

مقاله پژوهشی

تصویربرداری فراطیفی فروسرخ نزدیک به منظور تخمین غیر مخرب pH سیب رد دلشیز در دوره نگهداری

عبداله گل محمدی^{۱*}، محمد طهماسبی^۲، مهساسادات رضوی^۲

۱. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۷

چکیده

ارزیابی کیفیت و درجه بندی میوه‌ها یکی از فعالیت‌های مهم پس از برداشت است که با توجه به رشد تقاضا برای محصولات سالم و دارای کیفیت بهتر، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر فناوری‌های مختلفی برای ارزیابی میوه‌ها و سبزی‌ها به صورت غیر تخریبی کاربرد پیدا کرده‌اند. در بین این روش‌ها، تصویربرداری فراطیفی به عنوان یک روش غیر مخرب، سریع و دوستدار محیط زیست به منظور سنجش خواص محصولات کشاورزی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نظر به اینکه مصرف اسیدهای آلی و در نتیجه تغییرات pH یکی از خواص کیفی مهم سیب به شمار می‌رود، در این تحقیق اثر طول دوره انبارداری سرد بر میزان pH سیب رقم رد دلشیز به مدت ۶۰ روز بررسی شد. تصویربرداری فراطیفی بازتابی در محدوده طول موج‌های ۴۰۰-۱۱۰۰ nm انجام و میزان pH در نمونه‌ها نیز به صورت مخرب اندازه‌گیری شد. پس از حذف نویزها با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، برای بهبود طیف، پیش پردازش‌های اولیه مختلف اعمال و اثرات آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مدل مناسب با استفاده از روش حداقل مربعات جزئی (PLS) تعیین گردید. طول موج‌های مهم براساس ضریب رگرسیون بهترین مدل و شامل نقاط دارای مقادیر بالای قدرمطلق ضریب رگرسیون انتخاب و یا استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی شد. براساس آنالیز PLS بهترین نتایج با پیش‌پردازش هموارسازی ساویتزکی-گولای با خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) ۰/۰۲ و ۰/۰۱۸ و ضریب تعیین (R^2) هر دو برابر با ۰/۹۸۰ به ترتیب برای داده‌های کالیبراسیون و اعتبار سنجی حاصل شد. بر اساس ضریب رگرسیون بهترین مدل، ۹ طول موج به عنوان بهترین طول موج‌ها تعیین شد. در مدل‌سازی با استفاده از طول موج‌های مؤثر، شبکه عصبی مصنوعی بهترین نتیجه را داشت. در نتیجه به نظر می‌رسد که روش غیر مخرب تصویربرداری فراطیفی قادر به تخمین pH سیب در دوره انبارداری با دقت بالا است.

واژه‌های کلیدی: انبارداری، تصویربرداری فراطیفی، سیب، غیر مخرب، pH

۱. مقدمه

مرئی برای دسته‌بندی اشیائی که دارای رنگ مشابه هستند، برای تشخیص معایب نامرئی و همچنین به‌منظور تخمین ویژگی‌های کیفی (ترکیب شیمیایی) اغلب ناکارآمد است، اگرچه خصوصیات خارجی مانند اندازه، شکل، رنگ، بافت و معایب خارجی با یک بینایی رایانه‌ای معمولی قابل ارزیابی می‌باشد، ولی تشخیص ویژگی‌های داخلی با یک وسیله تصویربرداری معمولی و نسبتاً ساده، مشکل است [۶]. گاهی ارزیابی محصولات طبیعی به سامانه‌های تصویربرداری فراطیفی نیاز دارد، دوربین‌های چندطیفی، چندین نوار مرئی و غیرمرئی را با استفاده از صافی‌ها و حسگرهای مناسب ترکیب می‌نمایند [۷]. در سال‌های اخیر کاربردهای تصویربرداری فراطیفی برای آزمون غیرمخرب در بسیاری از بخش‌های صنعتی و پژوهشی افزایش یافته است [۸].

یک تصویر طیفی، مجموعه‌ای از تصاویر می‌باشد که هر کدام در یک نوار باریک طیفی متفاوتی قرار دارند. تصویربرداری طیفی به سه روش به نام‌های چندطیفی، فراطیفی و ابرطیفی انجام می‌شود. تصویربرداری فراطیفی مربوط به تصویربرداری از یک صحنه با نوارهای طیفی گسسته و پشت سر هم (همانند یک طیف بازتاب کامل در تک تک نقاط تصویری) می‌شود. تصاویر فراطیفی اطلاعاتی با جزئیات بیشتر در مقایسه با تصویربرداری معمولی که فقط سه نوار طیفی مختلف در رنگ‌های اولیه بصری (قرمز، سبز و آبی) به دست می‌آورد را فراهم می‌کند؛ بنابراین، تصویربرداری فراطیفی قابلیت و توانایی وسیعی برای دسته‌بندی اشیا در تصویر بر اساس ویژگی‌های طیفی‌شان فراهم می‌کند. افزون بر این، تصویربرداری فراطیفی می‌تواند اندازه‌گیری‌های طیفی در تمام سطح محصول را نیز فراهم کند، در حالی که طیف‌سنج‌های مرسوم تنها اندازه‌گیری نقطه‌ای را انجام می‌دهند [۷].

پتانسیل کاربرد این روش تصویربرداری طیفی، برای شناسایی و تعیین ترکیبات شیمیایی و نمایش توزیع مکانی آن‌ها به اثبات رسیده است. مونرا و همکاران [۹] به‌منظور ارزیابی خواص فیزیکوشیمیایی درونی و ادراک حسی (عطر و طعم و ...)، دو رقم شلیل از تصویربرداری ابرطیفی بازتابی فرو

سیب (*Malus domestica* Bork) گیاهی از خانواده گلسرخیان (*Rosaceae*) و زیرخانواده *Pomoidea* از زمره اولین میوه‌هایی است که بشر از دوران ماقبل تاریخ و شروع دوران کشاورزی و باغبانی شناخته و مورد استفاده قرار داده است. عقیده بر این است که منشأ آن در آسیای مرکزی، چین و قفقاز می‌باشد [۱]. سیب یکی از مهم‌ترین میوه‌های استراتژیک کشور بوده و در حال حاضر از نظر وزنی بالاترین حجم صادرات محصولات باغی کشور را به خود اختصاص داده است [۲]. کشور چین به تنهایی ۷۰ درصد تولید جهانی این محصول را به خود اختصاص داده است. ایران نیز رتبه هشتم جهان را از نظر تولید این محصول دارد [۳].

