

تکنیک تصویر برداری ابرطیفی

نادر اکرامی راد^۱، رضا علیمردانی^{۲*}، سید سعید محتسبی^۳، افشین ایوانی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۲. استاد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۳. استاد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۴. استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲)

چکیده

امروزه تقاضا برای محصولات با کیفیت بالا افزایش یافته و استانداردهای سختگیرانه‌ای برای سلامت آنها وضع می‌شود. لذا برای ارتقاء صادرات انواع محصولات کشاورزی، استفاده از فن آوری‌های پیشرفته پس از برداشت، برای تعیین سریع تر، موثرتر و دقیق تر کیفیت و سلامت محصولات ضروری می‌باشد. در این تحقیق، روش تصویربرداری ابرطیفی در محدوده ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر، برای تشخیص سیب های آفت زده توسط کرم سیب، بکار برده شده است. پس از تهیه نمونه های آفت زده و انتقال آنها به آزمایشگاه، تصاویر تحت شرایط کنترل شده گرفته شدند. سپس طیف بازتابی میانگین از نواحی مطلوب استخراج و پیش پردازش گردیده و در نهایت با استفاده از چندین تکنیک یادگیری ماشین شامل تحلیل تفکیک خطی، k-نزدیکترین همسایه و درخت تصمیم گیر طبقه بندی نمونه ها انجام گرفت. نتایج نشان داد جداسازی میوه های آفت زده با نرخ کلاس بندی ۹۶٪ و ۹۴٪ برای نمونه های سالم و آفت زده امکان پذیر بوده و بهترین نرخ کلاس بندی برای روش درخت تصمیم گیر بدست آمد. همچنین طول موج های بهینه برای توسعه تصویربرداری چندطیفی استخراج گردیدند. نتایج این پژوهش بیانگر کارایی بالای تصویر برداری ابرطیفی در جداسازی غیرمخرب سیب های آفت زده برای استفاده در ماشین‌های درجه بندی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصویر ابرطیفی، تحلیل تفکیک خطی، درخت تصمیم گیر، k-نزدیکترین همسایه، درجه بندی سیب

مقدمه

برای رسیدن به اهداف چشم انداز بلندمدت کشور راهی به جز ورود به بازارهای جهانی و صادرات محصولات تولیدی در تمامی بخش‌هایی که رقیبانی در جهان وجود دارد، متصور نیست. از طرف دیگر مهمترین عامل در صادرات، مقوله کیفیت و سلامت محصول می‌باشد که این امر خود دارای ابعاد مختلفی است. امروزه مصرف کنندگان محصول با کیفیت و استانداردهای بالا می‌خواهند و بنابراین تولید کنندگانی که نتوانند شرایط آنها را برآورده کنند متحمل ضررهای سنگینی می‌شوند. همچنین از طرفی کشورهای توسعه یافته مانند ایالات متحده امریکا و اتحادیه اروپا به منظور برآورده نمودن تقاضای بازار داخلی، استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای برای کیفیت و سلامت محصولات غذایی وارداتی تعریف کرده‌اند. لذا این امر نیازمند توسعه روش‌های سریع، دقیق و کم هزینه برای ارزیابی کیفیت و

وضعیت محصول در مراحل مختلف، بویژه در مبادی صادراتی می‌باشد.

سیب یکی از مهمترین محصولات باغبانی ایران محسوب می‌شود که پس از انگور مقام دوم را از نظر میزان تولید میوه در سطح کشور دارد (آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴). همچنین ایران جزء بزرگترین تولید کنندگان انواع سیب درختی در جهان می‌باشد بطوریکه براساس آمار منتشره وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۴ نزدیک به ۲۳۳۳۲۰ هکتار زیر کشت این محصول رفته و تولیدی معادل ۳۴۸۳ هزارتن داشته است. با وجود این در حال حاضر علیرغم بازارهای قابل دسترس وسیع در منطقه و تمایل بازرگانان برای خرید محصولات باغی ایران، به علت عدم رعایت اصول باغداری و در نتیجه وجود آفت زدگی و پایین بودن خاصیت انبارداری و نبود استانداردهای کیفی در میوه‌ها و همچنین عدم رعایت نمودن بسته بندی مناسب، کیفیت محصولات تولیدی اغلب پایین و غیر قابل رقابت با محصولات کشورهای پیشرفته می‌باشد (Shahabi & Malakouti, 2010).

* نویسنده مسئول: rmardani@ut.ac.ir

آمار، عدم نیاز به پیش فرآوری محصول (نظیر آسیاب کردن، عصاره گیری، افزودن حلال و ...) و همچنین امکان استفاده در سامانه های درجه بندی برخط، اشاره نمود. در هر حال این روش ها به دلیل معایبی نظیر گران بودن تجهیزات و دقت پایین تر نسبت به روش های مخرب همچنان در حال توسعه می باشند (Butz et al., 2005).

تصویربرداری ابرطیفی بعنوان یک فناوری جدید و غیرمخرب، اطلاعات موجود در طول موج های نواحی مرئی و فرورسرخ نزدیک را پوشش داده و با اطلاعات تصویر ادغام می کند. این ویژگی می تواند اطلاعات تشخیصی بیشتری شامل خصوصیات ساختاری درونی، اطلاعات ریخت شناسی و ترکیبات شیمیایی، در مقایسه با روش ماشین بینایی و یا طیف سنجی ارائه دهد. تصویربرداری ابرطیفی در حوزه کشاورزی مورد مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته و کاربرد های زیادی در زمینه های تخمین خصوصیات درونی میوه ها (Lu & Peng, 2010; Huang & Lu, 2006)، تشخیص صدمات درونی محصولات (Ariana & Lu, 2008)، و دریافت اطلاعات رشد محصول (Ruiz-Altisent et al., 2010) داشته است. اخیراً مطالعات فراوانی در خصوص شناسایی حشرات و آفات و صدمات آنها بر روی میوه ها، توسط تصویربرداری ابرطیفی گزارش شده است. (Xing et al., 2008) از تصویربرداری ابرطیفی بازتابی و عبوری جهت تشخیص آسیب درونی حشره در آلبالو استفاده کرد. (Wang et al., 2011) آفت زدگی در میوه عناب را توسط تصویربرداری ابرطیفی بازتابی تشخیص داد. در یک تحقیق دیگر تصویربرداری ابرطیفی در محدوده ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر برای شناسایی میوه های انبه آسیب دیده توسط آفت مگس میوه^۲ بکار برده شد (Saranwong et al., 2011). در یک تحقیق مشابه دیگر، از تصویربرداری ابرطیفی برای جدا کردن خیار های آسیب دیده توسط آفت مگس میوه استفاده شد (Lu & Ariana, 2013). بنابراین تکنیک تصویربرداری ابرطیفی یک روش امیدبخش برای تشخیص و درجه بندی میوه های معیوب و آفت زده می باشد.

