

مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰

ISSN ۲۷۱۶-۹۸۰۴ الکترونیکی، ISSN ۲۷۱۷-۰۶۳۲ چاپی

فناوری‌های پیشرفته تشخیص بیماری‌های گیاهی



نوع مقاله: مروری [20.1001.1.27170632.1400.14.4.7.0](https://doi.org/10.27170632.1400.14.4.7.0)

فرزاد آزادشهرکی^{۱*}، محبوبه شاهرخی^۲، کسری شریفی^۳ و گیتا حسینی^۴

۱- استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۲- کارشناس ارشد دبیر زیست‌شناسی، دبیرستان استعدادهای درخشان فرزنانگان ۴، البرز، ایران

۳- استادیار مؤسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

farzad_shahrekian@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

صفحه ۴۶-۲۷

چکیده

عدم تشخیص زود هنگام وقوع بیماری‌های گیاهی منجر به استفاده بیشتر از آفت‌کش‌های شیمیایی و کاهش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی می‌شود. تشخیص سریع، دقیق، ارزان و زودهنگام بیماری‌های گیاهی، به‌ویژه آن‌هایی که بدون علائم اولیه گسترش می‌یابند، در کاهش مصرف آفت‌کش‌های شیمیایی و ارتقاء کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی مؤثر است. در این مقاله روش‌های پیشرفته تشخیص بیماری‌های گیاهی مبتنی بر فناوری نانو، فناوری‌های غیرتخریبی بر اساس طیف‌سنجی و بویایی الکترونیکی تشریح شده است. بسیاری از این فناوری‌ها امکان تشخیص بسیاری از بیماری‌ها را قبل از بروز علائم ظاهری فراهم کرده که با اقدامات کنترلی و جلوگیری از توسعه بیماری، علاوه بر کاهش هزینه کنترل بیماری، توسعه پایدار کشاورزی و حفظ محیط زیست و سلامت مصرف‌کننده را نیز به‌دنبال خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: بیماری‌های گیاهی، بویایی الکترونیکی، طیف‌سنجی، روش‌های غیرتخریبی، نانوتکنولوژی.

مقدمه

رشد انواع قارچ‌ها و باکتری‌ها است و به همین دلیل انواع مختلفی از آفت‌کش‌ها و گاه با غلظتی بالاتر از مقدار توصیه‌شده در گلخانه‌ها مصرف می‌شود. سم‌پاشی‌های مکرر در گلخانه‌ها، برداشت بلافاصله محصول پس از سم‌پاشی و امکان باقی ماندن مقادیر زیادی از آفت‌کش‌ها در محصولات گلخانه‌ای، سلامت مصرف‌کنندگان را بیش از پیش به‌خطر می‌اندازد. همچنین بر اساس شرایط محیطی گلخانه، امکان تماس کشاورز و کارگر با آفت‌کش بیشتر شده و احتمال افزایش ابتلا به انواع بیماری برای آنها افزایش می‌یابد (Andersson et al. 2014; Philippe et al. 2021). ضایعات محصولات کشاورزی بستگی زیادی به شرایط تولید داشته و بروز و شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی در مرحله تولید منجر به افزایش ضایعات محصولات کشاورزی و تهدید امنیت غذایی می‌شود. از طرفی مقررات و استانداردهای بین‌المللی نیز بر مصرف حداقلی آفت‌کش‌های شیمیایی در کنترل آفات و بیمارگرها تاکید داشته تا میزان باقیمانده آفت‌کش‌ها در محصولات کشاورزی بر اساس این استانداردهای کشور مقصد کاهش یافته و صادرات محصولات کشاورزی با مشکل مواجه نشود. متأسفانه در برخی از بیماری‌های گیاهی، علائم اولیه بیماری

سالانه میلیون‌ها لیتر از آفت‌کش‌های شیمیایی در سراسر جهان به‌منظور کنترل آفات، بیمارگرها و علف‌های هرز در بخش کشاورزی استفاده می‌شود (Mojarradi et al. 2015; Rezaei et al. 2020). استفاده از آفت‌کش‌های شیمیایی در کشاورزی مدرن باعث افزایش عملکرد معنی‌دار تولید محصولات کشاورزی شده است ولی این امر افزایش معنی‌دار تجمع مواد شیمیایی در مواد غذایی و محیط زیست از جمله آلودگی آب، تخریب لایه اوزون، نابودی جنگل‌ها، فرسایش شدید خاک و افزایش شدید درجه حرارت در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای را به دنبال داشته است. از اثرات منفی آفت‌کش‌های شیمیایی بر سلامت انسان می‌توان انواع سرطان‌ها، بیماری‌های عصبی، دیابت، بیماری‌های تنفسی، نارسایی‌ها، بیماری‌های جنینی و مشکلات تنفسی را نام برد. با توجه به افزایش جمعیت در جهان، نیاز به تولیدات کشاورزی و مواد غذایی روز به روز افزایش یافته و به‌دلیل محدودیت نهاده‌ها، سیستم‌های کشاورزی سنتی جای خود را به کشاورزی صنعتی، کشت در محیط‌های کنترل شده و گلخانه‌ای داده است. گلخانه به‌دلیل بسته بودن محیط و وجود رطوبت بالا، محل مناسبی برای

"آزادشهرکی و همکاران، فناوری‌های پیشرفته تشخیص بیماری‌های گیاهی"

در جدول ۱ فهرستی از روش‌های رایج و مستقیم (روش‌هایی که قادر به شناسایی خصوصیات خود عامل بیماری‌زا است) همراه با ویژگی‌های اصلی آنها به صورت خلاصه آورده شده است. روش‌های مستقیم علی‌رغم داشتن مزایایی از قبیل حساسیت، اعتبار و قابلیت تکرار نتایج، نیاز به زمان طولانی برای اجرا و دریافت پاسخ، ابزار، تجهیزات و مواد شیمیایی مختلف، نیروی متخصص و هزینه بالادارند و همچنین احتمال تشخیص دیرنگام بیماری در این روش‌ها وجود دارد (Fang and Ramasamy, 2015; Dincer et al. 2015; Zarei. 2017). به منظور کاهش زیان‌های ناشی از بیماری، جلوگیری از شیوع و بروز گونه جدید و کاهش استفاده از آفت‌کش‌های شیمیایی، پایش گیاهان میزبان از نظر آلودگی به عوامل بیماری‌زا و مدیریت این عوامل در مراحل مختلف پیشرفت بیماری، ضروری است. از این‌رو، در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در زمینه تشخیص زودهنگام عوامل بیماری‌زای گیاهی و توسعه روش‌ها و ابزارها که به‌طور هم‌زمان بتواند چندین عامل بیماری‌زا را شناسایی کند، انجام شده است. این فناوری‌ها دارای سرعت پاسخ مناسب بوده و تجزیه و تحلیل نتایج در آنها ساده است (Xie and He, 2016;

چند روز و حتی چند هفته پس از بروز آلودگی اولیه ظاهر می‌شود که پیشرفت بیماری را به صورت غیرقابل پایش به همراه دارد (Grover. 2013; Nehra et al. 2021). اولین رویکرد در کنترل شیوع بیماری‌ها، اجرای فعالیت‌های مراقبتی و قرنطینه، تفسیر علائم ظاهری بیماری و مطالعه ویژگی‌های مرفولوژیکی عامل بیماری‌زا از طریق رشد آنها در محیط‌های کشت خاص (در صورت قابل کشت بودن) یا مشاهده از طریق روش‌های میکروسکوپی است. علی‌رغم سادگی و هزینه کم روش‌های کنترلی اشاره شده، این روش‌ها قابلیت اطمینان و دامنه کاربرد کمی دارند. علاوه بر این، ممکن است عامل بیماری‌زا در محیط درون‌شیشه (*in vitro*) قابل کشت نباشد یا مشاهده آن با میکروسکوپ آسان نباشد. استفاده از فناوری‌های مبتنی بر اسیدنوکلئیک به دلیل سرعت و دقت تشخیص و امکان بررسی تعداد زیاد نمونه در زمان کم می‌تواند در برخی موارد جایگزین روش‌های سنتی تشخیص بیماری شود (López et al. 2005). به صورت کلاسیک، علاوه بر روش‌های آنالیز مولکولی، روش‌های سرولوژیک (serological methods) نیز به دلیل توان بالای عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند (López et al. 2003; Alvarez et al. 2004).

