

## Processing the Hyperspectral Images for Detecting Infection of Pistachio Kernel by R5 and KK11 Isolates of *Aspergillus flavus* Fungus

KAMRAN KHEIRALIPOUR<sup>1,2,3\*</sup>, HOJJAT AHMADI<sup>2</sup>, ALI RAJABIPOUR<sup>2</sup>, SHAHIN RAFIEE<sup>2</sup>, MOHAMMAD JAVAN-  
NIKKHAH<sup>4</sup>, DIGVIR S. JAYAS<sup>5</sup>, KALIRAMSH SILIVERU<sup>3,5</sup>, ALI MALIHIPOUR<sup>6</sup>

1. Mechanical Engineering of Biosystems, Ilam University, Ilam, Iran.

2. Department of Agricultural Machinery, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Alborz, Iran.

3. Department of Biosystems Engineering, University of Manitoba, Canada.

4. Department of Plant Protection, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Alborz, Iran.

5. Department of Grain Science and Industry, Kansas State University, Manhattan, Kansas State, USA.

6. Cereal Research Department, Seed and Plant Improvement Institute (SPII), AREEO, Karaj, Alborz, Iran

(Received: Apr. 25, 2020- Revised: Dec. 1, 2020- Accepted: Dec. 26, 2020)

### ABSTRACT

Hyperspectral imaging technique as a new and efficient method is applied for detecting infection in agricultural products. It was used for classification of healthy and infected pistachio kernels by *Aspergillus flavus* fungus with and without considering infection stages. Two different fungus isolates, R5 and KK11 with and without capable of producing aflatoxin, respectively, were individually used to infect the pistachio kernel samples. From 960 to 1700 nm, three effective wavelengths of 1090, 1280, and 1700 nm were selected by principle component analysis method. After feature extraction, K-fold cross validation, support vector machine, and artificial neural network methods were used for classification. The results showed that the classification accuracy of the K-fold cross validation method was higher for classifying the healthy and infected pistachios without considering the infection stages and isolate type (99.71%). The maximum accuracy of the developed algorithms in classification of isolate type and infection stage was obtained as 69-91%.

**Keywords:** Pistachio, Fungal infection, Infection stage, Hyperspectral imaging technique, Image processing.

## پردازش تصاویر فراطیفی به منظور تشخیص آلودگی مغز پسته به دو جدایه *Aspergillus* R5 و KK11 و قارچ *flavus*

کامران خیرعلی پور<sup>۱،۲،۳\*</sup>، حجت احمدی<sup>۱</sup>، علی رجبی پور<sup>۲</sup>، شاهین رفیعی<sup>۲</sup>، محمد جوان نیکخواه<sup>۴</sup>، دیگوبیر اس جیاس<sup>۲</sup>، کالیرامش سیلیوریو<sup>۳،۵</sup> و علی ملیحی پور<sup>۶،۷</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
  ۲. گروه ماشین های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، البرز، ایران.
  ۳. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه مانیتوبا، وینیپگ، مانیتوبا، کانادا.
  ۴. گروه گیاه پزشکی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، البرز، ایران.
  ۵. گروه علوم و صنایع غلات، دانشگاه ایالتی کانزاس، منهتن، کانزاس، آمریکا.
  ۶. بخش تحقیقات غلات، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، البرز، ایران.
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۶)

### چکیده

فناوری تصویربرداری فراطیفی به عنوان روشی نوین و موثر در تشخیص آلودگی محصولات کشاورزی به کار می‌رود. این روش برای تشخیص پسته سالم و آلوده به قارچ *Aspergillus flavus* با و بدون در نظر گرفتن مراحل آلودگی، مورد استفاده قرار گرفت. جدایه‌های R5 و KK11 به ترتیب با و بدون قابلیت تولید سم آفلاتوکسین، به طور جداگانه، برای آلوده‌سازی پسته استفاده شد. از بین طول موج‌های ۹۶۰ تا ۱۷۰۰ نانومتر، سه طول موج موثر ۱۰۹۰، ۱۲۸۰، و ۱۷۰۰ نانومتر با استفاده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی انتخاب شد. پس از استخراج ویژگی، از روش‌های اعتبارسنجی K-بخشی، ماشین بردار پشتیبان، و شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی استفاده شد. نتایج نشان داد که دقت روش اعتبارسنجی K-بخشی در طبقه‌بندی نمونه‌های پسته سالم و آلوده بدون در نظر گرفتن مراحل آلودگی و نوع جدایه (۹۹/۷۱ درصد) بالاتر بود. حداکثر دقت طبقه‌بندی الگوریتم‌های توسعه یافته در تشخیص نوع جدایه و مراحل آلودگی ۶۹ تا ۹۱ درصد به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** پسته، آلودگی قارچی، مرحله آلودگی، فناوری تصویربرداری فراطیفی، پردازش تصویر.

### مقدمه

روش‌های تصویربرداری برای تشخیص قارچ در کشاورزی و صنایع غذایی غیرمخرب و سریع هستند، مانند تصویربرداری پرتو ایکس نرم و گرمانگاری (Narvankar et al., 2009; Kheiralipour et al., 2013; Farokhzad et al., 2020). جدیدترین روش تصویربرداری در ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی تصویربرداری فراطیفی<sup>۱</sup> است که امواج الکترومغناطیس در محدوده‌های مختلف را ثبت می‌کند. وجه تمایز روش تصویربرداری فراطیفی با تصویربرداری مرئی، تشخیص مواردی است که قابل رویت نبوده و در تصویربرداری مرئی دیده نمی‌شود. و به این خاطر برای تشخیص اولیه بیماری دارای توانایی بالایی می‌باشد.

روش تصویربرداری فراطیفی برای کاربردهای متنوعی از جمله در کشاورزی به کار رفته است (Kumar et al., 2016; )

تشخیص فساد و خرابی محصولات خام و فراوری شده یکی از موضوعات مهم در کشاورزی و صنایع غذایی است که با استفاده از روش‌های مختلفی (Heidarian, 2004; Pirsā & Mohammad, 2017; Alizadeh et al., 2017; Nejad, 2017) صورت می‌گیرد. نتایج روش‌های آزمایشگاهی دقیق و قابل اطمینان بوده؛ اما حصول این نتایج مستلزم صرف هزینه بالا، زمان زیاد، و تجربه بالای فرد متخصص است. اخیراً، پژوهش‌هایی برای توسعه فناوری‌های نوین در تشخیص آلودگی در محصولات مختلف انجام شده است، از جمله کروماتوگرافی گازی و طیف‌سنجی جرمی. بیشتر این روش‌ها نتایج قابل اعتمادی را ارائه می‌دهند؛ اما زمان زیادی را برای آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش‌های مربوطه نیاز دارند (Chelladurai et al., 2010).

\* نویسنده مسئول: k.kheiralipour@ilam.ac.ir

فراطیفی در محدوده طیف فرورسرخ نزدیک با طول موج بلند برای تصویربرداری از پسته های سالم و آلوده به قارچ *Aspergillus flavus*، پردازش تصاویر اکتساب شده، و طبقه بندی آنها است.

### مواد و روش ها

تحقیق حاضر در سال ۲۰۱۲ در گروه مهندسی بیوسیستمز، دانشگاه مانیوتوبا، وینیپگ، مانیوتوبا، کانادا انجام شد. قارچ های مورد بررسی از گروه گیاه پزشکی پردیس کشاورزی منابع طبیعی دانشگاه تهران تهیه شد.

### آماده سازی نمونه ها

در تحقیق حاضر، پسته رقم اکبری تولید شده در شهرستان رفسنجان، استان کرمان، از بازار تهیه شد. پسته ها به صورت دستی مغز شده و سپس قارچ زدایی شدند. از دو جدایه<sup>۱</sup> قارچ *Aspergillus flavus* یعنی R5 و KK11، برای آلوده نمودن مغز پسته ها، به طور جداگانه، استفاده شد. جدایه ها از کلکسیون قارچی گروه گیاه پزشکی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران تهیه شدند. به عبارت دیگر، تعدادی از پسته ها به عنوان نمونه های سالم در نظر گرفته شد، تعدادی توسط قارچ *Aspergillus flavus* جدایه KK11 و بقیه آنها به جدایه R5 از قارچ *Aspergillus flavus* آلوده شدند. جدایه R5 قابلیت تولید سم آفلاتوکسین را داشته، در حالی که KK11 قادر به تولید این سم نیست. در مجموع یک طبقه پسته سالم، هفت طبقه پسته آلوده به جدایه R5 از آلوده یک روزه تا هفت روزه و هفت طبقه پسته آلوده به جدایه KK11 از آلوده یک روزه تا هفت روزه آماده شد. تعداد ۴۸ نمونه برای هر طبقه در نظر گرفته شد.

