

تخمین غیرمخرب سفتی میوه گوجه‌فرنگی با استفاده از روش طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک

محمد حق‌شناس آدرمنابادی^۱، سید احمد میره‌ای^{۲*}، مرتضی صادقی^۲ و مجید ناظری^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵)

چکیده

با توجه به استقبال بازار از محصولات کشاورزی با کیفیت و سالم، استفاده از روش‌های غیرمخرب برای تعیین کیفیت آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، روش طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIR) یکی از روش‌های پرکاربرد در حوزه ارزیابی کیفی محصولات کشاورزی است. در این پژوهش، سامانه‌ای برای اندازه‌گیری طیف NIR میوه گوجه‌فرنگی در مد "عبور نیمه" توسعه داده شد. از لامپ‌های هالوژنی به‌عنوان منابع تحریک نور و از یک اسپکترومتر پرتابل مجهز به فیبر نوری برای جمع‌آوری طیف در محدوده ۴۰۰-۱۱۰۰ نانومتر استفاده شد. بلافاصله پس از جمع‌آوری طیف از ۱۷۰ نمونه گوجه‌فرنگی (رقم گلدی) که در طول مراحل مختلف رسیدگی برداشت شده بودند، سفتی نمونه‌ها با استفاده از آزمون نفوذ با پروب استاندارد اندازه‌گیری شد. برای حذف اثر عوامل مزاحم از روش‌های مختلف پیش‌پردازش و برای مدل‌سازی سفتی از روش رگرسیون چند متغیره حداقل مربعات جزئی (PLS) استفاده شد. در بررسی نتایج اولیه طیف‌ها، دو پیک جذبی در طول موج‌های ۶۷۰ و ۹۹۰ نانومتر مشاهده شدند که به ترتیب مربوط به وجود کلروفیل و آب در میوه گوجه‌فرنگی بودند. روش طیف‌سنجی NIR توانست سفتی گوجه‌فرنگی را با یک ضریب همبستگی در مرحله پیش‌بینی (rp) برابر با ۰/۹۲۱ و خطای پیش‌بینی (RMSEP) برابر ۲/۵ نیوتن پیشگویی کند.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIR)، گوجه‌فرنگی، سفتی، مد عبور نیمه، حداقل مربعات جزئی (PLS)

۱ و ۲. به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیاران، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. استادیار، گروه فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: samireei@cc.iut.ac.ir

مقدمه

طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی ایران، در سال زراعی ۹۵-۹۴، از حدود ۱۴۹ هزار هکتار سطح زیر کشت گوجه‌فرنگی، حدود ۵/۸ میلیون تن محصول برداشت شده که بخشی از آن نیز به صادرات اختصاص داده شده است (۳). بنابراین، حجم نسبتاً بالای تولید (رتبه هفتم جهانی بر اساس آمار فائو در سال ۲۰۱۶) و صادرات گوجه‌فرنگی، تعیین کیفیت آن را از نظر اقتصادی به‌صرفه کرده است. برای گوجه‌فرنگی‌های تازه، دو ویژگی مهم کیفیت برای مصرف‌کنندگان، بافت و رنگ پوست آن‌ها است. بافت یک ویژگی کیفی بسیار مهم برای محصول گوجه‌فرنگی است که به ساختار (مولکولی، میکروسکوپی یا ماکروسکوپی) آن مربوط است. فاکتورهای متعددی مانند میزان رسیدگی، حساسیت به آسیب‌های مکانیکی موجود در هنگام برداشت و نگهداری و مدت زمان انبارمانی، به‌میزان سفتی و یا بافت گوجه‌فرنگی بستگی دارند. از طرف دیگر، انتخاب زمان بهینه برداشت، نقش مهمی در تولید گوجه‌فرنگی‌های با کیفیت و قابلیت فروش بهتر و عمر مفید طولانی‌تر بازی می‌کند (۱۸).

نگرانی تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در مورد گوجه‌فرنگی‌ها همواره این بوده است که پس از برداشت، فرایند رسیدن آن‌ها ادامه می‌یابد و گوجه‌فرنگی‌ها می‌توانند خیلی سریع‌تر از حد انتظار، بیش‌رسیده شوند. به عبارت دیگر، نرم شدن در حین انبارداری، توزیع و مصرف گوجه‌فرنگی‌ها یک مشکل عمده در این نوع محصول است و حساسیت آن‌ها به آسیب را افزایش می‌دهد. به‌نحوی که برخی مصرف‌کنندگان در زمان انتخاب با استفاده از فشار انگشتان دست برای آزمودن میزان سفتی گوجه‌فرنگی استفاده می‌کنند و سپس تصمیم به خرید می‌گیرند. بنابراین از درجه سفتی به‌عنوان یک شاخص مهم کیفیت گوجه‌فرنگی استفاده می‌شود (۴ و ۵). اما به‌طور دقیق، سفتی گوجه‌فرنگی به‌صورت نیروی مورد نیاز برای نفوذ یک پروب استاندارد به داخل گوشت محصول تعیین می‌شود (۱۶). با این حال، این آزمایش، مخرب بوده و پس از آن محصول دیگر قابل مصرف یا عرضه به بازار نیست. همچنین امکان به‌کارگیری این