در زمینه تشخیص غیرمخرب آفت کرم سیب، (Hansen et al., 2008) از تصویربرداری حرارتی^۳ برای تشخیص لارو آفت و یا اثرات فعالیت آن درون میوه، بر مبنای وجود اختلاف دمایی این نواحی با نواحی سالم، استفاده کردند. آنها نتیجه گیری کردند که در تصاویر حاصل از تصویربرداری

کرم سیب^۱ (*Cydia pomonella* L.) یک آفت جدی برای این میوه می باشد که همه ساله باعث تلفات و خسارات بسیار زیادی می گردد. در تمام نقاط ایران که کشت درختان میوه سیب انجام می گیرد، این آفت نیز به عنوان یکی از رایجترین حشرات زیان آور درختان حضور دارد و در صورت عدم کنترل آن، شدت خسارات این آفت ممکن است تا حد ۹۰ یا حتی ۱۰۰ درصد نیز برسد (Ranjbar-Aghdam & Ataran, 2014). لاروهای نسل اول این حشره معمولاً از دم میوه ولی در نسلهای بعدی از هر جای آن وارد میوه شده و از گوشت آن تغذیه کرده و به هسته می رسند. بعد از ۳ تا ۴ هفته، دوره رشد لاروها کامل شده و میوه را ترک می کنند. در حین این دوره لاروها درون میوه فضولات خود را به جا می گذارند که ممکن است در محل دم میوه و یا سطح کناری آن نمایان باشد (Greenwood et al., 2000). تعداد نسل کرم سیب به دو عامل درجه حرارت و طول روشنایی روز بستگی دارد و در اکثر مناطقی که سیب کشت می شود دارای ۳ نسل در سال می باشد (Amiri et al., 2014). با وجود اینکه عمومی ترین روش برای مدیریت و مبارزه با کرم سیب، استفاده از حشره کش ها در باغات می باشد ولی اخیراً روشهای مدیریت تلفیقی کاربرد فراوانی پیدا کرده اند، اگرچه این روش نیز حذف کامل میوه های آفت زده را تضمین نمی نماید (Wang et al., 2001). بنابراین تشخیص زود هنگام با استفاده از روشهای غیرمخرب سریع و دقیق، به جداسازی میوه های معیوب قبل از بسته بندی و حمل به بازارهای محلی و بین المللی کمک شایانی خواهد کرد.

در حال حاضر برای شناسایی میوه های معیوب و کرم زده در غالب موارد از روش معاینه دستی استفاده می گردد که روش مذکور برای تشخیص میوه های آلوده، روشی با دقت کم، وقت گیر و تخریبی بوده و از نظر اقتصادی به صرفه نمی باشد. از طرف دیگر خصوصیات درونی میوه از جمله تشخیص آلوده بودن به کرم بدلیل عدم امکان رویت اثرات این آفت در داخل میوه، توسط نیروی انسانی عموماً قابل ارزیابی نمی باشد.

در سال های اخیر توجه پژوهشگران بر توسعه روش های تشخیص غیرمخرب به منظور برطرف نمودن عیوبی که در روش های مخرب و نیمه مخرب وجود دارد، افزایش یافته است. از مزایای روش های غیرمخرب می توان به امکان اندازه گیری چند ویژگی کیفی با یک بار آزمایش محصول، عدم اعمال ضربه یا آسیب به محصول، سرعت بالاتر اندازه گیری نسبت به روش های مخرب و نیمه مخرب، امکان افزایش حجم نمونه برداری

2. Fly Fruit
3. Thermo Imaging

1. Codling Moth

لیتری که یک پنبه مرطوب در ته آن قرار داشت گذاشته شدند (شکل ۲). سپس تخمها درون این ظرف سر بسته به داخل اینکوباتور با دمای ۲۸ درجه سلیسیوس منتقل و در آنجا نگهداری شدند. بعد از گذشت ۳ روز تخمها تبدیل به لاروهای اولیه ۳ شده و آنها بر روی نمونه‌های سیب درون توری‌ها قرار گرفتند. مدت زمان انبارداری ۶۰ روز در نظر گرفته شد و آزمایش‌ها به فواصل یک هفته انجام گرفت. در هر مرحله از آزمایش، تعداد ۵ عدد از نمونه‌ها از محفظه‌ی مربوطه خارج گردید و به مدت ۴ ساعت در آزمایشگاه با دمای 21 ± 1 °C قرار داده شد تا نمونه‌ها به شرایط تعادل دمایی برسند. شکل (۳) نمونه‌هایی از میوه سیب سالم و آفت زده درونی که پس از انجام آزمون، برش خورده و نصف شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۱. قرار دادن نمونه‌ها در معرض تخم حشره درون توری مخصوص



شکل ۲. تخم‌های حشره بین لایه کاغذ مخصوص و درون ظرف پلاستیکی (ب)



شکل ۳. نمونه‌های برش خورده سیب سالم (الف) و آفت زده (ب)

سامانه تصویربرداری

به منظور تحویل تصاویر ابرطیفی در محدوده طول موجی مرئی

حرارتی نواحی آسیب دیده میوه از نواحی سالم قابل تشخیص می‌باشد. همچنین در یک تحقیق دیگر، روش تصویربرداری اشعه ایکس برای تشخیص غیرمخرب عیوب درونی سیب ناشی از کبودشدگی، پوسیدگی و صدمات حشرات از جمله کرم سیب بکار برده شده است (Schatzki et al., 1996).