ارزیابی کیفیت و درجه‌بندی میوه‌ها یکی از فعالیت‌های مهم پس از برداشت است که با توجه به رشد تقاضا برای محصولات سالم و دارای کیفیت بهتر، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر تکنیک‌های مختلفی مانند اشعه X، روش‌های نوری، فراصوت، طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIR) و غیره برای ارزیابی میوه‌ها و سبزی‌ها به‌صورت غیرتخریبی کاربرد پیدا کرده‌اند. این فناوری‌های غیرتخریبی بسیار مطلوب و نسبت به روش‌های تخریبی سریع‌تر و اقتصادی‌تر هستند. طی دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای روی کاربرد این روش‌ها در کیفیت‌سنجی میوه‌ها و سبزی‌ها صورت گرفته است. با این حال هیچ‌کدام از روش‌های پیشنهادی تاکنون نتوانسته‌اند تمام اطلاعات مورد نیاز تعیین کیفیت و رسیدگی محصول را فراهم نمایند و به‌صورت صنعتی همچنان از روش‌های مخرب استفاده می‌شود. استفاده از این روش‌ها مشکل، زمان‌بر و پرهزینه هستند؛ در نتیجه روش‌های غیرتخریبی در اندازه‌گیری ویژگی‌های میوه می‌تواند برای تعیین سریع کیفیت و رسیدگی تعداد بیشتری میوه به‌صورت تک تک مفید باشد [۴].

همچنین در سال‌های اخیر کاربرد ماشین بینایی در کشاورزی و صنایع غذایی در برخی زمینه‌ها مانند بازرسی غیرمخرب ویژگی محصولات، کنترل کیفیت و دسته‌بندی در خطوط فرآوری و عموماً خودکارسازی فرآیند، افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است [۵]. با این حال روش تصویربرداری

موج‌هایی مؤثر، معرفی نمودند. وی و همکاران [۱۳] به مدل‌سازی تخمین SSC و استحکام خرما لوب مبتنی بر تصویربرداری ابرطیفی NIR در طول موج در ۹۰۰-۱۰۰۰۰ پرداختند. در این مطالعه روش قطعه‌بندی نمونه شامل الگوریتم کنارد-استون^۷ (KS)، الگوریتم فاصله x-y تقسیم مشترک^۸ (SPXY) و روش انتخاب تصادفی^۹ (RS) به کار گرفته شد. برای انتخاب متغیر ویژگی‌ها از حذف غیرآگاهانه متغیرهای مونت کارلو^{۱۰} (MC-UVE)، روش نمونه‌گیری تطبیقی رقابتی وزنی^{۱۱} (CARS) و الگوریتم طرح‌ریزی پی در پی (SPA) استفاده شد. برای تشخیص SSC و استحکام بهترین مدل‌ها-SPXY-MC-UVE-CARS-PLS با ۱۲ متغیر ویژگی و-Savitzky-Golay-RS-CARS-PLS با ۷ متغیر ویژگی بودند. خیرعلی‌پور و همکاران [۱۴] از این روش برای تشخیص پسته سالم و آلوده به قارچ *Aspergillus flavus* استفاده نمودند و گزارش نمودند از بین طول موج‌های ۹۶۰ تا ۱۷۰۰ nm، سه طول موج مؤثر بر اساس روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی شامل ۱۰۹۰، ۱۲۸۰ و ۱۷۰۰ بود، در بین روش‌های اعتبارسنجی کا-بخشی، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی، بالاترین دقت مربوط به روش اعتبارسنجی کا-بخشی در طبقه‌بندی نمونه‌های پسته سالم و آلوده (۰/۹۹/۷۱) بود.

از طرف دیگر pH یکی از پارامترهای کیفی مهمی که بیانگر میزان تغییرات اسیدهای آلی محصول در طول دوره نگهداری است. تصور می‌شود که تنفس و در نتیجه مصرف اسید آلی ناشی از پیری میوه، یکی از دلایل اصلی افزایش pH سیب در طی دوره نگهداری باشد [۱۵]، این پارامتر همچنین تا حد زیادی وابسته به میزان اسید استیک در محصول است [۱۶]، که ممکن است بر پایداری آنتوسیانین و در نتیجه، رنگ میوه تأثیر بگذارد. با این وجود پیش‌بینی غیر مخرب تغییرات pH میوه سیب در طی نگهداری سرد تاکنون بررسی نشده است. لذا هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده از روش

سرخ نزدیک^۱ استفاده نمودند. تصاویر ابرطیفی از میوه‌ها در طی رسیدگی تحت شرایط کنترل شده و نتایج بهینه با مقادیر R² بالاتر از ۰/۸۷ به دست آمد. اکرامی‌راد و همکاران [۱۰] روش تصویربرداری ابرطیفی در محدوده ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر، برای تشخیص سیب‌های آفت‌زده توسط کرم سیب، استفاده و گزارش نمودند که جداسازی میوه‌های آفت‌زده با نرخ کلاس‌بندی ۰/۹۶ و ۰/۹۴ برای نمونه‌های سالم و آفت‌زده امکان‌پذیر بوده و بهترین نرخ کلاس‌بندی برای روش درخت تصمیم گیر به دست آمد. ژو و همکاران [۱۱] از تصویربرداری فراطیفی برای پیش‌بینی کیفیت داخلی میوه کیوی بر اساس الگوریتم‌های انتخاب متغیر و مدل‌های هندسی استفاده نمودند. استحکام، میزان مواد جامد محلول (SSC) و pH موجود در کیوی با استفاده از این تکنیک مورد ارزیابی قرار گرفت. ضرایب رگرسیون وزنی^۲ (BW)، الگوریتم پیش‌بینی متوالی^۳ (SPA) و الگوریتم ژنتیکی - حداقل مربعات جزئی^۴ (GAPLS) برای انتخاب طول موج‌های مؤثر مقایسه و ارزیابی شدند. همچنین، رگرسیون خطی چندگانه^۵ (MLR)، رگرسیون حداقل مربعات جزئی و ماشین بردار پشتیبانی حداقل مربعات^۶ (LS-SVM) برای پیش‌بینی ویژگی‌های کیفیت کمی با استفاده از طول موج‌های مؤثر توسعه داده شدند. مدل SPA-MLR برای استحکام و SSC در ۳۸۰-۱۰۲۳ nm عملکرد عالی را نشان داد، در حالی که GAPLS-LS-SVM مدل بهینه در ۸۷۴-۱۷۳۴ برای پیش‌بینی pH بود. راهی و همکاران [۱۲] از تصویربرداری ابرطیفی در ناحیه فرورسرخ نزدیک به همراه روش تفکیک کمترین مربعات جزئی برای تشخیص سریع کاهوی برگی آلوده به میکروب اشرشیاکلی از نمونه‌های کنترل (فاقد آلودگی) استفاده و گزارش نمودند که ۴ گروه متفاوت با دقت بیش از ۰/۹۰ و خطای کمتر از ۰/۰۰۸ قابل طبقه‌بندی هستند. همچنین، با استفاده از بردار اهمیت متغیر، ناحیه طیفی ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ و ۱۲۰۰ را

7. Kennard-stone
8. Sample set partitioning joint x-y distances algorithm
9. Random selection
10. Monte Carlo uninformative variables elimination
11. Competitive adaptive reweight sampling method

