

## تشخیص آلودگی قارچی در غده سیب‌زمینی با استفاده از تصویربرداری حرارتی

سعید فرخزاد<sup>۱</sup>، اسعد مدرس مطلق<sup>۲\*</sup>، پرویز احمدی مقدم<sup>۳</sup>، سعید جلالی هنرمند<sup>۴</sup>، کامران خیرعلی پور<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۴. استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی کرمانشاه

۵. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۲/۱۰)

### چکیده

پوسیدگی خشک سیب‌زمینی یکی از خسارت‌زاترین بیماری‌های غده‌های سیب‌زمینی است که عامل اصلی آن قارچ فوزاریوم سلوانی است. برای جلوگیری از توسعه بیماری پوسیدگی خشک سیب‌زمینی و کاهش تلفات آن، باید قارچ عامل شناسایی و از بین برده شود. روش‌های معمول در تشخیص آلودگی قارچی زمان‌بر، پرهزینه و مشکل هستند. در این تحقیق یک روش سریع و قابل اطمینان مبنی بر فناوری گرمانگاری فعال برای تشخیص غده‌های سالم و آلوده و هم‌چنین برای طبقه‌بندی مرحله آلودگی (آلوده یک روزه تا نه روزه) ارائه شده است. در گرمانگاری فعال دو سطح دمای گرم‌کن و چهار سطح زمان خنک شدن نمونه لحاظ شد. نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین اختلاف دمای سطح غده‌های سالم و آلوده نشان داد که دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد گرم‌کن و خنک شدن ۴۰ ثانیه نمونه‌ها بهترین تیمار برای داشتن بیشترین اختلاف بین غده‌های سالم و آلوده است. برای ارزیابی طبقه‌بند شاخص‌های آماری نظیر دقت، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن محاسبه شد. دقت کلی طبقه‌بند ۹۶/۶۷٪ بود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که روش ارائه شده در این تحقیق یکی از روش‌های توانمند بینایی ماشین در تشخیص کیفیت و سلامت مواد غذایی و محصولات کشاورزی است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی قارچی، فوزاریوم سلوانی، گرمانگاری، ماشین بردار پشتیبان

### مقدمه

جمعیت در حال رشد جهان نیاز به تامین مواد غذایی بیشتر و به تبع آن نیاز به تحقیقات بیشتر در حوزه کشاورزی را آشکار نموده است. طبق گزارش سازمان خواربار جهانی تا سال ۲۰۳۰ باید تولید مواد غذایی ۷۰٪ نسبت به شرایط کنونی افزایش یابد تا بتواند جوابگوی نیازهای این جمعیت در حال رشد باشد. نوسان قیمت در بازارهای بین‌المللی غلات و سایر محصولات کشاورزی باعث کمبود مواد غذایی و ناآرامی‌های اجتماعی می‌گردد. یکی از رویکردهایی که به کاهش این خطر کمک می‌کند، تغییر تولید مواد غذایی به سمت تولید محصولات اساسی مغذی مانند سیب‌زمینی است که حساسیت کمتری نسبت به تغییر بازارهای بین‌المللی را دارند (Sezavar, 2011). سطح زیرکشت سیب‌زمینی و میزان تولید آن در ایران در سال ۲۰۱۴ به ترتیب ۱۵۸/۹۵۸ هزار هکتار و ۴/۷۱۷ میلیون تن در سال می‌باشد که این میزان تولید سیب‌زمینی ایران را از لحاظ

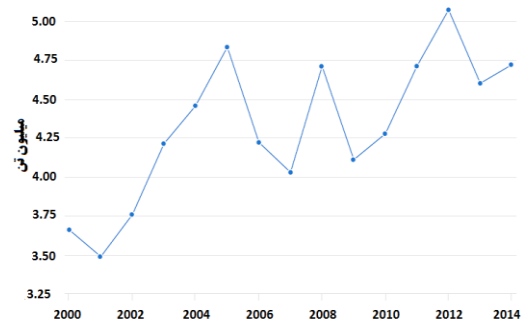
تولید سیب‌زمینی دررتبه چهاردهم قرار داده است (FAO, 2014).

محدودیت‌ها و هزینه‌های بالای تهیه و نگهداری غده‌های بذری و همچنین پوسیدگی آنها در سردخانه یا انبار، توسعه بیماری‌های سیب‌زمینی در طول دوره انبارداری و نبودن انبارهای استریل و مناسب از جمله مشکلات عمده تولیدکنندگان سیب‌زمینی محسوب می‌گردد (Bojanowska *et al.*, 2013). بسیاری از کشاورزان غده‌های بذری سیب‌زمینی مورد نیاز کشت پاییزه را در سردخانه یا انبار به مدت ۲ الی ۴ ماه نگهداری می‌کنند که هر ساله بخش عمده‌ای از این غده‌ها دچار پوسیدگی شده و از بین می‌روند (Azadvar *et al.*, 2006). بررسی تغییرات تولید سیب‌زمینی ایران (شکل ۱) در چند سال گذشته نشان می‌دهد که در سال‌هایی که تولید افزایش پیدا کرده است به دلیل نبودن انبارهای مناسب و توسعه بیماری‌های دوره انبارداری بخش عمده محصول از بین رفته که این امر سبب بی‌رغبتی کشاورز برای کشت سیب‌زمینی و کاهش تولید در سال‌های آتی شده است.

\* نویسنده مسئول: amodmot@gmail.com

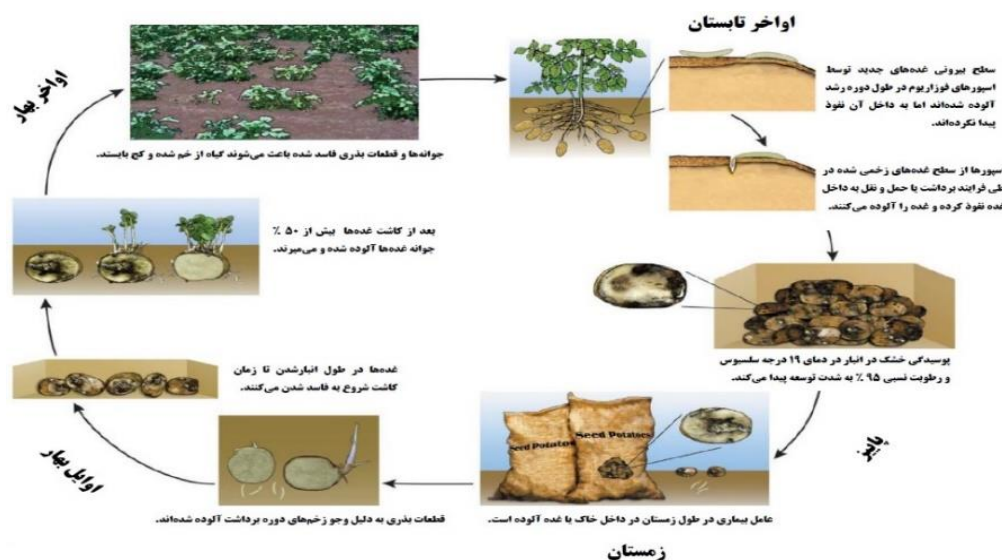
سیب‌زمینی راه اصلی انتقال بیماری به غده است. در اثر بیماری بافت سیب‌زمینی خشک و در نهایت چروکیده می‌شود. استفاده از قارچ‌کش‌ها، ضدعفونی کردن و تامین شرایط مناسب تهویه، دما و رطوبت در انبار مناسب‌ترین روش‌های مبارزه با این بیماری هستند (Schisler *et al.*, 2016). علاوه بر خسارت ناشی از این بیماری در انبارهای سیب‌زمینی، به علت تولید سم توسط این قارچ‌ها، خطری جدی برای سلامت انسان و دام به شمار می‌رود (Sharifi *et al.*, 2009; Azadvar *et al.*, 2006).