آزمون در خطوط با سرعت بالای درجه‌بندی وجود ندارد. از طرف دیگر تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه استفاده از روش طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک برای تعیین شاخص‌های کیفی میوه‌ها و سبزیجات در دنیا انجام گرفته است. به‌خصوص در یک دهه اخیر، به‌همراه توسعه سامانه‌های پرتابل، از این روش به‌صورت برخط و در سرعت‌های بالای خطوط درجه‌بندی محصولات کشاورزی نیز استفاده شده است. به‌طورکلی، پژوهش‌های انجام شده در زمینه طیف‌سنجی NIR را می‌توان به دو دسته تحلیل‌های کمی و کیفی تقسیم‌بندی کرد. در تحلیل‌های کمی، از داده‌های طیف NIR برای تخمین و یا پیشگویی میزان یک مؤلفه مشخص از محصول استفاده می‌شود. درحالی که در تحلیل‌های کیفی از این داده‌ها برای دسته‌بندی یا طبقه‌بندی محصولات بر اساس یک ویژگی مشخص مانند آسیب‌های درونی، واریته و یا مراحل رسیدگی محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. در زمینه به‌کارگیری روش طیف‌سنجی NIR در ارزیابی کیفیت و رسیدگی گوجه‌فرنگی، این روش توانسته است در محدوده ۴۰۰ تا ۲۳۵۰ نانومتر، مواد جامد محلول (SSC) و اسیدیته کل (pH) گوجه‌فرنگی را با ضرایب همبستگی (r) به‌ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۸۳ پیشگویی کند (۹). همچنین سفتی و میزان لیکوپن میوه گوجه‌فرنگی در محدوده ۴۰۰ تا ۲۳۵۰ نانومتر به‌ترتیب با ضرایب تبیین (R^2) برابر ۰/۹۷ و ۰/۹۶ پیشگویی شدند (۷). لیکوپن و رنگ گوجه‌فرنگی نیز با R^2 به‌ترتیب برابر ۰/۹۸ و ۰/۹۶ در محدوده ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر پیشگویی شدند (۸). همچنین با مقایسه طیف‌های رامان حاصل از قند خالص و طیف‌های گرفته شده از میوه گوجه‌فرنگی به‌صورت غیرمخرب، اثر انگشت‌های طیفی مربوط به قندها در محدوده طیفی ۳۰۰۰ و ۲۳۰۰ سانتی‌متر معکوس بررسی شدند (۱۴). درنهایت در پژوهشی دیگر، لیکوپن گوجه‌فرنگی این بار در محدوده ۳۸۰ تا ۷۰۰ نانومتر با ضریب همبستگی (r) ۰/۹۰ پیشگویی شد (۶).

با توجه به موارد مطرح شده، هدف از این پژوهش، بررسی امکان به‌کارگیری روش طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ نزدیک

در هنگام ثبت طیف در وضعیت عبور نیمه، نمونه روی استوانه نگهدارنده میوه قرار می‌گرفت (شکل ۱). سپس از شش لامپ هالوژنی برای پرتودهی گسترده از زیر به نمونه‌های گوجه‌فرنگی و به‌صورت مایل استفاده شد. فیبر نوری نیز در داخل استوانه نگهدارنده نمونه، دقیقاً زیر نمونه قرار می‌گرفت تا از ورود پرتوهای ناشی از بازتابش معمولی جلوگیری شود. قبل از شروع هر اندازه‌گیری، طیف‌های تیره و مرجع تعریف و اندازه‌گیری شدند. طیف تیره با خاموش کردن منابع نور و قرار دادن جسم کدر در محل قرارگیری نمونه و طیف مرجع با روشن کردن تمام منابع نور اندازه‌گیری شد. در زمان اندازه‌گیری اولین طیف مرجع، شدت نور لامپ‌ها تا اندازه‌ای زیاد شد که اسپکترومتر در آستانه اشباع شدن قرار گیرد. فاصله فیبر نوری از سطح محفظه نگهدارنده نمونه در تمامی اندازه‌گیری‌ها ثابت بود به‌صورتی که فیبر با نمونه تماس مستقیم نداشته باشد.

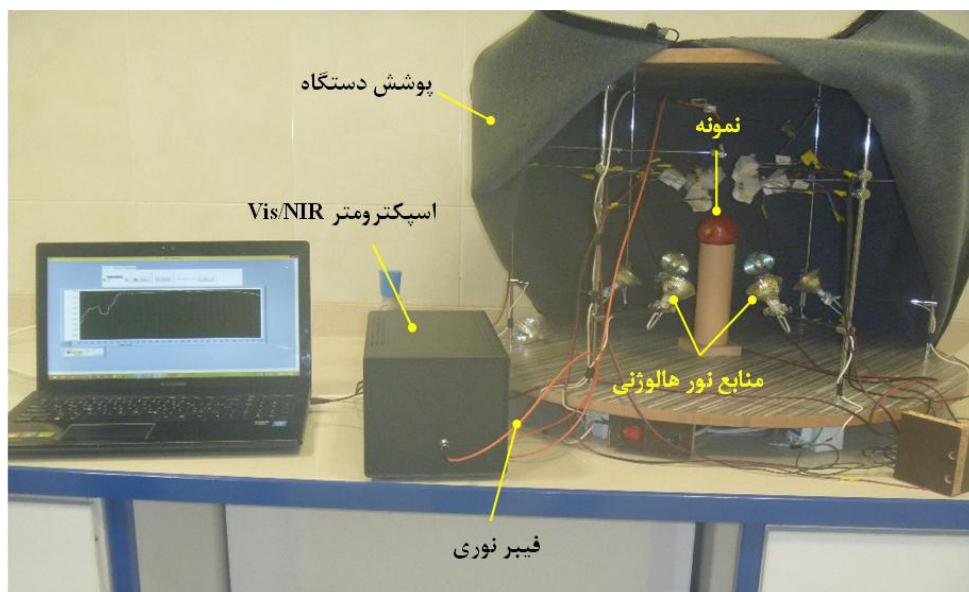
پس از اتمام جمع‌آوری طیف NIR، سفتی نمونه‌ها با استفاده از روش استاندارد اندازه‌گیری شد. شکل ۲، دستگاه جامع آزمون کشش و فشار مدل ۲۰-STM محصول شرکت سنتام (SANTAM)، ساخت کشور ایران را که برای این منظور استفاده شد را نشان می‌دهد. لودسل مورد استفاده در این پژوهش، یک لودسل S شکل، مدل ۵۰-DBBP ساخت شرکت بونگ‌شین کشور کره جنوبی و با ظرفیت ۵۰ kgf بود. طبق استاندارد ASABE از یک پروب سر تخت با قطر چهار میلی‌متر برای انجام آزمون نفوذ استفاده شد. برای اینکه نیروهای مماسی در سطح پروب به حداقل برسد، نمونه به‌گونه‌ای داخل محل نگهداری قرار داده شد که سطح گوجه‌فرنگی عمود بر پروب باشد. سپس پروب روی سطح میوه مماس شده و آزمون نفوذ تا رسیدن به اولین نقطه تسلیم میوه انجام گرفت. فک بالایی دستگاه طبق استاندارد با سرعت ۲۵/۴ میلی‌متر بر دقیقه حرکت می‌کرد. نرم‌افزار دستگاه، نمودار نیرو در برابر جابه‌جایی را در فایل اکسل ذخیره می‌کرد. حداکثر مقدار نیروی لازم برای نفوذ پروب به داخل بافت گوجه‌فرنگی به‌عنوان شاخص سفتی میوه در نظر گرفته شد.