بررسی منابع نشان داد که تاکنون تحقیقی در زمینه شناسایی آفت زدگی سیب توسط کرم سیب با روش غیرمخرب تصویربرداری ابرطیفی و چندطیفی گزارش نشده است. بنابراین با توجه به مطالب فوق الذکر، هدف اصلی از انجام این پژوهش، توسعه یک روش غیر مخرب مبتنی بر تصویربرداری ابرطیفی به منظور تشخیص آفت زدگی درونی در محصول سیب می‌باشد. علاوه بر این، هدف دیگر این تحقیق انتخاب طول موج‌های پهنه جهت تشخیص آفت زدگی بمنتظر توسعه روش تصویربرداری چندطیفی که دارای کاربرد عملی در سامانه‌های زمان-واقعی هستند، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های میوه

از محصول سیب رقم گولد راش^۱ در آزمایش‌ها استفاده گردید. تعداد ۱۵۰ عدد سیب از یک باغ تجاری واقع در شهر Georgetown ایالت کنتاکی کشور آمریکا و در شهریور ماه ۱۳۹۴ (September 2015) برداشت گردید. در حین برداشت سعی شد نمونه‌های یکدست و سالم چیده شوند و نمونه‌ها از لحاظ ظاهری نیز بازرسی شدند تا عاری از هرگونه ضایعات ناشی از بیماری باشد. نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت به آزمایشگاه مهندسی مواد غذایی، گروه مهندسی بیوسیستم و کشاورزی و دانشگاه کنتاکی^۲ منتقل گردیدند. پس از شستشو، تمیز کردن و خشک کردن، نمونه‌ها به صورت تصادفی به ۲ دسته ۷۵ تایی بعنوان نمونه‌های در معرض آفت و شاهد تقسیم گردیدند تا در شرایط انبار با دمای ۴ °C قرار گیرند. به منظور ایجاد نمونه‌های آفت زده بطور مصنوعی، براساس روش استاندارد سازمان فائو برای پرورش حشره کرم سیب (Dyck, 2010)، سیب‌ها در درون توری‌های مخصوص مانند شکل (۱) و در معرض تخم حشره قرار گرفتند. تخم حشره از شرکت Benzon Research, Inc (Carlisle, PA) خریداری شد و به محض دریافت در درون یک ظرف پلی پروپیلین ۹۲۸ میلی

1. Gold Rush

2. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, University of Kentucky

3. Neonate

پیش‌زمینه، تصویر با طول موج ۷۱۵ نانومتر به عنوان تصویر ماسک برای ایجاد تصویر باینری بکار گرفته شد زیرا در این تصویر، میوه نسبت به پیش‌زمینه بیشترین تمایز را دارا بود. تصویر ماسک با استفاده از روش قطعه‌بندی بر مبنای آستانه^{۱۰} تشکیل گردید. در ادامه برای بدست آوردن تصویر قطعه‌بندی شده نهایی، برای همه ۵۱۲ طول موج ابرمکعب، ماتریس تصویر ماسک پیکسل در پیکسل در تصویر ابرطیفی ضرب گردید. سپس برای بدست آوردن طیف میانگین بازتابی برای هر تصویر قطعه بندی شده، مقدار میانگین شدت نور هر پیکسل بر روی ناحیه جدا شده آن تصویر محاسبه گردید. پس از آن هر تصویر طیفی با استفاده از تصاویر مرجع طیف سیاه و طیف بازتابش ۵۰ درصد طبق استاندارد (اس آر تی-۴۰-۰۵۰، لاسفر، آی ان سی، نورث ساتن، یو اس ای^{۱۱}) و با استفاده از رابطه‌ی زیر واسنجی گردید:

$$RR = \frac{I_s(i) - I_d(i)}{I_r(i) - I_d(i)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن RR طیف بازتابی نسبی هر تصویر، I_s مقادیر شدت نور برای نمونه، I_r مقادیر شدت نور برای مرجع بازتابش ۵۰ درصد و I_d مقادیر شدت نور برای مرجع سیاه می باشند.

پیش پردازش و تجزیه تحلیل داده ها

داده های مربوط به طیف بازتابی نسبی میانگین، به منظور کاهش نوفه ناشی از منابع مختلف، پیش پردازش گردیدند. در این تحقیق، از عملیات هموارسازی^{۱۲} با استفاده از مشتق اول و دوم و همچنین مرکز میانگین^{۱۳} بمنظور از بین بردن نوفه‌های تصادفی بوجود آمده در طیف‌های استخراج شده استفاده گردید (Rady et al., 2015).

کلاس بندی نمونه‌ها به دو دسته سالم و آفت زده با استفاده از چندین روش کلاس‌بندی شامل تحلیل تفکیک خطی^{۱۴}، k-نزدیکترین همسایه^{۱۵} و درخت تصمیم‌گیر^{۱۶} انجام گرفت. در اجرای روش تحلیل تفکیک خطی، تکنیک تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) به منظور کاهش ابعاد داده‌ها بکار برده شد و تنها ۵ مولفه اصلی اول که ۹۹ درصد کل واریانس را موجب می شدند، مدنظر قرار گرفتند. برای اختصاص دادن هر نمونه به کلاس خاص، از معیار فاصله اقلیدسی^{۱۷} استفاده شد.

