

بررسی خواص کیفی چغندر قند با استفاده از تصویربرداری فراطیفی

سید محسن مولایی^۱، عبدالله گل محمدی^{۲*}، محمد طهماسبی^۳

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- *استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- دانشجوی سابق دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

ایمیل نویسنده مسئول: golmohammadi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۵

چکیده

در دهه‌های اخیر برای ارزیابی کیفیت میوه‌ها و سبزی‌ها، فناوری‌های مختلف غیرمخرب کاربرد پیدا کرده است. در بین این روش‌ها، تصویربرداری فراطیفی به‌عنوان یک روش غیرمخرب، سریع و با کمترین آلودگی زیست‌محیطی به‌منظور ارزیابی خواص محصولات کشاورزی مورد توجه محققان قرار گرفته است. هدف از پژوهش بررسی تأثیر رقم، مدت‌زمان و شرایط نگهداری بر خواص کیفی چغندر قند و همچنین امکان‌سنجی استفاده از تصاویر فراطیفی به‌عنوان تکنیک جدید و غیرمخرب در سنجش خواص کیفی بوده است. سه رقم چغندر قند شامل ارقام آگریت، موریل و شکوفا در سه شرایط مختلف انبارداری (۱- در شرایط انباری با حفاظ ۲- بدون حفاظ یعنی در شرایط جوی ۳- زیر خاک و همان شرایط مزرعه) به مدت ۴۵ روز نگهداری و سپس تصویربرداری فراطیفی در مد بازتابی و در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر برای در هر ۱۵ روز یک‌بار اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد خواص نمونه‌ها (شامل مواد جامد محلول (SSC)، خواص مکانیکی، عیار قند، درصد رطوبت و pH) بر اساس روش‌های مخرب تعیین شد. چون طیف‌های اکتسابی دارای نویز می‌باشند به‌وسیله پیش‌پردازش‌های متنوع تأثیرات عوامل مزاحم به حداقل رسید تا داده‌های شفاف‌تری برای مدل‌سازی ویژگی‌های کیفی نمونه‌ها فراهم شود. در نهایت با استفاده از داده‌های منتج از تصویربرداری فراطیفی و آزمایش‌های مرجع بر اساس روش رگرسیون حداقل مربعات (PLS) اقدام به مدل‌سازی گردید و در گام آخر بعد از اعتبارسنجی مدل‌های حاصله، مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که روش تصویربرداری فراطیفی می‌تواند به‌عنوان ابزاری با ارزش برای پیش‌بینی خواص کیفی چغندر قند در طول دوره نگهداری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

"انبارداری"، "تصویربرداری فراطیفی"، "چغندر قند"، "خواص فیزیکی"، "رگرسیون حداقل مربعات (PLS)"

۱- مقدمه

تعیین و اندازه‌گیری ویژگی‌های بیرونی مانند اندازه، شکل و رنگ می‌باشد. تعیین عیار قند به روش آزمایشگاهی (شیمیایی) دارای عیوبی شامل مخرب بودن، وقت‌گیر بودن، محدودیت نمونه‌های مورد بررسی و نیاز به زمان جهت دریافت نتایج می‌باشد (آقایی سعدی و همکاران، ۱۳۹۷). چغندر قند با نام علمی *Beta vulgaris* گیاهی است دو ساله از تیره اسفناج که به‌صورت گیاه یک‌ساله کشت می‌شود. چغندر قند طی دوره رشد رویشی فاقد ساقه بوده و به‌صورت مجموعه‌ای از برگ‌های بزرگ افقی تا عمودی مشاهده می‌شود. طول دوره رشد برای تولید قند ۶ تا ۹ ماه می‌باشد (شفیعی، ۱۳۸۴). بر اساس آمار فائو در سال ۲۰۲۱ مقدار کل تولید چغندر قند در جهان ۲۷۸ میلیون تن بود که از ۴۶۲۹ هزار هکتار مزارع زیر کشت به‌دست آمده بود. (FAO, ۲۰۲۳)

بر اساس اطلاعات منتشر شده در وب‌سایت فائو در سال ۲۰۲۱ در بین کشورهای تولیدکننده این محصول کشور روسیه با تولید ۴۱/۲ میلیون تن مقام اول را به خود

رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضای محصولات غذایی، اهمیت کشاورزی مدرن را بیش از پیش نمایان ساخته است. افزایش تقاضا باعث از بین رفتن مرزهای تجاری و صادرات و واردات محصولات غذایی در جهان شده است. حضور مؤثر و مفید در بازارهای جهانی و رقابت تنگاتنگ با دیگر کشورها نیازمند توسعه و پیشرفت بیشتر در فناوری‌های پس از برداشت در فرآوری و صادرات محصولات می‌باشد. با توجه به اینکه کیفیت مواد غذایی به‌طور مستقیم با سلامت انسان در ارتباط است، سنجش کیفیت محصولات کشاورزی به‌عنوان یکی از فعالیت‌های مهم در فناوری پس از برداشت بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. (Moghimi et al, ۲۰۱۰) میزان قند، اسیدیته، طعم و مزه، بافت، ارزش غذایی و عیوب داخلی از جمله ویژگی‌های درونی برخی محصولات کشاورزی می‌باشند که کیفیت محصولات بر اساس آن‌ها سنجیده می‌شود. ارزیابی ویژگی‌های درونی تا حدودی مشکل‌تر از