به‌عنوان یک روش غیرمخرب و سریع برای تخمین سفتی میوه گوجه‌فرنگی است.

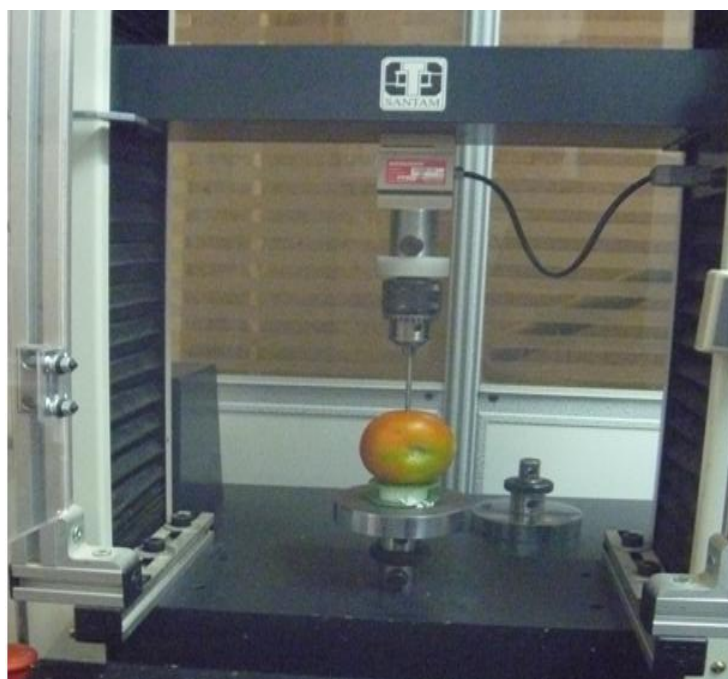
مواد و روش‌ها

در این پژوهش میوه‌های گوجه‌فرنگی (رقم گلدی) از گلخانه‌ای در روستای روران شهر اصفهان خریداری و سپس به آزمایشگاه آزمون‌های غیرمخرب گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه صنعتی اصفهان منتقل شدند. پس از بررسی‌های اولیه، تعداد ۱۷۰ نمونه سالم انتخاب و تا قبل از انجام آزمایش‌های اصلی در یخچال و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند. نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش، برای برقراری تعادل با محیط به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری و سپس بر اساس رنگ ظاهری و به‌صورت چشمی به سه گروه نارس (نمونه‌های سبز رنگ با کد G)، نیمه‌رس (نمونه‌های نارنجی رنگ با کد O) و رسیده (نمونه‌های قرمز رنگ با کد R) تقسیم و کدگذاری شدند.

پس از اندازه‌گیری مشخصه‌های فیزیکی نمونه‌ها شامل ابعاد، وزن و رنگ، طیف NIR نمونه‌ها در مد عبور نیمه جمع‌آوری شد. شکل ۱ سامانه توسعه داده شده برای اندازه‌گیری طیف NIR در وضعیت عبور نیمه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است این سامانه شامل منبع نور، اسپکترومتر پرتابل با آشکارساز CCD، فیبر نوری و یک بدنه انعطاف‌پذیر برای اتصال قسمت‌های مختلف به آن است. در این سامانه از شش عدد لامپ هالوژن کوارتزی ۱۲ ولتی با توان ۵۰ وات ساخت کشور آلمان به‌عنوان منابع نور NIR استفاده شد. این منابع در محدوده طول‌موج مرئی و فروسرخ دارای تابشی پیوسته و بدون نوسان هستند. از یک اسپکترومتر از نوع آرایه CCD برای ثبت و ذخیره طیف در محدوده طول‌موج از ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر با وضوح اپتیکی دو نانومتر استفاده شد. همچنین از یک فیبر نوری شیشه‌ای ۲۰۰ میکرونی مجهز به درگاه خروجی SMA برای انتقال نور عبوری از میوه به درون اسپکترومتر استفاده شد. طیف به‌دست آمده از طریق درگاه USB به رایانه منتقل و به‌وسیله برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار Lab View در رایانه ذخیره شد.