جدول ۱- روش های رایج تشخیص بیماری های گیاهی و مزایا و معایب این روش ها (Fang and Ramasamy, 2015; (Dincer et al. 2015; Zarei. 2017).

روش	حد تشخیص (LOD) بر اساس واحد تشکیل کلنی بر میلی لیتر (CFU/mL)	مزایا	محدودیت ها
واکنش زنجیره ای پلیمرز (PCR)	۱۰ ^۳ -۱۰ ^۴	تکنولوژی جا افتاده و رایج، قابل حمل، کارکرد آسان	اثر بخشی به استخراج دی.ان.ا. فعالیت پلیمرز، غلظت بافر PCR و دئوکسی نوکلئوتید تری فسفات (dNTP) وابسته است.
دو رگ گیری فلورسانس درجا (FISH)	۱۰ ^۳	حساسیت بالا	اتوفلورسانس (نیاز به مواد فلورسنت)، فتوبلیچینگ
الایزا (ELISA)	۱۰ ^۵ -۱۰ ^۶	هزینه کم، تغییر رنگ ظاهری می تواند در تشخیص کمک کند.	حساسیت کم برای باکتری و نژادهای مختلف ویروس
ایمونوفلورسنس (IF)	۱۰ ^۳	حساسیت بالا، توزیع مولکول هدف قابل مشاهده شدن است.	فتوبلیچینگ
فلوسایتومتری (FCM)	۱۰ ^۲	اندازه گیری هم زمان چندین ویژگی یک سلول از جمله اندازه، پیچیدگی سیتوپلاسمی، محتوی دی.ان.ا. و آر.ان.ا، تشخیص سریع	هزینه بالا، وجود اطلاعات زیاد ناخواسته

دارای قابلیت استفاده آسان را در تشخیص عوامل بیماری زای گیاهی به همراه داشته و منجر به تشخیص بدون برچسب (label-free detection) عوامل بیماری زا در گیاهان شده است. از ویژگی این فناوری ها می توان به حساسیت بالای تشخیص و نیاز نداشتن به نیروی ماهر اشاره کرد. بسیاری از روش های تشخیص بیولوژیکی شامل برچسب زدن پروتئین ها و سایر مولکول ها هستند که به طور معمول از طریق گونه های رادیواکتیو، نقاط کووانتومی، یا آنزیم ها نشانگرهای فلورسنت

امکان بررسی تعداد زیاد نمونه گیاهی به طور هم زمان در این روش ها، می تواند مجموع هزینه های پایش سلامت محصولات در مزرعه را کاهش دهد. توسعه روش های مولکولی برخط در مزرعه (on-field) می تواند به طور معنی داری زمان تصمیم گیری و احتمال انتقال عوامل بیماری زا به سایر گیاهان یا مناطق غیر آلوده را کاهش دهد (Xie et al. 2015; Ghanei et al. 2018).

توسعه انواع حسگرها و یا چیدمان هایی از حسگرها، استفاده از فناوری های سریع، ارزان و

"آزادشهرکی و همکاران، فناوری‌های پیشرفته تشخیص بیماری‌های گیاهی"

فناوری نانو، روش‌های غیرتخریبی طیف‌سنجی، یا بویایی الکترونیکی هستند.

فناوری‌های نوین تشخیص بیماری‌های گیاهی

تشدید پلاسمون سطحی (surface plasmon resonance, SPR)

به نوسانات منسجم الکترون‌های آزاد یک محیط پلاسمایی، پلاسمون گفته می‌شود و در صورتی که پلاسمون‌ها در سطح مشترک یک فلز و دی الکتریک ایجاد شوند، به آنها پلاسمون سطحی (SPR) گفته می‌شود که پس از تابش امواج الکترومغناطیس، در سطح میان فلز و دی الکتریک ایجاد می‌شوند. پلاسمون‌های سطحی به تغییرات ضریب شکست سطح فلز حساس هستند و از این پدیده به‌عنوان حسگر نوری در آشکارسازی استفاده می‌شود. پدیده SPR به دلیل تعامل تابش الکترومغناطیس و دریای الکترونی داخل فلز ایجاد می‌شود. در این فرآیند امواج الکترومغناطیس، در شرایط خاصی اثرات تشدید در دریای الکترونی ایجاد می‌کنند. تغییر شرایط فیزیکی سطح، اثر قابل توجهی بر این تشدید دارد و آشکارسازی این تغییرات اساس کار حسگرهای SPR است. فناوری تشدید پلاسمون سطحی یکی از فناوری‌های پیشرفته تشخیص بدون برچسب و بلادرنگ (real-

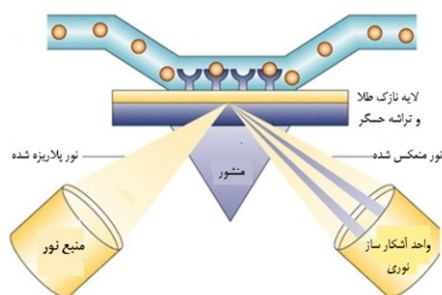
هستند (Waggoner and Craighead, 2007; Hempen and Karst, 2006; Umapathi et al. (2022).

روش‌های برچسب‌گذاری همراه با سنج‌های زیستی چندگانه به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند تا مجموعه‌ای از مولکول را شناسایی کنند. روش‌های تشخیص با برچسب‌زنی نیازمند صرف وقت و هزینه برای برچسب‌زنی مولکول هستند و دقت آنها نیز بسته به عواملی چون دقت تجهیزات و ابزار اندازه‌گیری، کیفیت مواد مورد استفاده و مهارت کارشناسان اندازه‌گیری متفاوت است که سبب می‌شود تمایل به سیستم‌های مختلف تشخیص بدون برچسب، که به اندازه روش‌های برچسب‌زنی یا بیشتر از آنها حساس باشند، بیشتر شود (Hempen and Karst, 2006).

در این مقاله به معرفی روش‌های سریع و نوین تشخیص بیماری‌های گیاهی که اغلب نیاز به آنالیز نمونه نداشته و در پاره‌ای از موارد که به فناوری‌های غیرتخریبی موسومند، پرداخته شده است. همراه با معرفی هر فناوری و بیان مزایا و معایب آن، مثال یا مثال‌هایی از پژوهش‌های انجام‌شده در رابطه با استفاده از این فناوری‌ها در تشخیص بیماری‌های گیاهی آورده شده است. فناوری‌های معرفی شده در این مقاله غالباً مبتنی بر

فناوری به طور معمول از یک لایه فلزی نازک (اغلب از نانوسیم های طلا) استفاده می شود (شکل ۱) (Hou and Cronin, 2013; Wang et al. (2022).