ناحیه مختلف در بخش‌های طوقه، ریشه و دم در محدوده ۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر و به‌طور تماشایی انجام شد. همچنین طیف‌سنجی از سه ناحیه بر روی پوست و سپس نمونه‌ها را به‌صورت عمودی برش داده و از نواحی سه‌گانه طیف‌سنجی را انجام دادند. بر اساس نتایج این پژوهش برای تشخیص و سنجش عیار چغندر قند می‌توان از روش طیف‌سنجی بازتابی و ترکیب با انواع روش‌های پیش‌پردازش و مدل‌سازی رگرسیون چند متغیره PHS بهره برد. پن و همکاران (Pan et al., ۲۰۱۵) در پژوهشی از طیف‌سنجی مرئی و مادون قرمز نزدیک، همراه با رگرسیون حداقل مربعات جزئی، برای پیش‌بینی رطوبت، مواد جامد محلول و محتوای ساکارز و خواص مکانیکی چغندر قند استفاده نمودند. طیف‌های تعاملی از چغندر دست‌نخورده و برش خورده با استفاده از دو طیف‌سنج قابل حمل که به ترتیب مناطق محدوده طیفی ۴۰۰-۱۱۰۰ نانومتر و ۹۰۰-۱۶۰۰ نانومتر را پوشش می‌دادند، به دست آمد. هر دو طیف‌سنج پیش‌بینی‌های عالی برای رطوبت، مواد جامد محلول و محتوای ساکارز برش‌های چغندر با ضرایب همبستگی ۰/۸۹ تا ۰/۹۵ و خطاهای استاندارد پیش‌بینی ۰/۶ تا ۰/۸۵ ارائه نمودند؛ اما دقت پیش‌بینی برای چغندر دست‌نخورده پایین‌تر بود، پن و همکاران (Pan et al., ۲۰۱۶) در پژوهشی دیگر تصاویر پراکنده فراطیفی برای منطقه محدوده طیفی ۵۰۰-۱۰۰۰ نانومتر به دست آوردند که از آن طیف میانگین نسبی محاسبه شده بودند. مدل‌های پیش‌بینی با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) برای هر دو طیف کامل و طول‌موج‌های انتخابی توسعه داده شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از طیف میانگین نسبی، پیش‌بینی خوبی برای رطوبت، مواد جامد محلول و محتوای ساکارز برش‌های چغندر با همبستگی ۰/۷۵-۰/۸۸ و خطای استاندارد پیش‌بینی ۰/۹۵-۱/۰۸ بر اساس رگرسیون حداقل مربعات جزئی طیف کامل دارد. هدف از این پژوهش بررسی رقم، زمان و شرایط نگهداری بر خواص کیفی چغندر قند و همچنین امکان‌سنجی استفاده از تصاویر فراطیفی به‌عنوان تکنیک جدید و غیرمخرب در سنجش خواص کیفی در ارقام مختلف چغندر قند تحت شرایط مختلف زمان و روش نگهداری است.

روش انجام تحقیق

• تهیه نمونه‌ها و شرایط نگهداری

ابتدا تعداد ۸۱ نمونه ریشه چغندر قند با اندازه‌های مختلف به‌طور تصادفی از سه رقم چغندر قند (اگریت، موریل و شکوفا) از هر رقم تعداد ۲۷ عدد از مزارع بخش‌های ۴، ۵