شکل ۱. سامانه اندازه‌گیری طیف NIR از نمونه‌ها



شکل ۲. دستگاہ جامع آزمون کشش و فشار

اثر پراکنش نور، ناهمواری‌های سطحی نمونه، عوامل مرتبط با دستگاہ مانند نویز حرارتی آشکارساز اسپکترومتر، نویز ایجاد شده در اثر کم بودن شدت تابش و غیره ایجاد شوند. بدین منظور با استفاده از روش‌های مختلف پیش‌پردازش، اطلاعات غیرمفید از طیف‌های جمع‌آوری شده حذف شدند. ابزارها و

روش‌های پیش‌پردازش طیف‌ها داده‌های خام معمولاً دچار مشکلاتی مانند نویز، بایاس و همچنین اطلاعات غیرمفیدی که موجب تضعیف پردازش‌های بعدی می‌شوند هستند. در مورد طیف‌های به‌دست آمده در این پژوهش، اطلاعات غیرمفید می‌توانند در اثر برخی عوامل مانند

شیب‌دار خطی است که دو نقطه طیف را به هم متصل می‌کند.

مشتق‌های اول و دوم

در این روش با استفاده از الگوریتم ساویتسکی-گولای یک چندجمله‌ای بر طیف به دست آمده منطبق می‌شود و سپس از این چندجمله‌ای مشتق‌های مرتبه اول و دوم گرفته می‌شود. از این روش‌ها می‌توان برای یکنواخت کردن طیف (با استفاده از الگوریتم ساویتسکی-گولای) و نیز حذف اثرات جابه‌جایی خط پایه نیز استفاده کرد. همچنین مشتق مرتبه دوم، پیش‌پردازشی بسیار مناسب برای نشان دادن و برجسته کردن پیک‌های ضعیف در طیف است.

پس از اعمال روش‌های مختلف پیش‌پردازش، کلیه نمونه‌ها به دو دسته کالیبراسیون و آزمون تقسیم شدند. از دسته کالیبراسیون که ۷۵ درصد نمونه‌ها را شامل می‌شد، برای استخراج مدل و از دسته آزمون برای اعتبارسنجی مدل حاصل استفاده شد که ۲۵ درصد باقی‌مانده را در بر می‌گرفت.

مدل‌سازی و ارزیابی مدل

در این پژوهش برای استخراج مدل‌های پیشگویی سفتی گوجه‌فرنگی از روش حداقل مربعات جزئی (Partial Least Squares یا PLS) استفاده شد. به‌طورکلی روش PLS زمانی که در مسئله مورد نظر چندین متغیر وابسته وجود داشته باشد، تعداد متغیرهای مستقل زیاد و شناسایی متغیرهای مؤثر مشکل باشد، در متغیرهای مستقل مشکل هم‌راستایی وجود داشته باشد و در نهایت تعداد نمونه‌ها کم باشد، بسیار پرکاربرد است. در این پژوهش نیز هر طیف، شامل ۱۰۹۶ عدد طول موج می‌شد که از این تعداد طول موج به‌عنوان متغیر مستقل در مدل‌های PLS استفاده شد. از لحاظ تکنیکی تفاوت اصلی روش PLS با سایر روش‌های رگرسیونی آن است که به‌جای استفاده مستقیم از متغیرهای مستقل، با به‌کارگیری اصول تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، متغیرهای مستقل در چندین عامل اصلی که در اصطلاح فاکتور یا متغیر پنهانی نامیده می‌شوند، توصیف می‌شوند به‌گونه‌ای که این فاکتورها می‌توانند

روش‌های مختلف پیش‌پردازش که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند عبارت بودند از:

یکنواخت کردن

برای حذف نویزهای تصادفی از طیف‌ها از تکنیک‌های مختلف یکنواخت‌سازی استفاده می‌شود. در این پژوهش از الگوریتم ساویتسکی-گولای (Savitzky-Golay) (SG) برای این منظور استفاده شد (۱۳).

نرمالیزه کردن

به‌طور کلی، نرمالیزه کردن با هدف تصحیح طیف از اثرات تغییر فاصله بین آشکارساز و نمونه و نیز جدا کردن یک باند جذبی از یک ترکیب شیمیایی ثابت انجام می‌شود. روش‌های مختلفی برای نرمالیزه کردن داده‌ها وجود دارند که شامل نرمالیزه کردن برداری، میانگین، حداقل، حداکثر و حداقل-حداکثر هستند. در میان این روش‌ها مؤثرترین روش، نرمالیزه کردن برداری است که در این پژوهش از این نوع به‌عنوان یکی از روش‌های پیش‌پردازش استفاده شد.

تصحیح پراکنش افزایشنده (Multiplicative Scatter Correction یا MSC)

برای تصحیح همزمان منتقل شدن نقطه شروع طیف‌ها و تغییرات ایجادشده در شکل طیف، از روش MSC استفاده می‌شود. تغییرات ایجاد شده در شکل طیف می‌توانند ناشی از برخی عوامل فیزیکی از قبیل پراکنش غیر یکنواخت ایجاد شده در سرتاسر طیف، اندازه میوه و تغییر در شاخص انکسار باشند. با به‌کارگیری روش MSC، اثرات پراکنش نور حذف می‌شوند به‌صورتی که هر طیف به یک طیف ایده‌آل از نمونه که در عمل همان طیف میانگین است، خطی‌سازی می‌شود.