قبل از آلوده کردن پسته ها، نمونه ها با استفاده از اتوکلاو در به مدت ۲۰ دقیقه دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس قارچ زدایی شدند. جدایه های مورد نظر به طور جداگانه برای آماده سازی محلول اسپور استفاده شد. پس از قرار دادن نمونه های پسته در محلول، در ظروف شیشه ای قرار داده شدند. برای فراهم آوردن محل مناسب رشد قارچ از انکوباتور به مدت هفت روز استفاده شد (Kheiralipour et al., 2015).

### سامانه تصویربرداری فراطیفی

در تصویر برداری فراطیفی، مشابه اسپکتروسکوپی یا طیف سنجی فرورسرخ<sup>۲</sup>، اموج در طول موج های پیوسته در فواصل ۵ تا ۱۰ نانومتری بین ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ nm دریافت و ثبت می شود. تفاوت این دو روش در این است که در طیف سنجی جذب تک نقطه ای

در زمینه تشخیص بیماری و آلودگی در محصولات کشاورزی، تصویربرداری فراطیفی برای تشخیص قارچ در گندم (Singh et al., 2007)، مرکبات (Siripatrawan & Gomez-Sanchis et al., 2008)، برنج (Gomez-Sanchis et al., 2008)، و ذرت (Chu et al., 2020) تشخیص آسیب در گندم توسط حشرات (Singh, 2009)، آسیب داخلی بادام (Li et al., 2011) و خرابی مرکبات (Nakariyakul and Casasent, 2011)، فساد باکتریایی در گوشت گاو (Peng et al., 2011; al., 2016)، استفاده شده است. (ElMasry et al. 2012)

پسته با نام علمی *Pistacia vera* یکی از مهم ترین محصولات کشاورزی در ایران است. سطح زیرکشت، میزان تولید و صادرات بالا، خواص مهم و نقش اجتماعی و زیست محلی پراهمیت پسته سبب شده است تا این محصول به عنوان یکی از مهم ترین و معروف ترین خشکبارها در کشور به حساب آید (Anonymous, 2011; Zijuan, 2011). سطح زیرکشت پسته در ایران ۸۲۵/۲۹ هزارهکتار بوده که از این نظر رتبه اول را در جهان دارا است و امریکا و ترکیه با اختلاف زیادی به ترتیب با سطح زیرکشت ۱۰۶/۸۴ و ۷۰/۰۹ هزارهکتار در جایگاه دوم تا سوم قرار دارند. همچنین رتبه اول تولید سالانه پسته در جهان به ایران تعلق دارد (۵۵۱/۳۱ هزارتن) و امریکا و ترکیه به ترتیب با تولید سالانه ۴۴۷/۷۰ و ۲۴۰/۰۰ هزارتن در رتبه های بعدی قرار دارند (FAO, 2018).

یکی از مشکلات اصلی در این حوزه، وجود سم آفلاتوکسین در مغز پسته است (Bahar and Altuğ, 2012). سم آفلاتوکسین از نظر بیولوژیکی مخرب بوده و مشکلاتی مانند سرطان زایی، ناقص الخلقه زایی، جهش زایی، ایجاد مسمومیت کلیوی و کبدی و اثر تضعیف کننده گی سیستم ایمنی بدن را ایجاد می کند و همچنین دارای اثرات نامطلوب بیوشیمیایی مانند اختلال در متابولیسم کربوهیدرات و چربی، متابولیسم انرژی، و سنتز پروتئین و اسید نوکلئیک است (Sweeney et al., 2000). از آن جا که منشاء سم آفلاتوکسین قارچ اسپرژیلوس از جمله *Aspergillus flavus* است (Sommer et al., 1986)، تشخیص این قارچ در محصولات کشاورزی به منظور از بین بردن آن، در صورت امکان قبل از تولید سم آفلاتوکسین، ضروری می باشد (Kheiralipour, 2012).

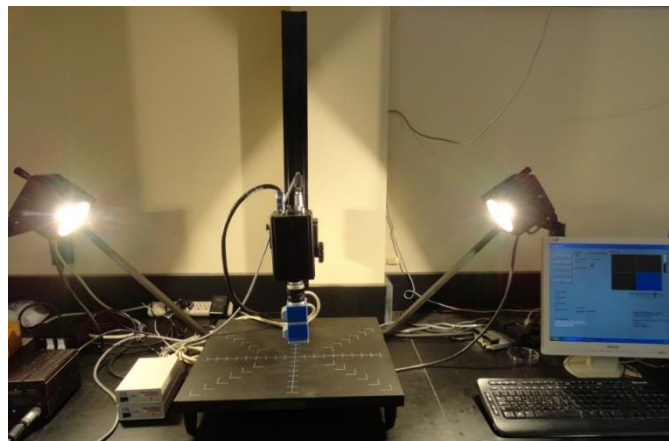
با توجه به اهمیت پسته و اثر نامطلوب قارچ بر آن، تحقیق حاضر به منظور تشخیص قارچ در پسته صورت گرفته است. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر، به کارگیری فناوری تصویربرداری

ماساچوست، آمریکا<sup>۶</sup>) با گستره قابل تنظیم ۹۰۰ تا ۱۷۰۰ nm (شماره ۳) و یک منبع نوری شامل دو لامپ هالوژن تنگستن (شرکت لایتینگ یوشیو، سیپرس، کالیفرنیا، آمریکا<sup>۵</sup>) با توان W ۳۰۰ است (شماره ۴). در این سامانه از یک رایانه اپتیکس دل (GX280 Intel(R)<sup>۶</sup> (شرکت دل، روند راک، تی.اکس، آمریکا<sup>۷</sup>) استفاده شد (شماره ۵). از یک قاب اکتساب داده رقمی (مدل ان آی پی سی آی-۱۴۲۲، شرکت نشنال اینسترومنتیشن، آستین، تگزاس، آمریکا<sup>۸</sup>) سازگار با علامت‌های RS-422 تولید شده توسط دوربین، برای اتصال دوربین و رایانه استفاده شد. حداقل تفکیک-پذیری این سامانه ۰/۰۱ nm است.

بخش نرم‌افزاری شامل برنامه‌ای برای اکتساب فرامکعب‌ها و ذخیره‌سازی آن‌ها در محیط لبویو (شرکت نشنال اینسترومنتیشن، آستین، تگزاس، آمریکا<sup>۹</sup>) بود. این برنامه تنظیمات سامانه تصویربرداری فراطیفی، گستره طول موج و تعداد طول موج‌های مورد نظر برای اکتساب را در یک فایل ذخیره می-نماید (Singh, 2009).

اتفاق می‌افتد، اما در تصویربرداری فراطیفی جذب طیفی در یک توزیع مکانی  $m \times n$  صورت گرفته و به صورت یک تصویر چند کاناله ارائه می‌شود. همچنین تصویربرداری چندطیفی<sup>۱</sup> نیز همانند تصویربرداری فراطیفی بوده؛ اما تعداد کانال‌های تصویر در در روش چندطیفی محدود است. برای مثال؛ تعداد کانال‌ها در تصویر برداری فراطیفی ۷۵ تا ولی در تصویربرداری چندطیفی سه تا است (Kheiralipour et al., 2018).

در تحقیق حاضر از سامانه تصویربرداری فراطیفی فروسرخ طول موج بلند (LWNIR) (گستره جذب طیف ۹۰۰ تا nm ۱۷۰۰) در گروه مهندسی بیوسیستمز، دانشگاه مانیتوبا، وینیپگ، مانیتوبا، کانادا، استفاده شد (شکل ۱). این سامانه شامل یک دوربین InGaAs خنک شونده الکتریکی (مدل: SU640-1.7RT-D، شرکت آنلیمیتد سنسورز، پرینستون، نیوجرسی، آمریکا<sup>۲</sup>) با اندازه آشکارساز  $۶۴۰ \times ۴۸۰$  پیکسل و ۲۷ mm (شماره ۱)، یک لنز ۲۵ میلی‌متری F1.4 C-mount (شرکت الکتروفیزیکز، فیرفیلد، نیوجرسی، آمریکا<sup>۳</sup>) (شماره ۲)، دو فیلتر طول موج متغیر LCTF (مدل MIR06، شرکت ریسرچ اند اینسترومنتیشن کمبریج، وبرن،



شکل ۱. سامانه تصویربرداری فراطیفی فروسرخ نزدیک طول موج بلند (Kheiralipour et al., 2017).

(Kheiralipour, 2012).

