دارند، استفاده از اطلاعات طیف‌سنجی به تنهایی یا در تلفیق با اطلاعات مکانی حاصل از تصاویر طیفی می‌تواند در شناسایی وضعیت گیاه یا محصول (از نظر کیفیت، ایمنی و سلامت) در مراحل رشد مفید باشد. کاربرد این فناوری آزمون غیرمخرب با توجه به مزایای بسیاری که نسبت به روش‌های مرسوم و مخرب آزمایشگاهی برای این منظور دارد بسیار موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است [۷ تا ۹]. جدول ۲ مزایای این فناوری غیرمخرب اپتیکی را به عنوان مثال در مقایسه با روش معمول اندازه‌گیری مقدار نیتروژن (روش کجلدال[3])، نشان می‌دهد.

جدول ۲- فناوری آزمون غیرمخرب طیف‌سنجی در مقایسه با روش معمول اندازه‌گیری نیتروژن گیاه یا محصول

طیف‌سنجی نوری	روش کجلدال
غیرمخرب	مخرب
عدم نیاز به نمونه‌گیری یا آماده‌سازی نمونه	نیازمند نمونه‌گیری و آماده‌سازی نمونه (هضم، تقطیر و تیتراسیون)
سریع (کسری از ثانیه)	زمان‌بر (حداقل ۱ روز)
کم‌هزینه (دستگاه نسبتاً ارزان‌قیمت بدون هزینه مواد آزمایشگاهی یا آماده‌سازی نمونه است)	پرهزینه (هزینه آماده‌سازی و مواد و تجهیزات آزمایشگاهی + هزینه دستگاه)
عدم نیاز به آزمایشگاه (قابل کاربرد در خارج از آزمایشگاه)	درون‌آزمایشگاهی
کاربری آسان	مشکل و نیازمند متخصص
ناآلاینده	نیازمند مواد شیمیایی
قابلیت اندازه‌گیری چند جزء ترکیبی به طور همزمان با اندازه‌گیری نیتروژن	اندازه‌گیری نیتروژن
قابل کاربرد در توسعه حسگرها و سامانه‌های هوشمند پرتابل، دستی، قابل نصب در محیط رشد یا روی تجهیزات کشاورزی/ قابل کاربرد در طراحی ربات‌های هوشمند	غیرقابل کاربرد در توسعه حسگرها و سامانه‌های هوشمند پرتابل، دستی، قابل نصب در محیط رشد یا روی تجهیزات کشاورزی/ غیر قابل کاربرد در طراحی ربات‌های هوشمند

بنابراین، طراحی سامانه‌های هوشمند پرتابل، دستی یا قابل نصب در محیط رشد یا روی تجهیزات کشاورزی همچنین ربات‌های هوشمند[4] مبتنی بر آزمون غیرمخرب طیف‌سنجی به منظور نظارت و پایش وضعیت گیاه از نظر کیفیت، ایمنی و سلامت (آنالیز گیاه یا محصول به منظور اندازه‌گیری ترکیبات فیزیکوشیمیایی، وضعیت نیتروژن و دیگر عناصر تغذیه‌ای گیاه؛ نظارت بر آفات و بیماری‌ها و غیره [۱۰ و ۱۱]) از پیشرفت‌های مهمی است که نقش

1 Nearinfrared
2 Daily Light Integral
3 The Standard Kjeldahl Method
4 Intelligent Robots

www.SID.ir

موثری در آینده کشاورزی هوشمند خواهند داشت. نمونه‌های بارزی از کاربرد فناوری طیف‌سنجی بازتابی به عنوان یک حسگر یا سامانه هوشمند نظارت و پایش وضعیت گیاه در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

شکل ۳ یک نمونه اسپکترومتر تلفن همراه هوشمند را نشان می‌دهد که به راحتی با یک گوشی تلفن همراه و طیف‌سنجی در ناحیه قرمز، سبز و آبی می‌تواند مشکلات مختلفی را در گیاه یا محصول (از نظر کیفیت، ایمنی و سلامت) تشخیص دهد [۱۱]

شکل ۳- اسپکترومتر تلفن همراه هوشمند [۱۱]