تصحیح خط پایه (Baseline Correction یا BC)

پیش‌پردازش BC در اصل یک نوع تبدیل است که در آن یک خط پایه شیب‌دار به یک خط پایه افقی تبدیل می‌شود. خط پایه

آمده دارای شدت پایین تری است. نکته قابل توجه دیگر، وجود پیک جذبی (فرورفتگی در طیف عبور نیمه) در طول موج‌های ۶۷۰ و ۹۹۰ نانومتر است که به‌خصوص در مورد نمونه‌های نارس مشهود است. جذب ۶۷۰ نانومتر را می‌توان به وجود کلروفیل نسبت داد و همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میزان جذب به‌خصوص در نمونه‌های نارس که دارای سطح بالاتری از میزان کلروفیل هستند، بیشتر است. این جذب در نمونه‌های رسیده کاملاً از بین رفته است که دلیل آن، از بین رفتن کلروفیل میوه گوجه‌فرنگی طی فرایند رسیدگی است. جذب ۹۹۰ نانومتر نیز ناشی از وجود آب در میوه گوجه‌فرنگی است. شبیه این مشاهدات را پژوهشگران دیگر نیز گزارش کرده‌اند. در طیف NIR پرتقال، پیک جذبی در طول موج ۶۷۵ نانومتر به وجود کلروفیل آلفا نسبت داده شده است. همچنین مشاهده شده است که هرچه رنگ پوست میوه از سبز تیره به نارنجی تغییر می‌کند، جذب کمتری اتفاق می‌افتد و در نتیجه با افزایش روند رسیدگی میوه، کاهش جذب را می‌توان مربوط به کاهش مقدار کلروفیل و در نتیجه کاهش جذب نور توسط رنگدانه‌ها دانست. همچنین جذب ۹۸۰ نانومتر به آب موجود در پرتقال نسبت داده شده است (۱۷). علاوه‌بر آن، تغییرات قابل توجه طیف در محدوده ۶۷۵ تا ۶۷۸ نانومتر برای محصول گوجه‌سبز را به تغییرات کلروفیل نسبت داده‌اند (۱۹). در پژوهش دیگر، میزان کلروفیل در میوه گوجه‌فرنگی در طول موج ۶۷۵ نانومتر طیف‌های NIR تشخیص داده شده است (۷).

پیش‌پردازش و تحلیل اولیه طیف‌های NIR

جدول ۱ اثر پیش‌پردازش‌های مختلف بر نتایج مدل‌های رگرسیون PLS برای پیش‌بینی سفتی با استفاده از طیف NIR را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طیف‌سنجی NIR با منابع نور گسترده هالوژنی، بهترین نتایج با استفاده از الگوریتم ساویتسکی-گولای ($r_c=0/911$ و $RMSEC=2/338$ N) و $r_{cv}=0/876$ و $RMSECV=2/754$ N) به‌عنوان پیش‌پردازش به‌دست آمد.

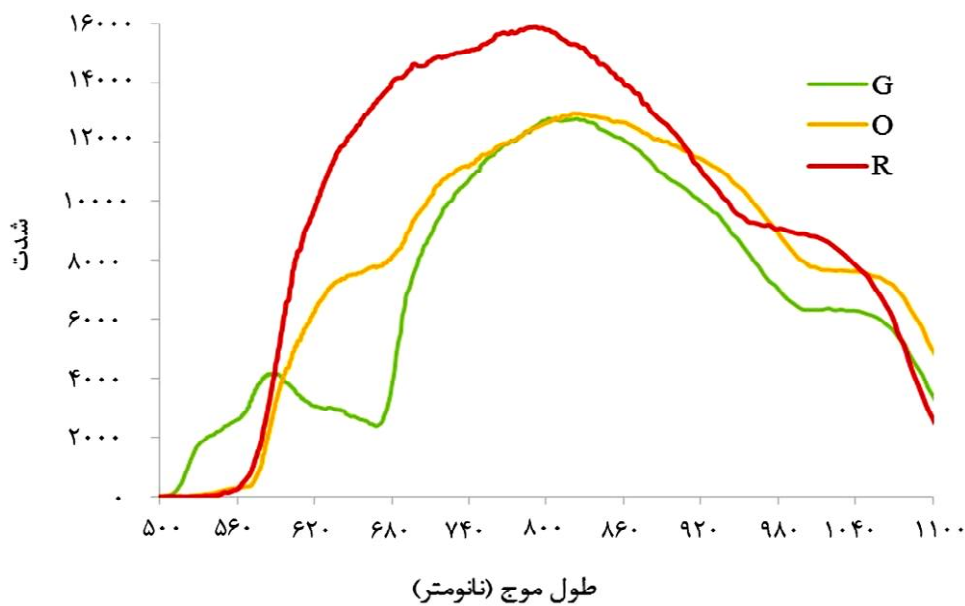
پس از آنکه پیش‌پردازش مناسب برای روش طیف‌سنجی

به‌طور هم‌زمان، بیشترین تغییرات در متغیر(های) وابسته را نیز توصیف کنند (۲۰).