1. Vis/NIR
2. Weighted regression coefficients
3. Successive projections algorithm
4. Genetic algorithm-partial least square
5. multiple linear regression
6. partial least squares regression and least squares support vector machin

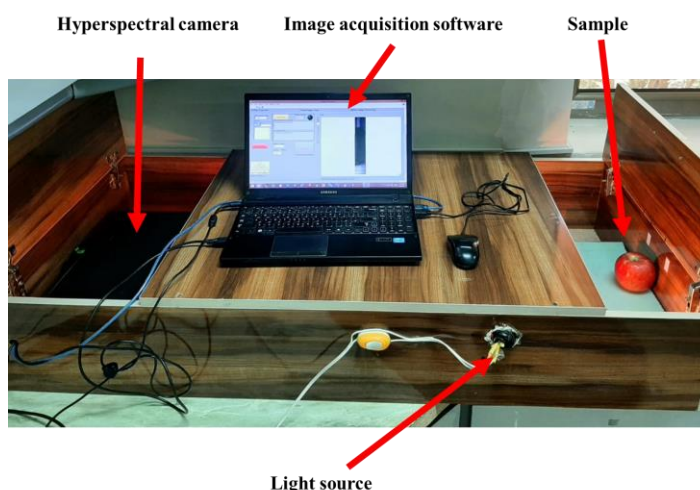
به آزمایشگاه منتقل و از بین آن‌ها ۸۰ میوه با اندازه، شکل و رنگ یکنواخت و بدون هیچ‌گونه نشانه‌ای از آسیب‌های مکانیکی و یا پوسیدگی قارچی برای انجام آزمایش‌ها انتخاب و در دمای ۴°C نگهداری شدند. در روزهای صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نگهداری به شرح زیر هر بار از ۲۰ عدد از نمونه‌ها تصویربرداری شده و بلافاصله از نظر pH مورد ارزیابی قرار گرفتند.

تصویربرداری طیفی در تخمین تغییرات pH سیب در طی دوره نگهداری است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. تهیه نمونه

در این پژوهش تعدادی سیب رقم رد دلشیز از باغات تجاری سیب واقع در مشکین شهر اردبیل تهیه شد. میوه‌ها بلافاصله



شکل (۱) اجزای اصلی سامانه تصویربرداری فراطیفی برای پیش‌بینی میزان pH سیب

Fig 1. Main components of the hyperspectral imaging system for predicting of apple pH value

برای کاهش تأثیر روشنایی و تاریک آشکارسازهای CCD، اختلافات در دوربین و پیکربندی فیزیکی سیستم تصویربرداری، تصاویر فراطیفی با یک تصویر مرجع سیاه و سفید اصلاح شد. تصویر بازتاب سیاه با پوشاندن کامل لنز دوربین با استفاده از یک درپوش مات و تصویر بازتاب سفید با استفاده از یک تخته سفید تفلون (بازتاب ۰.۹۹/۹۹) به دست آمد [۱۷] و تصاویر خام به دست آمده (R_0) با رابطه (۱) تصحیح شد:

$$R = \frac{R_0 - R_d}{R_w - R_d} \quad (1)$$

جایی که R_0 تصویر اصلی فراطیفی، R_d تصویر سیاه و R_w تصویر بازتابی سفید است. از تصاویر تصحیح شده برای تجزیه و تحلیل بیشتر استفاده شد [۱۶].

۲.۲. تصویربرداری فراطیفی

تصاویر فراطیفی از نمونه‌ها با استفاده از یک بستر آزمون تصویربرداری چرخشی (Fanavaran Physics Co., Iran) به دست آمد. این سیستم از یک موتور افقی، یک رایانه، یک نرم‌افزار اکتساب تصویر و یک دوربین با لنز دستگاه بارجفت‌شده^۱ (CCD) تشکیل شده بود. تصویر به دست آمده شامل ۴۲۰ نمایه فضایی با طول موج از ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ nm در فواصل ۱/۴۳ نانومتری بود. همچنین پارامترهای سیستم تصویربرداری فراطیفی به شرح زیر بود: به‌منظور قرار گرفتن میوه به‌صورت کامل در میدان دید لنز دوربین فاصله بین نمونه و لنز سامانه ۱۰۰ cm در نظر گرفته شد و به‌منظور جلوگیری از ایجاد سایه در تصاویر شدت منبع نور ۲۰ W با زاویه ۴۵ درجه نسبت به نمونه بود (شکل ۱).

1. Charge-coupled device (CCD)



۳.۲. اندازه‌گیری pH

به منظور اندازه‌گیری pH آب‌میوه، از pH متر دیجیتالی (Metrohm 827, Switzerland) در دمای محیط استفاده شد. مقداری از آب‌میوه در بشر ریخته و با قرار دادن الکتروود در آب‌میوه، مقدار pH اندازه‌گیری شد [۱۸].

۴.۲. تجزیه و تحلیل داده‌ها

۱.۴.۲. تجزیه مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) به‌منظور حذف

نمونه‌های پرت

در طول انجام آزمایش‌ها به دلایل مختلفی نظیر مشکلات فنی تجهیزات، جمع‌آوری داده، نمونه‌گیری نادرست و ... ممکن است برخی نمونه‌ها نامناسب و یا به اصطلاح پرت باشند. به‌منظور حذف این نمونه‌ها قبل از هرگونه پردازش روی داده‌ها از تجزیه مؤلفه‌های اصلی استفاده شد.

۲.۴.۲. پیش‌پردازش

داده‌های حاصل از سیستم تصویربرداری طیفی ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند اثر پراکنش نور توسط تغییر آشکارساز با نمونه، تغییر در اندازه نمونه، ناهمواری‌های سطحی در نمونه، نویزهای ایجاد شده به علت افزایش دما سامانه و بسیاری عوامل دیگر قرار گیرد و این اطلاعات ناخواسته بر دقت مدل‌های کالیبراسیونی تأثیر بگذارد. از این رو جهت دستیابی به مدل‌های واسنجی پایدار، دقیق و قابل اعتماد نیاز به پیش‌پردازش داده‌ها است [۱۹]. در این پژوهش میانگین متحرک^۲، فیلتر گوسین^۳، فیلتر میانه^۴، هموارسازی ساویتزکی-گولای^۵، نرمال‌سازی^۶، تصحیح پخش افزایشنده^۷ (MSC) و توزیع نرمال استاندارد^۸ (SNV) بر روی داده‌ها اعمال شد.