شکل ۴- سامانه هوشمند مبتنی بر طیف‌سنجی برای کیفیت‌سنجی گیاه یا محصول از نظر عناصر تغذیه‌ای و توزیع کود متناسب با نیاز تغذیه‌ای [۴]

شکل ۴ یک سامانه هوشمند سنجش کیفیت گیاه یا محصول را بر اساس عناصر تغذیه‌ای آن را نشان می‌دهد که در آن، یک هد حسگر مبتنی بر طیف‌سنجی بازتابی فروسرخ نزدیک بالای تراکتوری که کودپاش به آن متصل است، نصب شده است. این سامانه که به صورت تجاری نیز درآمده است، نور خورشید را اندازه‌گیری و به طور همزمان با داده‌های بازتابی محصول مرتبط می‌کند. نور بازتاب‌شده از محصول اطلاعات بسیار مفیدی در مورد فیزیولوژی و مقدار کلروفیل گیاه همچنین کیفیت آن فراهم و امکان تشخیص سلامت و نیاز تغذیه‌ای آن را (بر اساس تغییرات طیفی ناشی از بیماری یا کمبود مواد مغذی) به صورت غیرمخرب و سریع ایجاد می‌کند. این سامانه قادر است متناسب با نیاز تغذیه‌ای پیش‌بینی‌شده، کودپاشی را به صورت زمان-واقعی انجام دهد. در این سامانه همچنین، امکان تهیه نقشه‌های نظارتی بر پایه مختصات سامانه موقعیت‌یاب جهانی[1] (GPS) وجود دارد. این سامانه نمونه‌ای عالی از پتانسیل کشاورزی هوشمند برای استفاده بهتر از منابع به منظور بهبود عملکرد و بهره‌وری کشاورزی ارائه می‌دهد که مبنای آن طیف‌سنجی به عنوان یک آزمون غیرمخرب اپتیکی است [۴].

طیف‌سنجی و تصویربرداری طیفی در کاربردهای کشاورزی دقیق[2] و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مبتنی بر اطلاعات طیفی محصول نیز نقش بسزایی دارند. توسعه اسپکترومترها یا دوربین‌های طیفی هوشمند در این زمینه نیز می‌تواند نویدبخش تغییرات چشم‌گیر در آینده کشاورزی جهان باشد.

۴- نقش طیف‌سنجی در نظارت و کنترل کیفیت، ایمنی و سلامت محصولات کشاورزی و مواد غذایی

از دیگر زمینه‌های کاربردی مهم در کشاورزی هوشمند که طیف‌سنجی نوری به عنوان یک فناوری توانمند غیرمخرب توانسته در آن به صورت موفق عمل کند، ارزیابی، نظارت و کنترل محصولات کشاورزی و غذایی از نظر کیفیت، ایمنی و سلامت است. دلیل این امر، مزایای بسیار این فناوری آزمون غیرمخرب در مقایسه با روش‌های مرسوم ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی و مواد غذایی است.

جدول ۳ مزایای این طیف‌سنجی نوری را به عنوان مثال در مقایسه با روش معمول اندازه‌گیری باقیمانده سموم شیمیایی در محصول (روش کروماتوگرافی گازی-طیفسنجی جرمی[3])، نشان می‌دهد.

1 Global Positioning System
2 Precision Agriculture

3 Gas ChromatographyMass Spectrometry

www.SID.ir

جدول ۳- فناوری آزمون غیرمخرب طیف‌سنجی در مقایسه با روش مرسوم اندازه‌گیری باقیمانده سموم شیمیایی در محصول