و فرورسرخ نزدیک (۱۰۰۰-۴۰۰ نانومتر) از سامانه تصویربرداری ابرطیفی بازتابی (میدلتون اسپکترا ویژن، یو اس ای^۱) گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه کنتاکی استفاده گردید. شکل (۴) اجزای اصلی این سامانه را نشان می دهد. سامانه مذکور از یک دوربین صنعتی CCD (مدل پیکسل فلای، پکوا ی جی، کلهم، آلمان^۲)، یک طیف‌نگار از نوع منشور-توری-منشور^۳ (مدل وی ۱۰ ای، اسپسیم، اولو، فنلاند^۴) به همراه لنز بزرگنمایی از نوع C-mount تشکیل شده است. واحد نورپردازی شامل یک منبع نور دارای یک لامپ هالوژن با توان ۱۵۰ وات (مدل ای ۲۰۸۰۰، اسکات، سوات بریج، یو اس ای^۵) بود که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به نمونه و در بالای آن قرار می گرفت. تشکیل یک تصویر ابرطیفی، که ابرمکعب نیز نامیده می‌شود، با حرکت یک پلیت متحرک (مدل ام ار سی-۹۹۹-۰۳۱، میدلتون اسپکترا ویژن، میدلتون، یو اس ای^۶) که با یک نرم افزار کامپیوتری کنترل می‌شد، صورت گرفت. ابرمکعب^۷های تحصیل شده که دارای وضوح‌پذیری طیفی و مکانی به ترتیب برابر ۱/۱۸ نانومتر و ۰/۱۳ میلی‌متر بر پیکسل بودند، به صورت تصاویر با فرمت *.raw و با اندازه ۵۸۶×۶۹۶ پیکسل و با ۵۱۲ باند طیفی ذخیره گردیدند. همچنین زمان پرتوگیری^۸ برابر ۴۵ میلی‌ثانیه و سرعت پایش ۳۳۲۲ شمارش^۹ بر ثانیه در نظر گرفته شد.

برای گرفتن داده‌های ابرطیفی، نمونه سیب بر روی پلیت متحرک سیاه رنگ در سه جهت مختلف (انتهاء کاسبرگ، انتهاء دم و سطح کناری میوه) قرار داده و پایش گردید تا تصاویر ابرطیفی آن ثبت و ذخیره گردد. سپس نمونه سیب مورد آزمون جهت مشاهده آفت‌زدگی درونی به دو نیمه برش داده شده و نتایج وجود یا عدم وجود عیب داخلی ثبت گردید.

پردازش تصویر

مراحل مختلف انجام گرفته در این پژوهش برای تحلیل تصاویر ابرطیفی در شکل (۵) نشان داده شده است. ابتدا، همانطور که در بالا توضیح داده شد نمونه سیب توسط سامانه تصویربرداری پایش گردید تا تصاویر ابرطیفی آن گرفته شده و ذخیره گردد. سپس به منظور جدا کردن ناحیه مطلوب تصویر میوه از

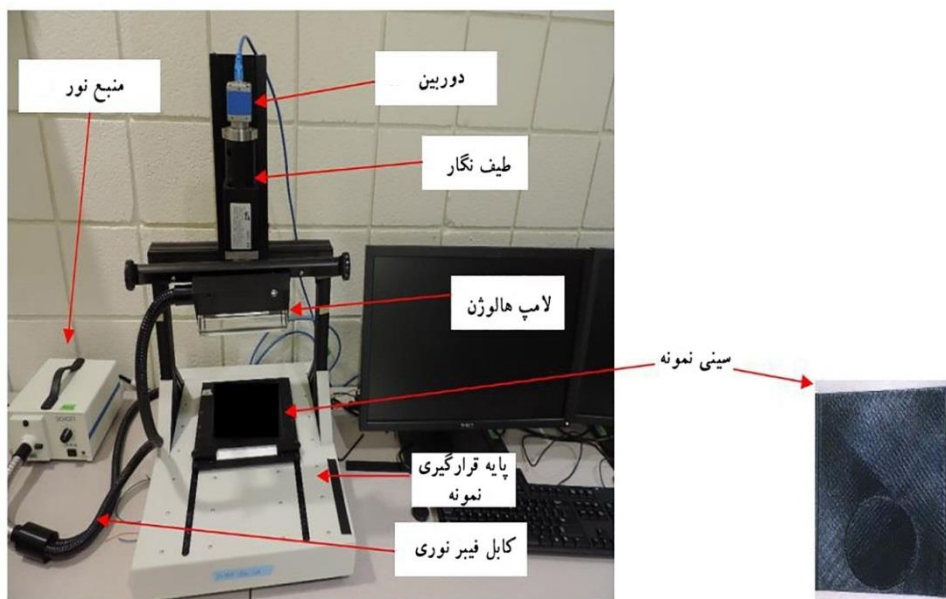
10. Thresholding based segmentation
11. No. SRT-40-050, Labsphere, INC., NorthSutton, NH, USA
12. Smoothing
13. Mean center
14. Linear Discriminant Analysis
15. K-Nearest Neighbors
16. Decision Tree
17. Euclidean distance

1. Middleton Spectral Vision, USA
2. Model no. pixelfly qe, PCOAG, Kelheim, Germany
3. Prism-grating-prism (PGP)
4. Model no. V10E, Specim, Oulu, Finland
5. Model no. A20800, Schott, Southbridge, MA, USA
6. Model M R C-999-031, Middleton Spectral Vision, USA
7. Hypercube
8. Exposure time
9. Count per second