۳.۴.۲. رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۹ (PLS) و

یافتن طول موج‌های مؤثر

از آنجایی که به‌کارگیری روش‌های غیرمخرب مبتنی بر طیف‌سنجی با بازه کاملی از طول موج‌ها نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار بالا است، کاربرد عملی این روش را تقریباً غیرممکن می‌سازد لذا باید به دنبال یافتن راهی برای یافتن طول موج‌های مؤثر و محدود کردن طول موج‌ها به حداقل مقدار ممکن بود. روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) از این نظر ایده‌آل به نظر می‌رسد. در این پژوهش به‌منظور ساخت مدل‌ها، داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند: ۸۰٪ نمونه‌ها به‌منظور آموزش و اعتبارسنجی و متقاطع و از باقی داده‌ها جهت اعتبارسنجی مستقل استفاده شد. مدل‌های PLS برای کلیه پیش‌پردازش‌های صورت گرفته روی داده‌ها ایجاد و از شاخص‌های آماری ضریب تبیین^{۱۰} (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات^{۱۱} (RMSE) (روابط ۲ و ۳) به‌منظور یافتن بهترین مدل استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - Z_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - p_i)}{N}} \quad (3)$$

از ضریب رگرسیون بهترین مدل کالیبراسیون PLS برای انتخاب طول موج‌های مؤثر استفاده شد. طول موج‌های با مقادیر بالای قدرمطلق ضریب رگرسیون نشان می‌دهد که متغیرها تأثیرات مهمی در پیش‌بینی متغیر Y دارند و در نتیجه می‌توانند به‌عنوان طول موج‌های مؤثر انتخاب شوند [۲۰].

۴.۴.۲. مدل‌سازی با استفاده از طول موج‌های مؤثر

به منظور یافتن بهترین مدل برازش‌کننده رابطه بین طول موج‌های مؤثر و تغییرات pH سیب در طول دوره نگهداری، مدل‌های PLS، رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، ماشین‌بردار پشتیبان^{۱۲} (SVM) و شبکه عصبی مصنوعی^{۱۳}

1. Principal component analysis
2. Moving Average
3. Gaussian Filter
4. Median Filter
5. Savitzky-Golay smoothing
6. Normalization
7. Multiplicative Scatter Correction
8. Standard normal distribution
9. Partial least squares regression

10. Coefficient of determination
11. Root mean square error
12. Support vector machines
13. Artificial neural network

می‌شود [۱۵]. نتایج مشابه در مورد افزایش pH سیب و سایر محصولات در طول دوره نگهداری گزارش شده است [۲۱-۲۴].

۲.۲. تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA)

براساس نتایج آنالیز PCA که در شکل ۲ نشان داده شده است، اولین مؤلفه اصلی (PC-1) ۹۵٪ و دومین مؤلفه اصلی (PC-2) ۲٪ از واریانس نمونه‌های مورد آزمایش را توصیف می‌کنند و در نتیجه دو مؤلفه اصلی اول مجموعاً ۹۷٪ از داده‌ها را بیان می‌کنند. همچنین همان‌گونه که در این شکل مشخص است نمونه‌ها هر یک از زمان‌های مورد ارزیابی در کنار هم و به‌صورت کاملاً تفکیک شده قرار دارند که این امر نشان می‌دهد که این روش به خوبی قادر به تشخیص تغییرات نمونه‌ها در طول دوره نگهداری است. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد در طول انجام آزمایش‌ها برخی نمونه‌ها به دلایل مختلفی نظیر مشکلات فنی تجهیزات، جمع‌آوری داده، نمونه‌گیری نادرست و ... ممکن است نامناسب و یا به اصلاح پرت باشند [۲۵-۲۷] که در این پژوهش برای تشخیص آن‌ها از توزیع تی‌مربع هاتلینگ- باقیمانده F استفاده شد. در این روش باقیمانده F فاصله نمونه تا مدل را بیان می‌کند و توزیع تی‌مربع هاتلینگ نشان‌دهنده توصیف نمونه توسط مدل است [۲۷]. براساس نتایج حاصل که در شکل ۱- ب نشان داده شده است، تعداد شش عدد از کل نمونه‌ها به‌عنوان داده‌های پرت تعیین شد که با علامت دایره نشان داده شده‌اند؛ که در آن‌ها مقادیر توزیع تی‌مربع هاتلینگ بالاتر از ۸/۵ است. داده‌های پرت شناسایی شده در آنالیزهای بعدی حذف شدند.

(ANN) پیاده‌سازی شد. مطابق با آنچه در بخش قبلی گفته شد به‌منظور ساخت مدل‌ها، داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند و از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) (روابط ۲ و ۳) به‌منظور یافتن بهترین مدل استفاده شد. از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه بر پایه الگوریتم پس انتشار شامل یک لایه ورودی با تعداد نورون برابر با تعداد طول موج‌های مؤثر و لایه خروجی با یک نورون (pH) و دو لایه پنهان در پنج سطح مختلف از تعداد نورون (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰) استفاده شد. همچنین در این پژوهش از الگوریتم لونیگ-مارکوارت برای به‌هنگام‌سازی وزن‌های شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد که به علت آموزش سریع شبکه و به حداقل رساندن سطح خطا از الگوریتم‌های پرکاربرد در این زمینه است [۲۰]. کلیه مراحل تجزیه و تحلیل داده‌ها به غیر از شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از نرم افزار The Unscrambler X 10.4 انجام گرفت و برای ایجاد شبکه عصبی از نرم‌افزار Matlab2018b استفاده شد همچنین کلیه محاسبات و رسم نمودارها در نرم افزار Microsoft Excel 2016 انجام گرفت.

۳. نتایج و بحث

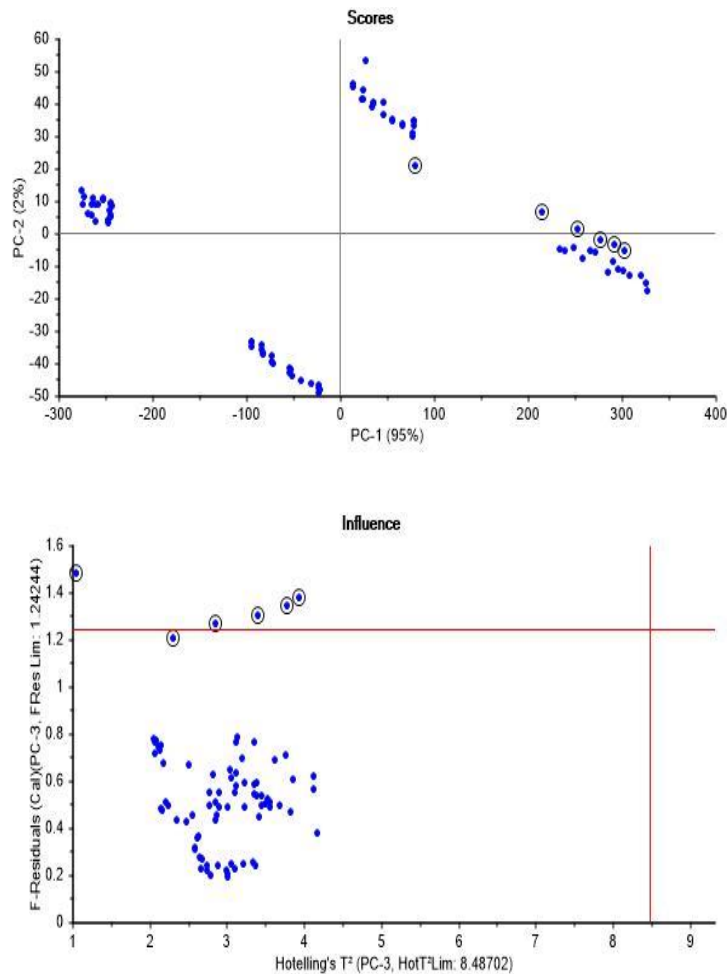
۳.۱. تغییرات pH نمونه‌ها در طول دوره نگهداری