اختصاص داده است و پس از آن کشورهای فرانسه، ایالات متحده و آلمان بزرگ‌ترین تولیدکنندگان این محصول در دنیا به شمار می‌روند. ایران نیز با تولید ۵/۱۳ میلیون تن و سطح زیر کشت ۹/۱۸ هزار هکتار ۱۳ امین کشور بزرگ تولیدکننده این محصول به شمار می‌رود (FAO, ۲۰۲۳). ظرفیت کارخانه‌های قند و شکر کشور در حال حاضر کم‌تر از مقدار چغندری است که روزانه برداشت می‌شود بنابراین لازم است که چغندر تولیدی تا فراهم شدن شرایط برای فرآوری ذخیره‌سازی گردد (حزیره، ۱۳۹۰). در فرآیند تولید شکر، کیفیت چغندر قند یکی از مؤثرترین و مهم‌ترین فاکتورها است و در کارخانه‌های قند محصول تولیدی به‌طور وسیعی وابسته به کیفیت چغندر قند می‌باشد. تحقیقات نشان داده است افزایش ضایعات قندی و وزنی چغندر قند طی دوره نگهداری باعث کاهش استحصال قند می‌شود (Kenter and Hoffm, ۲۰۰۹) و گل محمدی و همکاران در سال ۱۴۰۱) در پژوهشی اثر طول دوره انبارداری سرد بر میزان pH سبب رقم ردلیشز به مدت ۶۰ روز با استفاده از تصویربرداری فراطیفی بازتابی در محدوده طول‌موج‌های ۴۰۰-۱۱۰۰ nm انجام و پس از حذف نویزها با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بهبود طیف، پیش‌پردازش‌های اولیه مختلف اعمال و اثرات آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. مدل مناسب با استفاده از روش حداقل مربعات جزئی (PLS) تعیین کردند. طول‌موج‌های مهم‌تر بر اساس ضریب رگرسیون بهترین مدل و شامل نقاط دارای مقادیر بالای قدر مطلق ضریب رگرسیون انتخاب و با استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی کردند. بر اساس آنالیز PLS بهترین نتایج با پیش‌پردازش هموارسازی ساویترکی-گولای با خطای جذر میانگین مربعات ۰/۲/۰ (RMSE) و ۰/۱۸ 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 طول‌موج به‌عنوان بهترین طول‌موج‌ها تعیین شد. به نظر می‌رسد روش غیر مخرب تصویربرداری فراطیفی قادر به تخمین pH سبب در دوره انبارداری با دقت بالا است. باقرپور و همکاران (Bagherpour et al., ۲۰۱۴) در تحقیقاتی توانایی روش طیف‌سنجی VIS/NIR بازتابی جهت اندازه‌گیری و پیش‌بینی غیرمخرب میزان قند موجود در ریشه‌های چغندر قند و نیز تأثیر پیش‌پردازش‌های مختلف طیفی بر دقت مدل‌های چند متغیره پیش‌بینی کننده را مورد مطالعه قرار دادند. در طیف‌سنجی از نمونه‌های چغندر قند از سه

بدین منظور، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از یک آبمیوه گیری خانگی آبیگری و سپس با استفاده از دستگاه pH متر میزان pH عصاره حاصل به دست آمد (Ding et al., ۲۰۱۹).

• مواد جامد محلول (SSC)

میزان مواد جامد محلول برحسب درجه Brix توسط دستگاه رفرکتومتر دیجیتال (PrismaTech BPTR^o, Iran) و با ریختن یک قطره شربت چغندر قند بر روی صفحه شیشه‌ای رفرکتومتر انجام شد.

• خواص مکانیکی

ابتدا نمونه‌ها با یک لوله استوانه‌ای شکل برش داده شد و در جهت طولی با بارگذاری فشاری محوری شبه استاتیکی، با استفاده از دستگاه آزمون کشش-فشار مدل STM-۲۰ ساخت شرکت طراحی مهندسی سنتام مورد آزمون قرار گرفت برای تعیین خواص مکانیکی چغندر قند، از آزمون بارگذاری فشاری و منحنی نیرو - تغییر شکل مستخرج از آن استفاده شد. این دستگاه مجهز به بارسنج BONGUSHIN مدل ۱۰۰-DBBP با ظرفیت ۱۰۰ kgf و یک فک ثابت (فک پایین) و متحرک (فک بالا) که به صورت مسطح است. برای انجام آزمون فشاری، از هر نمونه برش داده و بین دو فک بالا و پایین قرار گرفت. سپس شروع آزمون توسط نرم‌افزار مربوطه و از طریق رایانه متصل به دستگاه داده شد. با کاهش نیرو در نمودار نیرو-تغییر شکل در صفحه نمایش رایانه دستور توقف آزمون به دستگاه داده شده و پس از انجام هر آزمون نمودار نیرو-تغییر شکل و داده‌های متناظر نیرو و تغییر شکل در نرم‌افزار اکسل ذخیره شد. از این نمودارها برخی ویژگی مکانیکی چغندر قند شامل نیروی گسیختگی و تغییر شکل در نقطه گسیختگی تعیین شد.

طرح آزمایشی

این آزمایش بر پایه طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل و با سه تکرار مورد آزمون قرار گرفت. اثر متغیرهای مستقل مدت زمان نگهداری (دو هفته در میان)، رقم (اگریت، موریل و شکوفا) و شرایط نگهداری (۱-در شرایط انباری با حفاظ ۲-بدون حفاظ یعنی در شرایط جوی و ۳- زیر خاک یا همان شرایط مزرعه) و اثرات متقابل آن‌ها بر خصوصیات کیفی چغندر قند شامل محتوای رطوبتی، عیار قند، pH و خواص مکانیکی بررسی شد. همچنین امکان تخمین غیرمخرب این خصوصیات کیفی با استفاده از روش تصویربرداری فراطیفی مورد ارزیابی قرار گرفت.

• تجزیه و تحلیل تصاویر فراطیفی

و ۶ کشت و صنعت دام پروری مغان تهیه و جمع‌آوری و به وسیله خودروی شخصی بدون آسیب به چغندر قندها و به تفکیک ارقام جهت انبار به محل نگهداری منتقل شد. سپس در سه شرایط مختلف انبارداری (۱-در شرایط انباری با حفاظ ۲-بدون حفاظ یعنی در شرایط جوی ۳- زیر خاک همان شرایط مزرعه) به مدت ۴۵ روز نگهداری شد. در طول دوره نگهداری نمونه‌ها به صورت دوره‌ای و با فواصل دو هفته در میان با استفاده از دوربین فراطیفی ساخت ایران-شرکت فن آوران فیزیک نور با گستره طیفی ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر به صورت غیر مخرب ارزیابی و بلافاصله عیار، رطوبت و اسیدیته و خواص مکانیکی محصول اندازه گیری شد.