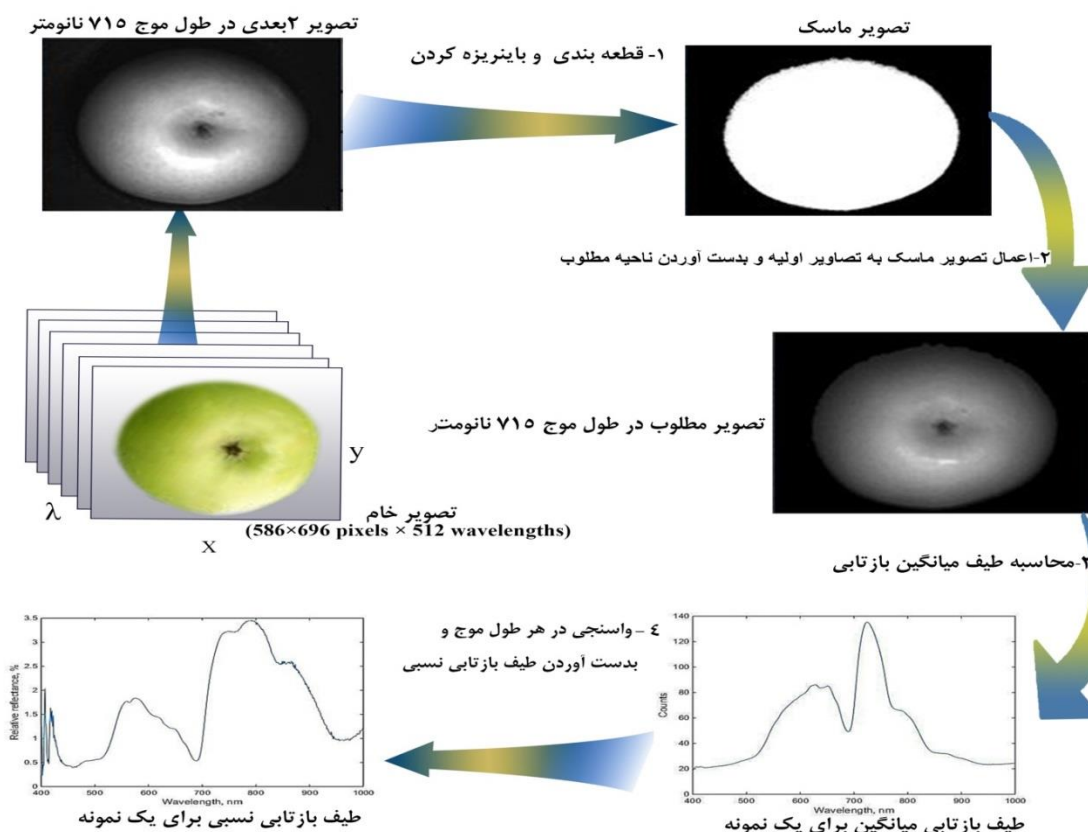
اکرامی و همکاران: تشخیص غیرمخرب آفت کرم سیب (*Cydia pomonella L.*) با استفاده از ... ۲۴۵

(مقادیر X) به نواحی که در آن خطاء کلاس بندی کمترین مقدار ممکن می باشد بنا شده است.

در مورد روش k - نزدیکترین همسایه، فاصله اقلیدسی با مقادیر k مساوی ۵ و براساس نتایج اولیه مورد استفاده قرار گرفت. درخت تصمیم گیر بر پایه تقسیمات متوالی فضای ورودی طیف



شکل ۴. سامانه تصویربرداری ابرطیفی



شکل ۵. مراحل انجام تحلیل تصاویر ابرطیفی

داده‌های آموزشی و برای افزایش دقت مدل و همچنین جلوگیری از بیش برداش مدل‌ها بهره گرفته شد. تمامی مراحل پردازش داده ها و کلاس بندی نمونه ها با استفاده از نرم افزار متلب (آر ۲۰۱۴ بی، ناتیگ، ام ای، یو

پس از استخراج و پیش پرداخت داده ها، تعداد ۱۰۰ نمونه (حدود ۸۰ درصد) به طور تصادفی برای ساخت مدل‌ها (داده های آموزشی) و مابقی به منظور ارزیابی (داده های آزمون) در نظر گرفته شدند. از تکنیک 4-fold cross validation بر روی

شده مربوط به نمونه‌های سیب سالم و آفت زده را نشان می‌دهد. در تحلیل داده‌ها فقط طول موج‌های بازه ۱۰۰۰-۴۳۴ نانومتر بکار برده شد زیرا ابتدای بازه دارای نویز زیادی بود. همانطور که در شکل‌های (۶) و (۷) مشخص است نمودارها بیانگر شباهت شکل کلی طیف‌های تحصیل شده از نمونه‌های سالم و معیوب بوده ولی با وجود این میزان بازتابش نسبی برای دو گروه در طول موج‌های مختلف متفاوت می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان جذب نسبی برای نمونه‌های آفت زده تقریباً در تمامی گستره طول موج‌های ثبت شده در این تحقیق، بیشتر می‌باشد. این نتایج مشابه یافته‌های مطالعات قبلی که از تصویربرداری ابرطیفی برای تشخیص بیماری‌ها، آلودگی‌ها و صدمات مکانیکی روی سیب استفاده کرده‌اند، می‌باشد. بعنوان مثال (Mehl et al., 2004) نتیجه‌گیری کرد که در سیب‌های رقم گولدن دلشز^۸ و گالا^۹، طیف بازتابی برای نمونه‌های سالم، بالاتر از طیف بازتابی نمونه‌های دارای کوفتگی^{۱۰}، آلودگی و عفونت قارچی، قرار داشتند.

لازم به ذکر است که محدوده طول موج استفاده شده در این پژوهش توانایی نفوذ به قسمت‌های مرکزی میوه را نداشته و تفاوت ایجاد شده در طیف میانگین بازتابی دو گروه نمونه‌ها و تشخیص حاصل شده، از روی اثرات غیرمستقیم فعالیت لارو آفت و تغییرات بافتی و شیمیایی ایجاد شده در لایه سطحی و همچنین لایه زیرسطحی میوه بوده است.