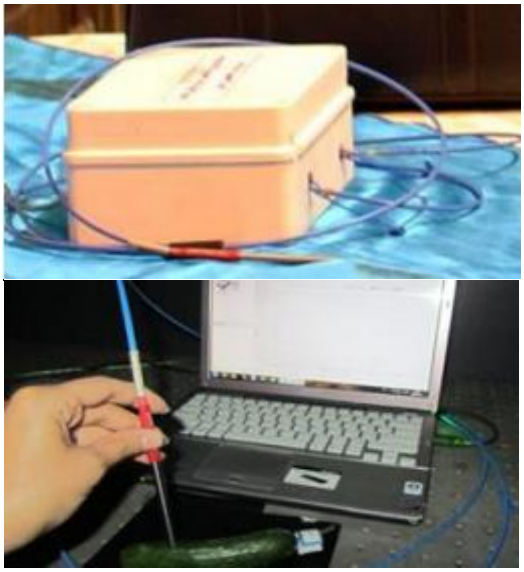
طیف‌سنجی نوری	روش کروماتوگرافی گازی با طیف‌سنجی جرمی (GC/MS)
غیرمخرب	مخرب
عدم نیاز به نمونه‌گیری یا آماده‌سازی نمونه	نیازمند نمونه‌گیری و آماده‌سازی نمونه (استخراج، خالص‌سازی، تزریق به دستگاه)
سریع (کسری از ثانیه)	زمان‌بر (حداقل ۲ روز)
بسیار کم‌هزینه (دستگاه نسبتاً ارزان‌قیمت بدون هزینه مواد آزمایشگاهی یا آماده‌سازی نمونه است)	پرهزینه (هزینه زیاد آماده‌سازی و مواد و تجهیزات آزمایشگاهی + گران‌قیمت بودن دستگاه)
عدم نیاز به آزمایشگاه (قابل کاربرد در خارج از آزمایشگاه)	درون‌آزمایشگاهی
کاربری آسان	مشکل و نیازمند متخصص
ناآلاینده	نیازمند مواد شیمیایی
قابل کاربرد برای هر تعداد نمونه	معمولاً برای تعداد محدودی نمونه انجام و نتیجه به کل نمونه‌ها تعمیم داده می‌شود
برگشت نمونه سالم به چرخه	هدررفت نمونه سالم
قابل کاربرد در توسعه حسگرها و سامانه‌های هوشمند پرتابل، دستی، قابل نصب روی ماشین‌ها و تجهیزات کشاورزی/ قابل نصب و کاربرد در خطوط کنترل فرایند و صنعت غذا	غیرقابل کاربرد در توسعه حسگرها و سامانه‌های هوشمند پرتابل، دستی، قابل نصب روی ماشین‌ها و تجهیزات کشاورزی/ غیر قابل نصب و کاربرد در خطوط کنترل فرایند و صنعت غذا

بنابراین، اسپکترومترهای پرتابل، دستی یا سامانه‌های پرتابل، دستی و یا قابل نصب روی ماشین‌ها و تجهیزات کشاورزی یا قابل نصب و کاربرد در خطوط کنترل فرایند و صنعت غذا (مبتنی بر طیف‌سنجی یا تصویربرداری طیفی) برای ارزیابی سریع و غیرمخرب کیفیت، سلامت و ایمنی مواد غذایی اعم از خام و فراوری‌شده (شامل محصولات زراعی، باغی، گلخانه‌ای، دام و طیور و شیلات) به دلیل توانمندی‌های این فناوری در تشخیص ترکیبات شیمیایی و غذایی مواد بیولوژیک به عنوان مثال شناسایی سریع و غیرمخرب تقلب در محصولات یا مواد غذایی (مانند تشخیص عسل تقلبی از اصل، تشخیص خلوص آبلیمو و شناسایی آبلیموی خالص از تقلبی، تشخیص زعفران تقلبی از اصل و غیره) بر پایه تشخیص ترکیبات شیمیایی آنها مبتنی بر اطلاعات طیفی؛ همچنین تشخیص و شناسایی سریع و غیرمخرب ترکیبات شیمیایی خارجی اضافه شده به محصول یا گیاه مانند باقیمانده آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و کودهای شیمیایی، آلودگی‌های میکروبی و قارچی، و غیره مبتنی بر اطلاعات طیف‌سنجی آنها، بسیار مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران حوزه کشاورزی مدرن قرار گرفته و تاکنون پژوهش‌های بسیاری در این زمینه‌ها اجرا شده است [۱۲ تا ۲۴].