(Chen et al.) در زمینه بیوشیمیایی است (2010; Hoseinian et al. 2016). در فناوری تشدید پلاسمون سطحی، تغییرات شاخص انکسار نور ناشی از واکنش بین آنالیت موجود در محلول و لیگاند، توسط حسگر پایش می شود. در این



شکل ۱- اجزاء فناوری تشدید پلاسمون سطحی در تشخیص آنتی بادی بیماری گیاهی (Hou and Cronin, 2013).

$122-39 \mu\text{g mL}^{-1}$ که در مقایسه با روش های رایج سریعتر و دقیق تر است استفاده شده است (Luna- Moreno et al. 2019). از مزایای SPR در تشخیص بیماری های گیاهی، علاوه بر عدم نیاز به برچسب زنی، می توان به حساسیت بالا به ماده مورد سنجش در حد پیکوگرم بر میلی لیتر، زمان بسیار کوتاه اندازه گیری و امکان چندین بار اندازه گیری با یکبار پوشش آنتی بادی اشاره کرد (Cooper. 2003; Ramachandran et al. 2005).

میکروبالانس کریستال کوارتز (quartz crystal microbalance, QMC)

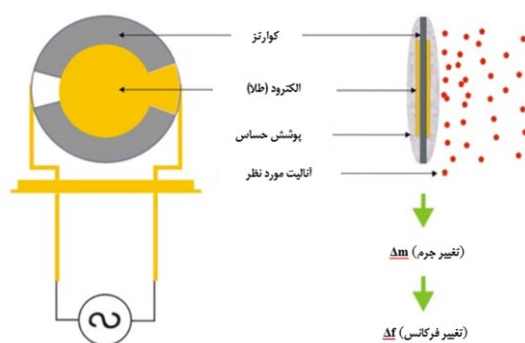
یکی از روش های سنجش تغییرات در لایه تشخیص ایموبولیزه شده در اثر اتصال به مولکول

در رابطه با استفاده از این فناوری در تشخیص بیماری های گیاهی می توان به استفاده از نانوسیم های طلا در SPR برای تشخیص آنتی بادی اختصاصی ویروس های موزاییک سیمبیدیوم (cymbidium mosaic virus) و لکه حلقوی ادونتوگلاسم (odontoglossum ringspot virus)، به ترتیب با توانایی ردیابی غلظت 48 pg mL^{-1} و 42 pg mL^{-1} از این دو ویروس که بسیار پایین تر از کمترین غلظت ویروس (1200 pg mL^{-1}) در روش های مبتنی بر ELISA است، اشاره کرد. همچنین از این روش در ردیابی بیماری قارچی سیگاتو سیاه موز (black sigatoka) با عامل *Pseudocercospora fijiensis* با توانایی تشخیص

"آزادشهرکی و همکاران، فناوری‌های پیشرفته تشخیص بیماری‌های گیاهی"

یک قطعه پیزوالکتریک که هسته اصلی آن یک دیسک کوارتز (به‌طور معمول یک صفحه دایره‌ای شکل) است و دو الکتروود از جنس طلا یا نقره روی آن نشانده شده و گیرنده زیستی (پوشش حساس) بر روی این الکتروودها قرار داده شده است (شکل ۲) (Stambaugh et al. 2018).

هدف، استفاده از میکروبالانس کریستال کوارتز (QMC) است. تغییرات فرکانس یک کریستال کوارتز که با جذب جرمی در حد نانوگرم ایجاد می‌شود می‌تواند برای اندازه‌گیری جرم‌های در حد نانوگرم در زمان جذب مولکول مورد استفاده قرار گیرد. مبنای حسگرهای جرمی، ایجاد پیام خاص در اثر تغییر جرم است. یک حسگر QMC در واقع



شکل ۲- طرح‌واره استفاده از میکروبالانس کریستال کوارتز (Stambaugh et al. 2018).

کرد (Akgonullu et al. 2022).

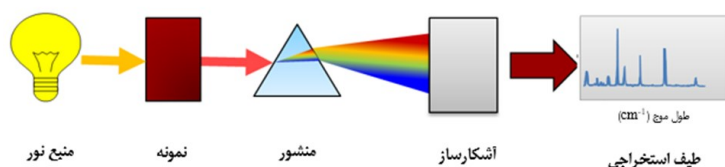
طیف‌سنجی رامان (Raman Spectroscopy, RS) و طیف‌سنجی رامان ارتقاء یافته سطحی (Surface-Enhanced Raman Scattering, SERS)

از دیگر روش‌های پیشرفته تشخیص سریع بیماری‌های گیاهی می‌توان به پراکندگی / طیف‌سنجی رامان و پراکندگی / طیف‌سنجی رامان ارتقاء یافته سطحی (SERS) اشاره کرد. در

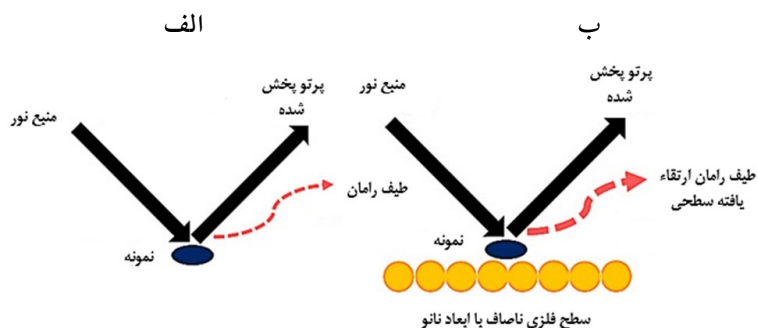
از QMC به‌عنوان یک روش بسیار حساس موازنه جرمی، برای تشخیص بیماری ویروسی پیسک زرد ذرت (MCMV) به‌صورت تغییر در فرکانس تشدید کریستال در هنگام تغییر جرم ماده استفاده و نتیجه آن رضایت‌بخش و در حد ELISA (حد تشخیص 250 ngL^{-1}) بوده است. از مزایای استفاده از QMC نسبت به ELISA در تشخیص MCMV می‌توان به سادگی کار، هزینه کم، سرعت و قابلیت اندازه‌گیری بلادرنگ اشاره

منبع استفاده شود. یکی از روش‌های تقویت پیام رامان استفاده از SERS است. در تکنیک SERS به کمک یک سطح فلزی (طلا یا نقره) که دارای سطوح ناصاف به ابعاد نانو است، میدان نوری تقویت می‌شود. در شکل ۳ طرح‌واره و اجزاء طیف‌سنجی رامان و در شکل ۴ تفاوت طیف‌سنجی رامان با طیف‌سنجی رامان ارتقاء یافته سطحی آمده شده است (Zheng and He, 2014).

طیف‌سنجی رامان، پرتو نور توسط ماده پراکنده می‌شود و این پراکنده شدن نور منجر به تغییر طول موج نور می‌شود. بررسی نور پراکنده شده اساس کار طیف‌سنجی رامان بوده و از این طریق می‌توان درباره ترکیبات ماده‌ای که نور به آن می‌تابد اطلاعاتی به دست آورد. پیام‌هایی که در طیف‌سنجی رامان به دست می‌آیند، پیام‌های ضعیفی هستند، به ویژه اگر از نور مرئی به عنوان



شکل ۳- طرح‌واره طیف‌سنجی رامان (Zheng and He, 2014).



شکل ۴- تفاوت طیف‌سنجی رامان (الف) با طیف‌سنجی ارتقاء یافته سطحی (ب) (Zheng and He, 2014).