در تحقیق حاضر برنامه اکتساب تصویر برای گستره ۹۶۰ تا ۱۷۰۰ nm و فاصله بین لایه‌های تصویر برابر ۱۰ nm، تصویر ۷۵ کاناله، تنظیم شد. در هر مرحله از اکتساب تصویر، ابتدا تصویر مقوای مشکی به عنوان پس‌زمینه ثبت شده و نرم‌افزار سامانه به طور خودکار تصویر پس‌زمینه مشکی را از تصاویر نمونه‌ها کم نمود. پس از آن، تصویر فراطیفی صفحه سفید استاندارد

### اکتساب تصاویر فراطیفی

در تصویربرداری فراطیفی اطلاعات مکانی در ده‌ها طول موج ناحیه فروسرخ نزدیک (که به دو منطقه طول موج بلند و طول موج کوتاه تقسیم می‌شود) به طور پیوسته دریافت و ثبت می‌شود. تصاویر فراطیفی نیز همانند تصاویر چندطیفی با سه مشخصه توصیف می‌شوند که دو مشخصه اول ابعاد مکانی و بعد سوم مربوط به طول موج‌های دریافت شده است. داده‌های مربوط به تصاویر سه بعدی فراطیفی، فرامکعب<sup>۱۰</sup> نامیده می‌شوند

6. Dell Optiplex GX280 Intel(R)  
7. Dell Inc., Round Rock, TX, USA  
8. NI PCI-1422, National Instruments Corp., Austin, TX, USA  
9. LabVIEW, Version 1, National Instruments Corp., Austin, TX, USA  
10. Hypercube

1. Multispectral imaging technique  
2. Model no. SU640-1.7RT-D, Sensors Unlimited Inc., Princeton, NJ, USA  
3. Electrophysics Corp., Fairfield, NJ, USA  
4. MIR06, Cambridge Research and Instrumentation Inc., Woburn, MA, USA  
5. Ushio Lighting Inc., Cypress, CA, USA

مطرح شد و توسط Hotelling, (1933) توسعه یافت. این روش برای تجزیه و تحلیل داده‌ها به منظور پیش‌بینی بدون سرپرست و کاهش ابعاد داده‌ها (ترکیب داده‌ها) استفاده می‌شود. ورودی این روش یک مجموعه نقطه داده و خروجی آن شامل تعدادی مولفه اصلی است که در واقع همان بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس داده‌ها هستند و با ترکیب ویژه ماتریس کوواریانس داده‌ها یا تجزیه مقدار واحد ماتریس داده محاسبه می‌شوند. در این روش هر نقطه داده بر روی چند مولفه اصلی اول، با حفظ حداکثر واریانس بین داده‌های اولیه، نگاشته می‌شود. اولین مولفه اصلی معادل جهتی است که حداکثر واریانس داده‌های نگاشت شده را دارا می‌باشد مولفه اصلی  $n$  جهتی است که متعام بر اولین  $n-1$  مولفه اصلی قبل از خود بوده که حداکثر واریانس بین داده‌ها را نشان می‌دهد (Jolliffe, 2002).

برنامه سوم مشابه برنامه دوم بوده با این تفاوت که در این جا از روش تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده نشده، اما ویژگی‌های حداکثر، حداقل، میانگین، میانه، واریانس و انحراف استاندارد فقط در طول موج‌های انتخابی استخراج شدند. در نهایت، این برنامه ویژگی‌های استخراج شده تمام نمونه‌های پسته را در فایل‌های اکسل (هر فایل مربوط به یک طبقه) ذخیره نمود.

علاوه بر سه برنامه بالا که برای پردازش و استخراج ویژگی‌های تصاویر فراطیفی استفاده شد، سه برنامه برای طبقه بندی داده‌های به دست آمده بر اساس روش‌های ماشین بردار پشتیبان<sup>۴</sup> (SVM)، اعتبارسنجی  $k$ -بخشی<sup>۵</sup> (KFCV) و شبکه عصبی مصنوعی<sup>۶</sup> (ANN) در نرم افزار متلب کد نویسی شد.

ماشین‌های بردار پشتیبان در چارچوب نظریه یادگیری آماری برای جدا کردن دو مجموعه یا طبقه با استفاده از یک فرافصله<sup>۷</sup> (یا ابرصفحه) توسعه یافته است (Vapnik, 1995). این روش در ابتدا برای جدا کردن دو طبقه به صورت خطی ارائه شد و پس از آن به صورت غیرخطی و سپس برای طبقه بندی بیش از دو طبقه (چندطبقه ای) توسعه یافت (Burges, 1998; Cristianini & Shawe-Taylor, 2000; Campbell, 2002; Lin & Lin, 2003). روش ماشین بردار پشتیبان برای طبقه بندی داده‌های بیش از دو طبقه در تحقیقات مختلف به کار رفته است (Farokhzad et al., 2017) که شامل "یکی در برابر بقیه" (SVM1) و "یکی در برابر یکی" (SVM2) است. در هر دو روش از تابع هسته گاوسی برای پیدا کردن فرافصله استفاده شد. دو

اسپکترالون<sup>۱</sup> با انعکاس ۹۹٪ (شرکت لیسفر، نورت ساتون، نیوهمپشایر، آمریکا<sup>۲</sup>) قبل و بعد از ثبت فرامکعب‌های پسته در هر مرحله ثبت شد.

### تحلیل تصاویر فراطیفی

روش‌های تحلیلی همراه با پردازش تصویر به منظور کاهش ابعاد فرامکعب‌ها، انتخاب طول موج‌های کارا، استخراج ویژگی‌ها، و توسعه مدل‌های واسنجی و طبقه بندی استفاده می‌شود (Singh, 2009). در تحقیق حاضر سه برنامه در نرم‌افزار متلب (MATLAB 2010a) توسعه یافت.

اولین برنامه برای فراخوانی و تحلیل دو تصویر فراطیفی صفحه‌های سفید بود که قبل از شروع و پس از پایان هر مرحله (روز) تصویربرداری اکتساب شد. این برنامه پس از فراخوانی، میانگین شدت پیکسل آن‌ها را به دست آورده و سپس نتایج حاصل در تمام طول موج‌های مورد نظر را ذخیره نمود. این کار برای دستیابی به میزان انعکاس نمونه‌های پسته ضروری است تا میانگین تصاویر سفید از تمام تصاویر فراطیفی نمونه‌های پسته کم شود.

در برنامه دوم داده‌های مربوط به میانگین تصاویر سفید، و سپس تمام تصاویر فراطیفی نمونه‌های پسته به طور خودکار فراخوانی شد. در این برنامه کانال اول هر تصویر یعنی در طول موج ۹۶۰ nm (شکل ۲-الف)، به تصویر شدت خاکستری تبدیل شد (شکل ۲-ب). بعد از آن، با استفاده از آستانه ۵۰ درصد تصاویر شدت خاکستری به تصاویر سیاه و سفید تبدیل (شکل ۲-پ) و سپس نقاط اضافی موجود در آن حذف شدند (شکل ۲-ت). نمونه‌های پسته در هر تصویر شماره گذاری شده و به رنگ‌های مختلف نمایش داده شدند. در ادامه، هر فرامکعب بر میانگین شدت پیکسل صفحه‌های سفید مربوطه تقسیم شده و سپس میانگین شدت پیکسل‌های هر نمونه پسته در تمام طول موج‌های مورد نظر استخراج شد. روش تحلیل مولفه‌های اصلی<sup>۳</sup> (PCA) برای به دست آوردن مولفه‌های اصلی (یا عامل‌های بارگذاری) اول و دوم استفاده شد. در نهایت این برنامه مولفه‌های اصلی را در فایل اکسل ذخیره نمود. با استفاده از این مولفه‌های اصلی طول موج‌ها برای استخراج ویژگی‌های مورد نظر تصاویر فراطیفی نمونه‌های پسته انتخاب شدند.

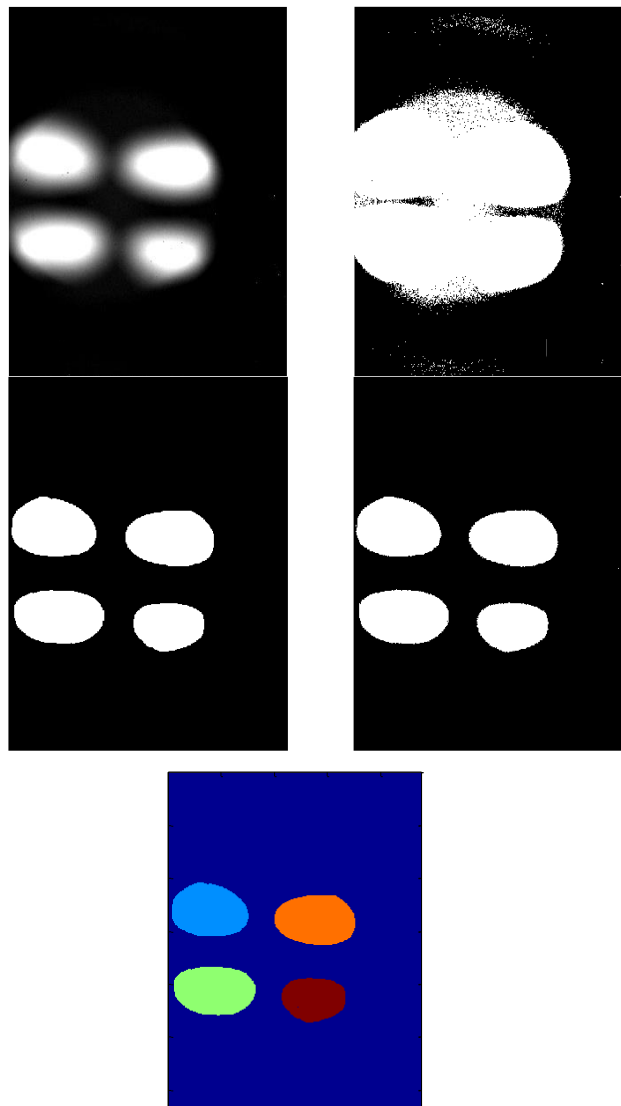
تحلیل مولفه‌های اصلی ساده‌ترین تحلیل واقعی چندمتغیره مبتنی بر بردار ویژه است که توسط Pearson (1901)