جدول (۱) مقادیر pH نمونه‌های سیب را در مراحل مختلف آزمایش نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصل با گذشت زمان مقدار pH در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این تغییرات در pH نمونه‌ها را می‌توان به اثرات تنفس و مصرف اسیدهای آلی ناشی از پیری میوه در طول دوره نگهداری نسبت داده

جدول (۱) مقادیر pH نمونه‌های سیب در مراحل مختلف آزمایش

Table 1. The pH values of apple samples at different test stages

میانگین \pm انحراف معیار Mean \pm Standard deviation	تعداد Number	زمان (روز) Time (Day)
4.075 \pm 0.011	20	0
4.176 \pm 0.014	20	20
4.364 \pm 0.018	20	40
4.440 \pm 0.019	20	60



شکل (۲) نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA)

Fig 2. Principal Component Analysis Results (PCA)

پژوهش از بین روش‌های میانگین متحرک، نرمال شده با بیشینه، میانگین و محدوده، هموارسازی ساویتزکی-گولای مشتقات اول و دوم، تصحیح پخش افزاینده (MSC) و توزیع نرمال استاندارد (SNV)، استفاده از هموارسازی ساویتزکی-گولای مشتقات اول بالاترین دقت در تشخیص پارامترهای کیفی گوجه‌فرنگی را در پی داشت. ژانگ و همکاران [۲۹] در تخمین SSC سیب فوجی با استفاده از طیف سنجی فروسرخ نزدیک برای کاهش نویزها توابع تصحیح پخش افزاینده (MSC) و توزیع نرمال استاندارد (SNV) را استفاده و گزارش نمودند که استفاده از تصحیح پخش افزاینده (MSC) در مقایسه با توزیع نرمال استاندارد (SNV) تخمین دقیق‌تری از مقدار SSC در پی خواهد داشت. کیم و همکاران [۳۰] در تخمین SSC خربزه شرقی با استفاده از طیف سنجی فروسرخ

۳.۳. رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)

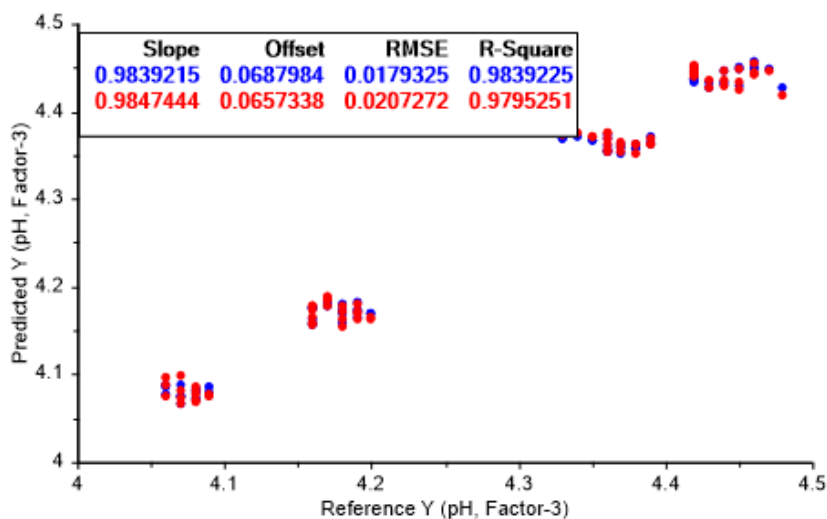
مقادیر R^2 ، RMSE برای مجموعه‌های کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل‌های مختلف رگرسیون PLS با داده‌های خام و پردازش شده با توابع مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که همه پیش‌پردازش‌های انجام شده و همچنین طیف‌های بدون پیش‌پردازش قادر به پیش‌بینی pH با دقت مطلوبی بودند و بهترین نتایج در مدل تدوین شده در پیش‌پردازش هموارسازی ساویتزکی-گولای با $RMSEC=0/020$ ، $R^2_{CV}=0/980$ ، $RMSECV=0/020$ ، $R^2_c=0/980$ حاصل شد (شکل ۳). رحمان و همکاران [۲۸] پتانسیل تصویربرداری فراطیفی به منظور پیش‌بینی صفات کیفی گوجه‌فرنگی شامل pH و محتوای رطوبتی را بررسی نمودند. در این

نزدیک در بین روش‌های مختلف پیش‌پردازش شامل هموارسازی ساویتزکی-گولای، نرم‌سازی با بیشینه و کمینه، نرم‌سازی استواری، استانداردسازی، متغیر نرمال استوار، توزیع نرمال استاندارد (SNV) و تصحیح پخش افزاینده (MSC) گزارش نمودن که بهترین نتیجه با توزیع نرمال استاندارد (SNV) حاصل شده است. هر چند با توجه به ماهیت متفاوت نمونه‌ها، روش و تجهیزات اندازه‌گیری و سایر شرایط اثرگذار در خواص طیفی محصولات بهتر است داده‌های حاصل از پژوهش‌های مختلف با یکدیگر مورد مقایسه قرار نگیرند [۲۶].

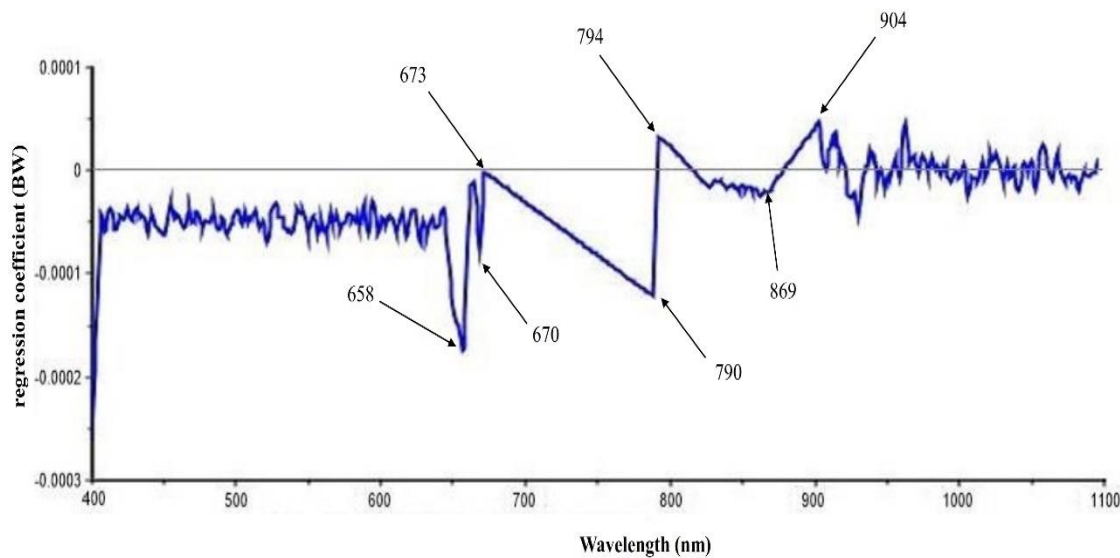
جدول (۲) مقادیر R^2 ، RMSE برای مجموعه‌های کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل‌های مختلف رگرسیون (PLS)