• محتوای رطوبتی

جهت رطوبت سنجی ابتدا از هر نمونه با استفاده از کارد مخصوص قسمتی از غده برش داده و نمونه‌ای برش خورده خلال شده را در ترازوی دیجیتال وزن کرده سپس در آن به مدت ۲۴ ساعت با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس حرارت داده و بعد از آوردن از دستگاه آن دوباره وزن شد. اختلاف وزن به دست آمده، درصد وزنی رطوبت را تعیین نمود. درصد رطوبت برحسب وزن مرطوب با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$(1) \quad \text{درصد رطوبت} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

که در این رابطه:

W_1 = وزن ظرف و نمونه پیش از خشک شدن

W_2 = وزن ظرف و نمونه پس از خشک شدن

• عیار قند (SC)

نمونه‌های شسته شده و تمیز داخل دستگاه خمیرگیری قرار داده شد پس از خمیرگیری برای تعیین عیار سنجی ۲۶ گرم خمیر کاملاً مخلوط با قاشق استیل برداشته و به وسیله ترازوی دیجیتالی وزن شد و پس از آن خمیر نمونه به همراه ۱۷۷/۸ گرم محلول زلال کننده در مخلوط کن استیلی ریخته شد و به مدت حداقل ۳ دقیقه هم زده شد. در مرحله بعد خمیر به دست آمده و سولفات آلومینیم را در قیف‌های محتوی کاغذ صافی ریخته شد با گذشت زمان، ناخالصی‌ها در کاغذ صافی مانده و شربت در لیوان‌ها جمع گردید. اولین قطره دور ریخته شده و سپس عیار نمونه‌ها با به وسیله دستگاه ساکاریمتر اندازه گیری شد. پس از تعیین عیار هر نمونه قیف دستگاه ساکاریمتر با آب مقطر شسته شد (Bagherpour et al., ۲۰۱۴).

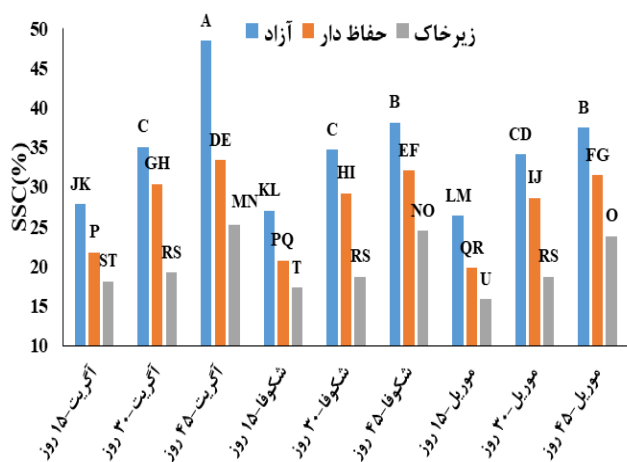
• میزان اسیدیته (pH)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - p_i)^2}{N}} \quad (۲)$$

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

۳- نتایج

مشخصات آماری ویژگی‌های کیفی چغندر قند مشخصات آماری ویژگی‌های کیفی نمونه‌های چغندر قند شامل pH، مواد جامد محلول (SSC)، سفتی بافت، کاهش جرم و عیار قند در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس pH، مواد جامد محلول (SSC)، سفتی بافت، کاهش وزن و عیار قند چغندر قند نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای دوره انبارداری، رقم و شرایط نگهداری بر تغییرات جرم، pH، مواد جامد محلول (SSC)، سفتی بافت و عیار قند چغندر قند در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲) مشخص است که تمامی اثرات اصلی، اثرات دوگانه و اثرات سه‌گانه عوامل مورد نظر بر ویژگی‌های pH، SSC، سفتی بافت و کاهش وزن چغندر قند در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است؛ همچنین اثرات اصلی و دوگانه عوامل مورد نظر بر تغییرات عیار قند معنی‌دار می‌باشند.