به عنوان نمونه می‌توان به سامانه اپتیکی طراحی‌شده مبتنی بر طیف‌سنجی مرئی/فروسرخ نزدیک به منظور تشخیص سریع و غیرمخرب باقیمانده سموم در محصولات کشاورزی با قابلیت شناسایی محصول سالم از آلوده بر پایه حد مجاز باقیمانده (MRL) در محصول و مبتنی بر مدل‌های تشخیص الگو و پیش‌بینی‌کننده مقدار سم اشاره کرد. این سامانه شامل سه بخش اصلی سنجش طیفی مبتنی بر فیبر نوری[1]، مدل‌های تشخیص و تعیین باقیمانده سم (که بر اساس نتایج روش مرسوم آزمایشگاهی برای یک جامعه آماری از نمونه محصول خیار واسنجی و اعتبارسنجی شده)، و نرم‌افزار سامانه به صورت رابط گرافیکی کاربر به منظور نمایش نتیجه بررسی ایمنی محصول و مبتنی بر مدل‌های تدوین‌شده است (شکل ۵). دقت این سامانه در شناسایی محصول سالم از آلوده بیش از ۹۲ درصد است [۱ و ۲۵].

1 Fiber Optic

www.SID.ir



شکل ۵- سامانه اپتیکی تشخیص و تعیین سریع و غیرمخرب باقیمانده سموم در محصول [۱]

به عنوان یک نمونه دیگر، سامانه اپتیکی توسعه‌یافته بر پایه طیف‌سنجی مرئی/فروسرخ نزدیک برای تشخیص سریع و غیرمخرب آفت درونی کرم گلوگاه انار و خسارت‌های ناشی از آن در مراحل اولیه رشد و بدون علائم ظاهری با قابلیت شناسایی محصول سالم از ناسالم مبتنی بر مدل‌های تشخیص الگو قابل ذکر است (شکل ۶). این سامانه نیز شامل یک بخش سنجش طیفی مبتنی بر دو شیوه اپتیکی، مدل‌های شناسایی انار سالم از آلوده (که برای یک جامعه آماری انار سالم و آلوده‌شده به صورت مصنوعی به لارو آفت (در مراحل مختلف رشد) تدوین و اعتبارسنجی شده)، و یک رابط گرافیکی کاربر مبتنی بر مدل‌های تشخیص است. دقت این سامانه برای تفکیک انارهای سالم از آلوده (رقم ملسِ ساوه) ۹۰ درصد است [۲۶ و ۲۷].

شکل ۶- سامانه اپتیکی تشخیص سریع و غیرمخرب آفت کرم گلوگاه انار مبتنی بر طیف‌سنجی مرئی/فروسرخ نزدیک [۲۷]

از سوی دیگر، پیشرفت‌های اخیر در طراحی اسپکترومترهای هوشمند و دوربین‌های طیفی، سامانه‌ها یا ربات‌های مبتنی بر طیف‌سنجی و هوش مصنوعی در زمینه نظارت و پایش کیفیت، سلامت و ایمنی محصولات کشاورزی (چه در مراحل رشد و چه در مراحل پس از برداشت، انبارداری یا سیلو) و مواد غذایی (در صنعت غذا) نوید آینده‌ای هوشمند در این زمینه را می‌دهد.

شکل ۷ نمونه یک سامانه هوشمند اپتیکی طراحی‌شده برای تعیین غیرمخرب رسیدگی میوه سیب با تکیه بر اطلاعات طیف‌سنجی مرئی/فروسرخ نزدیک را نشان می‌دهد. قسمت‌های اصلی این سامانه شامل فرستنده‌ها و گیرنده‌های نوری، فیبرهای نوری، واحد پردازش و کنترل مبتنی بر پردازنده آردوینو[1]، و نمایشگر است. این سامانه با یک مدل تشخیص رسیدگی یا عدم رسیدگی میوه بر پایه پارامترهای کیفی آن آموزش داده شده است. دقت تشخیص این سامانه حدود ۵۵ درصد است [۲۸].

به عنوان یک نمونه بارز در این زمینه کاربرد، می‌توان به ربات هوشمند مبتنی بر طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک اشاره کرد که توانایی برداشت محصول انبه را متناسب با تشخیص میزان رسیدگی بر پایه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده هوشمند تدوین‌شده بر اساس اطلاعات طیفی محصول در ناحیه فروسرخ نزدیک دارد[۲۹].