6. Artificial neural network  
7. Hyperplane

1. Standard Spectralon reflectance panel  
2. Labsphere Inc., North Sutton, NH, USA  
3. Principal component analysis  
4. Support vector machine  
5. K-fold cross validation

سوم داده‌ها برای آموزش شبکه و یک سوم آن‌ها برای آزمون شبکه استفاده شد. اعتبارسنجی (برآورد چرخشی<sup>۱</sup>) روشی آماری برای پیش بینی و طبقه بندی است به گونه ای که هر بخش (مرحله) اعتبارسنجی شامل بخش بندی داده‌ها به زیر مجموعه‌های مکمل، تحلیل یکی از زیرمجموعه‌ها (به نام مجموعه آموزشی)، و اعتبارسنجی آن تحلیل به زیرمجموعه دیگر (به نام مجموعه اعتبارسنجی و یا مجموعه آزمون) است. مراحل متعدد اعتبارسنجی با استفاده از تقسیم بندی‌های مختلف انجام و سپس میانگین تمام نتایج اعتبارسنجی محاسبه می‌شود (Grossman)

در اعتبارسنجی K-بخشی، مجموعه داده‌های اصلی به طور تصادفی به K زیرمجموعه تقسیم می‌شود که یکی از زیرمجموعه‌ها به عنوان داده‌های اعتبارسنجی برای آزمون مدل، و بقیه زیرمجموعه‌ها (K-1 زیرمجموعه) به عنوان داده‌های آموزش در نظر گرفته می‌شود. از آن جا که روش اعتبارسنجی ۱۰-بخشی معروف بوده و توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته (McLachlan *et al.*, 2004)، بنابراین در تحقیق حاضر نیز ۱۰ مرحله برای آموزش و آزمون مدل طبقه بند مورد نظر در نظر گرفته شد.



شکل ۲. پردازش تصاویر فراطیفی پسته، الف) تصویر فراطیفی پسته سالم در طول موج ۹۶۰ nm، ب) تصویر شدت خاکستری، پ) تصویر سیاه و سفید، ت) حذف نقاط اضافی در تصویر سیاه و سفید، ث) تصویر کدگذاری شده.

شده است (McCulloch & Pitts, 1943). در این روش مدل هوشمندی با ایجاد ارتباطات وزنی میان داده های ورودی و هدف

شبکه عصبی مصنوعی یک روش محاسباتی است که برای فرمول نویسی آن از شبکه های عصبی بیولوژیکی مغز الهام گرفته

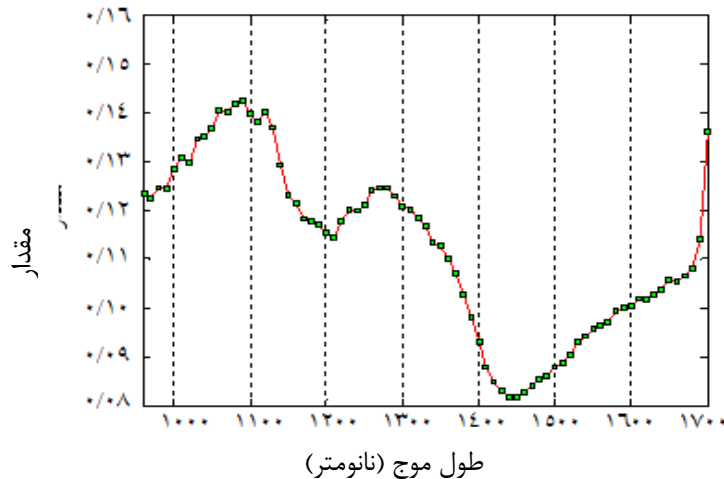
### انتخاب طول موج موثر

مولفه‌های اصلی اول و دوم نمونه‌های پسته در تمام طول موج‌ها برای ۱۵ طبقه مختلف، یعنی پسته سالم، آلوده به جدایه KK11 از یک روزه تا هفت روزه، و آلوده به جدایه R5 از یک روزه تا هفت روزه، محاسبه شد. میانگین این مولفه‌های اصلی به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

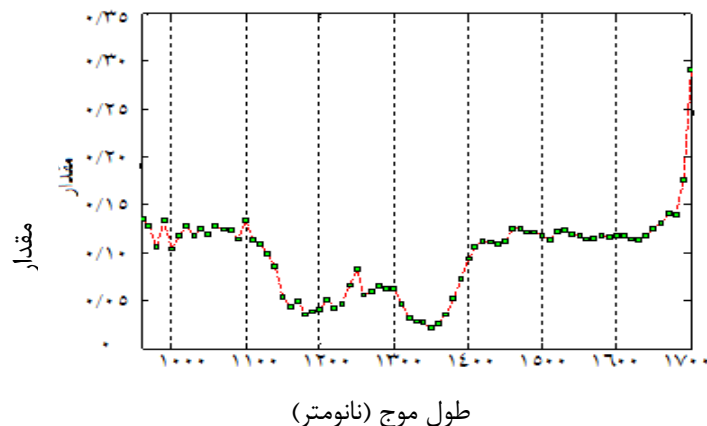
طول موج قله در شکل‌های (۳) و (۴) به عنوان طول موج موثر انتخاب شد. بر این اساس، بزرگترین قله‌های موجود در شکل (۳) (دو طول موج) و شکل (۴) (یک طول موج) به عنوان طول موج موثر انتخاب شدند. بنابراین ویژگی‌های تصاویر فراطیفی تمام نمونه‌های پسته در طول موج‌های ۱۰۹۰، ۱۲۸۰ و ۱۷۰۰ nm استخراج و طبقه‌بندی شدند.

نمونه‌های معلوم آموزش داده می‌شود. ارتباطات وزنی شبکه مطابق با یک قانون یادگیری و با استفاده از خطای محاسبه شده تنظیم می‌شود. پس از تنظیمات پی‌درپی به منظور ارائه خروجی نزدیک به هدف، آموزش شبکه بر اساس معیارهای خاصی خاتمه می‌یابد. در تحقیق حاضر، از مدل لونبرگ-مارکوات برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد؛ چرا که این روش آموزش سریع‌تر و دقیق‌تر از الگوریتم پس‌انتشار استاندارد است و همچنین داده‌های ورودی کمتری برای آموزش نیاز دارد (Kheiralipour & Pormah, 2017).

### نتایج و بحث



شکل ۳. میانگین مولفه اصلی اول طبقه‌های مختلف پسته.



شکل ۴. میانگین مولفه اصلی دوم طبقه‌های مختلف پسته.

*Aspergillus flavus* در مراحل مختلف رشد قارچ با در نظر گرفتن نوع جدایه به طور جداگانه و بدون در نظر گرفتن نوع جدایه طبقه‌بندی شد. نتایج طبقه‌بندی بدون در نظر گرفتن جدایه در جدول (۱)، جدایه KK1 در جدول (۲) و جدایه R5 در جدول (۳)

### طبقه‌بندی

#### طبقه‌بندی مراحل مختلف رشد قارچ

تصاویر فراطیفی نمونه‌های پسته سالم و پسته‌های آلوده به قارچ

روش SVM (۹۴/۷۱-۹۷/۹۴ درصد) از روش ANN (۸۴-۰/۰۰) ۸۸/۴۰ درصد) بالاتر بود. این نتیجه نشان می‌دهد که روش مورد استفاده در تحقیق حاضر می‌تواند با دقت بالایی آلودگی در مراحل اولیه رشد قارچ (بدون در نظر گرفتن نوع جدایه) را تشخیص دهد. دقت تشخیص روش مورد استفاده ۹۸/۸۳ درصد برای تشخیص اولین روز رشد قارچ از سایر مراحل آلودگی و ۹۵/۷۴ درصد برای تشخیص اولین روز، و دومین تا سومین روز آلودگی از سایر مراحل رشد قارچ بود.