بعد از ذخیره‌سازی طیف‌ها و انتقال آن‌ها به نرم‌افزار Excel با میانگین‌گیری از دو طیف اکتسابی از طرفین نمونه‌های چغندر قند یک طیف واحد به دست آمد که به‌عنوان طیف شاخص آن نمونه در نظر گرفته شد. با توجه به نوبت موجود در طول موج‌های ابتدایی و انتهایی طیف‌ها این نواحی حذف شدند. داده‌های طیفی متأثر از عواملی مانند اثر پراکنش نور توسط تغییر آشکارساز با نمونه، تغییر در اندازه نمونه، ناهم‌واری‌های سطحی در نمونه، نوبت‌های ایجاد شده به‌وسیله افزایش دمای اسپکترومتر و عوامل متعدد دیگری هستند. این اطلاعات نامفهوم بر روی اطلاعات مفید تأثیر می‌گذارند و باعث کاهش دقت مدل‌های کالیبراسیون خواهند شد؛ بنابراین، به‌منظور تعدیل تأثیرات چنین اطلاعات نامفهومی و دستیابی به مدل‌های واسنجی با ثبات، دقیق و با قابلیت اطمینان نیاز به پیش‌پردازش داده‌های طیفی است. روش‌های پیش‌پردازش متفاوتی موجود است که هر کدام قابلیت‌های خاصی دارند و برای اهداف مشخصی استفاده می‌شوند. انتخاب پیش‌پردازش بهینه امری تجربی است و به روش آزمون و خطا پیش‌پردازش‌های مختلف می‌توان آن را مشخص کرد. از این‌رو، نمی‌توان یک پیش‌پردازش مشخص را برای تمام مدل‌های پیش‌بینی ویژگی‌های متفاوت در نمونه‌های مختلف به کار گرفت (Rosel, ۲۰۰۸). در این پژوهش از پیش‌پردازش‌های مختلف هموارسازی و کاهش نویز، نرمال‌سازی و افزایش قدرت تفکیک طیفی و ترکیب این پیش‌پردازش‌ها استفاده شد.

• رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و یافتن طول موج‌های مؤثر از آنجایی که به کارگیری روش‌های غیرمخرب مبتنی بر طیف‌سنجی در بازه کامل از طول موج‌ها نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار بالا است، کاربرد عملی این روش را تقریباً غیرممکن می‌سازد لذا باید به دنبال 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 ایده آل به نظر می‌رسد. در این پژوهش به‌منظور ساخت مدل‌ها، داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند: ۸۰ درصد داده‌ها 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 (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و رابطه ۲ به‌منظور یافتن بهترین مدل استفاده شد.

شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات سه گانه عوامل آزمایشی بر ویژگی‌های کیفی چغندر قند

با توجه به شکل (۱) مشخص است که نمونه‌های نگهداری شده در زیر خاک با افزایش دوره انبارداری در هر سه رقم خاصیت اولیه خود را بهتر حفظ کرده‌اند و کمترین تغییرات در (SSC) آن‌ها رخ داده است؛ همچنین نمونه‌های پوشش‌دار نسبت به نمونه‌های آزاد تغییرات کمتری داشته‌اند که نشان‌دهنده تأثیر سیستم حفاظتی بر حفظ

کیفیت نمونه‌هاست. همچنین در تمامی دوره‌های انبارداری و در تمامی شرایط نگهداری رقم موریل کمترین تغییرات را در (SSC) داشته است. نکته قابل توجه در شکل (۱) این است که نمونه‌های نگهداری شده در زیر خاک نسبت به نمونه‌های آزاد و پوشش‌دار کمتر تحت تأثیر افزایش دوره

جدول ۱- ویژگی‌های آماری نمونه‌های چغندر قند

ویژگی	تعداد نمونه	حداقل	حداکثر	میانگین	SD	CV (%)
عیار قند	۸۱	۹/۸۵	۱۵/۳	۱۲/۰۶	۱/۳۳۶	۱۱/۰۸
SSC	۸۱	۱۴/۸	۴۹/۵	۲۷/۳۲	۷/۷۶	۲۸/۴۳
سفتی بافت (N)	۸۱	۱۸/۰	۷۸/۰	۴۴/۰۲	۱۶/۳۸	۳۷/۲
pH	۸۱	۴/۹۶	۷/۶۹	۶/۲۶	۰/۳۶۲	۵/۷۸
کاهش جرم (%)	۸۱	۶/۸	۴۶/۰	۲۰/۰۲	۱۰/۸۶	۵۴/۲۴

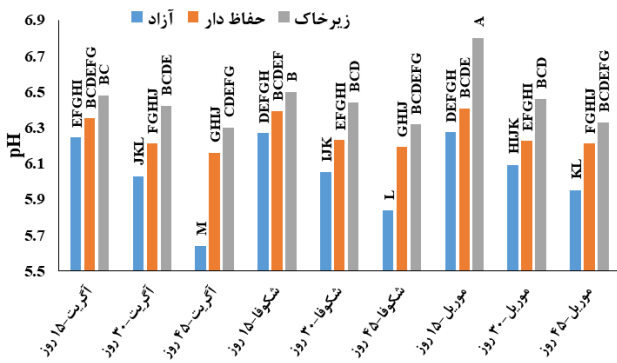
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس pH، مواد جامد محلول (SSC)، کاهش وزن و عیار قند چغندر قند

منابع	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		SSC	سفتی بافت	pH	کاهش وزن
دوره انبارداری (A)	۲	۸۳۰**	۳۳۸۱**	۱/۳۱۲**	۱۴۶۸**
رقم (B)	۲	۴۷/۹**	۱۴۷/۴**	۰/۳۷۱**	۵۶/۲۸**
روش انبارداری (C)	۲	۱۳۶۰**	۷۰۳۴**	۱/۹۵**	۲۷۲۵**
B×A	۴	۱۱/۴**	۲/۹۲**	۰/۱۱۶**	۵/۶۴**
C×A	۴	۴۳/۸۶**	۷۶/۱۶**	۰/۱۴۵**	۲۱۳/۴**
B×C	۴	۸/۳۶**	۱/۸**	۰/۱۱۶**	۹/۰۸**
A×B×C	۸	۱۰/۵۲**	۱/۵۶**	۰/۱۸۷**	۱/۸۴**
اشتباه آزمایش	۵۴	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۰۰۳۷	۰/۱۴
کل	۸۰				