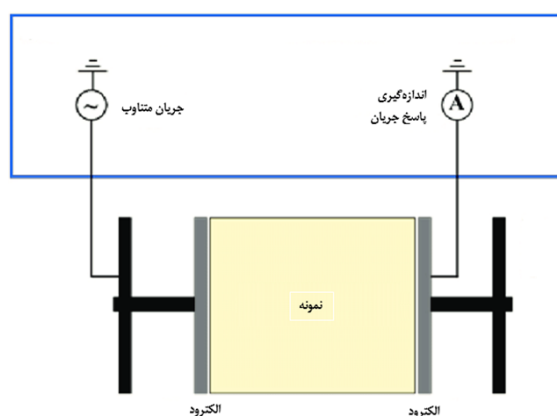
سرعت بالا و حساسیت بیشتر آن به میزان توکسین تولید شده توسط آلترناریا بود (Pan et al. 2018). سنجش و پایش این مولکول‌ها در محصولات کشاورزی با استفاده از روش‌های معمول هزینه‌بر و زمان‌بر است (Weng et al. 2021).

از SERS برای تشخیص سریع مایکوتوکسین تولید شده توسط عامل بیماری لکه‌موجی گلابی با LOD برابر $1/30 \mu\text{g/L}$ استفاده شد. مقایسه این روش با روش مرسوم کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) حاکی از دقت، حساسیت و

"آزادشهرکی و همکاران، فناوری‌های پیشرفته تشخیص بیماری‌های گیاهی"

معمول با اعمال یک پیام جریان متناوب (AC) بر روی یک سیستم الکتروشیمیایی و سپس اندازه‌گیری پاسخ جریان انجام می‌شود (شکل ۵). برای استفاده از این روش، به یک سلول خوردگی با ابعاد هندسی مشخص که شامل یک الکتروود مرجع بوده و همچنین تجهیزاتی که توانایی اندازه‌گیری و ضبط پاسخ الکتریکی سلول الکتروشیمیایی در دامنه وسیعی از فرکانس‌های AC اعمالی را داشته باشد، نیاز است (Magar et al. 2021).

طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) روش دیگر غیرتخریبی مورد استفاده در علوم گیاهی برای تشخیص ویروس یا عوامل بیماری‌زای دیگر، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) است. یکی از کارآمدترین روش‌ها در مطالعه خوردگی مواد است و برای پایش و اندازه‌گیری سرعت خوردگی و مکانیزم واکنش‌ها استفاده می‌شود. EIS به طور



شکل ۵- طرح‌واره چیدمان طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (Magar et al. 2021).

زیستی هیبیریداسیون دی.ان.ا. مبتنی بر الکترودهای کربنی صفحه‌ای (screen printed carbon electrodes) اصلاح‌شده با نانوذرات طلا در تشخیص ویروس تریستزای مرکبات اشاره کرد (Khater et al. 2019). این فناوری همچنین برای تشخیص ویروس آبله آلو (plum pox) با LOD

علاوه بر سادگی و حساسیت بالای EIS، این روش به دلیل توانایی دریافت پاسخ سریع و داده برداری با ابزار قابل حمل و بدون تخریب نمونه برای ردیابی بیمارگر در مزرعه مناسب است (Khater et al. 2019). در رابطه با استفاده از EIS در تشخیص عوامل بیماری‌زا می‌توان به حسگر

فروسرخ نزدیک توسط بافت گیاهی دارند و فرآیند جذب این پرتوها معمولاً توسط پیوندهای C-H، O-H و N-H در ترکیبات عمده گیاه انجام می‌شود (Cen and He, 2007; Nicolai et al. 2014).

انرژی فوتون‌های فروسرخ (۱۵-۱ Kcal/mol) به اندازه‌ای نیست که بتواند موجب برانگیختگی الکترون‌ها شود ولی ممکن است سبب ارتعاش اتم‌ها و گروه‌های دارای پیوند کووالانسی شود. هنگام تابش پرتو فروسرخ به یک مولکول، مولکول به تراز بالاتری از انرژی برانگیخته می‌شود و فقط فرکانس‌های مشخصی از تابش که با فرکانس ارتعاش مولکول هماهنگ هستند جذب مولکول می‌شوند و نوعی طیف جذبی به دست می‌آید که منعکس‌کننده ساختار مولکولی آنهاست. پس طیف‌های فروسرخ از طریق مقایسه با طیف‌های مربوط به نمونه‌های شناخته‌شده برای شناسایی ترکیبات، مانند انگشت‌نگاری کاربرد دارند (Javanbakht et al. 2008). در NIRS به‌طور معمول از فیبرهای نوری مخصوص برای انتقال اطلاعات درونی ماده آلی استفاده می‌شود. استفاده از طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک در تشخیص ویژگی‌های یک گیاه به‌طور معمول با تکنیک‌های شیمی‌سنجی (روش‌های پیشرفته

معادل $10 \text{ pg/mL}^{-1} - 200 \text{ pg/mL}^{-1}$ نیز استفاده شده است (Jarocka et al. 2011). از روش EIS علاوه بر تشخیص برخی بیماری‌های ویروسی در تشخیص بیماری‌های باکتریایی نیز استفاده شده است که می‌توان به تشخیص *Xylella fastidiosa* در باغ‌های زیتون اشاره کرد (Chiriacò et al. 2018).

طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (near infrared spectroscopy, NIRS)

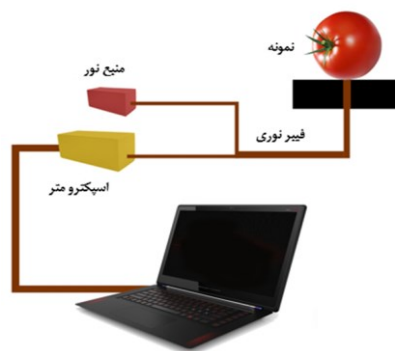
از دیگر فناوری‌های غیرتخریبی و محبوب مورد استفاده در تشخیص ویژگی‌های درونی گیاهی می‌توان به طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIRS) اشاره کرد. تابش فروسرخ نزدیک بخشی از تابش فروسرخ و در محدوده ۷۸۰-۲۵۰۰ nm است. در طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک، محصول توسط تابش فروسرخ نزدیک پرتو دهی شده و بسته به ماده شیمیایی نمونه و خواص فیزیکی آن، پرتو منعکس، جذب یا منتقل شده و پرتو عبوری یا انعکاسی اندازه‌گیری می‌شود. این تغییرات به ترکیب شیمیایی محصول و ساختار میکروسکوپی آن وابسته است (Nicolai et al. 2007).

هسته، میتوکندری، وزیکول‌ها، غشاها و دیواره‌های سلولی نقش اساسی در پخش امواج

"آزادشهرکی و همکاران، فناوری‌های پیشرفته تشخیص بیماری‌های گیاهی"

پژوهش که از طیف‌سنجی مرئی/فروسرخ نزدیک (visible/near-infrared spectroscopy) همراه با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای تدوین مدل و تشخیص الگو استفاده شد، نتایج حاکی از دقت بسیار بالای این روش (۹۳-۱۰۰ درصد) در تشخیص بیماری لکه‌موجی و نوع عامل با دقت ۹۳٪-۱۰۰٪ بود. نتایج همچنین نشان داد در تشخیص این بیماری توسط طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک، گیاهان آلوده به گونه *Alternari solani* بدون هیچ خطایی شناسایی شدند (Azadshahraki et al. 2022).

آماری در طیف‌سنجی که توسط آن داده‌های مزاحم حذف و داده‌های اصلی حفظ می‌شوند)، همراه است و استفاده توام طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک و شیمی‌سنجی منجر به ایجاد ابزاری موثر در تعیین ویژگی‌های متنوعی در بسیاری از زمینه‌ها شده است (Teye et al. 2013; Azadshahraki et al. 2018). در شکل ۶ طرح‌واره‌ای از چیدمان NIRS آورده شده است (Sharifi and Azadshahraki, 2021). در رابطه با استفاده از NIRS در تشخیص بیماری‌های گیاهی می‌توان به تشخیص بیماری لکه‌موجی گوجه فرنگی توسط نگارندگان اشاره کرد. در این



شکل ۶- اجزاء و چیدمان آنها در طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (Sharifi and Azadshahraki, 2021).