پارامترهایی که برای ارزیابی توانایی مدل‌های ساخته شده استفاده شدند، شامل ضریب همبستگی کالیبراسیون (r_c)، ریشه میانگین مربعات خطای کالیبراسیون (RMSEC)، ضریب همبستگی اعتبارسنجی مقاطع یگانه (r_{cv})، ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی مقاطع یگانه (RMSECV)، ضریب همبستگی اعتبارسنجی آزمون (rp) و ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی آزمون بودند. علاوه‌بر این پارامترها از شاخص انحراف پیشگوی باقی‌مانده (Residual Predictive Deviation یا RPD) نیز برای ارزیابی توانایی مدل‌ها در تخمین سفتی گوجه‌فرنگی نیز استفاده شد. این شاخص بهترین پارامتر برای ارزیابی مسائل مربوط به مدل‌سازی‌های NIR است که با تقسیم انحراف استاندارد پارامتر مورد نظر (در اینجا سفتی) بر میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی آزمون مدل به‌دست می‌آید. مقادیر نسبتاً پایین RPD بیانگر آن است که یا نمونه‌های انتخاب شده دارای دامنه کمی از تغییرات در پارامتر مورد نظر هستند و یا خطای تخمین به‌دست آمده از مدل کالیبراسیون طیف‌ها در مقایسه با گسترش پارامتر مورد نظر زیاد است که در هر دو حالت مدل‌های به‌دست آمده شرایط ثابت و مطمئن را در پیشگویی‌های بعدی نخواهند داشت (۲). کلیه تحلیل‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری The Unscrambler نسخه ۹/۷ انجام شد.

نتایج و بحث

شکل ۳ طیف‌های میانگین به‌دست آمده از نمونه‌های گوجه‌فرنگی در مراحل مختلف رسیدگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، طیف نمونه‌های رسیده با شدت بیشتری به آشکارساز می‌رسد که این امر، به دلیل شفاف‌تر شدن بافت‌های داخلی میوه در طی فرایند رسیدگی و در نتیجه عبور راحت‌تر نور از داخل آن است. ولی در مورد نمونه‌های نارس، به‌علت استحکام دیواره سلولی، نفوذ نور به درون میوه به‌سختی انجام می‌شود، بنابراین طیف به‌دست



شکل ۳. طیف NIR در مد تقابلی به‌دست آمده از نمونه‌های گوجه‌فرنگی در سه مرحله مختلف رسیدگی

جدول ۱. اثر پیش‌پردازش‌های مختلف بر نتایج رگرسیون PLS برای پیش‌بینی سفتی با استفاده از طیف‌سنجی NIR

اعتبار سنجی مقاطع یگانه		کالیبراسیون		پیش‌پردازش
RMSECV	r_{cv}	RMSEC	r_c	
۲/۷۶۰	۰/۸۷۵	۲/۴۶۳	۰/۹۰۱	Raw
۲/۷۵۴	۰/۸۷۶	۲/۳۳۸	۰/۹۱۱	Smoothing S.G
۲/۹۶۹	۰/۸۵۴	۲/۸۱۴	۰/۸۶۹	MSC
۳/۱۶۰	۰/۸۳۳	۲/۵۵۴	۰/۸۹۳	1st Derivatives
۲/۷۶۶	۰/۸۷۵	۲/۴۵۶	۰/۹۰۱	Baseline
۳/۰۳۹	۰/۸۴۷	۲/۸۶۲	۰/۸۶۳	SNV

همان‌طور که نشان داده شده است، طیف‌های NIR در حالت یکنواخت شده با الگوریتم ساویتسکی-گولای منجر به بهترین مدل‌های پیشگو شدند، به‌نحوی که مدل مربوط توانست در مرحله آزمون نتایج خوبی با ضریب همبستگی (rp) برابر ۰/۹۲۱، ریشه میانگین مربعات خطا پیشگویی (RMSEP) برابر ۲/۵۰ نیوتن و نسبت انحراف استاندارد ۲/۲۲ را ارائه دهد.

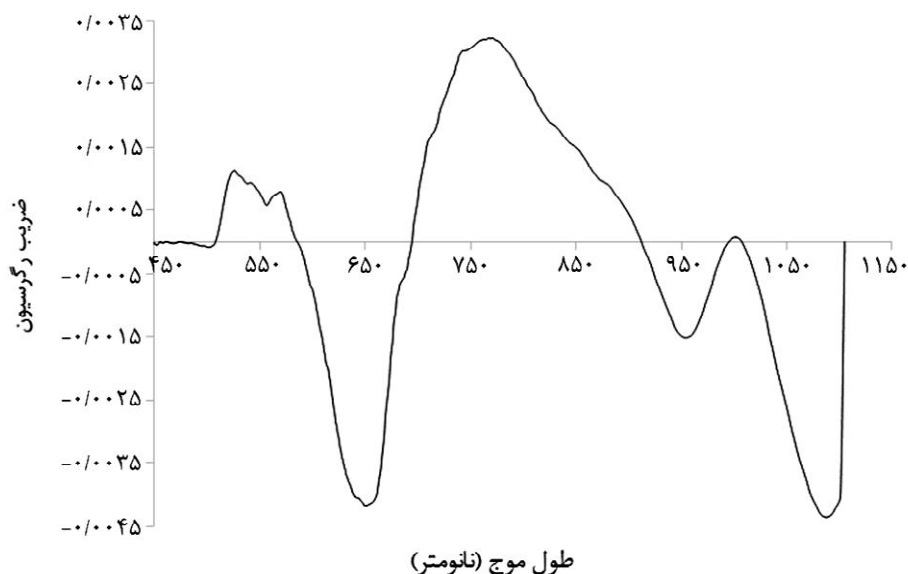
شکل ۴ منحنی ضرایب کالیبراسیون بهترین مدل پیشگو برای تخمین مؤلفه سفتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مقادیر ضریب کالیبراسیون در اطراف طول‌موج‌های ۶۵۰، ۷۷۰، ۹۶۰ و ۱۰۹۰ نانومتر بیشترین مقادیر

در NIR تخمین مؤلفه سفتی مشخص شد و داده‌های پرت حذف شدند، بهترین مدل تخمین، استخراج و سپس توانایی آن در پیش‌بینی دسته داده مستقل آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت. ذکر این نکته ضروری است که به‌طورکلی در روش‌های خطی مثل PLS، برای حذف اثرات غیر خطی ناشی از عوامل مزاحم، الگوی مشخصی برای تشخیص بهترین پیش‌پردازش وجود ندارد و معمولاً تشخیص بهترین پیش‌پردازش با روش سعی و خطا انجام می‌شود.