Table 2. R^2 and RMSE values for calibration and validation sets of different regression models (PLS)

RMSECV	R^2_{cv}	RMSEC	R^2_c	روش پیش‌پردازش Pre-processing method
0.028	0.977	0.027	0.979	بدون پیش‌پردازش Without preprocessing
0.021	0.977	0.020	0.980	میانگین متحرک Moving Average
0.021	0.978	0.020	0.980	فیلتر گوسین Gaussian filter
0.021	0.978	0.021	0.979	فیلتر میانه Middle filter
0.018	0.980	0.020	0.984	هموارسازی ساویتزکی-گولای Savitsky-Gulay smoothing
0.027	0.960	0.026	0.966	نرمال شده Normalized
0.027	0.964	0.025	0.969	تصحیح پخش افزاینده (MSC) Multiplicative scatter correction (MSC)
0.026	0.966	0.024	0.970	توزیع نرمال استاندارد (SNV) Standard normal distribution



شکل (۳) همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده pH مدل رگرسیون (PLS) پیش‌پردازش شده با هموارسازی ساویتزکی-گولای
Fig 3. Correlation between reference and predicted of pH values of PLS model that preprocessed with Savitzky-Golay smoothing



شکل (۴) تغییرات ضرایب رگرسیونی بهترین مدل PLS
 Fig 4. Changes to Regression coefficients of the best PLS model

۴.۳. طول موج‌های مؤثر

براساس ضرایب رگرسیونی مدل PLS ایجاد شده داده‌های پیش‌پردازشی با فیلتر میانه (شکل ۴)، ۹ طول موج که در محدوده ۶۵۰ تا ۹۵۰ nm قرار دارند به‌عنوان طول موج‌های مؤثر شناسایی شدند (شکل ۴). براساس چگونگی توزیع اورتون‌های پیوندهای اصلی^۱ [۳۱] تفکیک نمونه‌های سیب براساس شاخص کیفی pH را می‌توان به اورتون سوم OH در محدوده طول موج ۷۰۰ تا ۸۰۰ nm و اورتون دوم OH در محدوده ۸۰۰ تا ۹۰۰ nm که در ساختار اسید مالیک وجود دارد که از اسیدهای کربوکسیلیک با یک گروه عاملی هیدروکسیل (OH) به شمار می‌رود، نسبت داد. همچنین وجود حضور اورتون‌های H₂O در این محدوده طول موجی نیز احتمالاً با تغییرات محتوای رطوبتی نمونه‌ها سیب در طول دوره نگهداری مرتبط است. نتایج مشابه در تشخیص pH با استفاده از تصویربرداری فراطیفی در نمونه‌های گوجه [۲۸]، گیلان [۳۲] و سیب رقم فوجی [۳۳] نیز گزارش شده است.

۵.۳. مدل‌سازی با استفاده از طول موج‌های مؤثر

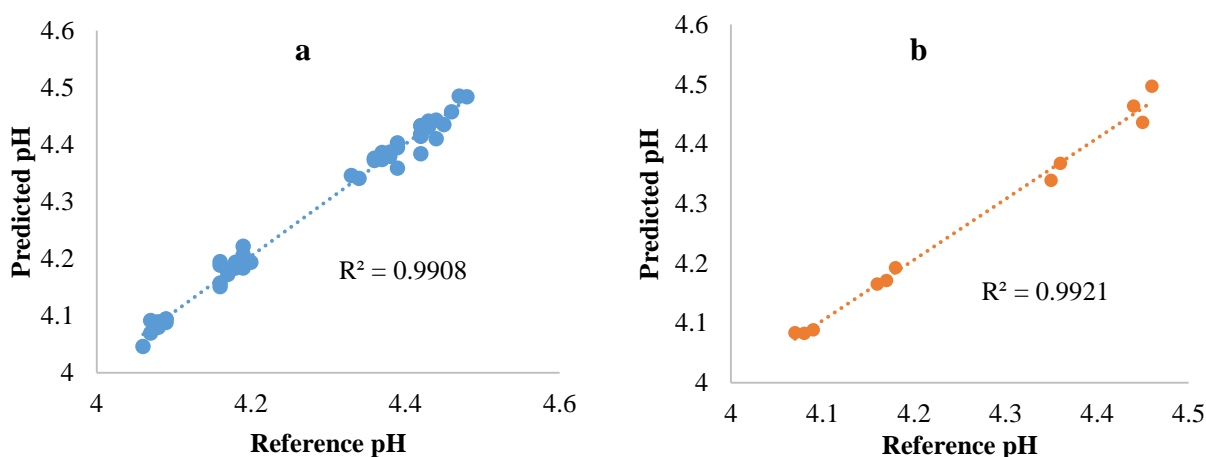
براساس نتایج ارائه شده در جدول (۳) کلیه مدل‌های ایجاد شده با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی pH سیب در طول دوره نگهداری براساس طول موج‌های مؤثر هستند؛ اما در بین این مدل‌ها مدل شبکه عصبی (ANN) با $RMSEC=0.013$ ، $R^2_C=0.991$ ، $RMSECV=0.013$ و $R^2_{CV}=0.992$ دارای بالاترین دقت در پیش‌بینی pH است (شکل ۵). در سال‌های اخیر، قابلیت بالاتر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) جهت محاسبات تکمیلی نسبت به مدل‌های رگرسیونی به علت یادگیری مستقیم از روی داده‌ها، بدون نیاز به برآورد مشخصات آماری آن‌ها در بسیاری از زمینه‌ها و در علوم مختلف گزارش شده است [۲۰، ۳۴ و ۳۵]. سبزی و همکاران [۳۶] در دسته‌بندی برگ گیاه خیار براساس محتوای نیتروژن با استفاده از تصویربرداری فراطیفی نیز گزارش نمودند که در بین الگوریتم‌های مختلف، مدل ایجاد شده با تلفیق شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم رقابت استعماری بهترین عملکرد را به‌منظور پیش‌بینی محتوای نیتروژن برگ خیار داشت.