برای طبقه‌بندی هشت‌راهه روش SVM1 (یکی در برابر یکی) دارای بالاترین نرخ طبقه‌بندی صحیح بود (۷۶/۴۷ درصد) که اختلاف زیادی با روش KFCV (۷۶/۲۱ درصد) را نشان نمی‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که حداکثر با دقت ۷۶/۴۷ درصد می‌توان مراحل مختلف رشد قارچ از یک روزه تا هفت روزه را بدون در نظر گرفتن نوع جدایه از هم تشخیص داد.

بالاترین نرخ طبقه‌بندی صحیح در طبقه‌بندی دوراهه تشخیص پسته سالم و آلوده به قارچ جدایه KK11 توسط روش KFCV (۹۸/۵۵ درصد) به دست آمد. بعد از این روش، روش‌های SVM و ANN به ترتیب با دقت ۹۷/۰۹ و ۹۶/۸۰ درصد قرار داشتند. برای طبقه‌بندی سه‌راهه نیز روش KFCV دارای بالاترین نرخ طبقه‌بندی صحیح یعنی ۹۸/۲۶ درصد بود. برای طبقه‌بندی چهار و هشت‌راهه نیز بالاترین دقت طبقه‌بندی توسط این روش به ترتیب ۹۵/۳۶ و ۷۶/۲۳ درصد به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که هر چند دقت تشخیص آلودگی در حالت بدون در نظر گرفتن نوع جدایه بالاتر است؛ اما دقت طبقه‌بندی آلودگی توسط قارچ جدایه KK11 نیز بالا می‌باشد.

جدول ۲. طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی پسته سالم و آلوده به جدایه KK11 در مراحل مختلف آلودگی.

نوع طبقه-بندی	نرخ طبقه‌بندی صحیح (%)			
	ANN	SVM2	SVM1	KFCV*
دوراهه	۹۶/۸	۹۷/۱	۹۷/۱	۹۸/۶
سه‌راهه	۹۱/۹	۹۵/۴	۹۳/۶	۹۸/۳
چهارراهه	۸۳/۲	۹۰/۱	۸۷/۲	۹۵/۴
هشت‌راهه	۵۴/۲	۶۱/۶	۶۴/۵	۷۶/۲

\*KFCV, SVM1, SVM2, و ANN به ترتیب نشان دهنده مدل طبقه‌بندی بر اساس اعتبار سنجی K-بخشی، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر بقیه، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر یکی، و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد.

بالاترین نرخ طبقه‌بندی صحیح برای طبقه‌بندی دوراهه پسته سالم و آلوده به قارچ جدایه R5 از آن روش KFCV و برابر با ۹۹/۴۶ درصد به دست آمد. برای دیگر انواع طبقه‌بندی پسته سالم و آلوده به جدایه R5 نیز این روش دارای بالاترین دقت

آورده شده است. در این قسمت، چهار نوع طبقه‌بندی برای بررسی دقت تشخیص قارچ بر روی مغز پسته، در نظر گرفته شد:

۱- طبقه‌بندی دوراهه شامل ۱- پسته سالم و ۲- پسته آلوده به قارچ بدون در نظر گرفتن مرحله (روز) آلودگی، برای ارزیابی دقت تشخیص پسته سالم و آلوده.

۲- طبقه‌بندی سه‌راهه شامل ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده یک روزه، ۳- پسته آلوده دو روزه تا هفت روزه. برای ارزیابی دقت تشخیص پسته سالم و آلوده یک روزه و بیش از یک روزه.

۳- طبقه‌بندی چهارراهه شامل طبقه‌بندی ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده یک روزه، ۳- پسته آلوده دو و سه روزه و ۴- پسته آلود چهار تا هفت روزه، برای ارزیابی دقت تشخیص پسته سالم، پسته آلوده در مراحل اولیه رشد قارچ و پسته آلوده در مراحل تکمیلی رشد قارچ. این نوع طبقه‌بندی به این دلیل صورت گرفته است که معمولاً قارچ‌ها بعد از گذشت سه روز سم تولید می‌کنند.

۴- طبقه‌بندی هشت‌راهه شامل ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده یک روزه، ۳- پسته آلوده دو روزه، ... و ۸- پسته آلوده هفت روزه، برای تشخیص همه انواع پسته سالم و آلوده.

جدول ۱. طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی پسته سالم و آلوده به قارچ بدون در نظر گرفتن نوع جدایه.

نوع طبقه-بندی	نرخ طبقه‌بندی صحیح (%)			
	ANN	SVM2	SVM1	KFCV*
دوراهه	۹۶/۶	۹۹/۷	۹۹/۷	۹۹/۳
سه‌راهه	۸۸/۴	۹۷/۹	۹۷/۹	۹۸/۸
چهارراهه	۸۴/۰	۹۴/۴	۹۴/۷	۹۵/۷
هشت‌راهه	۵۹/۲	۷۴/۴	۷۶/۵	۷۶/۲

\*KFCV, SVM1, SVM2, و ANN به ترتیب نشان دهنده مدل طبقه‌بندی بر اساس اعتبار سنجی K-بخشی، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر بقیه، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر یکی، و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد.

برای طبقه‌بندی پسته‌های آلوده بدون در نظر گرفتن نوع جدایه، بالاترین نرخ طبقه‌بندی صحیح مربوط به طبقه‌بندی دوراهه توسط روش SVM و سه و چهارراهه توسط روش KFCV به ترتیب با دقت ۹۹/۷۱، ۹۸/۸۳، و ۹۵/۷۴ درصد به دست آمد. در طبقه‌بندی دوراهه بعد از این روش، روش‌های KFCV (۹۹/۲۷ درصد) و ANN (۹۶/۶۰ درصد) قرار دارند. نتایج طبقه‌بندی دو راهه نشان می‌دهد که تصاویر فراطیفی به کمک روش SVM می‌تواند با دقت بالاتری پسته سالم را از آلوده به قارچ (بدون در نظر گرفتن نوع جدایه) تشخیص دهد.

در طبقه‌بندی‌های سه و چهارراهه بدون در نظر گرفتن نوع جدایه، کارایی روش KFCV به ترتیب با دقت ۹۸/۸۳ و ۹۵/۷۴ درصد از سایر روش‌های طبقه‌بندی بالاتر بود همچنین دقت



برای ارزیابی دقت تشخیص پسته سالم، پسته آلوده در روز اول رشد قارچ و پسته آلوده در مراحل تکمیلی رشد قارچ انجام شده است.

۴- طبقه‌بندی هفت‌راهه شامل ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز اول، ۳- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز دوم تا سوم، ۴- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز چهارم تا هفتم، ۵- پسته آلوده به جدایه R5 در روز اول، ۶- پسته آلوده به جدایه R5 در روز دوم تا سوم، و ۷- پسته آلوده به جدایه R5 در روز چهارم تا هفتم. دلیل انجام این طبقه‌بندی ارزیابی توانایی تمایز پسته‌های آلوده با و بدون تولید سم است؛ چرا که معمولاً قارچ‌ها بعد از گذشت سه روز سم تولید می‌کنند.

۵- طبقه‌بندی پانزده‌راهه شامل ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز اول، ۳- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز دوم، ... و ۸- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز هفتم، ۹- پسته آلوده به جدایه R5 در روز اول، ۱۰- پسته آلوده به جدایه R5 در روز دوم، ... و ۱۵- پسته آلوده به جدایه R5 در روز هفتم، برای تشخیص همه انواع پسته سالم و آلوده با در نظر گرفتن نوع جدایه و مراحل مختلف رشد قارچ.

در این جا نیز روش KFCV برای تمام انواع طبقه‌بندی، به جزء در طبقه‌بندی سه‌راهه، دارای بالاترین دقت در طبقه‌بندی دو نوع جدایه با و بدون در نظر گرفتن مراحل مختلف آلودگی بود. دقت پایین‌تر به ترتیب از آن روش‌های SVM و ANN بود. روش KFCV برای طبقه‌بندی دوراهه یعنی پسته آلوده به جدایه KK11 و R5 در همه مراحل آلودگی (بدون در نظر گرفتن مراحل آلودگی) دارای نرخ طبقه‌بندی صحیح ۶۹/۵۰ درصد بود. دقت این مدل طبقه‌بند برای طبقه‌بندی سه‌راهه اندکی افزایش یافت (۷۰/۷۸ درصد) اما دقت روش SVM از آن بالاتر بود (۷۱/۷۶ درصد). دلیل این افزایش شدن طبقه سوم یعنی داده‌های مربوط به پسته سالم بوده که دارای ماهیت متفاوتی نسبت به پسته‌های آلوده است. نتایج مربوط به روش‌های KFCV و SVM1 در طبقه‌بندی پنج‌راهه نیز نسبت به طبقه‌بندی سه‌راهه افزایش یافت و به ترتیب برابر ۷۱/۸۱ و ۷۵/۳۵ درصد بود. علت این افزایش جدا نمودن پسته‌های آلوده یک روزه از آلودگی در سایر مراحل بود؛ اما کارایی روش KFCV در طبقه‌بندی هفت‌راهه حدود ۴ درصد (۷۱/۷۰ درصد) و در طبقه‌بندی پانزده‌راهه بیش از ۱۰ درصد (۶۰/۰۶ درصد) کاهش یافت. علت این امر کاهش توان تمایز با افزایش طبقه‌های مشابه است. با در نظر گرفتن متوسط پاسخ‌ها در انواع طبقه‌بندی، روش KFCV تواناترین روش برای طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی پسته سالم و آلوده به قارچ بود. پس از این روش، روش‌های SVM و ANN قرار داشتند.