جدول ۲ نتایج بهترین مدل PLS برای پیش‌بینی مؤلفه سفتی گوجه‌فرنگی با استفاده از طیف‌سنجی NIR را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج رگرسیون PLS برای پیش‌بینی مؤلفه سفتی با استفاده از طیف‌سنجی NIR

اعتبارسنجی آزمونی			اعتبارسنجی مقاطع یگانه		کالیبراسیون			بهترین پیش‌پردازش
RPD	RMSEP (N)	r_p	RMSECV (N)	r_{cv}	RMSEC (N)	r_c	LV	
۲/۲۲۴	۲/۴۹۹	۰/۹۲۱	۲/۶۰۲	۰/۸۷۵	۲/۳۰۹	۰/۹۰۲	۹	Smoothing SG



شکل ۴. منحنی ضرایب کالیبراسیون روش طیف‌سنجی NIR برای تخمین مؤلفه سفتی

است که بسیاری آن را مربوط به جذب آب موجود در محصولات کشاورزی دانسته‌اند.

شکل ۵ مقادیر پیش‌بینی شده سفتی در مقابل مقادیر واقعی به‌دست‌آمده از بهترین مدل PLS را نشان می‌دهد. همبستگی بالا بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی (۰/۹۲۱) و خطای تخمین پایین (۲/۵ نیوتن) مؤید این نکته است که روش طیف‌سنجی NIR روشی مفید در تعیین مؤلفه سفتی میوه گوجه‌فرنگی است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که سفتی گوجه‌فرنگی (رقم گلدی) با استفاده از روش طیف‌سنجی NIR با دقت بالایی قابل پیش‌گویی است. در طیف NIR به‌دست‌آمده از نمونه‌های رسیده، به‌علت شفاف‌تر شدن بافت درونی میوه و عبور راحت‌تر نور از داخل آن، شدت طیف ثبت شده بالاتر بود. این

در تخمین مؤلفه سفتی با استفاده از روش NIR را به خود اختصاص داده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، طول‌موج‌های اطراف ۶۴۰ نانومتر مربوط به‌میزان کلروفیل موجود در گوجه‌فرنگی است (۱۹) و از آنجا که همراه با پیشرفت مراحل رسیدگی و نرم شدن گوجه‌فرنگی، کلروفیل موجود در نمونه‌ها شکسته می‌شود، میزان جذب در این طول موج توانسته است با سفتی نمونه‌ها یک همبستگی بالا و منفی ایجاد کند. همچنین، طول‌موج‌های اطراف ۷۶۰ نانومتر می‌تواند مربوط به جذب آب یا سومین اورتون گروه پایه OH و یا کربوهیدرات و یا چهارمین اورتون گروه پایه CH باشند. به‌نظر می‌رسد افزایش مواد جامد محلول گوجه‌فرنگی در طول فرایند رسیدگی توانسته است یک همبستگی مثبت با میزان سفتی آن ایجاد کند که این امر به‌خوبی در شکل ۴ قابل مشاهده است. طول‌موج ۹۶۰ نانومتر نیز مربوط به اولین اورتون گروه پایه OH

طیف‌های NIR ثبت شده قابل مشاهده بودند. علاوه بر این، در طی فرایند رسیدگی گوجه‌فرنگی، نرم شدن میوه نیز اتفاق می‌افتد که این تغییر نیز توسط طیف‌های NIR به وضوح قابل مشاهده بود.

در حالیست که برای نمونه‌های نارس، به دلیل استحکام دیواره‌های سلولی، طیف‌های ثبت شده شدت پایین تری داشت. همچنین فعل و انفعالات موجود در فرایند رسیدگی گوجه‌فرنگی شامل شکست کلروفیل، سنتز کاروتنوئید و ایجاد لیکوپن و در نهایت تغییر رنگ میوه از سبز به قرمز به خوبی در