برای پیشگیری از این بیماری باید قارچ‌های عامل را شناسایی و قبل از پخش اسپورهای قارچ در انبار یا خاک آن‌ها را از بین برد. بهترین زمان برای تشخیص آلودگی قارچی در سیب‌زمینی و مبارزه با آن قبل از انبار کردن، در طول دوره انبارداری و قبل از کاشت غده‌های بذری است (Merlington, 2014). روش‌های متداول و بصری تشخیص آلودگی قارچی بسیار وقت‌گیر و مشکل بوده که نیازمند کار آزمایشگاهی زیادی هستند (Ravikanth *et al.*, 2016) به طوری که نمونه مشکوک به آلودگی قارچی باید به مدت یک هفته در آزمایشگاه کشت داده شود و سپس با استفاده از میکروسکوپ شناسایی شود.



شکل ۱. میزان تولید سیب‌زمینی ایران در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ (FAO, 2014).

پوسیدگی غده‌ها و قطعات بذری سیب‌زمینی مهم‌ترین و خسارت‌آورترین بیماری‌های سیب‌زمینی در دوره پس از برداشت و انبارداری است. شایع‌ترین نوع پوسیدگی غده و قطعات بذری، پوسیدگی خشک فوزاریومی است (Wharton & Kirk, 2014). عامل بیماری، گونه‌های مختلف قارچ فوزاریوم هستند که گونه سولانی دارای بیشترین شدت در تخریب سیب‌زمینی و توسعه بیماری است (Wharton *et al.*, 2007; Chehri *et al.*, 2014). با توسعه بیماری در غده‌ها، قوه‌ی جوانی‌زنی قطعات بذری کاهش یافته، غده‌ها فاسد شده، آلودگی توسعه پیدا کرده و در نهایت تلفات افزایش می‌یابد. در شکل ۲ روند توسعه بیماری پوسیدگی خشک سیب‌زمینی نشان داده شده است. زخمی شدن



شکل ۲. سیکل بیماری پوسیدگی خشک سیب‌زمینی (Wharton *et al.*, 2007).

2011; Zhang *et al.*, 2007; Thybo *et al.*, 2004; Pujari *et al.*, 2015) ازدیاد مقادیر جزئی DNA (PCR<sup>۱</sup>) و ازدیاد مقادیر جزئی RNA (RT-PCR)<sup>۲</sup> (Lee, 2001; Gashgari *et al.*,

2006). اما تولید بالا و تفضای زیاد برای سیب‌زمینی با کیفیت، محققان زیادی را بر آن داشته است که به دنبال روش‌های سریع‌تر و دقیق برای تشخیص آلودگی قارچی باشند. در دهه‌ی اخیر روش‌های زیادی از قبیل پردازش تصویر دیجیتال (Yorulmaz *et al.*, 2012; Ramalingam *et al.*,

1. Polymerase Chain Reaction  
2. Reverse Transcription PCR

بدون تهویه است (Rutolo et al., 2014). در مقایسه با سایر روش‌های فوق استفاده از روش تصویربرداری حرارتی برای تشخیص آلودگی قارچی در سیب زمینی بسیار ساده، سریع و دقیق است. لذا هدف از این مقاله تشخیص غده‌های سیب‌زمینی سالم از غده‌های آلوده به قارچ فوزاریوم سولانی با استفاده از تصاویر حرارتی است.

### اصول گرمانگاری

گرمانگاری امکان مشاهده تغییرات دمای اشیاء را برای انسان امکان‌پذیر می‌سازد. در دوربین‌های گرمانگاری، انرژی فروسرخ ساطع شده از اشیاء با استفاده از آشکارسازهای فروسرخ به یک علامت الکتریکی تبدیل شده و به صورت یک تصویر گرمایی رنگی نمایش داده می‌شود. اساس کار دوربین‌های گرمانگاری بر اساس روابط زیر بیان می‌شود. توزیع شدت انرژی ساطع شده از جسم سیاه ایده‌آل بر اساس قانون توزیع پلانک بیان می‌شود. از طرفی شدت انرژی کل جسم سیاه ایده‌آل،  $I_t$  (J/m<sup>2</sup>) برابر انتگرال طیف گسیل شده در تمام طول موج‌ها می‌باشد.

$$I(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^{-1} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$I_t = \int_0^\infty \frac{8\pi hc}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^{-1} d\lambda \quad (\text{رابطه ۲})$$

با حل رابطه (۲) شار توان ساطع شده، یعنی قانون استفان بولتزمن، برای جسم سیاه ایده‌آل به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$W = \sigma T^4 \quad (\text{رابطه ۳})$$

اما این قانون فقط برای اجسام سیاه ایده‌آل صادق می‌باشد (Gowen et al., 2010). از آن جا که مواد پاسخ متعددی به پرتو فروسرخ دارند، لذا دوربین گرمانگاری برای تشکیل یک تصویر، به جای دمای جسم، ممکن است از همه این پاسخ‌ها استفاده کند. این پدیده با استفاده از قانون کرشهف بیان می‌شود:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (\text{رابطه ۴})$$

که  $\alpha$  ضریب جذب،  $\rho$  ضریب انعکاس و  $\tau$  ضریب انتقال می‌باشد. در بسیاری از کاربردهای گرمانگاری، قانون کرشهف برای اشیاء مات به رابطه (۵) تبدیل می‌شود ( $\tau=0$ ):

$$\alpha + \rho = 1 \quad (\text{رابطه ۵})$$

جذب توسط یک شیء در حالت تعادل حرارتی، برابر گسیلندگی آن است ( $\alpha = \varepsilon$ )

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که  $\varepsilon$  گسیلندگی می‌باشد (Manickavasagan et al., 2005).

(Pan et al., 2013; Jeevalatha et al., 2013; Malachova et al., 2014; Ben M'Barek et al., 2015; Wang et al., 2014; Lopez et al., 2015; Ravikanth et al., 2016) و تصویربرداری فراطیفی (Ray et al., 2011; Huang et al., 2014; Bauriegel & Herppich, 2014; Kheiralipour et al., 2015) برای نظارت و ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی و تشخیص بیماری‌های قارچی مورد استفاده قرار گرفته است. با وجود اینکه این روش‌ها قابل اطمینان هستند اما برای آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌ها وقت زیادی نیاز است (Kheiralipour et al., 2015).