شکل ۷- سامانه هوشمند تعیین غیرمخرب رسیدگی سیب مبتنی بر اطلاعات طیف‌سنجی مرئی/فروسرخ نزدیک [۲۸]

۵- سایر کاربردها

از دیگر کاربردهای طیف‌سنجی نوری در کشاورزی که قابلیت هوشمندسازی و توسعه حسگرها و سامانه‌های هوشمند را دارند، می‌توان به آنالیزهای خاک به صورت غیرمخرب یا در حال حرکت برای سنجش کیفیت و تخمین

1 Arduino

www.SID.ir

ترکیبات یا ویژگی‌های خاک [۳۰]؛ آنالیز، نظارت و پایش کیفیت چوب [۳۱]؛ نظارت و کنترل کیفیت آب و نهاده‌های کشاورزی (کود و سم)، نظارت و کنترل کیفیت غذای دام و غیره اشاره کرد.

به عنوان یک نمونه بارز می‌توان به اسکنر دستی هوشمند مبتنی بر فناوری طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک برای کیفیت‌سنجی غیرمخرب خاک اشاره کرد (شکل ۸).

شکل ۸- اسکنر دستی هوشمند مبتنی بر طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک و اپلیکیشن تلفن همراه [۳۲]

این ابزار قادر به اندازه‌گیری و نظارت بر عناصر تغذیه‌ای خاک مبتنی بر اطلاعات طیفی آن و بر پایه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مقدار عناصر مغذی خاک به صورت زمان-واقعی، سریع و مقرون به صرفه است و به کمک آن در عرض چند دقیقه وضعیت کیفیت خاک از نظر مقدار عناصر تغذیه‌ای قابل دریافت روی تلفن همراه هوشمند است. این ابزار برای نظارت بر کیفیت غذای دام و برگ گیاهان از نظر مقدار عناصر تغذیه‌ای آنها نیز قابل کاربرد است [۳۲].

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نقش طیف‌سنجی نوری به عنوان یک فناوری غیرمخرب اپتیکی در کاربردهای کشاورزی با هدف توسعه حسگرها و سامانه‌های طیفی هوشمند ارائه شد. مهم‌ترین کاربردهای این فناوری که می‌توانند نقش موثری در توسعه کشاورزی هوشمند داشته باشند عبارتند از نظارت بر رشد و فیزیولوی گیاه؛ نظارت و کنترل کیفیت نور محیط رشد، تولید یا نگهداری؛ نظارت و پایش وضعیت گیاه یا محصول (از نظر کیفیت، ایمنی و سلامت)؛ نظارت و کنترل کیفیت محصولات کشاورزی و مواد غذایی؛ آنالیزها و کیفیت‌سنجی خاک و چوب؛ نظارت و کنترل کیفیت آب و نهاده‌های کشاورزی؛ و غیره. با توجه به مزایا و توانمندی‌های این فناوری می‌توان انتظار داشت که حسگرها و سامانه‌های هوشمند مبتنی بر طیف‌سنجی به عنوان مهم‌ترین اجزاء در فناوری نوظهور اینترنت اشیاء و یکپارچه با فناوری‌های کلان‌داده، رایانش ابری و هوش مصنوعی نقش موثری در حل چالش‌های کلیدی بخش کشاورزی و به تبع آن افزایش بهره‌وری با هدف توسعه پایدار داشته باشند. از سوی دیگر، کاربرد ترکیبی حسگرها و سامانه‌های هوشمند مبتنی بر طیف‌سنجی با سایر حسگرها و سامانه‌های مبتنی بر سایر فناوری‌های آزمون غیرمخرب (مانند بیوحسگرها[1]، حسگرها و سامانه‌های فراصوتی[2] و غیره) که در صنعت کشاورزی به منظور ارزیابی کیفیت، ایمنی و سلامت محصول در حال توسعه هستند و قابلیت هوشمندسازی دارند، می‌تواند آینده‌ای مدرن‌تر برای کشاورزی جهان ترسیم کند.

۷- منابع

[۱] جمشیدی، ب. (۱۳۹۷). شناسایی سریع محصول آلوده به سم آفت‌کش با روش‌های نوین فناوری آزمون غیرمخرب. *فناوری آزمون غیرمخرب*. دوره ۲، شماره ۲. صفحات ۶۵-۵۸.

[۲] جمشیدی، ب. (۱۳۹۸). یکپارچگی فناوری‌های اینترنت اشیاء و کلان داده در کشاورزی هوشمند. *دوازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران*، ۱۶ تا ۱۸ بهمن، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

[3] Ouzounis, T., Rosenqvist, E. and Ottosen, C.O. (2015). Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: A review. *HortScience*, 50(8), 1128-135.