ضمناً در رابطه با شکل کلی طیف بازتابی بدست آمده، با توجه به شکل‌های (۶) و (۷)، دو پیک جذب آشکار (مینیمم موضعی در نمودار بازتابی) در محدوده ۶۹۰-۶۸۰ نانومتر و ۹۷۰-۹۵۰ برای هر دو گروه نمونه‌ها وجود دارد که بترتیب مربوط به جذب کلروفیل و جذب آب می‌باشند. (Mehl et al., 2004) نیز نتایج طیفی مشابهی برای باند جذبی کلروفیل در مورد سیب‌های ارقام مختلف با تصویربرداری ابرطیفی بدست آوردند. همچنین در ناحیه مادون قرمز نزدیک، طیف تحت تاثیر جذب ناشی از محتوای رطوبتی موجود در محصول است. این نتیجه مشابه نتایج تحقیقات پیشین می‌باشد که میزان جذب بالا در محدوده طول موج ۹۶۰ نانومتر را ناشی از جذب مربوط به محتوای رطوبتی نمونه دانسته‌اند (Wang & ElMasry, 2010).

اس‌ای^۱ و همچنین جعبه ابزار طبقه‌بندی توسعه داده شده توسط Davide Ballabio (گروه تحقیقات کمومتریک میلان، دانشگاه میلان- بیسوکا، ایتالیا)^۲ انجام گرفت.

انتخاب طول موج‌های بهینه

بطور کلی، فرآیند انتخاب طول موج همانند عملیات انتخاب ویژگی در مسائل تشخیص الگو می‌باشد. بنابراین روش‌های انتخاب ویژگی را می‌توان در طیف‌سنجی به منظور استخراج طول موج‌های بهینه در پایش کیفیت میوه‌ها بکار برد. انتخاب ویژگی در داده‌های با ابعاد بالا^۳، علاوه بر غلبه بر مشکل بیش برداش^۴، باعث ایجاد مدل‌های طبقه‌بندی قوی‌تر و همچنین کاهش در زمان محاسبه عملیات پردازش تصویر، استخراج ویژگی و ساخت مدل‌های طبقه‌بندی می‌گردد. بنابراین حذف کردن ویژگی‌هایی که باعث قوی‌تر شدن مدل نمی‌شوند، به ما کمک می‌کند تا از ابعاد داده‌ها کاسته شود (Webb, 2002).

تکنیک جستجوی متوالی^۵ به طور موفقیت آمیزی برای هدف انتخاب ویژگی در داده‌های با ابعاد بالا برای کاربردهای مختلف بکار برده شده است (Guyon et al., 2002; Weston et al., 2000). در روش انتخاب متوالی رو به جلو^۶، ویژگی (در اینجا طول موج) جدیدی به مدل اضافه می‌شود و سپس عملکرد مدل با استفاده از شاخص خاصی که اغلب خطا طبقه‌بندی می‌باشد، ارزیابی می‌شود. فرآیند انتخاب زمانی متوقف می‌شود که اضافه کردن ویژگی‌ها باعث بهبود عملکرد مدل نگردد. ولی در انتخاب متوالی روبه عقب^۷، ویژگی‌ها یک به یک از مدل حذف شده و این عمل تا زمانی ادامه می‌یابد که با حذف یک ویژگی عملکرد مدل شروع به پایین رفتن می‌کند. در این تحقیق روش‌های انتخاب متوالی رو به جلو و رو به عقب بکار گرفته شد و مدل طبقه‌بندی توسط شاخص خطا طبقه‌بندی ارزیابی گردید.

نتایج و بحث

طیف‌های پردازش شده برای نمونه‌ها

شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب طیف بازتابی میانگین پردازش

1. R2014b, Natick, MA, USA
2. Milano Chemometrics and QSAR Research Group, University of Milano-Bicocca, Milan, Italy
3. High dimensional data
4. Overfitting
5. Sequential search techniques
6. Sequential forward selection
7. Sequential backward selection

8. Golden Delicious
9. Gala
10. Bruising

جدول ۱. نتایج طبقه بندی نمونه های سیب سالم و آفت زده توسط سه روش طبقه بندی و با استفاده از تمامی طول موج ها

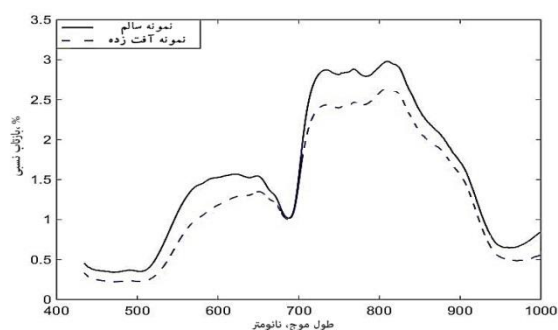
روش طبقه بندی	نرخ طبقه بندی نمونه های آموزشی (%)			نرخ طبقه بندی نمونه های آزمون (%)		
	سالم	آفت زده	کل	سالم	آفت زده	کل
تحلیل تفکیک خطی	۸۱	۶۸	۷۲	۷۹	۶۸	۷۴
درخت تصمیم گیر	۹۶	۹۴	۹۵	۷۹	۷۸	۷۹
k-نزدیکترین همسایه	۹۳	۹۴	۹۴	۷۲	۸۴	۷۸

جدول ۲. نتایج طبقه بندی نمونه های سیب سالم و آفت زده توسط سه روش طبقه بندی و با استفاده از طول موج های منتخب

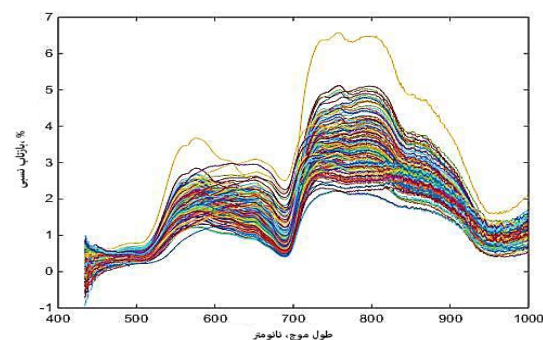
روش طبقه بندی	نرخ طبقه بندی نمونه های آموزشی (%)			نرخ طبقه بندی نمونه های آزمون (%)		
	سالم	آفت زده	کل	سالم	آفت زده	کل
تحلیل تفکیک خطی	۷۷	۶۰	۷۰	۸۱	۵۷	۷۰
درخت تصمیم گیر	۹۷	۱۰۰	۹۸	۸۳	۷۳	۷۸
k-نزدیکترین همسایه	۸۵	۷۴	۸۰	۷۵	۸۶	۷۸