روش‌های مختلفی برای تشخیص آلودگی قارچی سیب‌زمینی در مقالات گزارش شده است که عبارتند از: روش PCR برای تشخیص قارچ *Phytophthora infestans* عامل بیماری بادزدگی غده سیب زمینی در خاک (Hussain et al., 2014) و همچنین تشخیص ۱۵ گونه قارچ بیماری‌زای سیب‌زمینی برای جلوگیری از ورود غده‌های وارداتی آلوده به کره جنوبی (Lee & Rho, 2015)، روش RT-PCR برای تشخیص قارچ *Phytophthora infestans* در انبار سیب‌زمینی (Hussain et al., 2015)، روش بینی الکترونیکی برای تشخیص باکتری‌های *Ralstonia solanacearum* و *Clavibacter michiganensis* عامل بیماری پوسیدگی قهوه‌ای و پوسیدگی حلقه‌ای سیب‌زمینی (Biondi et al., 2014) و روش کروماتوگرافی گازی و طیف سنجی جرمی برای تشخیص قارچ‌های *Pythium ultimum* و *Phytophthora infestans* عوامل بوته‌میری سیب‌زمینی (Lui et al., 2005). اخیراً از فناوری گرمانگاری برای تشخیص قارچ آسپرژیلوس فلاوس عامل تولید سم افلاتوکسین در پسته (Kheiralipour et al., 2015) و تشخیص قارچ *Aspergillus niger* در گندم (Chelladurai et al., 2010) استفاده شده است. تصویربرداری حرارتی روشی مفید با سرعت بالا برای تعیین تغییرات دمایی به منظور کیفیت‌سنجی مواد غذایی و آزمون‌های غیرمخرب است (Kheiralipour et al., 2016). هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایبی دارند. برای مثال مزیت استفاده از روش‌های ازدیاد مقادیر جزئی و کروماتوگرافی دقیق بودن آن در تشخیص گونه قارچ و باکتری است اما این روش‌ها وقت‌گیر بوده و نیازمند کار آزمایشگاهی دقیق و نیروی متخصص هستند (Kheiralipour, 2012). با توجه به اینکه هر قارچی در حین آلودگی گاز خاصی را متصاعد می‌کند لذا بینی الکترونیکی براساس گازهای متصاعد شده از سیب‌زمینی در حین فساد توسط قارچ‌ها وجود آلودگی قارچی را تشخیص می‌دهد اما این روش مناسب فضاهای بسته و

مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

### آلوده‌سازی غده‌ها به قارچ عامل بیماری

قبل از آلوده نمودن غده‌ها به قارچ عامل بیماری پوسیدگی خشک فوزاریومی، نمونه‌ها با محلول هیپوکلریت سدیم ۳٪ به مدت ۱۵ دقیقه ضدعفونی و پس از شستشو با آب مقطر خشک شدند. میسیلیوم قارچ فوزاریوم سولانی از گروه گیاهپزشکی دانشگاه بوعلی سینا همدان تهیه شد. در شرایط استریل و در زیر هود بیولوژیک میسیلیوم به محیط کشت اسید لاکتیک+PDA منتقل شد. ظروف پتری درون انکوباتور در دمای هود بیولوژیک میسیلیوم به محیط کشت اسید لاکتیک+PDA منتقل شد. ظروف پتری درون انکوباتور در دمای ۲۵°C به مدت یک هفته نگهداری شدند (Sharifi et al., 2009). پس از تولید پرگنه‌ی قارچ و تولید اسپورهای فراوان، از حاشیه‌ی پتری چند بلوک از آن برداشته شد و به محیط کشت مایع (۲۵۰mL) عصاره‌ی سیب‌زمینی+آب مقطر) منتقل شد. سپس به مدت ۳ روز در دمای ۲۴°C با سرعت ۶۰ rpm در داخل شیکر قرار داده شد. سپس سوسپانسیون اسپور با سرعت ۶۰۰۰ rpm به مدت ۷ دقیقه سانتریفیوژ شده (Agrios, 2005) تا نمونه یکدست و شفاف شود. پس از سانتریفیوژ کردن نمونه، با استفاده از هموسایتومتر (لام گلبول شمار) غلظت سوسپانسیون به  $10^4$  (Spore/mL) رسید (Sharifi et al., 2009). تعداد ۲۵۰ نمونه سیب‌زمینی در سوسپانسیون حاوی اسپور غوطه‌ور شده و در داخل پاکت استریل در داخل اتاقک تاریکی به دمای ثابت ۲۵°C نگهداری شدند. از آب مقطر به عنوان تیمار شاهد برای آغشته نمودن نمونه‌های سالم استفاده شد. برای جلوگیری از آلوده شدن نمونه‌ها به سایر آلودگی‌ها تمامی عملیات‌های مختلف در زیر هود استریل انجام شد.

### تصویربرداری حرارتی

به منظور داده‌برداری بستر آزمایش متشکل از دوربین حرارتی، پایه دوربین، جعبه تاریک، دماسنج، رایانه، کابل‌های ارتباطی، فن، گرم‌کن و بستر عایق پیاده‌سازی شد (شکل ۳). جعبه تاریک محفظه‌ای عایق کاری شده است که دمای داخل آن توسط یک ترموکوپل کنترل شده و اگر دما از ۲۸/۵°C افزایش یابد فن به کار افتاده و دمای داخل جعبه را به ۲۸/۵°C می‌رساند. کنترل دمای داخل جعبه باعث می‌شود داده‌برداری در شرایط کاملاً یکسان انجام شود.

براساس رابطه (۶) دوربین‌های گرمانگاری گسیلندگی و انعکاس امواج فرورسرخ اشیاء را دریافت می‌کنند و چون در محیط، انعکاس از اشیاء پیرامون بسیار زیاد است لذا برای حذف

اما برای اجسام واقعی و با هر رنگ و شرایط سطحی، باید ضریب گسیلندگی ( $\epsilon$ ) در معادله (۳) ضرب شود (Gowen et al., 2010)

$$W = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{رابطه ۷})$$

که مقدار W شاخصی از دمای جسم ساطع کننده می‌باشد. این مفهوم اصلی گرمانگاری می‌باشد. از آن جا که گرمانگاری در یک گستره با طول موج محدود انجام می‌شود، قانون استفان-بولتزمن قابل استفاده نیست، لذا باید از قانون پلانک استفاده شود. انتگرال عددی قانون پلانک برای محدوده طول موج ۸ تا ۱۲  $\mu\text{m}$  به صورت معادله (۸) می‌باشد:

$$W_{8-12\mu\text{m}} = \epsilon \sigma T^{4.5} \quad (\text{رابطه ۸})$$

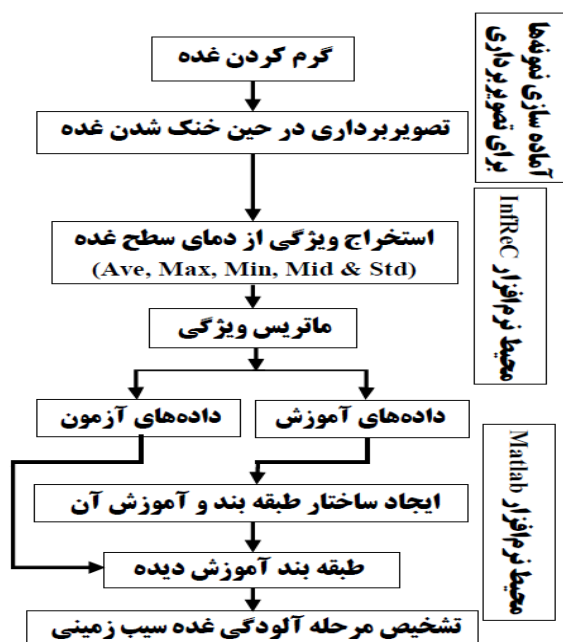
لذا در روش گرمانگاری مقدار پرتو ساطع شده از اشیاء متناسب با دمای جسم و گسیلندگی آن (ضریب گسیلندگی) می‌باشد. تغییر در ضریب نفوذ گرمایی سبب تغییر در نرخ سرد و گرم شدن مواد می‌شود. ضریب نفوذ گرمایی در علم انتقال حرارت، معیاری از توانایی یک ماده در رسانش گرما در قیاس با ذخیره انرژی گرمایی در آن ماده است. این کمیت به صورت نسبت گرمای عبور کرده به گرمای ذخیره شده توسط واحد حجم ماده است که به صورت رابطه ۹ بیان می‌شود:

$$\alpha = \left( \frac{k}{\rho c_p} \right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در رابطه (۹) k ضریب هدایت گرمایی،  $c_p$  ظرفیت گرمای ویژه و  $\rho$  چگالی هستند.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه از سیب‌زمینی رقم دیامونت بخاطر داشتن بیشترین حساسیت به بیماری پوسیدگی خشک استفاده شد (Azadvar et al., 2006). آزمایش‌ها بصورت فاکتوریل و در قالب طرح کامل تصادفی با ۲۵ تکرار انجام شد. عامل دمای گرم‌کن در دو سطح ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد و عامل زمان خنک شدن در چهار سطح ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۷۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت تا مناسب‌ترین ترکیب دمای گرم‌کن×مدت زمان خنک شدن برای داشتن بیشترین اختلاف دمایی بین غده‌های سالم و آلوده شناسایی شود. با مقایسه میانگین اثر متقابل هشت تیمار مختلف ((دمای گرم‌کن) ۲×۴ (مدت زمان خنک)) بر اختلاف دمای بین غده‌های سالم و آلوده به قارچ، بهترین تیمار برای داشتن بیشترین اختلاف دما بین غده‌های سالم و آلوده به قارچ انتخاب شد. بعد از انتخاب مناسب‌ترین تیمار، تصویر برداری برای سایر مراحل مختلف آلودگی قارچی فقط براساس تیمار برتر انجام شد و از این طریق حجم داده‌ها و محاسبات کاهش پیدا کرد. از نرم‌افزار MSTATC 51 برای تحلیل آماری داده‌ها و



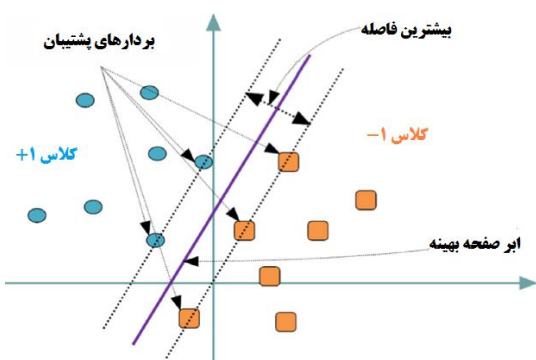
شکل ۴. مراحل مختلف سامانه تشخیص مرحله آلودگی در غده سیب زمینی.

#### طبقه‌بندی غده‌های سالم و آلوده به قارچ

در این تحقیق برای طبقه‌بندی غده‌های سالم و آلوده به قارچ از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شد. در این روش داده‌های آزمایش (D) شامل n عضو به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شوند:

$$D = \{(x_i, y_i) | x_i \in \{-1, 1\}\}_{i=1}^n \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که مقدار y برابر با ۱ یا -۱ و هر  $x_i$  یک بردار حقیقی p-بعدی است. هدف این روش یافتن ابر صفحه جداکننده با بیشترین فاصله از نقاط حاشیه‌ای است که نقاط با  $y_i = +1$  را از نقاط با  $y_i = -1$  جدا کند (شکل ۵).



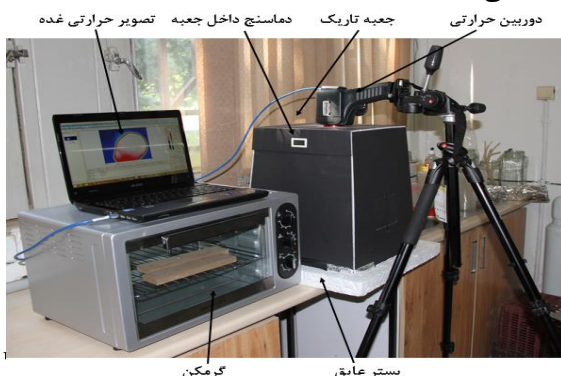
شکل ۵. جدا کننده خطی در SVM (Shen et al., 2016).

هر ابر صفحه را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از نقاط x که شرط (۱۱) را ارضا کند، نوشت:

$$w \cdot x + b = 0 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که w بردار نرمال ابر صفحه است. باید w و b طوری

این اثر، جعبه ساخته شد. از گرم‌کن برای ایجاد گرمانگاری فعال با محدوده دمایی  $10^\circ\text{C}$  تا  $250^\circ\text{C}$  استفاده شد.



شکل ۳. بستر انجام آزمایش.

در این تحقیق از دوربین حرارتی NEC G120 با رزولوشن  $320 \times 240$  پیکسل، سرعت  $10 \text{ frame/s}$  و محدوده طیفی  $\mu\text{m}$  ۸-۱۴ استفاده شد. تصویربرداری با روش گرمانگاری فعال انجام شد. در روش فعال، نمونه‌ها به مدت ۹۰ ثانیه در دماهای گرم‌کن  $60^\circ\text{C}$  و  $90^\circ\text{C}$  گرم شدند و در زمان‌های ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۷۰ ثانیه بعد از خنک شدن از نمونه‌ها تصاویر حرارتی تهیه شد. ضریب گسیلندگی برای نمونه‌های سیب‌زمینی با استفاده از روش ارائه شده در (Kheiralipour, 2012)،  $0/89$  به دست آمد. دوربین در ارتفاع  $30 \text{ cm}$  نمونه‌ها و روی جعبه تاریک نصب شد. در تحقیق حاضر از مراحل مختلف آلودگی غده در دو سطح غده (غده سالم و آلوده)، دو سطح دمای گرم‌کن ( $60^\circ$  و  $90^\circ$  درجه سانتیگراد) و چهار حالت خنک شدن (۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۷۰ ثانیه) تصاویر گرمایی توسط دوربین فرسوخ تهیه شد. دیاگرام کلی سامانه تشخیص آلودگی قارچی در غده‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

#### استخراج ویژگی

بعد از اکتساب تصاویر در کلاس‌های مختلف، هر تصویر در نرم افزار InfReC (Analyzer NS9500 Standard) بارگذاری شد و برای حذف اثرات دمای حاشیه، حاشیه تصاویر حذف گردیدند. سپس در نرم افزار InfReC ویژگی‌های میانگین، حداکثر، حداقل، میانه و انحراف معیار (Chelladurai et al., 2010) دمای سطح هر غده برای تمام تصاویر گرمایی محاسبه شدند. برای هر تصویر گرمایی پنج ویژگی استخراج شد. ویژگی‌های استخراج شده به نرم‌افزار MATLAB 2010b وارد شد و از آنها برای آموزش و آزمون ماشین بردار پشتیبان استفاده شد.

برای دسته‌بندی غیرخطی، باید از هسته غیرخطی استفاده کرد. در جدول ۱ هسته‌های متداول آورده شده است (Shen et al., 2016).

جدول ۱. توابع معمول مورد استفاده در SVM.