دوربین دیجیتال است که به یک کامپیوتر و نرم‌افزار پردازش تصویر (image processing) متصل است. یک تصویر دیجیتال شامل سه حالت رنگی متعلق به باندهای قرمز، سبز و آبی (RGB)

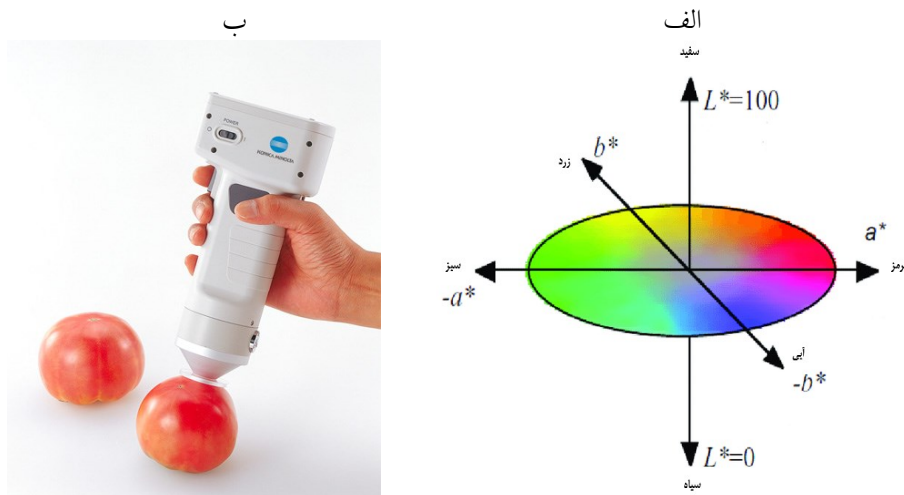
ماشین بینایی (machine vision)

یکی از روش‌های رایج و معمول مورد استفاده در ارزیابی محصولات کشاورزی روش ماشین بینایی است. سیستم ماشین بینایی شامل یک

۰ (سیاه) تا ۱۰۰ (سفید)، a^* محور بیان‌کننده رنگ از سبز تا قرمز و b^* بیانگر رنگ از آبی تا زرد است. محورهای a^* و b^* محدودیت ویژه عددی ندارند (Azadshahraki and Kafashan, 2018).

در شکل ۷ فضا رنگ سه‌بعدی CIELAB و محورهای آن به همراه تصویر یک رنگ‌سنج آورده شده است (Azadshahraki and Kafashan, 2018). در رابطه با استفاده از ماشین بینایی در تشخیص بیماری‌های گیاهی به همراه روش‌های مختلف مدل‌سازی می‌توان به تشخیص بلاست برنج با دقت تشخیص ۹۸٪-۹۴٪ (Askari Asli et al. 2020) و بیماری آتشک در لیلیوم با دقت ۹۷٪-۸۵٪ (Biab et al. 2019) اشاره کرد.

است. برای تشخیص یک شیء (میوه، برگ، ساقه، کبودی و لکه) پیکسل‌های آن در تصویر باید بر اساس یک ویژگی مشخص دسته‌بندی شوند که ساده‌ترین راه استفاده از باندهای قرمز، سبز یا آبی است. به‌طور معمول در ماشین بینایی فضای رنگی RGB به فضای رنگی L^* ، a^* و b^* (فضارنگ CIELAB) منتقل می‌شود یا مؤلفه‌های رنگ (L^* ، a^* و b^*) توسط ابزار مخصوص رنگ‌سنجی (colorimeter) اندازه‌گیری می‌شوند. فضارنگ CIELAB را می‌توان به صورت یک فضای سه‌بعدی در نظر گرفت که موقعیت هر رنگ در این فضا، با مختصات رنگی آن یعنی L^* ، a^* و b^* مشخص می‌شود. در این سیستم، L^* محور مشخص‌کننده روشنایی، از سیاه تا سفید، بین



شکل ۷ - فضا رنگ سه‌بعدی CIELAB و محورهای L^* ، a^* و b^* (الف) و رنگ‌سنج (ب) (Azadshahraki and Kafashan, 2018).

تصویربرداری ابرطیفی و چندطیفی

(multispectral and hyperspectral imaging)

تصویربرداری ابرطیفی و چندطیفی یکی دیگر از فناوری‌های ارزیابی ویژگی‌های درونی و تشخیص بیماری در گیاهان است. در این فناوری‌ها از ترکیب اطلاعات طیف‌سنجی نقطه‌ای (point spectroscopy) و ماشین‌بینایی بهره‌برده می‌شود. در تصویربرداری چندطیفی تصاویر در چند طول موج به دست می‌آید در حالی‌که، در تکنیک ابرطیفی تصویربرداری با تعداد طول موج‌های زیاد انجام می‌پذیرد. رایج‌ترین تکنیک در میان این تکنیک‌ها، تکنیک تصویربرداری انعکاسی ابرطیفی است (hyperspectral reflectance imaging) و در دامنه طیفی VIS/NIR (۴۰۰-۱۰۰۰ نانومتر) یا فروسرخ موج کوتاه (۲۵۰۰-۱۰۰۰ نانومتر) در تشخیص نابسامانی‌های فیزیولوژیکی، انواع بیماری، آلودگی و خواص کیفی میوه و سبزیجات کاربرد دارد (Wu and Sun, 2013).

در رابطه با استفاده از این فناوری می‌توان به تشخیص لکه‌موجی در بادمجان با دقت ۸۸/۵٪ (Xie and He, 2016)، گوجه‌فرنگی با دقت ۱۰۰٪-۹۷٪ و سیب‌زمینی با دقت ۹۵٪-۸۹٪ اشاره کرد.

سیستم‌های بویایی الکترونیکی یا بینی‌های

الکترونیکی (electronic olfaction system or

electronic nose

از آنالیز ترکیبات آلی فرار (volatile organic compounds) می‌توان به عنوان روشی غیرمستقیم برای تشخیص عوامل بیماری‌زای گیاهی استفاده کرد. ترکیبات آلی فرار گیاهی به عنوان بیومولکول‌ها و متابولیت‌هایی با فشار بخار بالا، نقطه جوش پایین و وزن مولکولی کم هستند. گیاهان ترکیبات آلی فرار مختلفی منتشر می‌کنند که در انجام انواع فعالیت‌های گیاه از جمله رشد و نمو، مکانیزم‌های دفاعی و حیاتی شرکت می‌کنند. آلودگی‌ها و عفونت‌های ناشی از عوامل بیماری‌زا می‌تواند منجر به انتشار ترکیبات آلی فرار خاصی شود که نشان‌دهنده آسیب به سلامت فیزیولوژیکی گیاه بوده و می‌تواند برای پایش غیرتخریبی بیماری در گیاه به کار برده شود. بنابراین شناسایی مشخصات ترکیبات آلی فرار گیاه می‌تواند به عنوان فناوری سریع و غیرتخریبی برای تشخیص عوامل بیماری‌زای گیاهی، بدون نیاز به معرف‌های شیمیایی و با دقت بالا به کار رود (De Lacy Costello et al. 2001; Cellini et al. 2016; Spadafora. 2016). به طور معمول، ترکیبات آلی فرار در گیاهان توسط روش‌های

الکترونیکی حداقل دارای چهار بخش شامل شبکه حسگرهای گاز (gas sensor)، بخش تحویل گاز یا ماده فرار (volatile delivery system)، بخش کنترل و استخراج داده (control system and data acquisition) و بخش پردازش (processing system) است (Wilson. 2013; Azadshahraki. 2016).