مواد جامد محلول (SSC) افزایش یافته است و عواملی مانند دمای محیط و میزان تبادل اکسیژن با محیط به‌عنوان کاتالیزور عمل کرده و باعث تشدید این تغییرات شیمیایی می‌شود (Wang et al, ۲۰۱۴; Li et al, ۲۰۱۹; Wang et al, ۲۰۱۸)، بنابراین هرچه شرایط انبارداری به‌گونه‌ای باشد که دما در سطح پایین‌تری ثابت بماند یا تبادل اکسیژن بین نمونه و محیط کمتر شود تغییرات شیمیایی کمتری در نمونه رخ می‌دهد که با توجه به نتایج

انبارداری قرار گرفته‌اند به‌گونه‌ای که در دوره انبارداری ۳۰ و ۴۵ روز تغییرات کمتری را نسبت به نمونه‌های آزاد و پوشش‌دار در روز ۱۵ داشته‌اند. روند مشابهی در مقایسه بین نمونه‌های پوشش‌دار و آزاد فقط با شدت کمتری وجود دارد و نمونه‌های پوشش‌دار نسبت به نمونه‌های آزاد تغییرات کمتری را در گذر زمان داشته‌اند.

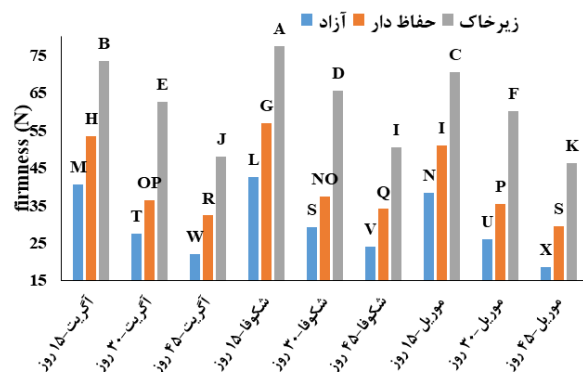
در تحقیقات بسیاری ذکر شده است که در طول دوره انبارداری عموماً به علت تبدیل کربوهیدرات‌ها به قند میزان



شکل ۳- اثر سه گانه دوره انبارداری، رقم و شرایط نگهداری بر pH

همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است با افزایش دوره انبارداری pH تمامی ارقام چغندر قند کاهش یافته است؛ همچنین نمونه‌های نگهداری شده در شرایط آزاد نسبت به سایر نمونه‌ها pH کمتری داشتند. نکته قابل توجه در شکل (۳) این است که نمونه‌های انبار شده در زیر خاک و همچنین نمونه‌های پوشش دار در اثر گذر زمان تغییرات pH بسیار کمتری نسبت به نمونه‌های آزاد داشته‌اند. دلیل کاهش pH تجزیه مواد آلی به اسیدها می‌باشد (Cole and Bugbee, ۱۹۷۶). چنین تفاوت‌های قابل توجهی بین روش‌های ذخیره‌سازی گواه این واقعیت است که فرآیندهای اسیدی شدن در حین نگهداری در فضای باز تحت تأثیر میکروارگانیسم‌ها اتفاق می‌افتد و روند تجزیه مواد سریع‌تر از مواد ذخیره‌شده در شرایط بی‌هوایی (زیر خاک و پوشش دار) است (Mioduszewska et al, ۲۰۲۰). در واقع نتایج این تحقیق نشان داد که حفاظت سطح محصولات کشاورزی از محیط اطراف راه مؤثری برای افزایش ماندگاری آن‌هاست.

به دست آمده از این تحقیق مشخص است که سیستم حفاظتی تا حد زیادی توانسته‌اند همانند خاک عمل کرده و کیفیت اولیه چغندر قند را در طول دوره انبارداری تا حد زیادی حفظ کنند.