بالاترین نرخ طبقه بندی برای حالت استفاده از طول موج های منتخب، توسط روش درخت تصمیم گیر و با بکارگیری طول موج های ۴۳۴، ۴۳۷/۵، ۴۴۲، ۴۵۰، ۴۶۵، ۶۴۵، ۷۰۰، ۹۲۵ و ۹۳۰ نانومتر برابر ۸۳، ۷۳ و ۷۸ درصد بترتیب برای نمونه های سالم، آفت زده و کل، برای داده های آزمون بدست آمد (جدول ۲). با مقایسه نتایج جداول (۱) و (۲) مشخص می باشد که استفاده از طول موج های منتخب برای ساخت مدل طبقه بندی منجر به رسیدن به عملکرد کلی تقریباً مشابهی با حالت استفاده از تمامی طول موج ها گردیده است. با وجود این، همانگونه که اشاره شد با استفاده از روش انتخاب طول موج، تعداد طول موج ها به ۹ عدد تقلیل یافت که کمتر از ۲٪ کل طول موج های موجود در طیف (۵۱۲ عدد) می باشد. این مقدار کاهش معنی دار در داده ها تاثیر مثبت بسیاری روی کاهش زمان محاسبات و تحلیل نتایج خواهد داشت.

نتایج حاصل از این پژوهش قابل مقایسه با نتایج (2015) *Vetrekar et al.* می باشد که از سامانه تصویربرداری ابرطیفی در محدوده ۱۰۰۰-۴۰۰ نانومتر برای کلاس بندی میوه سیب به نمونه های سالم و آسیب دیده درونی بر اثر کوفتگی، توسط مدل شبکه های عصبی استفاده کردند و نرخ طبقه بندی ۷۹/۵٪ را بدست آوردند. همچنین طبق نتایج بدست آمده از تحقیقات (2003) *Lu*، مقدار نرخ طبقه بندی برای جداسازی



شکل ۶. مقایسه نمودار طیف بازتابی نمونه برای میوه سالم و آفت زده



شکل ۷. نمودار طیف های بازتابی برای همه ۱۵۰ عدد نمونه

نتایج کلاس بندی سیب های سالم و آفت زده

نتایج حاصل از این آزمون برای ۱۵۰ نمونه استفاده شده در پژوهش حاضر در جداول (۱) و (۲) آمده است. در جدول (۱) نتایج طبقه بندی سیب ها با استفاده از تمامی طول موج های گستره طیف گزارش شده است در حالیکه نتایج جدول (۲) مربوط به طبقه بندی با طول موج های بهینه منتخب می باشد. همانطور که در این جداول مشخص می باشد، طبقه بندی سیب ها براساس آفت زدگی با آفت کرم سیب با نرخ طبقه بندی کل ۹۵ و ۹۸ درصد برای داده های آموزشی و ۷۹ و ۷۸ درصد برای داده های آزمون و به ترتیب با تمامی طول موج ها و با طول موج های منتخب به خوبی امکان پذیر بوده است. لازم به ذکر است که در جداول (۱) و (۲) ستون مربوط به نرخ طبقه بندی کل برابر با تعداد کل نمونه های طبقه بندی شده صحیح در هر دو گروه، تقسیم بر تعداد کل نمونه ها می باشد. بالاترین نرخ طبقه بندی کل برای داده های آموزشی و با استفاده از روش درخت تصمیم گیر، برابر ۹۸٪ حاصل شد (جدول ۲). همچنین نتایج ارائه شده در جدول (۱) نشان می دهد که صحت طبقه بندی روشهای درخت تصمیم گیر و k-نزدیکترین همسایه برای نمونه های سالم و آفت زده تقریباً مشابه بوده و مقدار نرخ طبقه بندی کل آنها به ترتیب برابر ۹۵٪ و ۹۴٪ برای نمونه های آموزشی و ۷۹٪ و ۷۸٪ برای داده های آزمون بدست آمد.

استفاده شد و نتایج رضایتبخشی بدست آمد. طیف بازتابی میانگین بدست آمده از نمونه ها حاکی از تفاوت آشکار میزان جذب برای دو گروه سالم و آفت زده بخصوص در محدوده های مرئی و همچنین مادون قرمز نزدیک بود و این اختلاف به عنوان ورودی مناسب برای انجام کلاس بندی با روشهای یادگیری ماشین مختلف شامل تحلیل تفکیک خطی، k-نزدیکترین همسایه و درخت تصمیم گیر، بکار برده شد. نتایج انتخاب طول موج ها نشان داد که استفاده از ۹ طول موج شامل ۴۳۴، ۴۳۷/۵، ۴۴۲، ۴۵۰، ۶۱۵، ۶۴۵، ۷۰۰، ۹۲۵ و ۹۳۰ نانومتر با روش درخت تصمیم گیر، بالاترین نرخ طبقه بندی را برابر با ۹۷، ۱۰۰ و ۹۸ درصد برای داده های آموزش و ۸۳، ۷۳ و ۷۸ درصد برای داده های آزمون بترتیب برای نمونه های سالم، آفت زده و کل، بدست داد. بنابراین، نتایج این پژوهش می تواند جهت توسعه تصویربرداری چند طیفی توسط انتخاب طول موج های بهینه، برای تشخیص آفت زدگی و عیوب سیب در سامانه های درجه بندی سیب برای جداسازی غیرمخرب میوه های آفت زده به صورت زمان-واقعی بکار برده شود.