[4] AVANTES. (2019). Spectroscopy plays a key role in the future of smart agriculture. https://avantesusa.com/category/industry-application-notes. (Accessed January 2020)

[5] SpectroLogiX. (2019). JTS-150 Photosynthesis spectrometer. https://spectrologix.com/photosynthesis. (Accessed January 2020)

[6] Digitium, (2019). Is IoT the future of agriculture? https://www.digiteum.com/iot-agriculture. (Accessed January 2020)

[7] Farber, C., Mahnke, M., Sanchez, L. and Kurouski, D. (2019). Advanced spectroscopic techniques for plant disease diagnostics. A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 43-49.

[8] Lowe, A., Harrison, N. and French, A.P. (2017). Hyperspectral image analysis techniques for the detection

1 Biosensors

2 Ultrasonic Systems

www.SID.ir

microbial and fungal assessment. *Proceedings of the 12th Congress on Biosystems Engineering and Mechanization*. February 5-7. Ahvaz, Iran.

[21] Kuroki, S., Kanoo, T., Itoh, H. and Kamisoyama, H. (2020). Nondestructive VIS/NIR spectroscopy estimation of intravitelline vitamin E and cholesterol concentration in hen shell eggs. *Journal of Food Measurement and Characterization*, DoI: 10.1007/s11694-019-00361-8

[22] Shafiee, S., Polder, G., Minaei, S., Moghadam-Charkari, N., van Ruth, S. and Kuś, P.M. 2016. Detection of honey adulteration using hyperspectral imaging. *IFAC-PapersOnLine*, 49(16), 311-314.

[23] Shafiee, S. and Minaei, S. 2018. Combined data mining/NIR spectroscopy for purity assessment of lime juice. *Infrared Physics and Technology*, 91, 193-199.

[24] Shawky, E., Abu El-Khair, R.M. and Selim, D.A. 2020. NIR spectroscopy-multivariate analysis for rapid authentication, detection and quantification of common plant adulterants in saffron (*Crocus sativus L.*) stigmas. *LWT*, 122, DoI: 10.1016/j.lwt.2020.109032

[25] Jamshidi, B., Mohajerani, E. and Jamshidi, J. (2016). Developing a Vis/NIR spectroscopic system for fast and non-destructive pesticide residue monitoring in agricultural product. *Measurement*, 89, 1-6.

[26] Jamshidi, B., Mohajerani, E., Farazmand, H., Mahmoudi, A. and Hemmati, A. (2019). Pattern recognition-based optical technique for non-destructive detection of Ectomyelois ceratoniae infestation in pomegranates during hidden activity of the larvae. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 206, 552-557.

[۲۷] جمشیدی، ب. (۱۳۹۷). طراحی و توسعه سامانه اپتیکی تشخیص غیرمخرب انارهای آلوده به آفت کرم گلوگاه. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. *موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی*. شماره ثبت: ۵۴۷۸۱. ۶۴ صفحه.

[۲۸] عباسی، س. (۱۳۹۸). تشخیص غیرمخرب رسیدگی میوه سیب با طراحی و ساخت سامانه خبره قابل حمل سنجش نوری. رساله دکتری تخصصی، *دانشگاه تربیت مدرس*. ۱۳۲ صفحه.

[29] Cortés, V., Blanes, C., Blasco, J., Ortíz, C., Aleixos, N., Mellado, M., Cubero, S. and Talens, P. (2017). Integration of simultaneous tactile sensing and visible and near-infrared reflectance spectroscopy in a robot gripper for mango quality assessment. *Biosystems Engineering*, 162, 112-23.

[30] Isaac, W. and Na, A. (2016). On-the-go soil nitrogen sensor based on near infrared spectroscopy. *International Conference on Information Technology - The Next Generation IT Summit on the Theme - Internet of Things: Connect your Worlds*, October 6-7. Noida, India.

[31] Sandak, J., Sandak, A. and Meder, R. (2016). Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: Hints and tips. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 24(6), 485-505.

AgroCares, 2020. AgroCares Nutrient Scanner. https://www.agrocares.com/en/products/scanner. (Accessed January 2020)

and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods*, 18, 1-12.