1. Main Overtone band

جدول (۳) مقادیر R^2 ، RMSE برای مجموعه‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های مختلف رگرسیون ایجاد شده با طول موج‌های مؤثر

Table 3. R^2 and RMSE values for calibration and validation sets of different regression models that created with effective wavelengths

Model	R^2_c	RMSEC	R^2_{cv}	RMSECV
رگرسیون کمترین مربعات جزئی (PLSR) Partial least squares regression (PLSR)	0.976	0.022	0.974	0.023
رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) Principal Component Regression (PCR)	0.971	0.024	0.970	0.024
رگرسیون خطی (MLR) Multiple linear regression (MLR)	0.985	0.018	0.985	0.017
ماشین بردار پشتیبان (SVM) Support Vector Machine (SVM)	0.981	0.019	0.979	0.020
شبکه عصبی مصنوعی (ANN) Artificial Neural Network (ANN)	0.991	0.013	0.992	0.013



شکل (۵) همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده pH شبکه عصبی مصنوعی ایجاد شده با طول موج‌های مؤثر برای داده‌های کالیبراسیون (الف) و اعتبارسنجی (ب)

Fig 5. Correlation between reference and predicted of pH values of artificial neural network models that created with effective wavelengths for calibration (a) and validation (b) sets

۴. نتیجه‌گیری
در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر شرایط مختلف انبارداری بر میزان pH سه رقم سیب به مدت ۶۰ روز نگهداری شد. طیف‌سنجی بازتابشی در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ nm انجام شد. پس از حذف نویزها با آنالیز PCA، برای بهبود طیف، پیش پردازش‌های اولیه مختلف اعمال و اثرات آنها مورد بررسی قرار گرفت. مدل مناسب با استفاده از روش حداقل مربعات جزئی (PLS) تعیین گردید. طول موج‌های مهم براساس ضریب رگرسیون بهترین مدل انتخاب و یا استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی شد. براساس آنالیز PLS بهترین نتایج با پیش‌پردازش هموارسازی ساویتزکی-گولای حاصل شد. بر اساس ضریب رگرسیون بهترین مدل، ۹ طول موج به‌عنوان بهترین طول موج‌ها تعیین شد. در مدل‌سازی با استفاده از طول موج‌های مؤثر، شبکه عصبی مصنوعی بهترین نتیجه را داشت. در نتیجه به نظر می‌رسد که روش غیر مخرب تصویربرداری فراطیفی قادر به تخمین pH سیب در دوره انبارداری را با دقت بالا دارد.

۴. نتیجه‌گیری
در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر شرایط مختلف انبارداری بر میزان pH سه رقم سیب به مدت ۶۰ روز نگهداری شد. طیف‌سنجی بازتابشی در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ nm انجام شد. پس از حذف نویزها با آنالیز PCA، برای بهبود طیف، پیش پردازش‌های اولیه مختلف اعمال و اثرات آنها مورد بررسی قرار گرفت. مدل مناسب با استفاده از روش حداقل مربعات جزئی (PLS) تعیین گردید. طول موج‌های مهم براساس ضریب رگرسیون

منابع

- [1] Thovhogi, F. (2009). *Consumer reference (of red-fleshed apples) an quantification of quality related traits, particularly skin and flesh colour, in apple breeding families*. Stellenbosch, South Africa: University of Stellenbosch, Department of Horticulture.
- [2] Hosseinpour, R., Ahmadi, K., Ebadzadeh, H., Mohammadnia S., Afroozi & Abbasteghani, R. (2014). *Export and import of agricultural sector*. Tehran, I.R. Iran: Ministry of Jihad Keshvarzi Publisher. [In Persian]
- [3] FAO (Food and Agriculture Organization). Crops and livestock products, 2019. URL <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Accessed 08.08.21.
- [4] Rai, M., Ribeiro, C., Mattoso, L., & Duran, N. (2015). *Nanotechnologies in food and agriculture*. New York: Springer.
- [5] Du, C. J., & Sun, D. W. (2006). Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *J. Food Eng.*, 72(1), 39-55.
- [6] Park, B., & Lu, R. (Eds.). (2015). *Hyperspectral imaging technology in food and agriculture*. New York: Springer.
- [7] ElMasry, G., Kamruzzaman, M., Sun, D. W., & Allen, P. (2012). Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 52(11), 999-1023.
- [8] Gowen, A. A., Taghizadeh, M., & O'Donnell, C. P. (2009). Identification of mushrooms subjected to freeze damage using hyperspectral imaging. *J. Food Eng.*, 93(1), 7-12.
- [9] Munera, S., Amigo, J. M., Blasco, J., Cubero, S., Talens, P., & Aleixos, N. (2017). Ripeness monitoring of two cultivars of nectarine using VIS-NIR hyperspectral reflectance imaging. *J. Food Eng.*, 214, 29-39.
- [10] Ekramirad, N., Mohtasebi, S. S., & Eyvani, A. (2017). Non-destructive Detection of Codling Moth (*Cydia pomonella* L) Damage in Apple Fruit Using Hyperspectral Imaging Method. *Iran. J. Biosyst. Eng.*, 48(2), 241-249. [In Persian]
- [11] Zhu, H., Chu, B., Fan, Y., Tao, X., Yin, W., & He, Y. (2017). Hyperspectral imaging for predicting the internal quality of kiwifruits based on variable selection algorithms and chemometric models. *Sci. Rep.*, 7(1), 1-13.
- [12] Rahi, S., Mobli, H., Jamshidi, B., Azizi, A., & Sharifi, M. (2020). Microbial Contamination Assessment of Lettuce using NIR Hyperspectral Imaging: Case Study on *Escherichia coli*. *Iran. J. Biosyst. Eng.*, 51(3), 599-610. [In Persian]
- [13] Wei, X., He, J., Zheng, S., & Ye, D. (2020). Modeling for SSC and firmness detection of persimmon based on NIR hyperspectral imaging by sample partitioning and variables selection. *Infrared Phys. Technol.*, 105, 99-103.
- [14] Kheiralipour, K., Ahmadi, H., Rajabipour, A., Rafiee, S., Nikkiah, M. J., Digvir, J., Siliveru, K., Malihipour, A. (2021). Processing the Hyperspectral Images for Detecting Infection of Pistachio Kernel by R5 and KK11 Isolates of *Aspergillus flavus* Fungus. *Iran. J. Biosyst. Eng.*, 52(1), 13-25. [In Persian]
- [15] Roopa, N., Chauhan, O. P., Madhukar, N., Ravi, N., Kumar, S., Raju, P. S., & Dasgupta, D. K. (2015). Minimal processing and passive modified atmosphere packaging of bread fruit (*Artocarpus altilis*) sticks for shelf life extension at refrigerated temperature. *J. Food Sci. Technol*, 52(11), 7479-7485.
- [16] Xu, K., Wang, A., & Brown, S. (2012). Genetic characterization of the Ma locus with pH and titratable acidity in apple. *Mol. Breed.*, 30(2), 899-912.
- [17] Polder, G., van der Heijden, G. W., Keizer, L. P., & Young, I. T. (2003). Calibration and characterisation of imaging spectrographs. *J. Near Infrared Spectrosc.*, 11(3), 193-210.
- [18] Ding, J., Zhang, R., Ahmed, S., Liu, Y., and Qin, W. 2019. Effect of Sonication Duration in the Performance of Polyvinyl Alcohol/Chitosan Bilayer Films and Their Effect on Strawberry Preservation. *Molecules*, 24(7), 1408-1414.
- [19] Rossel, R. A. V. (2008). ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, 90(1), 72-83.
- [20] Tahmasebi, M., Golmohammadi, A., & Tabatabaei-kolor, R. (2017). Measuring of Paddy mass flow using capacitive sensor and modeling with using multiple regression, ANN, and ANFIS models. *Iran. J. Biosyst. Eng.*, 48 (2), 221-227. [In Persian]
- [21] Tamuno, E. N. J., & Onyedikachi, E. C. (2015). Effect of packaging materials, storage conditions on the vitamin C and pH value of cashew apple (*Anacardium occidentale* L.) juice. *J. Food. Nutr. Sci.*, 3(4), 160-165.
- [22] Alenazi, M. M., Shafiq, M., Alsadon, A. A., Alhelal, I. M., Alhamdan, A. M., Solieman, T. H., ... & Al-Selwey, W. A. (2020). Improved functional and nutritional properties of tomato fruit during cold storage. *Saudi J. Biol. Sci.*, 27(6), 1467-1474.
- [23] Gelly, M., Recasens, I., Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., & Marsal, J. (2004). Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *J. Sci. Food Agric.*, 84(6), 561-568.