طبقه‌بندی بود (۴۶/۶۰-۹۹/۹۱ درصد). اکثر روش‌های طبقه‌بندی در جدول (۳) دارای نرخ طبقه‌بندی صحیح بالاتری نسبت به جدول (۲) بود. این امر بدین معنی است که توانایی روش فراطیفی برای تشخیص آلودگی توسط جدایه R5 بیشتر از آن جدایه KK11 است.

جدول ۳. طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی پسته سالم و آلوده به جدایه R5 در مراحل مختلف آلودگی.

نوع طبقه-بندی	نرخ طبقه‌بندی صحیح (%)		
	ANN	SVM2	SVM1
دوراهه	۹۶/۲	۹۸/۹	۹۸/۹
سه‌راهه	۹۱/۶	۹۸/۹	۹۸/۹
چهارراهه	۸۷/۳	۹۷/۳	۹۶/۷
هشتراهه	۶۸/۳	۸۴/۲	۸۵/۹

\*KFCV, SVM1, SVM2, و ANN به ترتیب نشان دهنده مدل طبقه‌بندی بر اساس اعتبار سنجی K-بخشی، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر بقیه، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر یکی، و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد.

با توجه به جداول (۱) تا (۳)، مشاهده می‌شود که روش فراطیفی دارای توانایی بالایی در تمایز بین پسته سالم، با آلوده به قارچ در مراحل یک تا سه روزه، و آلودگی بیشتر از سه روز است. در این جا روش طبقه‌بندی KFCV کارایی بهتری نسبت به دو روش دیگر را نشان داد.

طبقه‌بندی نوع جدایه با در نظر گرفتن مراحل مختلف رشد قارچ نتایج طبقه‌بندی پسته سالم و آلوده به جدایه‌های KK11 و R5 با و بدون در نظر گرفتن مراحل رشد قارچ در جدول (۴) نشان داده شده است. در این قسمت، چند نوع طبقه‌بندی در نظر گرفته شد:

۱- طبقه‌بندی دوراهه شامل ۱- پسته آلوده به جدایه KK11 در همه مراحل آلودگی و ۲- پسته آلوده به جدایه R5 در همه مراحل آلودگی، برای ارزیابی دقت تشخیص نوع جدایه بدون در نظر گرفتن مرحله (روز) آلودگی.

۲- طبقه‌بندی سه‌راهه شامل ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده به جدایه KK11 در همه مراحل آلودگی، و ۳- پسته آلوده به جدایه R5 در همه مراحل آلودگی، برای ارزیابی دقت تشخیص پسته سالم و آلوده به دو جدایه بدون در نظر گرفتن مرحله آلودگی.

۳- طبقه‌بندی پنج‌راهه شامل طبقه‌بندی ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز اول، ۳- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز دوم تا هفتم، ۴- پسته آلوده به جدایه R5 در روز اول، و ۵- پسته آلوده به جدایه R5 در روز دوم تا هفتم،

به طوری که بهتر است روزهای سوم و سوم به بعد رشد قارچ را یک مرحله در نظر گرفت.

جدول ۵. طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی پسته سالم و پسته آلوده در مراحل مختلف رشد قارچ *Aspergillus flavus* با و بدون در نظر گرفتن نوع جدایه.

نوع طبقه‌بندی	نرخ طبقه‌بندی صحیح (%)			
	ANN	SVM2	SVM1	KFCV*
چهارراهه ۱	۶۳/۶	۱۵/۹	۱۵/۹	۷۳/۱
چهارراهه ۲	۶۵/۵	۲۸/۵	۲۹/۱	۷۳/۹
چهارراهه ۳	۷۲/۸	۴۲/۷	۴۲/۹	۴۹/۷

\*KFCV, SVM1, SVM2 و ANN به ترتیب نشان دهنده مدل طبقه‌بندی بر اساس اعتبار سنجی K-بخشی، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر بقیه، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر یکی، و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد.

طبقه‌بندی نوع جدایه آلوده کننده در مرحله آخر رشد قارچ

به منظور بررسی توانایی روش تصویربرداری فراطیفی در تشخیص آلودگی پسته به سم آفلاتوکسین، تصاویر فراطیفی پسته‌های آلوده به دو نوع قارچ در آخرین مرحله از رشد قارچ (هفت روزه) طبقه‌بندی شدند. نتایج این طبقه‌بندی در جدول (۶) آمده‌اند. همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، دقت طبقه‌بندی روش‌های SVM, KFCV یکی در برابر یکی و یکی در برابر همه برابر (۷۵/۰۰ درصد) و بیشتر از آن روش ANN (۶۸/۸۰) است. از آن جا که جدایه R5 قادر به تولید سم آفلاتوکسین و جدایه KK11 این توانایی را ندارد، نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که می‌توان از روش تصویربرداری فراطیفی در تشخیص سم آفلاتوکسین در پسته استفاده کرد.

جدول ۶. طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی پسته آلوده به جدایه R5 و KK11 در پایان مرحله رشد قارچ.

ردیف	روش طبقه‌بندی	نرخ طبقه‌بندی صحیح (%)
۱	KFCV*	۷۵/۰
۲	SVM1	۷۵/۰
۳	SVM2	۷۵/۰
۴	ANN	۶۸/۸

\*KFCV, SVM1, SVM2 و ANN به ترتیب نشان دهنده مدل طبقه‌بندی بر اساس اعتبار سنجی K-بخشی، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر بقیه، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر یکی، و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد.

دقت طبقه‌بندی روش‌های به کار رفته توسط Lu (2003) در تشخیص لهیدگی سطح سیب با استفاده از تصویربرداری فراطیفی از ۵۹/۰۰ درصد بالاتر و حداکثر آن ۹۴/۰۰ درصد

جدول ۴. طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی پسته سالم و آلوده به جدایه‌های مختلف *Aspergillus flavus* در مراحل مختلف رشد قارچ.

نوع طبقه‌بندی	نرخ طبقه‌بندی صحیح (%)			
	ANN	SVM2	SVM1	KFCV*
دوراهه	۶۷/۰	۶۵/۳	۶۵/۳	۶۹/۵
سه‌راهه	۶۳/۱	۷۱/۸	۷۱/۸	۷۰/۸
پنج‌راهه	۶۰/۴	۷۱/۵	۷۲/۴	۷۱/۸
هفت‌راهه	۵۵/۴	۶۸/۲	۶۷/۱	۷۱/۷
پانزده‌راهه	۳۹/۹	۵۵/۰	۵۶/۸	۶۰/۱

\*KFCV, SVM1, SVM2 و ANN به ترتیب نشان دهنده مدل طبقه‌بندی بر اساس اعتبار سنجی K-بخشی، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر بقیه، ماشین بردار پشتیبان یکی در برابر یکی، و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد.

طبقه‌بندی مراحل مختلف رشد قارچ با و بدون در نظر گرفتن نوع جدایه

در این بخش نتایج طبقه‌بندی پسته سالم و آلوده به قارچ در مراحل مختلف با و بدون در نظر گرفتن جدایه آلوده کننده در جدول (۵) آورده شده است تا کارایی الگوریتم پردازش تصویر فراطیفی و مدل‌های طبقه‌بندی در تمایز روزهای اول آلودگی با در نظر گرفتن جدایه قارچ ارزیابی شود. در جدول (۵) سه نوع طبقه‌بندی در نظر گرفته شد:

۱- طبقه‌بندی چهارراهه: ۱- طبقه‌بندی ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده یک روزه بدون در نظر گرفتن نوع جدایه، ۳- آلودگی بیشتر از یک روز به قارچ KK11 و ۴- آلودگی بیشتر از یک روز به جدایه R5.

۲- طبقه‌بندی چهارراهه: ۲- طبقه‌بندی ۱- پسته سالم، ۲- پسته آلوده یک و دو روزه بدون در نظر گرفتن نوع جدایه، ۳- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز دوم تا هفتم، و ۴- پسته آلوده به جدایه R5 در روز دوم تا هفتم.