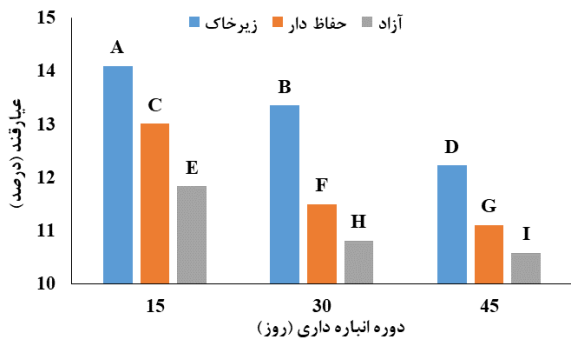


شکل ۲- اثر سه گانه دوره انبارداری، رقم و شرایط نگهداری بر سفتی بافت

همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود سفتی بافت چغندر قند با افزایش دوره انبارداری کاهش یافته است. با این حال برای نمونه‌های نگهداری شده در زیر خاک میزان نرم شدن بافت به طور قابل توجهی کمتر از نمونه‌های دیگر است. همچنین نمونه‌های پوشش دار نیز نسبت به نمونه‌های آزاد سفتی بافت خود را بهتر حفظ کرده‌اند. کاهش سفتی بافت طی دوره انبارداری به این دلیل است که در طول رسیدن، آنزیم‌های پلی‌گالاکتروناز و پکتین متیل استراز سبب دی‌متیل‌شدن اسید گالاکتورونیک در پکتین‌های دیواره سلولی می‌شوند و در نتیجه، یون کلسیم موجود در زنجیره‌های پلیمری دیواره سلولی آزاد شده و در نتیجه نرم شدن دیواره سلول‌ها، نرم شدن میوه اتفاق می‌افتد (Wei et al, ۲۰۰۲). با توجه به اینکه ذخیره‌سازی زیر خاک و کاربرد سیستم حفاظت سطح چغندر از محیط باعث کاهش تبادل اکسیژن بین بافت میوه با هوای آزاد می‌شود عملکرد آنزیم‌های داخلی میوه دچار اختلال شده و در نتیجه فرایند نرم شدن میوه به تأخیر می‌افتد. در تحقیقات بسیاری گزارش شده است که نگهداری میوه‌ها در شرایط بی‌هوایی یا پوشش دار کردن آن‌ها باعث تأخیر در فرایند پیری و فساد میوه می‌شود (Bourtoom, ۲۰۰۸). (et al, ۲۰۱۱).

شکل ۵- اثرات دوگانه رقم- دوره نگهداری و شرایط نگهداری- دوره انبارداری بر تغییرات عیار قند

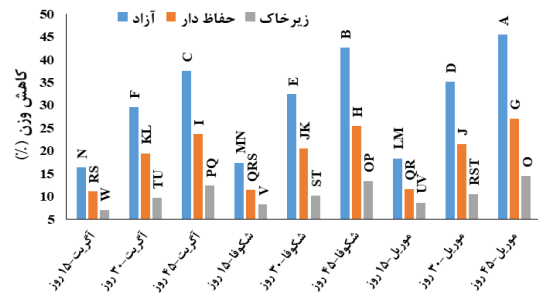
همان طور که در شکل (۵) دیده می شود عیار قند تمامی رقم‌ها با افزایش دوره انبارداری کاهش یافته است؛ رقم موریل در تمامی دوره ها بالاترین و رقم آگریت پایین ترین عیار قند را داشته اند. با این حال رقم موریل نسبت به تغییر زمان حساس تر و عیار قند این رقم با شدت بیشتری نسبت به دو رقم دیگر کاهش یافته است. کاهش عیار قند در طول دوره انبارداری به علت تنفس گیاه می باشد که انرژی مورد نیاز برای این فرایند از مصرف قند موجود در گیاه حاصل می شود و از سوی دیگر در اثر فعل و انفعالات هوازی قند موجود در گیاه به ترکیبات دیگری تبدیل می شود (Jaggard et al, ۱۹۹۷).



شکل ۶- تغییرات عیار قند چغندر قند در اثر تغییرات دوره انبارداری و شرایط نگهداری

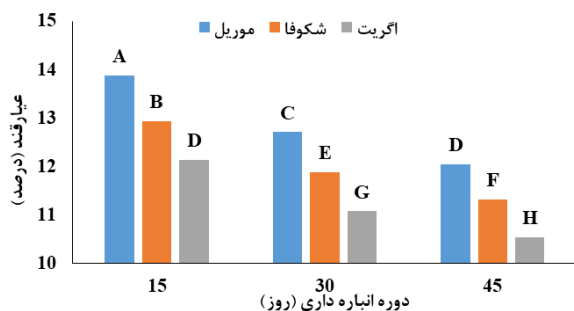
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۶) مشخص است که انبارداری چغندر قند در زیرخاک تا حد زیادی روند کاهش قند گیاه را تعدیل کرده و کیفیت چغندر قند در طول دوره انبارداری حفظ می شود. نمونه های حفاظ دار نیز نسبت به نمونه های آزاد کاهش کمتری را در عیار قند داشته اند. نکته قابل توجه در شکل ۶ این است که نمونه های نگهداری شده در زیرخاک با شیب بسیار کمتری عیار قند خود را از دست می دهند. با ذخیره کردن نمونه ها در زیرخاک تبادل اکسیژن نمونه ها با محیط اطراف مختل شده و فرایندهای هوازی مصرف کننده قند گیاه غیرفعال می شوند و بدین وسیله عیار قند گیاه حفظ می شود. در تحقیقات گذشته نیز چنین روندی در مورد شرایط نگهداری چغندر قند مشاهده شده است (Jaggard et al, ۱۹۹۷; Kenter and Hoffmann, ۲۰۰۹; Liebe and Varrelmann, ۲۰۱۶).