ویژگی فیزیکی یا شیمیایی حسگرهای نصب شده در شبکه حسگرهای گاز، در حضور ماده موردنظر تغییر کرده و به پیام الکتریکی تبدیل می شود. در بینی الکتریکی، انواع حسگرها می تواند به کار رود که حسگر گازی نیمه رسانای اکسید فلزی (metal oxide semiconductor)، حسگر کریستال کوارتز میکروبالانس (quartz crystal microbalance)، حسگر موج صوتی سطحی (surface acoustic wave)، مبدل اثر میدانی نیمه رسانای اکسید فلز (metal-oxide-semiconductor field effect transistor)، پلیمرهای رسانا (conductive polymers) و فیبرهای نوری (optical fibers) از این جمله اند. یکی از رایج ترین حسگرها در این سامانه، حسگرهای MOX هستند که از مواد نیمه رسانا مانند اکسید قلع (SnO_2)، اکسید روی (ZnO) و اکسید تیتانیوم (TiO_2) ساخته شده اند. اصول کلی این حسگرها براساس تغییر قابلیت

مبتنی بر کروماتوگرافی گازی-اسپکترومتری جرمی (GC-MS) سنجیده می شوند که استفاده از این روش ها به طور معمول پیچیده، وقت گیر و پرهزینه بوده و نیازمند تجهیزات و آموزش های تخصصی برای استفاده صحیح هستند. در میان روش های سریع و مناسب ارزیابی عوامل بیماری زای در گیاهان توسط ترکیبات آلی فرار، می توان به بینی های الکترونیکی یا سیستم های بویایی الکترونیکی (E-Nose; EOS) اشاره کرد. استفاده از بینی الکترونیکی در مقایسه با GC-MS علاوه بر غیرتخریبی بودن، سریع تر و ارزان تر است. این سیستم غالباً شامل آرایه ای از حسگرهای شیمیایی-الکترونیکی و یک سیستم محاسباتی است. گازها یا مواد فرار پس از برخورد با حسگرهای گازی منجر به ایجاد یک پاسخ فیزیکی یا شیمیایی در حسگر می شوند که برای پردازش و دریافت اطلاعات به یک پیام الکتریکی تبدیل می شوند. برای این که حسگرها بتوانند گازهای مختلف را از هم تشخیص دهند به یک شبکه از حسگرها نیاز است. این روش باید این قابلیت را داشته باشد تا مانند بینی انسان به مقدار کم گاز، حساس بوده و به تغییرات دما، رطوبت و سایر شرایط محیطی وابسته نباشد (Ewen. 2004; Wilson and Baietto, 2009). یک سیستم بینی

"آزادشهرکی و همکاران، فناوری‌های پیشرفته تشخیص بیماری‌های گیاهی"

روشنایی مواد به‌کار رفته در آن است (Rodrigues et al. 2010).

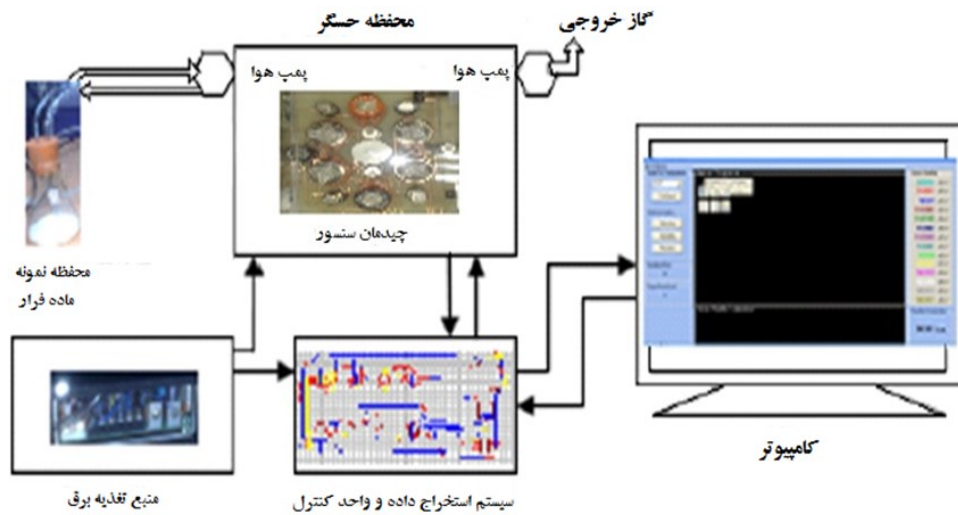
بخش تحویل گاز یا ماده فرار وظیفه انتقال ماده فرار به حسگر را داشته و ممکن است نوعی سازوکار تمیزکنندگی برای محفظه حسگرها نیز در آن در نظر گرفته شده باشد تا در هر بار اندازه‌گیری، شرایط محیطی حسگرها به حالت اولیه برگردد و از تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها اطمینان حاصل شود. بخش کنترل شامل سوپاپ‌ها و پمپ‌های هوا و بخش استخراج داده شامل کارت حافظه و میکروکنترلر است. بخش پردازش در بیشتر موارد شامل یک کامپیوتر مجهز به نرم‌افزارهای ویژه است که داده‌های به‌دست آمده از حسگرها را پردازش می‌کند. در این مرحله ممکن است از روش‌های ویژه پیش‌پردازش استفاده کرد که این روش‌ها با حذف اطلاعات غیرمفید و ناخواسته و استفاده از روش‌های ریاضی به‌ویژه، حجم اطلاعات را کاهش داده و منجر به استخراج اطلاعات مفید یا مؤثر می‌شوند. از جمله روش‌های ریاضی برای استفاده از داده‌ها و تشخیص الگو می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌تنهایی یا همراه با تجزیه شاخص‌های اصلی (PCA-ANN)، اشاره کرد. تجزیه شاخص‌های اصلی (principal component

analysis: PCA) روشی برای کاهش حجم داده‌ها است. از معایب این روش، می‌توان به دشواری استفاده از آن در مزرعه به‌دلیل تداخل هوای اتمسفر در گازهای مورد اندازه‌گیری و کاهش دقت اندازه‌گیری اشاره داشت (Laothawornkitkul. 2008; Nicolai et al. 2014). در شکل ۸ اجزاء و طرح‌واره یک سیستم بویایی الکترونیکی آورده شده است (Mamat et al. 2011).

در زمینه استفاده از بینی الکترونیکی در تشخیص بیماری‌های گیاهی می‌توان به تشخیص گیاهان استبرق (علف شیر) آلوده به شته اشاره کرد. در این پژوهش ظرفیت تمایز بین گیاهان سالم و آلوده طی ۴۸ تا ۷۲ ساعت پس از حمله ۹۰٪-۱۰۰٪ بود که نسبت به سایر روش‌های تشخیص تغییرات VOC (volatile organic compounds) در تشخیص این عامل، سه‌الی چهار روز سریعتر بود (Sharma et al. 2019).

در پژوهشی دیگر از یک آرایه بیوحسگرها برای تشخیص VOCهای آزاد شده در درختان آلوده به بیماری میوه سبز مرکبات، قبل از بروز علائم ظاهری استفاده شد. دقت استفاده از این فناوری با استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی ریاضی مناسب گزارش شد ولی همچنان استفاده از این

فناوری در باغ به صورت بلادرنگ دارای مشکلاتی بود (Chalupowicz et al. 2020).