۳- طبقه‌بندی چهارراهه: ۳- پسته سالم، ۲- پسته آلوده یک تا سه روزه بدون در نظر گرفتن نوع جدایه، ۳- پسته آلوده به جدایه KK11 در روز چهارم تا هفتم، و ۴- پسته آلوده به جدایه R5 در روز چهارم تا هفتم.

بالاترین دقت در انواع مختلف طبقه‌بندی ارائه شده در جدول (۵) برابر با ۷۲/۸۰ تا ۷۳/۸۶ درصد بود. در طبقه‌بندی چهارراهه ۱ و ۲ روش KECV دارای بالاترین نرخ طبقه‌بندی صحیح به ترتیب برابر با ۷۳/۱۳ و ۷۳/۸۶ درصد بود. بالاترین نرخ طبقه‌بندی صحیح برای طبقه‌بندی چهارراهه ۳ (۷۲/۸۰ درصد) مربوط به روش ANN بود. این نتایج نشان می‌دهند که با رشد بیشتر قارچ از یک تا سه روزه توانایی مدل‌های طبقه‌بندی در تشخیص مراحل آلودگی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است.

تصویربرداری رنگی طبقه بندی نمودند. در تشخیص قارچ در برنج، Li و Siripatrawan & Makino (2015) به دقت ۹۷/۰۰ درصد و Li (2016) در تشخیص خرابی مرکبات به دقت ۹۸/۶۰ درصد دست یافتند. در تحقیق حاضر، دقت طبقه بندی نمونه‌های پسته سالم و آلوده به قارچ بدون در نظر گرفتن مرحله آلودگی و نوع جدایه آلوده کننده برابر ۹۹/۷۱ درصد با استفاده از روش KFCV به دست آمد. با توجه به نتایج تحقیقات پیشین و همچنین نتایج طبقه‌بندی Gomez-Sanchis *et al.* (2008) و نتایج مربوط به طبقه‌بندی فقط تصاویر فراطیفی در تحقیق Singh *et al.* (2009)، نتایج تصویربرداری فراطیفی در تحقیق حاضر برای تشخیص آلودگی قارچی مغز پسته از نتایج تحقیق‌های پیشین بالاتر است.

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده روش تصویربرداری فراطیفی، تصاویر ۷۵ کاناله، از طیف الکترومغناطیس ۹۶۰ تا ۱۷۰۰ nm با فاصله ۱۰ nm، از مغز پسته‌های (رقم اکبری) سالم و آلوده به جدایه های KK11 و R5 قارچ *Aspergillus flavus* در مراحل مختلف آلودگی از یک روزه تا هفت روزه اکتساب شد.

پس از پردازش تصاویر به دست آمده، سه طول موج ۱۰۹۰، ۱۲۸۰ و ۱۷۰۰ nm به عنوان طول موج موثر انتخاب و سپس ویژگی‌های مختلفی از این سه کانال تصاویر استخراج شد.

پس از تحلیل، ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر با استفاده از روش‌های ماشین بردار پشتیبان، اعتبارسنجی K-بخشی و شبکه عصبی مصنوعی طبقه‌بندی شد. به طور متوسط دقت طبقه بندی روش اعتبارسنجی K-بخشی بالاتر سایر روش ها بود.

الگوریتم توسعه یافته برای پردازش تصاویر فراطیفی توانست با دقت بالایی (۹۹/۷۱ درصد توسط روش SVM) پسته سالم را از آلوده به قارچ بدون در نظر گرفتن نوع جدایه تشخیص دهد. این الگوریتم دارای توانایی بالایی در تمایز بین پسته سالم، آلوده به قارچ یک تا سه روزه، و آلودگی بیشتر از سه روز با دقت ۹۵/۷۴ درصد بدون در نظر گرفتن نوع جدایه، ۹۵/۳۶ درصد برای جدایه KK11 و ۹۷/۸۳ درصد برای جدایه R5 بود. همچنین دقت روش طبقه بندی پسته سالم و آلوده در تمام مراحل رشد قارچ توسط روش KFCV برای جدایه R5 (۹۱/۶۰) بیشتر از آن جدایه KK11 (۷۶/۲۳ درصد) و بدون در نظر گرفتن نوع جدایه آلوده کننده (۷۶/۲۱ درصد) بود.

هر چند توانایی تمایز همه ۱۵ طبقه مورد بررسی شامل پسته سالم و آلوده به هر دو نوع جدایه با در نظر گرفتن مراحل آلودگی (۶۰/۰۶ درصد) از تمایز دو جدایه آلوده کننده بدون در

گزارش شد. EIMasry *et al.* (2007) بالاترین دقت طبقه‌بندی را توسط روش‌های تحلیل تفکیک حدود ۸۹/۶۰ درصد در شناسایی مراحل رسیدگی توت فرنگی به وسیله تصویربرداری فراطیفی به دست آوردند. Mahesh *et al.* (2008) توانستند با دقت بیشتر از ۹۰/۰۰ درصد هشت نوع گندم را طبقه‌بندی نماید. آن‌ها گزارش دادند که طبقه‌بند تحلیل تفکیک خطی دارای بهترین دقت طبقه‌بندی بود. Choudhary *et al.* (2009) توانستند به بالاترین دقت طبقه‌بندی خود برای تمایز تصاویر فراطیفی انواع مختلف گندم با استفاده از روش طبقه‌بندی تحلیل تفکیک خطی (۹۹/۰۰ درصد) برسد. Gowen *et al.* (2009) برای شناسایی نمونه‌های قارچ منجمد با استفاده از روش تصویربرداری فراطیفی توانستند با دقت ۱۰۰/۰۰ درصد نمونه‌های قارچ سالم و ۹۵/۰۰ درصد نمونه‌های قارچ منجمد را تشخیص دهند. با توجه نتایج تحقیق Gowen *et al.* (2009)، در صورت برابر بودن تعداد نمونه‌های قارچ سالم و نمونه‌های قارچ منجمد می‌توان گفت که دقت طبقه‌بندی آن‌ها در تحقیق برابر ۹۸/۰۰ درصد بود. Singh (2009) تصاویر فراطیفی دانه‌های گندم سالم و آسیب دیده توسط حشرات را طبقه‌بندی نمودند و ایشان گزارش دادند که بالاترین دقت (از ۸۵/۰۰ تا ۱۰۰/۰۰ درصد) برای طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی گندم سالم و آسیب دیده از آن روش‌های تحلیل تفکیک خطی و درجه دوم و مربوط به طول موج‌های ۱۱۰۱/۶۹ و ۱۳۰۵/۰۵ نانومتر بود. Nakariyakul and Casasent (2011) با استفاده از تصویربرداری فراطیفی توانستند با دقت ۹۱/۲۰ درصد آسیب داخلی بادام را تشخیص دهند. بالاترین دقت پیش‌بینی Peng *et al.* (2011) برای تشخیص فساد باکتریایی در گوشت گاو برابر با ۹۵ درصد گزارش شد. EIMasry *et al.* (2012) توانستند با استفاده از روش تصویربرداری فراطیفی و روش برازش حداقل مربع جزئی ویژگی‌های  $a^*$ ،  $b^*$ ،  $i^*$ ، اسیدیته و نرمی گوشت را به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۸۸، ۰/۸۱، ۰/۷۳، و ۰/۸۳ پیش‌بینی نمایند. دقت طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی پسته سالم و پسته آلوده به قارچ بدون در نظر گرفتن نوع جدایه آلوده کننده و مراحل آلودگی توسط بیشتر روش‌های طبقه‌بندی در تحقیق حاضر بالای ۹۰/۰۰ درصد بود. ولی در تحقیق‌های گذشته فقط دقت تشخیص تعداد محدودی از آن‌ها بالاتر از ۹۰/۰۰ درصد بوده است.

دقت طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی در تحقیق Gomez-Sanchis *et al.* (2008) برای تشخیص آلودگی به قارچ پنیسیلیوم دیجیتالیم در مرکبات برابر با ۹۱/۰۰ درصد به دست آمده است. Singh *et al.* (2007) گندم سالم و آلوده به قارچ را با دقتی حدود ۹۸/۰۰ درصد با استفاده از روش تصویربرداری فراطیفی، و حدود ۹۹/۵۰ درصد را با استفاده از دو روش تصویربرداری فراطیفی و

سالم و آلوده به قارچ در مراحل یک، دو، سه و بیشتر از سه روز بود که می‌توان از این روش برای تشخیص سم آفلاتوکسین در پسته استفاده نمود.