سیب های کبودشده رقم رد دلشز و گولدن دلشز بترتیب برابر ۸۸٪ و ۹۴٪، با تصویربرداری در محدوده طول موج ۱۷۰۰-۹۰۰ نانومتر بود. در یک تحقیق دیگر، عملکرد روش تحلیل تفکیک خطی و ماشین بردار پشتیبان برای تشخیص سیب های سالم و کبودشده با هم مقایسه گردید و روش تحلیل تفکیک خطی با نرخ طبقه بندی ۹۵٪ نتایج بهتری را نشان داد، در صورتیکه روش ماشین بردار پشتیبان در تشخیص کبودشدگی عمیق از کبودشدگی سطحی، با نرخ طبقه بندی ۷۷٪ خروجی بهتری ارائه نمود (Wang et al., 2015). مقایسه این نتایج با نتایج پژوهش حاضر نشان می دهد که، با توجه به اینکه صدمه وارد بر میوه سیب توسط کرم سیب یک صدمه عمقی می باشد و عموماً اثرات آن به صورت ظاهری قابل رویت نمی باشد، بنابراین نرخ کلاس بندی بیشینه بدست آمده (۹۸٪ و ۷۹٪ به ترتیب برای داده های آموزش و داده های آزمون)، بیانگر عملکرد خوب روش تصویربرداری ابرطیفی استفاده شده در این تحقیق می باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش از تکنیک تصویربرداری ابرطیفی در محدوده ۱۰۰۰-۴۰۰ نانومتر برای طبقه بندی سیب سالم و آفت زده

REFERENCES

- Amiri, R., Shojaaddini, M., Motazedian, N., & Zibayee, K. (2014). Degree-day and pheromone traps in control timing of codling moth, *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Olethreutidae). *Agricultural Pest Management*, 1(2): 34-40.
- Ariana, D. P., & Lu, R. (2008). Quality evaluation of pickling cucumbers using hyperspectral reflectance and transmittance imaging - Part II. Performance of a prototype. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2(3), 152-160.
- Butz, P., Hofmann, C., & Tauscher, B. (2005). Recent Developments in Noninvasive Techniques for Fresh Fruit and Vegetables Internal Quality Analysis. *Journal of Food Science*, 70(9), 131-141.
- Dyck, V. A. (2010). Rearing codling moth for SIT. FAO Plant Production and Protection.
- Greenwood, P. (2000). Pests and diseases. *DK Publishing, NY*.
- Hansen, J. D., Carlton, R., Adams, S., & Lacey, L., A. (2008). Infrared Detection of Internal Feeders of Deciduous Tree Fruits. *Journal of Entomology Science*, 43(1), 52-56.
- Huang, M., & Lu, R. (2010). Apple mealiness detection using hyperspectral scattering technique. *Postharvest Biology and Technology*, 58(3), 168-175.
- Lu, R., (2003). Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging. *Transactions of the ASAE*, 46, 523-535.
- Lu, R., & Peng, Y. (2006). Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), 161-171.
- Lu, R., & Ariana, D. P. (2013). Detection of fruit fly infestation in pickling cucumbers using a hyperspectral reflectance/transmittance imaging system. *Postharvest Biology and Technology*, 81, 44-50.
- Mehl, P. M., Chen, Y. R., Kim, M. S., & Chan, D. E. (2004). Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 67-81.
- Rady, A., Guyer, D., & Lu, R. (2015). Evaluation of Sugar Content of Potatoes using Hyperspectral Imaging. *Food and Bioprocess Technology*, 8(5), 995-1010.
- Ranjbar Aghdam, H., & Ataran, M. (2014). Biological control of codling moth using parasitoid wasps *Trichogramma embryophagum* based on time-degree forecasting models. *Biological control of pests and plant diseases*. 3(2), 87-96.
- Ruiz-Altisent, M., Ruiz-Garcia, L., Moreda, G. P., Lu, R., Hernandez-Sanchez, N., Correa, E. C., & García-Ramos, J. (2010). Sensors for product characterization and quality of specialty crops-A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 176-194
- Saranwong, S., Haff, R. P., Thanapase, W., Janhiran,

- A., Kasemsumran, S., & Kawano, S. (2011). A feasibility study using simplified near infrared imaging to detect fruit fly larvae in intact fruit. *J. Near Infrared Spectrosc.*, 19, 55-60.
- Schatzki, T. F., Haff, R. P., Young, R., Can, I., Le, L-C., & Toyofuku, N. (1997). Defect detection in apples by means of X-ray imaging. *Transactions of the ASAE*, 40(5), 1407-1415.
- Shahabi, A., & Malakouti, M. (2010). The effect of concentration and time of application of calcium chloride on texture and quality characteristics of red apples of Esfahan Semirom area. *Journal of water and soil*, 12(8). In Farsi.
- Vetrekar, N. T., Gad, R. S., Fernandes, I., Parab, J. S., Desai, A. R., Pawar, J. D., & Umapathy, S. (2015). Non-invasive hyperspectral imaging approach for fruit quality control application and classification: case study of apple, chikoo, guava fruits. *Journal of Food Science and Technology*, 52(11), 6978-6989.
- Wang, H., Peng, J., Xie, C., Bao, Y., & Yong, He. (2015). Fruit Quality Evaluation Using Spectroscopy Technology: A Review. *Sensors*, 15, 11889-11927.
- Wang, J., Nakano, K., Ohashi, S., Kubota, Y., Takizawa, K., & Sasaki, Y. (2011). Detection of external insect infestations in jujube fruit using hyperspectral reflectance imaging. *Biosystems Engineering*, 108(4), 345-351.
- Wang, N., & ElMasry, G. (2010). Bruise Detection of Apples using Hyperspectral Imaging. *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control*, 295-320.
- Wang, S., Tang, J., & Cavalieri, R. (2001). Modeling fruit internal heating rates for hot air and hot water treatments. *Postharvest Biology and Technology*, 22, 257-270.
- Xing, J., Guyer, D., Ariana, D., & Lu, R. (2008). Determining optimal wavebands using genetic algorithm for detection of internal insect infestation in tart cherry. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2(3), 161-167.