شکل ۸- اجزاء یک سیستم بویایی الکترونیکی (Mamat et al. 2011).

نتیجه گیری

بیماری‌ها هستند. در اغلب این فناوری‌ها به روش‌های پیشرفته ریاضی برای تدوین مدل‌های تشخیص و پردازش داده‌ها نیاز است. استفاده از این فناوری‌ها هنوز با چالش‌هایی روبرو بوده و برای استفاده از آنها در مزرعه یا باغ به اصلاحات زیادی در این فناوری‌ها نیاز است.

امروزه ورود فناوری نانو، علم فیزیک و هوش مصنوعی به کشاورزی منجر به توسعه روش‌های جدید و خلاقانه‌ای در تشخیص بیماری‌های گیاهی شده است که برخی از آنها قادر به تشخیص زودهنگام و پیش از بروز علائم ظاهری

References

فهرست منابع

- Akgonullu S, Ozgur E, Denizli A. 2022.** Recent advances in quartz crystal microbalance biosensors based on the molecular imprinting technique for disease-related biomarkers. *Chemosensors*. 10(3): 106.
- Alvarez AM. 2004.** Integrated approaches for detection of plant pathogenic bacteria and diagnosis of bacterial diseases. *Annu. Rev. Phytopathol.* 42: 339-366.
- Andersson H, Tago D, Treich N. 2014.** Pesticides and health: A review of evidence on health effects, valuation of risks, and benefit- cost analysis. *Preference Measurement in Health*.
- Askari Asli -Ardeh E, Larijani MR, Loni R. 2020.** Diagnosis of rice blast disease in different environmental conditions using image processing technique. *Journal of food Science and Technology*. 100 (17): 17-28. (In Farsi with English abstract).
- Azadshahraki F. 2016.** Quality assessment of some Iranian grape cultivars using non-destructive near-infrared (NIR) spectroscopy. Thesis for the degree of doctor of philosophy in horticultural science, postharvest physiology and technology. Tehran University. Iran. (In Farsi with English abstract).
- Azadshahraki F, Jamshidi B, Sharabiani VR. 2018.** Non-destructive determination of vitamin C and lycopene contents of intact cv. Newton tomatoes using NIR spectroscopy. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*. 28 (4): 389-397.
- Azadshahraki F, Kafashan J. 2018.** Qualitative characteristics of horticultural products and their measurement methods. *Agricultural Research, Education and Extension Organization Press*. (In Farsi with English abstract).
- Azadshahraki F, Sharifi K, Jamshidi B, Karimzadeh R, Naderi H. 2022.** Diagnosis of early blight disease in tomato plant based on visible/near-infrared spectroscopy and principal components analysis-artificial neural network prior to visual disease symptoms. *Journal of Agricultural Machinery*. 12(1): 81-94.
- Biabi H, Mehdizadeh SA, Salmi MS. 2019.** Development of an intelligent system for diagnosis of the Botrytis Elliptica disease in the Lilium plant using image processing. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*. 50(3): 535-546. (In Farsi with English abstract).
- Cardoso RM, Pereira TS, Facure MH, dos Santos DM, Mercante LA, Mattoso LH, Correa, DS. 2021.** Current progress in plant pathogen detection enabled by nanomaterials-based (bio) sensors. *Sensors and Actuators Reports*. 100068.
- Cen H, He Y. 2007.** Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science & Technology* 18 (2): 72-83.
- Cellini A, Biondi E, Blasioli S, Rocchi L, Farneti B, Braschi I, Spinelli F. 2016.** Early detection of bacterial diseases in apple plants by analysis of volatile organic compounds profiles and use of electronic nose. *Annals of Applied Biology*. 168(3): 409-420.
- Chalupowicz D, Veltman B, Droby S, Eltzov E. 2020.** Evaluating the use of biosensors for monitoring of *Penicillium digitatum* infection in citrus fruit. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 311: 127896.
- Chiriaco MS, Luvisi A, Primiceri E, Sabella E, De Bellis L, Maruccio G. 2018.** Development of a lab-on-a-chip method for rapid assay of *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* strain CoDiRO. *Scientific Reports*. 8(1): 1-8.
- Chen H, Ming T, Zhao L, Wang F, Sun LD, Wang J, Yan CH. 2010.** Plasmon-molecule interactions. *Nano Today*. 5(5): 494-505.
- Cooper MA. 2003.** Label-free screening of bio-molecular interactions. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 377(5): 834-842.
- Dincer C, Bruch R, Kling A, Dittrich PS, Urban GA. 2017.** Multiplexed point-of-care testing-xPOCT. *Trends in Biotechnology*. 35(8): 728-742.
- De Lacy Costello BPJ, Evans P, Ewen RJ, Gunson HE, Jones PR, Ratcliffe NM, Spencer- Phillips PT. 2001.** Gas chromatography-mass spectrometry analyses of volatile organic compounds from potato tubers inoculated with *Phytophthora infestans* or *Fusarium coeruleum*. *Plant Pathology*. 50(4): 489-496.
- Ewen RJ, Jones PR, Ratcliffe NM, Spencer-Phillips PT. 2004.** Identification by gas chromatography-mass spectrometry of the volatile organic compounds emitted from the wood-rotting fungi *Serpula*

lacrymans and *Coniophora puteana*, and from *Pinus sylvestris* timber. *Mycological Research*. 108(7): 806-814.

Fang Y, Ramasamy RP. 2015. Current and prospective methods for plant disease detection. *Biosensors*. 5(3): 537-561.

Ghanei Ghooshkhaneh N, Golzarian MR, Mamarabadi M. 2018. Detection and classification of citrus green mold caused by *Penicillium digitatum* using multispectral imaging. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 98 (9): 3542-3550.

Grover S. 2013. Exploring motivations and perceptions of small-scale Farmers: considerations for sustainable agriculture in east central Indiana. Ph.D. Dissertation. Ball State University. Muncie.

Hempen C, Karst U. 2006. Labeling strategies for bioassays. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 384(3): 572-583.

Hoseinian M, Hoseinian M, Khoshnevis S, Kashanian F. 2016. Ultra-sensitive surface plasmon resonance fiber optic sensors based on gold nanoparticles. *Iranian Journal of Physics Research*. 15(4): 441-446. (In Farsi with English abstract).

Hou W, Cronin SB. 2013. A review of surface plasmon resonance- enhanced photocatalysis. *Advanced Functional Materials*. 23(13): 1612-1619.

Hunt RWG. 2001. Modern concepts of color and appearance-Asim Kumar Roy Choudhury. Science Publishers Inc. Enfield. New Hampshire. USA. 326 pages.

Jarocka U, Wąsowicz M, Radecka H, Malinowski T, Michalczyk L, Radecki J. 2011. Impedimetric immunosensor for detection of plum pox virus in plant extracts. *Electroanalysis*. 23(9): 2197-2204.

Javanbakht M, Ganjali M, Noroozi P. 2008. Infrared spectroscopy fundamentals and application. Tehran University Press. 204pp. (In Farsi with English abstract).

Khater M, De La Escosura-Muñiz A, Quesada-González D, Merkoçi A. 2019. Electrochemical detection of plant virus using gold nanoparticle-modified electrodes. *Analytica Chimica Acta*. 1046: 123-131.

Laothawornkitkul J, Moore JP, Taylor JE, Possell M, Gibson TD, Hewitt CN, Paul ND. 2008. Discrimination of plant volatile signatures by an electronic nose: a potential technology for plant pest and disease monitoring. *Environmental Science and Technology*. 42(22): 8433-8439.

López MM, Bertolini E, Olmos A, Caruso P, Gorris MT, Llop P, Cambra M. 2003. Innovative tools for detection of plant pathogenic viruses and bacteria. *International Microbiology*. 6(4), 233-243.