[9] Cozzolino, D., Porker, K. and Laws, M. (2015). An overview on the use of infrared sensors for in field, proximal and at harvest monitoring of cereal crops. *Agriculture*, 5, 713-722.

[10] Contreras-Medina, L.M., Osornio-Rios, R.A., Torres-Pacheco, I., Romero-Troncoso, R.J., Guevara-González, R.G. and Millan-Almaraz, J.R. (2012). Smart Sensor for Real-Time Quantification of Common Symptoms Present in Unhealthy Plants. *Sensors*, 12, 784-805.

[11] Findlight, (2018). Portable Spectroscopy and how it is Changing Agriculture. https://www.findlight.net/blog/2018/09/01/spectroscopy-precision-agriculture/. (Accessed January 2020)

[12] Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E. and Ghassemian, H. (2012). Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 85, 64-69.

[13] Jamshidi, B., Mohajerani, E., Jamshidi, J., Minaei, S. and Sharifi, A. (2015). Non-destructive detection of pesticide residues in cucumber using visible/near-infrared spectroscopy. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 32 (6), 857-863.

[14] Jamshidi, B. (2020). Ability of near-infrared spectroscopy for non-destructive detection of internal insect infestation in fruits: Meta-analysis of spectral ranges and optical measurement modes. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 225, DoI: 10.1016/j.saa.2019.117479

[15] Abasi, S., Minaei, S., Jamshidi, B., Fathi, D. and Khoshtaghaza, M. H. (2019). Rapid measurement of apple quality parameters using wavelet de-noising transform with Vis/NIR analysis. *Scientia Horticulturae*, 252, 7-13.

[16] Bahrami, M.E., Honarvar, M., Ansari, K. and Jamshidi, B. (2020). Measurement of quality parameters of sugar beet juices using near-infrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Engineering*, 271. DoI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109775

[17] Basati, Z., Jamshidi, B., Rasekh, M., and Abbaspour-Gilandeh, Y. (2018). Detection of sunn pest-damaged wheat samples using visible/near-infrared spectroscopy based on pattern recognition. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 203, 308-314.

[18] Rahi, S., Mobli, H. and Jamshidi, B. (2018). Spectroscopy and spectral imaging techniques for non-destructive food microbial assessment. *Proceedings of the 5th Iranian International NDT Conference*. November 3-4. Olympic Hotel, Tehran, Iran.

[19] Rahi, S., Mobli, H., Jamshidi, B., Azizi, A. and Sharifi, M. (2019). Visible/near-infrared spectroscopy as a novel technology for nondestructive detection of Escherichia coli ATCC 8739 in lettuce samples. *Proceedings of the World Conference on Engineering and Technology*. October 24-26. Frankfurt, Germany.

[20] Rahi, S., Mobli, H., Jamshidi, B., Azizi, A. and Sharifi, M. (2020). Data fusion approaches as a novel strategy in multivariate analysis of spectroscopic and spectral imaging information for non-destructive food

.

www.SID.ir

The Role of Spectroscopy as an Optical Non-destructive Technology in Development of Smart Agriculture

Bahareh Jamshidi
Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: b.jamshidi@areeo.ac.ir

Abstract:
Optical Spectroscopy, as a powerful and applicable Non-destructive Testing (NDT) technology, is capable of solving many problems in agriculture based on quality, safety and health assessment of the sample (plant or crop, food, soil, water, etc.). This non-destructive optical technology can be used for development of smart spectral sensors and systems, the most important objects that can be connected to the Internet with the potential to collect, store, process and analyze the spectral data and information, and control or communicate remotely. Recent advances in non-destructive Spectroscopy technology in combination with emerging and advanced technologies such as Internet of Things (IoT), Big Data, Cloud Computing, and Artificial Intelligence technologies, play an important role in developing Smart Agriculture and improving the agricultural productivity. This article aims to present the role of this Non-destructive Testing technology in the future of Smart Agriculture by introducing its most important applications in solving key challenges facing agriculture based on sample quality, safety and health assessment.

Keywords: Internet of Things, Spectroscopy, Non-destructive Testing, Smart Systems, Spectral Imaging, Spectral Sensors

www.SID.ir