### سپاسگزاری

از گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و گروه گیاه پزشکی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، البرز، ایران، و گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه مانیتوبا، وینیپگ، مانیتوبا، کانادا، به خاطر پشتیبانی از تحقیق حاضر قدردانی می‌شود.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

نظر گرفتن مرحله آلودگی (۶۹/۵۰ درصد) کمتر بود؛ اما کارایی این روش در تمایز پسته سالم، مراحل اولیه رشد قارچ، و مراحل نهایی آن (۳۵/۷۰-۷۲/۷۱ درصد) بیشتر بود. همچنین توانایی تمایز بین دو نوع جدایه آلوده کننده در روز هفتم آلودگی ۷۵/۰۰ درصد بود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با رشد بیشتر قارچ از یک تا سه روزه توانایی مدل‌های طبقه بند در تشخیص مراحل آلودگی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. به طوری که بهتر است روزهای سوم و سوم به بعد رشد قارچ را یک مرحله در نظر گرفت.

روش تصویربرداری فراطیفی و روش‌های طبقه‌بندی مورد استفاده در تحقیق حاضر دارای توانایی بالایی در طبقه‌بندی پسته

### REFERENCES

- Alizadeh, M., Pirsā, S., & Faraji, N. (2017). Determination of Lemon Juice Adulteration by Analysis of Gas Chromatography Profile of Volatile Organic Compounds Extracted with Nano-Sized Polyester-Polyaniline Fiber. *Food Analytical Methods*, 10, 2092-2101.
- Anonymous, (2011). Pistachio properties. At: <http://www.tebyan.net>.
- Bahar, B., & Altuğ, T. (2009). Carry-over of Aflatoxins to fig molasses from contaminated dried figs. *International Journal of Food Properties*, 12, 341-346.
- Burges, C.J.C. (1998). A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data mining and knowledge discovery*, 2(2), 121-167.
- Campbell, C. (2002). Kernel methods: a survey of current techniques. *Neurocomputing*, 48(1), 63-84.
- 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.
- Choudhary, R., Mahesh, S., Paliwal, J., & Jayas, D.S. (2009). Identification of wheat classes using wavelet features from near infrared hyperspectral images of bulk samples. *Biosystems Engineering*, 102, 115-127.
- Chu, X., Wang, W., Ni, X., Li, C., Li, Y. (2020). Classifying maize kernels naturally infected by fungi using near-infrared hyperspectral imaging. *Infrared Physics & Technology*, 105, 103242.
- Cristianini, N., & Shawe-Taylor, J. (2000). An Introduction to Support Vector Machines: and Other Kernel-Based Learning Methods, Cambridge University Press.
- ElMasry, G., Sun, D.W., & Allen, P. (2012). Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef. *Journal of Food Engineering*, 110, 127-140.
- ElMasry, G., Wang, N., ElSayed, A., & Ngadi, M. (2007). Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *Journal of Food Engineering*, 81, 98-107.
- FAO, 2018. At: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Farokhzad, S., Modarress Motlagh, A., Ahmadimoghadam, P., Jalali Honarmand, S., & Khaieralipour, K. (2017). Fungal infection in potato tuber using thermal imaging. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 48(3), 243-253.
- Farokhzad, S., Modarress Motlagh, A., Ahmadi moghadam, P., Jalali Honarmand, Khaieralipour, K. (2020). Application of infrared thermal imaging technique and discriminant analysis methods for non-destructive identification of fungal infection of potato tubers. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 88-94.
- Gomez-Sanchis, J., Gomez-Chova, L., Aleixos, N., Camps-Valls, G., Montesinos-Herrero, C., Molto, E., & Blasco, J. (2008). Hyperspectral system for early detection of rottenness caused by *Penicillium digitatum* in mandarins. *Journal of Food Engineering*, 89, 80-86.
- Gowen, A.A., Taghizadeh, M., & O'Donnell, C.P. (2009). Identification of mushrooms subjected to freeze damage using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 93, 7-12.
- Grossman, R., Seni, G., Elder, J., Agarwal, N., & Liu, H. (2010). Ensemble Methods in Data Mining: Improving Accuracy Through Combining Predictions". *Synthesis Lectures on Data Mining and Knowledge Discovery*. Morgan & Claypool. 2: 1-126.
- Heidarian, R. (2004). Comparison of *Aspergillus flavus* isolates based on vegetative compatibility and polymerase chain reaction groups of pistachio area in Kerman Province. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Persian).
- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 24, 417-441.
- Jolliffe, I.T. (2002). Principal Component Analysis.

- Springer Series in Statistics. New York: Springer-Verlag.
- 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, Iran. (In Persian).
- Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., & Rafiee, S. (2018). Thermal Imaging, Principles, Methods and Applications, 1<sup>st</sup> ed. Ilam University Publication, Ilam. (In Persian).
- Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., Rafiee, S., Javan-Nikkhah, M., & Jayas, D.S. (2013). Development of a New Threshold Based Classification Model for Analyzing Thermal Imaging Data to Detect Fungal Infection of Pistachio Kernel. *Agricultural Research*, 2(2): 127-131.
- 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., 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 & Foods*, 8, 129-135.
- Kheiralipour, K., & Abbas Pormah, A. (2017). Introducing new shape features for classification of cucumber fruit based on image processing technique and artificial neural networks. *Journal of Food Process Engineering*. 40(6), e12558.
- Kumar, A., Bharti, V., Kumar, V., Kumar, U., & Meena, P.D. (2016). Hyperspectral imaging: A potential tool for monitoring crop infestation, crop yield and macronutrient analysis, with special emphasis to Oilseed Brassica. *Journal of Oilseed Brassica*, 7(2), 113-12.
- Lin, K.M., & Lin, C.J. (2003). A Study on Reduced Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14(6), 1449-1459.
- Li, J., Huang, W., Tian, X., Wang, C., Fan, S., & Zhao, C. (2016). Fast detection and visualization of early decay in citrus using vis-NIR hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*. 127, 582-592.
- Lu, B., Dao, P.D., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture. *Remote Sensing*, 12, 2659.
- Lu, R. (2003). Detection of bruise on apples using near-infrared hyperspectral imaging. *Transactions of the ASAE*, 46, 523-530.
- Mahesh, S., Manickavasagan, A., Jayas, D.S., Paliwal, J., & White, N.D.G. (2008). Feasibility of near-infrared hyperspectral imaging to differentiate Canadian wheat classes. *Biosystems Engineering*, 101, 50-57.
- Manolakis, D., Marden, D., & Shaw, G.A. (2003). Hyperspectral image processing for automatic target detection applications. *Incoln Laboratory Journal*, 14, 79-116.
- McCulloch, W.S., & Pitts, W. (1943). A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115-133.
- McLachlan, G.J., Do, K.A., & Ambrose, C. (2004). Analyzing microarray gene expression data. Wiley. At: [http://en.wikipedia.org/wiki/Cross-validation\\_\(statistics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Cross-validation_(statistics)).
- Nakariyakul, S., & Casasent, D.P. (2011). Classification of internally damaged almond nuts using hyperspectral imagery. *Journal of Food Engineering*, 103, 62-67.
- Narvankar, D.S., Singh, C.B., Jayas, D.S., & White, N.D.G. (2009). Assessment of soft X-ray imaging for detection of fungal infection in wheat. *Biosystems Engineering*, 103, 49-56.
- Pearson, K. (1901). On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, 2(11): 559-572.
- Peng, Y., Zhang, J., Wang, W., Li, Y., Wu, J., Huang, H., Gao, X., & Jiang, W. (2011). Potential prediction of the microbial spoilage of beef using spatially resolved hyperspectral scattering profiles. *Journal of Food Engineering*, 102, 163-169.
- Pirsa, S., & Mohammad Nejad, F. (2017). Simultaneous analysis of some volatile compounds in food samples by array gas sensors based on polypyrrole nano-composites. *Sensor Review*, 37(2), 155-164.
- Singh, C.B. (2009). Detection of insect and fungal damage and incidence of sprouting in stored wheat using near-infrared hyperspectral and digital color imaging. Ph.D. Dissertation. University of Manitoba, Winnipeg, Canada.
- Singh, C.B., Jayas, D.S., Paliwal, J., & White, N.D.G. (2007). Fungal detection in wheat using near-infrared hyperspectral imaging. *Transactions of the ASAE*, 50, 2171-2176.
- Siripatrawan, U., & Makino, Y. (2015). Monitoring fungal growth on brown rice grains using rapid and nondestructive hyperspectral imaging. *International Journal of Food Microbiology*, 199, 93-100.
- Sweeney, M.J., Pamies, P., & Dobson, A.D.W. (2000). The use of reverse transcription-polymerase chain reaction (RT-PCR) for monitoring aflatoxin production in *Aspergillus parasiticus* 439. *Int J Food Microbiol*, 56, 97-103.
- Vapnik, V.N. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer, New York.
- Vejarano, R., Siche, R., & Tesfaye, w. (2017). Evaluation of biological contaminants in foods by hyperspectral imaging: A review. *International Journal of Food Properties*. 20(2), 1264-1297.
- Zijuan, Z. (2011). World production and trade of pistachios: the role of the U.S. and factors affecting the export demand of U.S. pistachios. M.Sc. Thesis. University of Kentucky, Lexington, KY, United States.