نوع هسته	فرمول هسته
هسته خطی	$K(X, X_i) = (X^T X_i)$
هسته چند درجه‌ای	$K(X, X_i) = ((X^T X_i) + 1)^d$
هسته پایه شعاعی	$K(X, X_i) = \exp(-\gamma \ X - X_i\ ^2)$
هسته سیگموئیدی	$K(X, X_i) = \tanh((X^T X_i) + b)$

ماشین بردار پشتیبان برای طبقه‌بندی غده‌های سالم، آلوده یک روزه، آلوده دو روزه، ... و آلوده نه روزه به کار برده شد. عملکرد ماشین بردار پشتیبان به عوامل زیادی از جمله روش چند کلاسه، نوع کرنل، پارامتر جریمه و پارامتر کرنل انتخابی بستگی دارد. برای هر وضعیت ۲۵۰ تصویر استخراج گردید که ۱۷۵ تصویر برای آموزش طبقه‌بند و ۷۵ تصویر برای آزمون به کار برده شد. در این تحقیق از ماشین بردار پشتیبان چند کلاسه با روش یکی در مقابل یکی، کرنل پایه شعاعی با پهنای ۰/۱ و پارامتر جریمه  $C=1$ ، به دلیل دارا بودن بهترین عملکرد برای طبقه بندی (Moosavian, 2012)، استفاده شد.

#### ارزیابی طبقه‌بند

برای ارزیابی روش ارائه شده تشخیص مرحله آلودگی قارچی در غده‌های سیب‌زمینی از ماتریس اغتشاش استفاده شد. ماتریس اغتشاش حاوی اطلاعات (کلاس‌های) مطلوب یا واقعی و اطلاعات تخمین زده توسط طبقه بند است. در ماتریس اغتشاش عضو  $n_{ij}$  توسط طبقه‌بند در کلاس  $i$  طبقه‌بندی شده است در حالی که در طبقه‌بندی واقعی به کلاس  $j$  تعلق دارد. اعضای روی قطر اصلی ماتریس ( $i=j$ ) نمونه‌هایی هستند که به درستی طبقه بندی شده‌اند. برای تخمین هر طبقه بند ۴ حالت وجود دارد: تصمیمات مثبت صحیح (TP) نمونه‌هایی هستند که به درستی توسط طبقه بند در کلاس نام طبقه بندی شده است. تصمیمات مثبت نا صحیح (FP) نمونه‌هایی که به اشتباه توسط طبقه بند به کلاس نام تعلق گرفته است. تصمیمات منفی صحیح (TN) نمونه‌هایی که به درستی توسط طبقه بند در کلاس نام طبقه بندی نشده و تصمیمات منفی ناصحیح (FN) نمونه‌هایی که به اشتباه توسط طبقه بند به کلاس نام تعلق نگرفته است (Taheri-Garavand et al., 2017).

برای ارزیابی سامانه طبقه‌بند پیشنهادی از شاخص‌های آماری مانند دقت، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن به صورت روابط ۱۸-۲۱ استفاده شد.

$$\text{Accuracy} = \frac{n_{TP} + n_{TN}}{n_{TP} + n_{TN} + n_{FP} + n_{FN}} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

انتخاب شوند که بیشترین فاصله بین ابر صفحه‌های موازی که داده‌ها را از هم جدا می‌کنند، ایجاد شود. ابر صفحه‌ها براساس رابطه (۱۲) تعریف می‌شوند:

$$w \cdot x - b = 1, w \cdot x - b = -1 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

اگر داده‌ها جدایی‌پذیر خطی باشند، می‌توان دو ابر صفحه را در حاشیه نقاط؛ به طوری که هیچ نقطه مشترکی نداشته باشند، در نظر گرفت و سپس فاصله آن‌ها را حداکثر نمود. فاصله این دو صفحه  $\frac{2}{\|w\|}$  است، بنابراین باید اندازه  $\|w\|$  حداقل شود. برای این که از ورود نقاط به حاشیه جلوگیری شود، شرط (۱۳) را باید لحاظ شود:

$$\forall i \rightarrow y_i(w \cdot x_i - b) \geq 1, 1 \leq i \leq n \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

بدون تغییر در مسئله می‌توان  $\|w\|$  را با  $\frac{1}{2}\|w\|^2$  جانشین کرد. هم‌چنین می‌توان مسئله بهینه‌سازی (کمینه کردن نرم  $w$ ) را با استفاده از ضرایب نامنفی لاگرانژ به صورت رابطه (۱۴) نوشت که در آن ضرایب لاگرانژ هستند.

$$\min_{w,b} \max_a \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n [y_i(w \cdot x_i - b) - 1] \right\} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

رابطه (۱۵) را می‌توان به کمک برنامه‌ریزی غیرخطی استاندارد حل کرد. جواب به صورت ترکیب خطی از بردارهای آموزشی بیان می‌شود.

$$w = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

که  $X_i$  متناظر، همان بردار پشتیبان خواهد بود که شرط (۱۶) و هم‌چنین شرط  $w \cdot x_i - b = 1$  را ارضا خواهد کرد. در عمل الگوریتمی مقاوم‌تر خواهد بود اگر از تمام بردار پشتیبان‌ها میانگین گرفته شود:

$$B = \frac{1}{N_{SV}} \sum_{i=1}^{N_{SV}} (w \cdot x_i - y_i) \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

با استفاده از این واقعیت که  $\|w\|^2 = w \cdot w$  و با جانشینی  $w = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i$  می‌توان نشان داد که SVM دوگانه به مسئله بهینه سازی ساده با شروط  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  و  $\alpha_i \geq 0$  و  $\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0$  تبدیل می‌شود:

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i^T x_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

که  $K(X, X_i)$  را هسته<sup>۱</sup> می‌نامند. روابط بالا ابتدا برای یک جدا کننده خطی مطرح شده که هسته آن خطی بود.

1. Kernel

جدول ۲. تجزیه واریانس اختلاف دمای بین غده‌های سالم و آلوده به قارچ.

میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی	منابع تغییرات
۱/۰۶**	۱	دما
۲/۲۷۴**	۳	زمان خنک شدن
۰/۵۵۶**	۳	دما× زمان خنک شدن
۰/۰۳۴	۱۹۲	خطای آزمایشی
	۱۹۹	کل
۱/۰۵۲	-	ضریب تغییرات %

\*\* و \* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و ns غیرمعنی‌دار.

### طبقه‌بندی

آموزش ماشین بردار پشتیبان با استفاده از ویژگی‌های اکتساب شده از تصاویر حرارتی در دمای گرم‌کن ۹۰ درجه سلسیوس و مدت زمان خنک شدن ۴۰ ثانیه انجام شد. مقادیر مربوط به شاخص‌های آماری برای تمام وضعیت‌های غده سیب‌زمینی پس از تشکیل ماتریس اغتشاش (جدول ۴) محاسبه و در جدول ۵ ارائه شد. مقادیر میانگین دقت، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن طبقه بند به ازای هر کلاس به ترتیب برابر ۹۹/۶۳، ۹۶/۶۷، ۹۳/۶۹ و ۹۹/۳۳ درصد به دست آمد. دقت کلی طبقه بند ۹۶/۶۷ درصد برای تمام کلاس‌های مختلف بود.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرم‌کن × زمان خنک شدن بر اختلاف دمای بین غده‌های سالم و آلوده به قارچ.