- [24] Etemadipoor, R., Ramezani, A., Dastjerdi, A. M., & Shamili, M. (2019). The potential of gum arabic enriched with cinnamon essential oil for improving the qualitative characteristics and storability of guava (*Psidium guajava* L.) fruit. *Sci. Hortic.*, 251, 101-107.
- [25] Cozzolino, D., Cynkar, W. U., Shah, N., & Smith, P. (2011). Multivariate data analysis applied to spectroscopy: Potential application to juice and fruit quality. *Food Res. Int.*, 44(7), 1888-1896.
- [26] Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., & Ghassemian, H. (2012). Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. *Comput. Electron. Agric.*, 85, 64-69.
- [27] Heidari, P., Rezaei, M., Sahebi, M., & Khadivi, A. (2019). Phenotypic variability of *Pyrus boissieriana* Buhse: Implications for conservation and breeding. *Sci. Hortic.*, 247, 1-8.
- [28] Rahman, A., Kandpal, L. M., Lohumi, S., Kim, M. S., Lee, H., Mo, C., & Cho, B. K. (2017). Nondestructive estimation of moisture content, pH and soluble solid contents in intact tomatoes using hyperspectral imaging. *Appl. Sci.*, 7(1), 109.
- [29] Zhang, N., Zhang, C., Han, C., & Shen, T. (2018). The Handling Approach of Near-Infrared Spectroscopy for Apple Quality Prediction Based on Digital Signal Processing. In: *37th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 4136-4140). Wuhan, China.
- [30] Kim, S. Y., Hong, S. J., Kim, E., Lee, C. H., & Kim, G. (2021). Neural Network based Prediction of Soluble Solids Concentration in Oriental Melon using VIS/NIR spectroscopy. *Appl. Eng. Agric.*, (in press). doi:10.13031/aea.14332.
- [31] Magwaza, L. S., Opara, U. L., Nieuwoudt, H., Cronje, P. J., Saeys, W., & Nicolai, B. (2012). NIR spectroscopy applications for internal and external quality analysis of citrus fruit—a review. *Food Bioproc. Tech.*, 5(2), 425-444.
- [32] Li, X., Wei, Y., Xu, J., Feng, X., Wu, F., Zhou, R., ... & He, Y. (2018). SSC and pH for sweet assessment and maturity classification of harvested cherry fruit based on NIR hyperspectral imaging technology. *Postharvest Biol. Technol.*, 143, 112-118.
- [33] Zhiming, G., Wenqian, H., Liping, C., Yankun, P., & Xiu, W. (2014). Shortwave infrared hyperspectral imaging for detection of pH value in Fuji apple. *Int. J. Agric. Biol.*, 7(2), 130-137.
- [34] Razavi, M. S., Golmohammadi, A., Sedghi, R., & Asghari, A. (2020). Prediction of bruise volume propagation of pear during the storage using soft computing methods. *Food Sci. Nutr.*, 8(2), 884-893.
- [35] Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S., Sharifi, M., Hosseinpour, S., & Shah, A. (2017). Combined application of Life Cycle Assessment and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for modeling energy and environmental emissions of oilseed production. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 78, 807-820.
- [36] Sabzi, S., Pourdarbani, R., Rohban, M. H., Fuentes-Penna, A., Hernández-Hernández, J. L., & Hernández-Hernández, M. (2021). Classification of Cucumber Leaves Based on Nitrogen Content Using the Hyperspectral Imaging Technique and Majority Voting. *Plants*, 10(5), 898-911.

*Research Article***Near infrared hyperspectral imaging for non-destructive determination of pH value in red delicious apple fruit during shelf life****Abdollah Golmohammadi^{1*}, Mohammad Tahmasebi², Mahsa Sadat Razavi²****1. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran****2. PhD candidate, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran****Abstract**

Quality assessment and fruits' sorting are important activities in postharvest process that are attracting notices interestingly because of increasing demand for healthy products with better quality. In the recent decades, various non-invasive and non-destructive techniques for fruits and vegetables evaluations have been employed. Among these methods, hyperspectral imaging as a non-destructive, fast and ecofriendly technique is getting researchers' attraction increasingly in order to crops properties assessment. Regarding this fact that consumption of organic acids and consequent changes pH is considered as one of the important qualitative parameters of apple fruits, this study aimed to investigate the effect of shelf life time on pH value of Red Delicious apples during 60 days. Hyperspectral reflecting imaging in range of 400-1000 nm has been applied while the pH of samples was measured destructively. After discarding noises using principal component analysis (PCA) analysis, to improve spectrum, different primary pre-processing had been applied and their effects were investigated. The suitable model was obtained via Partial Least Square method (PLS). Important wavelengths were selected based on regression coefficient of the best model includes large absolute values of weighted regression coefficients (BW) and using various techniques were modeled. Concerning the PLS analysis, the best results were obtained through smoothing Savitzky-Golay pre-processing with mean square root error (RMSE) of 0.02 and 0.018 and coefficient of determination (R^2) both 0.980 for calibration and validation data, respectively. According to regression coefficient of the best model, 9 wavelengths were determined as the best. In modeling by efficient wavelength, artificial neural network (ANN) gave the best result. Hence, it was obvious that non-destructive method of hyperspectral imaging was capable to predict pH values of apple fruits with high accuracy during the shelf life.

Keywords: Shelf life, hyperspectral imaging, apple, non-destructive, pH.

* Corresponding Author: golmohammadi@uma.ac.ir