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, H., M. Nazeri, A. Balooch and S. A. Mireei. 2014. LIF spectroscopy of fruits: Study of excitation wavelength independence. *In: Proceeding of The third Iranian Conference on Engineering Electromagnetic (ICEEM 2014)*, Tehran, Iran.
2. Agati, G., P. Pinelli, S. Cortés Ebner, A. Romani, A. Cartelat and Z. G. Cerovic. 2005. Nondestructive evaluation of anthocyanins in olive (*Olea europaea*) fruits by in situ chlorophyll fluorescence spectroscopy. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 53: 1354-1363.
3. Anonymous. 2010. Agricultural Statistics, Statistics Department of Ministry of Agriculture-Jahad.
4. Batu, A. 1998. Some factors affecting on determination and measurement of tomato firmness. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 22(4): 411-418.
5. Batu, A. 2004. Determination of acceptable firmness and colour values of tomatoes. *Journal of Food Engineering* 61(3): 471-475.
6. Berra, W. G. 2013. Visible/near infrared spectroscopic method for the prediction of lycopene in tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) Fruits. *Science, Technology and Arts Research Journal* 1(3): 17-23.
7. Chen, L., 2008. Non-destructive measurement of tomato quality using visible and near-infrared reflectance spectroscopy. PhD. Thesis. McGill University.
8. Clément, A., M. Dorais and M. Vernon. 2008. Nondestructive measurement of fresh tomato lycopene content and other physicochemical characteristics using visible-NIR spectroscopy. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 56(21): 9813-9818.
9. He, Y., Y. Zhang, A. G. Pereira, A. H. Gómez and J. Wang. 2005. Nondestructive determination of tomato fruit quality characteristics using VIS/NIR spectroscopy technique. *International Journal of Information Technology and Decision Making* 11(11): 97-106.
10. Lai, A., E. Santangelo, G. P. Soressi and R. Fantoni. 2007. Analysis of the main secondary metabolites produced in tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) epicarp tissue during fruit ripening using fluorescence techniques. *Postharvest Biology and Technology* 43(3): 335-342.
11. Liu, Y., X. Sun, H. Zhang and O. Aiguo. 2010. Nondestructive measurement of internal quality of Nanfeng mandarin fruit by charge coupled device near infrared spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture* 71: S10-S14.
12. Merzlyak, M. N., T. B. Melø and K. R. Naqvi. 2008. Effect of anthocyanins, carotenoids, and flavonols on chlorophyll fluorescence excitation spectra in apple fruit: signature analysis, assessment, modelling, and relevance to photoprotection. *Journal of Experimental Botany* 59(2): 349-359.
13. Nicolai, B. M., K. Beullens, E. Bobelyn, A. Peirs, W. Saeys, K. I. Theron and J. Lammertyn. 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology* 46(2): 99-118.
14. Nikbakht, A. M., T. Tavakoli Hashjin, R. Malekfar, B. Ghobadian. 2000. Application of Raman spectroscopy for non-destructive determination of qualitative parameters of tomato. *Journal of Food Science and Technology* 7(4): 25-33.
15. Noh, H. K. and R. Lu. 2007. Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality. *Postharvest Biology and Technology* 43(2): 193-201.
16. Ranatunga, C. L., H. H. E. Jayaweera, S. K. K. Suraweera and T. R. Ariyaratne. 2009. Effect of measurement of non-destructive firmness on Tomato quality and comparison with destructive methods. *Proceedings of the Technical Sessions* 25: 29-35.
17. Sighicelli, M. P., S. Patsayeva and A. Lai. 2005. Characterization of citrus fruit quality using reflectance spectroscopy. *In: Proceeding of the 31th IRSCE*, San Petersburg, Russia.
18. Teka, T. A. 2013. Analysis of the effect of maturity stage on the postharvest biochemical quality characteristics of

- tomato (*Lycopersicon esculentum* MILL.) fruit. *International Research Journal of Pharmaceutical and Applied Sciences* 3(5):180-186.
19. Tiwari, G., D. C. Slaughter and M. Cantwell. 2013. Nondestructive maturity determination in green tomatoes using a handheld visible and near infrared instrument. *Postharvest Biology and Technology* 86: 221-229.
 20. Williams, P. C. and K. Norris. 2001. Near-Infrared technology in the Agricultural and Food industry. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, Inc.
 21. Wulf, J. S., S. Rühmann, I. Rego, I. Puhl, D. Treutter and M. Zude. 2008. Nondestructive application of laser-induced fluorescence spectroscopy for quantitative analyses of phenolic compounds in strawberry fruits (*Fragaria x ananassa*). *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 56(9): 2875-2882.
 22. Wulf, J. S., M. Geyer, B. Nicolai and M. Zude. 2005. Non-destructive assessment of pigments in apple fruit and carrot by laser-induced fluorescence spectroscopy (LIFS) measured at different time-gate positions. In: Proceeding of the V International Postharvest Symposium, Verona, Italy. Pp. 682: 1387-1394.

Nondestructive Firmness Estimation of Tomato Fruit Using Near-Infrared Spectroscopy

M. Haghshenas Adarmanabadi¹, S. A. Mireei^{2*}, M. Sadeghi² and M. Nazeri³

(Received: October 09-2017; Accepted: January 15-2019)

Abstract

Today, nondestructive methods are widely used to determine the quality of agricultural products. Meanwhile, visible and near-infrared (Vis/NIR) spectroscopy is regarded as one of the most widely used methods in the field of quality assessment of agricultural products. In this study, a system was developed to measure the Vis/NIR spectra of tomato fruit samples in the half-transmittance mode of measurement. Halogen lamps were used as the sources of irradiation and a portable fiber optic spectrometer was utilized to collect the spectra in the range of 400-1000 nm. Immediately after collecting the spectra of 170 tomato samples, harvested at different stages of ripening, the firmness of the samples was measured using the standard Magness-Taylor penetration test. In order to eliminate the effects of irregular factors, different preprocessing methods were applied to the collected spectra. Then, partial least squares (PLS) regression was implemented to develop the firmness predictive models. Preliminary results showed two absorption peaks around 670 and 990 nm in the acquired spectra that were related to the chlorophyll and water contents of tomato, respectively. The spectroscopy method could nondestructively predict the tomato fruit firmness with a correlation coefficient (r_p) of 0.920 and the root mean squares error of prediction (RMSEP) of 2.5 mm.

Keywords Near-infrared spectroscopy, Tomato, Firmness, Half-transmittance mode, Partial least squares

1, 2. MSc. Student and Associate Professors, Respectively, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Laser and Photonics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: samireei@cc.iut.ac.ir