اختلاف دمای غده‌های سالم و آلوده به قارچ	زمان خنک شدن (S)	دما (°C)
* اختلاف دمای غده‌های سالم و آلوده به قارچ ( $\Delta T = T_{Infection} - T_{Health}$ ) °C	۱۰	۰/۰۱۰۸۰ <sup>c</sup>
	۲۵	۰/۰۰۸۱۶۰ <sup>c</sup>
	۴۵	۰/۲۵۶۶ <sup>b</sup>
	۷۰	۰/۱۰۲۵ <sup>c</sup>
میانگین	۱۰	۰/۰۹۴۵۱۵
	۲۵	۰/۰۵۲۸۰ <sup>c</sup>
	۴۵	۰/۱۰۱۲ <sup>c</sup>
	۷۰	۰/۷۱۲۵ <sup>a</sup>
	میانگین	۰/۰۹۴۰۸ <sup>c</sup>
میانگین	۰/۲۴۰۱۴۵	

\* حروف مشترک در هر ستون، نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن است.

دقت طبقه‌بندی کلی: تعداد تصمیم‌های صحیح تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های ممکن.

$$Precision = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FP}} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

صحت: تعداد تصمیم‌های مثبت صحیح سیستم تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های مثبت ممکن.

$$Sensitivity = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FN}} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

حساسیت: تعداد تصمیمات تصمیم‌های مثبت صحیح تقسیم بر جمع تعداد تصمیم‌های مثبت صحیح و تصمیم‌های منفی نادرست.

$$Specificity = \frac{n_{TN}}{n_{TN} + n_{FP}} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

اختصاصی بودن: تعداد تصمیم‌های منفی صحیح سیستم تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های منفی ممکن. پارامترهای ارائه شده در روابط ۱۸ تا ۲۳ در رابطه ۲۲ تعریف شده‌اند.

$$n_{TP} = n_{i,j}, n_{FP} = n_{i,+} - n_{i,j}, n_{FN} = n_{+,j} - n_{i,j}, n_{TN} = n - n_{TP} - n_{FP} - n_{FN} \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

که  $n_{i,+}$  مجموع تمام اعضای مربوط به سطر  $i$ ام و  $n_{+,j}$  مجموع اعضای تمام سطرها مربوط به ستون  $j$ ام در ماتریس اغتشاش است (Taheri-Garavand et al., 2017).

### نتایج و بحث

#### تغییرات دمای سطح غده‌ها

در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اختلاف دمای نمونه‌های سالم و آلوده به قارچ در تیمارهای مختلف دمای گرم‌کن و مدت زمان خنک شدن ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس داده‌های اختلاف دمای سطح غده‌های آلوده و سالم نشان داد که اثر دما، زمان خنک شدن و اثر متقابل دما× زمان خنک شدن دارای تاثیر معنی‌دار ( $P \leq 0.01$ ) بر صفت اختلاف دمای غده آلوده و سالم بود. مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرم‌کن× زمان خنک شدن (جدول ۳) نشان داد که بهترین روش برای داشتن بیشترین اختلاف دما بین غده‌های آلوده و سالم، استفاده از دمای ۹۰ درجه سلسیوس و مدت زمان خنک شدن نمونه‌ها به مدت ۴۰ ثانیه است. تغییر در نرخ سرد و گرم شدن غده‌های آلوده ناشی از تغییر در ضریب نفوذ گرمایی غده‌ها است و هر چه اختلاف دمای سطح غده‌های سالم و آلوده بیشتر باشد تشخیص و طبقه‌بندی غده‌ها با دقت بیشتری انجام می‌شود.

جدول ۴. ماتریس اغتشاش حاصل از مدل طبقه‌بند.

طبقه واقعی									
مرحله آلودگی									سالم
روزه ۹	روزه ۸	روزه ۷	روزه ۶	روزه ۵	روزه ۴	روزه ۳	روزه ۲	روزه ۱	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	سالم ۷۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۷۴	روزه ۱ ۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۵	۰	روزه ۲ ۰
۰	۰	۰	۰	۱	۱	۷۴	۰	۱	روزه ۳ ۰
۲	۰	۰	۰	۱	۷۴	۰	۰	۰	روزه ۴ ۰
۰	۰	۰	۰	۷۳	۰	۰	۰	۰	روزه ۵ ۰
۰	۰	۰	۷۵	۰	۰	۰	۰	۰	روزه ۶ ۰
۲	۲	۶۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	روزه ۷ ۰
۳	۶۹	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	روزه ۸ ۰
۶۸	۴	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	روزه ۹ ۰

مرحله آلودگی

طبقه پیش‌بینی شده

جدول ۵. پارامترهای آماری ارزیابی سامانه تشخیص مرحله آلودگی در غده‌های سیب زمینی.

وضعیت غده سیب زمینی	شاخص‌های آماری (%)	دقت طبقه‌بندی	صحت	حساسیت	اختصاصی بودن
سالم	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
روزه ۱	۹۹/۷۳	۹۸/۶۷	۹۸/۶۷	۹۸/۶۷	۹۹/۸۵
روزه ۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
روزه ۳	۹۹/۴۷	۹۶/۱۰	۹۶/۱۰	۹۸/۶۷	۹۹/۵۶
روزه ۴	۹۹/۴۷	۹۶/۱۰	۹۶/۱۰	۹۸/۶۷	۹۹/۵۶
روزه ۵	۹۹/۷۳	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۳۳	۱۰۰
روزه ۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
روزه ۷	۹۸/۵۳	۹۴/۴۴	۹۴/۴۴	۹۰/۶۷	۹۹/۴۱
روزه ۸	۹۸/۵۳	۹۳/۲۴	۹۳/۲۴	۹۲/۰۰	۹۹/۲۶
روزه ۹	۹۷/۸۷	۸۸/۳۱	۸۸/۳۱	۹۰/۶۷	۹۸/۶۷
میانگین به ازای هر کلاس (%)	۹۹/۳۳	۹۳/۶۹	۹۳/۶۹	۹۶/۶۷	۹۹/۶۳

مرحله آلودگی

پیدا کرد که این امر باعث شد ماشین بردار پشتیبان بتواند با دقت کلی ۹۶/۶۷ درصد وضعیت‌های مختلف غده‌های سیب زمینی را طبقه‌بندی کند.

در پژوهشی (Chelladurai et al., 2010) آلودگی قارچی در گندم را به وسیله ویژگی‌های مستخرج از تصاویر حرارتی و روش‌های طبقه‌بندی تحلیل تفکیک خطی (LDA) و درجه دوم (QDA) طبقه‌بندی کردند. بیشترین دقت مربوط به روش QDA در تشخیص گندم سالم، گندم آلوده توسط قارچ‌های *A. niger*، *glauca* و *Penicillium* به ترتیب ۱۰۰، ۷۴، ۶۲ و ۷۶٪ به دست آمد. (Pan et al., 2014) با استفاده از آنالیز گازهای متصاعد شده از توت فرنگی در دوره انبارداری توسط بینی الکترونیکی و کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی وجود آلودگی قارچی در توت فرنگی را بررسی کردند. در این تحقیق چهار طبقه شامل توت فرنگی سالم، آلوده به قارچ بوتریتیس، آلوده به پنسیلیوم و آلوده به ریزوپوس با دقت