López MM, Bertolini E, Caruso P, Penyalver R, Marco-Noales E, Gorris MT, Llop P. 2005. Advantages of an integrated approach for diagnosis of quarantine pathogenic bacteria in plant material. *Phytopathol. Pol.* 35: 49-56.

Luna-Moreno D, Sánchez-Álvarez A, Islas-Flores I, Canto-Canche B, Carrillo-Pech M, Villarreal-Chiu JF, Rodríguez-Delgado M. 2019. Early detection of the fungal banana black Sigatoka pathogen *Pseudocercospora fijiensis* by an SPR immunosensor method. *Sensors*. 19(3): 465.

Magar HS, Hassan RY, Mulchandani A. 2021. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications. *Sensors*. 21(19): 6578.

Mamat M, Samad SA, Hannan, MA 2011. An electronic nose for reliable measurement and correct classification of beverages. *Sensors*. 11(6): 6435-6453.

Mojarradi GhR, Golbaz Sh, Atai H. 2015. Analysis of deterrent and facilitating factors on organic farming adoption as perceived by Zanjan Jihad Agricultural Experts viewpoint. *Iran Agricultural Extension and Education Journal*. 2(10): 1-16. (In Farsi with English abstract).

Nehra M, Dilbaghi N, Marrazza G, Kaushik A, Sonne C, Kim KH, Kumar S. 2021. Emerging nanobiotechnology in agriculture for the management of pesticide residues. *Journal of Hazardous Materials*. 401: 123369.

Nicolai BM, Beullens K, Bobelyn E, Peirs A, Saeys W, Theron KI, Lammertyn J. 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*. 46 (2): 99-118.

Nicolai, BM, Defraeye T, De Ketelaere B, Herremans E, Hertog ML, Saeys W, Torricelli A. 2014. Nondestructive Measurement of Fruit and Vegetable Quality. *Food Science Technology*. 5: 285- 312.

- Pan TT, Sun DW, Pu H, Wei Q. 2018.** Simple approach for the rapid detection of alternariol in pear fruit by surface-enhanced Raman scattering with pyridine-modified silver nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 66(9): 2180-2187.
- Philippe V, Neveen A, Marwa A, Basel AYA. 2021.** Occurrence of pesticide residues in fruits and vegetables for the Eastern Mediterranean Region and potential impact on public health. *Food Control*. 119: 107457.
- Ramachandran N, Larson DN, Stark PR, Hainsworth E, LaBaer J. 2005.** Emerging tools for real-time label-free detection of interactions on functional protein microarrays. *The FEBS Journal*. 272(21): 5412-5425.
- Rezaei R, Safa L, Ganjkanloo MM. 2020.** Understanding farmers' ecological conservation behavior regarding the use of integrated pest management—an application of the technology acceptance model. *Global Ecology and Conservation*. 22: e00941.
- Rodriguez J, Duran C, Reyes A. 2010.** Electronic nose for quality control of Colombian coffee through the detection of defects in "cup tests". *Sensors*. 10: 36-46.
- Russell-Green S, Cotton J, Brumby S. 2020.** Research engagement changes attitudes and behaviours towards agrichemical safety in Australian farmers. *Safety*. 6(1): 16.
- Sharifi K, Azadshahraki F. 2021.** Non-destructively detection of early blight of greenhouse tomato by near-infrared spectroscopy. *Research final Report. Agricultural Research, Education & Extension Organization. Iran*. 60308 10-13. (In Farsi with English abstract).
- Sharma R, Zhou M, Hunter MD, Fan X. 2019.** Rapid in situ analysis of plant emission for disease diagnosis using a portable gas chromatography device. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 67(26): 7530-7537.
- Spadafora ND, Paramithiotis S, Drosinos EH, Cammarisano L, Rogers HJ, Müller CT. 2016.** Detection of *Listeria monocytogenes* in cut melon fruit using analysis of volatile organic compounds. *Food Microbiology*. 54: 52-59.
- Stambaugh C, Shakeel H, Kalteyer D, Abbott P, Pomeroy J. 2018.** Traceability of frequency based mass measurements using a quartz crystal microbalance. *Journal of Physics*. 1065: 4.
- Teye E, Huang XY, Afoakwa N. 2013.** Review on the potential use of near infrared spectroscopy (NIRS) for the measurement of chemical residues in food. *American Journal of Food Science and Technology*. 1: 1-8.
- Umaphathi R, Park B, Sonwal S, Rani GM, Cho Y, Huh YS. 2022.** Advances in optical-sensing strategies for the on-site detection of pesticides in agricultural foods. *Trends in Food Science and Technology*. 119: 69-89.
- Waggoner PS, Craighead HG. 2007.** Micro-and nanomechanical sensors for environmental, chemical, and biological detection. *Lab on a Chip*. 7(10): 1238-1255.
- Wang K, Wang Y, Li, Q, Liu, Z, Liu, S. 2022.** A fluorescence and localized surface plasmon resonance dual-readout sensing strategy for detection of acetamiprid and organophosphorus pesticides. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 351: 130977.
- Weng S, Hu X, Wang J, Tang L, Li P, Zheng S, Zheng L, Huang L, Xin Z. 2021.** Advanced application of Raman spectroscopy and surface-enhanced Raman spectroscopy in plant disease diagnostics: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 69(10): 2950-2964.
- Wilson AD, Baietto M. 2009.** Applications and advances in electronic-nose technologies. *Sensors*. 9(7): 5099-5148.
- Wilson AD. 2013.** Diverse applications of electronic-nose technologies in agriculture and forestry. *Sensors*. 13(2): 2295-2348.
- Wu D, Sun DW. 2013.** Color measurements by computer vision for food quality control—a review. *Trends in Food Science and Technology*. 29:5–20.
- Xie C, Shao Y, Li X, He Y. 2015.** Detection of early blight and late blight diseases on tomato leaves using hyperspectral imaging. *Scientific Reports*. 5: 16564.
- Xie C, He Y. 2016.** Spectrum and image texture features analysis for early blight disease detection on eggplant leaves. *Sensors*. 16 (5): 676.
- Zarei M. 2017.** Advances in point-of-care technologies for molecular diagnostics. *Biosensors and Bioelectronics*. 98: 494-506.

Zheng J, He L. 2014. Surface- enhanced Raman spectroscopy for the chemical analysis of food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 13(3): 317-328.

Advanced Technologies of Plant Disease Diagnosis

Farzad Azadshahraki^{*1}, Mahboobeh Shahrokhi², Kasra Sharifi³, Gita Hosseini⁴

1- Assistant professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREO), Karaj, Iran.

2- MSc. Biology Teacher, Farzanegan Development of Exceptional Talents High School, Alborz, Iran.

3- Assistant professor, Iranian Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

4- MSc. Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

farzad_shahrekian@yahoo.com

Abstract

Failure to early diagnosis of plant diseases increases the use of chemical pesticides and reduces the quantity and quality of agricultural products. Rapid, accurate, low cost and early diagnosis of plant diseases, especially those that spread without early symptoms, is effective in reducing the use of chemical pesticides and improving the quantity and quality of agricultural products. In this paper advanced method of plant disease diagnosis based on nanotechnology, nondestructive techniques of spectroscopy and electronic olfaction system is described. Some of these technologies make it possible to diagnose many diseases before the onset of symptoms, which by controlling and preventing the development of the disease, in addition to reducing the cost of disease control, sustainable agricultural, environmental protection and consumer health will also follow.

Keywords: Plant Disease, Spectroscopy, Nondestructive Method, Electronic Olfaction System, Nanotechnology.