نتایج جدول ۵ نشان داد که ماشین بردار پشتیبان با دقت ۱۰۰ درصد غده‌های سالم از غده‌های آلوده را تشخیص داد. نتایج نشان می‌دهد تغییرات ویژگی‌های مستخرج از دمای سطح غده‌های آلوده با گذشت زمان تا روز هفتم آلودگی افزایش پیدا کرده است و از روز هفتم به بعد دقت طبقه‌بند در تشخیص مرحله آلودگی غده کاهش پیدا کرده و خطا در تشخیص آلودگی‌های ۷، ۸ و ۹ روزه افزایش پیدا کرده است. کاهش دقت طبقه‌بند از آلودگی روز هفتم به بعد نشان دهنده کاهش تغییرات در ویژگی‌های دمایی مستخرج از دمای سطح غده نسبت به مراحل قبلی است که این نتیجه در تحقیق (Kheiralipour et al., 2016) نیز ذکر شده است. با گذشت زمان رشد قارچ‌ها بر سطح غده افزایش پیدا کرد؛ هر چند بسیار کم اما سبب تغییر در ضریب نفوذ گرمایی غده‌های سیب زمینی شد، از طرفی با اعمال گرمانگاری فعال تفاوت در ویژگی‌های مستخرج از دمای سطح غده بین کلاس‌های مختلف افزایش



تحقیقات گذشته استفاده از جعبه تاریک بود تا از انعکاس پرتوهای فروسرخ محیط به لنز دوربین حرارتی جلوگیری کرده و اثرات محیط را بر تصویر حرارتی به حداقل برساند.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله از تصویر برداری حرارتی و ماشین بردار پشتیبان با کرنل پایه شعاعی برای تشخیص غده‌های سیب‌زمینی آلوده به قارچ و سالم استفاده شد. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که آلودگی قارچی بر دمای سطح غده‌های سالم و آلوده در سطح احتمال ۹۹٪ اثر معنی‌دار دارد. در گرم‌نگاری فعال دو سطح دمای گرم‌کن و چهار سطح زمان خنک شدن استفاده شد که مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرم‌کن × زمان خنک شدن بر اختلاف دمای بین غده‌های سالم و آلوده به قارچ نشان داد که دمای گرم‌کن ۹۰ درجه سانتی‌گراد و خنک شدن نمونه‌ها به مدت ۴۰ ثانیه دارای بیشترین اختلاف بین نمونه‌های سالم و آلوده است. در نهایت دقت طبقه‌بند در تشخیص غده‌های سالم از آلوده ۱۰۰٪ و در تشخیص مرحله آلودگی غده‌ها ۹۶/۶۷ به دست آمد.

### REFERENCES

- Agrios, G. (2005). *Plant Pathology* (5th Ed.). California: Elsevier Academic Press.
- Azadvar, M. Najafinia, M. & Ershad, J. (2006). Study on causal agents of potato tuber rot in store and cold-room of Jiroft region. *Pajouhesh & Sazandegi*, 75, 97-101. (In Persian).
- Bauriegel, E. & Herppich, W. B. (2014). Hyperspectral and Chlorophyll Fluorescence Imaging for Early Detection of Plant Diseases, with Special Reference to Fusarium spec. Infections on Wheat. *Agriculture*, 4(1), 32-57.
- Ben M'Barek, S. Cordewener, J. H. Tabib Ghaffary, S. M. Van Der Lee, T. A. Liu, Z. Mirzadi Gohari, A. Mehrabi, R. America, A. H. Robert, O. Friese, T. L. Hamza, S. Stergiopoulos, I. De Wit, P. J. & Kema, G. H. (2015). PLC and liquid-chromatography mass spectrometry identify candidate necrosis-inducing proteins from culture filtrates of the fungal wheat pathogen *Zymoseptoria tritici*. *Fungal Genetics and Biology*, 79, 54-62.
- Biondi, E. Blasioli, S. Galeone, A. Spinelli, F. Cellini, A. Lucchese, C. & Braschi, I. (2014). Detection of potato brown rot and ring rot by electronic nose: From laboratory to real scale. *Talanta*, 129, 422-430.
- Bojanowskia, Avisa, T. J. Pelletier, S. & Tweddella, R. J. (2013). Management of potato dry rot. *Postharvest Biology and Technology*, 84, 99-109.
- Chehri, K. Ghasempour, H. R. & Karimi, N. (2014). Molecular phylogenetic and pathogenetic characterization of *Fusarium solani* species complex (FSSC), the cause of dry rot on potato in Iran. *Microbial Pathogenesis*, 67-68, 14-19.
- Chelladurai, V. Jayas, D. S. & White, N. D. G. (2010). Thermal imaging for detecting fungal infection in stored wheat. *Journal of Stored Products Research*, 46, 174-179.
- Food and Agriculture Organization. (2014). Retrieved April 9, 2017, from <http://www.fao.org/faostat/en/#compare>.
- Gashgari, R. M. Shebany, Y. M. & Gherbawy, Y. A. (2013). Molecular characterization of fungi associated with superficial blemishes of potato tubers in Al-Qasim region. In: *The International Conference for Academic Disciplines is organized at the UNLV Student Union Building*, 18-22 March., Maryland Parkway, Las Vegas, Nevada.
- Gowen, A. A. Tiwari, B. K. Cullen, P. J. McDonnell, K. O'Donnell, C.P. (2010). Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment. *Trends in Food Science & Technology*, 21(4), 190-200.
- Heidarian, R. Javan-Nikkhah, M. Peyambari, M. & Ormaz, B. (2006). Study on fungal contamination of pistachio seeds in kerman province, Iran and some new fungi for Iranian pistachio Mycoflora. In: *IV International Symposium on Pistachios and Almonds*, November 2006, Teheran, Iran, pp. 615 - 617. <http://kayhanarch.kayhan.ir/900723/7.htm>.

۹۶/۶۰٪ توسط شبکه‌های عصبی طبقه‌بندی شدند. Kheiralipour *et al.* (2015) آلودگی قارچی در پسته توسط قارچ آسپیرژیلوس فلاوس را با استفاده از فناوری گرم‌نگاری و روش‌های طبقه‌بندی تحلیل تفکیک درجه دوم (QDA) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) طبقه‌بندی نمودند. آنها در نتایج خود گزارش کردند که روش ANN و QDA با دقت ۹۷/۷۰٪ و ۹۹/۰۰٪ پسته سالم را از پسته آلوده تشخیص داد. در تحقیقی ذرت آلوده به قارچ پنسیلیوم (عامل بیماری *Blue-Eye*) و ذرت سالم با استفاده از ویژگی‌های ماتریس کوواریانس تصاویر و ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی شد. دقت طبقه‌بند در تشخیص ذرت سالم از آلوده ۹۶/۵٪ به دست آمد (Yorulmaz *et al.*, 2012).

با مقایسه نتایج حاصل از این مقاله با تحقیقات مشابه در تشخیص و طبقه‌بندی آلودگی قارچی در محصولات کشاورزی این نتیجه حاصل شد که روش تصویربرداری حرارتی و ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های توانمند ماشین بینایی در تشخیص غده سیب‌زمینی سالم و آلوده است به طوری که دقت به دست آمده در این تحقیق از بیشتر تحقیقات قبلی بیشتر است. یکی از دلایل افزایش دقت روش ارائه شده نسبت به

- Huang, H. Liu, L. & Ngadi, M. O. (2014). Recent Developments in Hyperspectral Imaging for Assessment of Food Quality and Safety. *Sensors*, 14(4), 7248-7276.
- Hussain, T. Singh, B. P. & Anwar, A. (2014). A quantitative Real Time PCR based method for the detection of *Phytophthora infestans* causing Late blight of potato, in infested soil. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21, 380-386.
- Hussain, T. Singh, B. P. & Anwar, A. (2015). Development of specific marker for PCR diagnostic of late blight of potato caused by *Phytophthora infestans* using RAPD based SCAR methodology. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, Available online 9 October 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166093415002414>.
- Jeevalatha, A. Kaundal, P. Venkatasalam, E. P. Chakrabarti, S. K. & Singh, B. P. (2013). Uniplex and duplex PCR detection of geminivirus associated with potato apical leaf curl disease in India, *Journal of Virological Methods*, 193(1), 62-67.
- Kheiralipour, K. (2012). Implementation and construction of a system for detecting fungal infection in pistachio kernel based on thermal imaging (TI) and image processing technology, Ph. D. dissertation, University of Tehran, Karaj.
- Kheiralipour, K. Ahmadi, H. Rajabipour, A. Rafiee, S. & Javan-Nikkhah, M. (2015). Classifying Healthy and Fungal Infected-Pistachio Kernel by Thermal Imaging Technology. *International Journal of Food Properties*, 18, 93-99.
- Kheiralipour, K. Ahmadi, H. Rajabipour, A. Rafiee, S. & Javan-Nikkhah, M. (2012). Investigation of total emissivity of pistachio kernel using thermal imaging technique. *Journal of Agricultural Technology*, 8(2), 435-441.
- Kheiralipour, K. Ahmadi, H. Rajabipour, A. Rafiee, S. Javan-Nikkhah, M. Jayas, D. S. & Siliveru. K. (2016). Detection of fungal infection in pistachio kernel by long-wave near-infrared hyperspectral imaging technique. *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, 8(1), 129-135.
- Lee, S. & Rho, J. Y. (2015). Development of a PCR Diagnostic System for Detecting Andean Potato Mottle Virus Associated with Potato Quarantine in Korea. *American Journal of Potato Research*, 92(4), 546-550.
- Lee, Y. S. (2001). New sensitive detection method for *Phytophthora infestans* in potato. In: *proceeding of the international workshop on potato late blight, solving a threat to global food security*, 15-19 October 2001, session III, pp. 66-83.
- Lopez, L. Echeverria, G. Usall, J. & Teixido, N. (2015). The detection of fungal diseases in the Golden Smoothie apple and Blanquilla pear based on the volatile profile. *Postharvest Biology and Technology*, 99, 120-130.
- Lui, L. Vikram, A. Hamzehzarghani, H. Kushalappa, A. C. (2005). Discrimination of three fungal diseases of potato tubers based on volatile metabolic profiles developed using GC/MS. *Potato Research*, 48, 85-96.
- Malachova, A. Sulyoka, M. Beltrán, E. Berthiller, F. & Krska, R. (2014). Optimization and validation of a quantitative liquid chromatography-tandem mass spectrometric method covering 295 bacterial and fungal metabolites including all regulated mycotoxins in four model food matrices. *Journal of Chromatography A*, 1362, 145-156.
- Manickavasagan, A. Jayas D. S. White N. D. G. & Paliwal, J. (2005). Applications of thermal imaging in agriculture-A review. In: *Canadian Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological Systems*. 26 - 29 June, Manitoba University, Winnipeg, Canada, pp.1-11.
- Merlington, A. A. (2014). Management options for control of fusarium dry rot (*Fusarium* spp) and potato common scab (*Streptomyces* spp) of potato (*Solanum tuberosum* L) in Michigan, M. Sc. dissertation, Michigan State University, Michigan.
- Moosavian, A. (2012). Fault Diagnosis and Classification of Journal Bearings by Using Support Vector Machine, M. Sc. dissertation, University of Tehran, Karaj.
- Pan, L. Zhang, W. Zhu, N. Mao, S. & Tu, K. (2014). Early detection and classification of pathogenic fungal disease in post-harvest strawberry fruit by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry. *Food Research International*, 62, 162-168.
- Pujari, D. J. Yakkundimath, R. & Byadgi, A. S. (2015). Image processing based detection of fungal disease in plants. *Procedia Computer Science*, 46, 1802-1808.
- Ramalingam, G. Neethirajan, S. Jayas, D. S. & White, N. D. G. (2011). Characterization of the influence of moisture content on single wheat kernels using machine vision. *Applied Engineering in Agriculture*, 27(3), 403-409.
- Ravikanth, L. Singh, C. B. Jayas, D. S. & White, N. D. G. (2016). Performance evaluation of a model for the classification of contaminants from wheat using near-infrared hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 147, 248-258.
- Ray, S. S. Jain, N. Arora, R. K. Chavan, S. & Panigrahy, S. (2011). Utility of Hyperspectral Data for Potato Late Blight Disease Detection. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 39(2), 161-169.
- Rutolo, M. Covington, J. A. Clarkson, J. & Iliescu, D. (2014). Detection of Potato Storage Disease via Gas Analysis: A Pilot Study Using Field Asymmetric Ion Mobility Spectrometry. *Sensors*, 14(9), 15939-15952.
- Schisler, D. A. Slininger, P. J. & Olsen, N. L. (2016). Appraisal of selected osmoprotectants and carriers for formulating Gram-negative biocontrol agents active against *Fusarium* dry rot

- on potatoes in storage. *Biological Control*, 98, 1–10.
- Sezavar, A. R. (2011 October). *Hunger, Permanent Great threaten*. Retrieved July 7, 2016, Keyhan Newspaper, No. 20048, pp. 7.
- Sharifi, K. Zaree, R. Zamani Zadeh, H. R. & Arjmandian, A. (2009). Fusarium species causing dry rot of potatoes in Ardabil, Tehran and Hamedan Provinces. *Entomology and Phytopathology*, 76(2), 93-113. (In Persian).
- Shen, L. Chen, H. Yu, Z. Kang, W. Zhang, B. Li, H. Yang, B. & Liu, D. (2016). Evolving support vector machines using fruit fly optimization for medical data classification. *Knowledge-Based Systems*, 96, 61–75.
- Taheri-Garavand, A. Omid, M. Ahmadi, H. Mohtasebi, S. S. & Carlomagno, G. M. (2017). Intelligent fault diagnosis of cooling radiator based on thermal image processing and artificial intelligence techniques. *Modares Mechanical Engineering*, 17(2), 240-250. (In Persian).
- Thybo, A. K. Jespersen, N. S. Larke, P. E. Stbdkilde-Jbrgensen, H. J. (2004). Nondestructive detection of internal bruise and spraing disease symptoms in potatoes using magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Imaging*, 22(9), 1311-1317.
- Wang, Y. Zia, S. Owusu-Adu, S. Gerhards, R. & Müller, J. (2014). Early Detection of Fungal Diseases in Winter Wheat by Multi-Optical Sensors. *APCBEE Procedia*, 8, 199–203.
- Wharton, P. Hammerschmidt, R. & Krik, W. (2007). *Fusarium dry rot*. Retrieved July 7, 2016, the Michigan Agricultural Experiment Station and the Michigan Potato Industry Commission, from <http://www.potatodiseases.org/pdf/fusarium-dry-rot-bulletin.pdf>
- Wharton, P. S. & Kirk, W. W. (2014). Evaluation of biological seed treatments in combination with management practices for the control of Fusarium dry rot of potato. *Biological Control*, 73, 23–30.
- Yorulmaz, O. Pearson, T. & Enisetin, C. A. (2012). Detection of fungal damaged popcorn using image property covariance features. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84, 47–52.
- Zhang, H. Paliwal, J. Jayas, D. S. & White, N. D. G. (2007). Classification of fungal infected wheat kernels using nearinfrared reflectance hyperspectral imaging and support vector machine. *Transactions of the ASABE*, 50(5), 1779-1785.