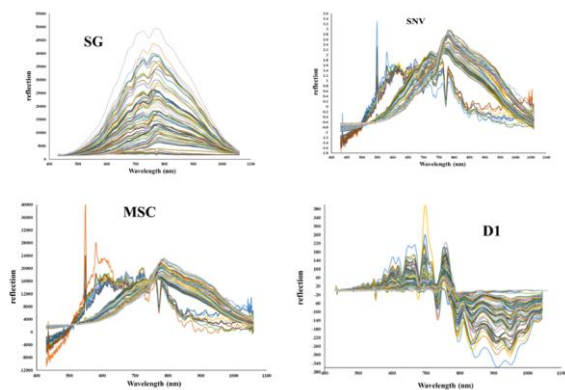
تفسیر طیف های Vis-NIR و پیش پردازش طیف ها طیف های بازتابی Vis/NIR و طیف های پیش پردازش شده با روش های مختلف برای تمامی تیمارها در محدوده ۴۳۰-۱۰۶۰ نانومتر برای چغندر قندها در شکل



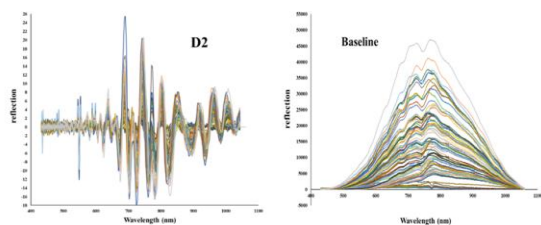
شکل ۴- اثر سه گانه دوره انبارداری، رقم و شرایط نگهداری بر کاهش جرم

نتایج مقایسه میانگین داده ها شکل ۴ نشان داد که با افزایش دوره کاهش جرم بیشتری در نمونه ها رخ داده است و همچنین رقم موریل در تمامی شرایط کاهش جرم بیشتری را نسبت به ارقام دیگر داشته است. برای نمونه های آزاد کاهش جرم نسبت به زمان شدیدتر بوده است و با شیب تندتری کاهش یافته است در حالی که نمونه های انبار شده در زیرخاک در طول دوره انبارداری به صورت جزئی کاهش جرم داشته اند و نمونه های پوشش دار نیز از این نظر در جایگاه بعدی قرار دارند. کاهش وزن میوه ها در انبار، به دلیل از دست دادن آب ناشی از فرآیندهای تنفس و تعرق در میوه هاست (Xu et al, ۲۰۰۷). به طور کلی، اثر مثبت حفاظت سطح میوه از محیط اطراف به دلیل این است که به عنوان سد بین میوه و محیط اطراف آن قرار گرفته، بنابراین تبادلات خارجی را کاهش می دهند (Salehi, ۲۰۲۰; Nicolau, ۲۰۲۱). خاک به عنوان یک مانع طبیعی تبادل رطوبت بین محیط و نمونه ها رو مختل کرده و تا حد زیادی وزن اولیه نمونه ها حفظ شده است با این حال ذخیره سازی چغندر قند زیرخاک در مقیاس تجاری-صنعتی غیرممکن است بنابراین به نظر می رسد کاربرد روش های دیگری برای حفظ کیفیت چغندر قند در مقیاس بزرگ منطقی تر باشد. در تحقیقات زیادی از پوشش های خوراکی برای حفظ کیفیت و جرم میوه ها (انگور Ali et al, ۲۰۱۶)، گوجه فرنگی (Chrysargyris et al, ۲۰۱۶)، هلو (Hazrati et al, ۲۰۱۷) و توت فرنگی (Sogvar et al, ۲۰۱۶)) استفاده شده است.





شکل ۸- طیف‌های پیش‌پردازش شده با روش‌های به ترتیب SG، SNV و MSC



شکل ۹- طیف‌های جذبی Vis/NIR پیش‌پردازش شده با روش‌های به ترتیب D1، D2 و Baseline

نتایج مدل‌سازی رگرسیون چند متغیره

در این بخش به بررسی و ارزیابی عملکرد مدل‌های مبتنی بر داده‌های پیش‌پردازش شده با استفاده از روش‌های مختلف پرداخته شده است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها از دور روش اعتبارسنجی متقابل و مستقل استفاده گردید و بر اساس معیارهای آماری $RMSEP_{rp}$ ، $RMSECV_{rev}$ و SDR مدل بهینه برای هر صفت انتخاب شد. باید این نکته را ذکر کرد که مدل‌های انتخابی باید دارای کمترین مقدار $RMSEP$ و بیشترین مقدار rp و SDR باشند.

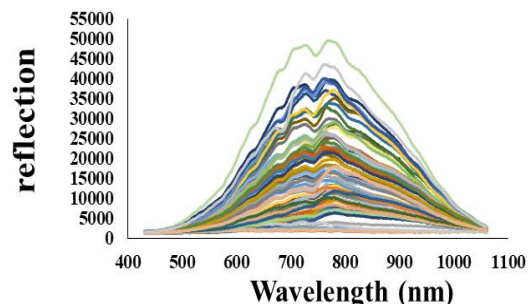
تشخیص SSC

معیارهای آماری مورد استفاده به منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های PLS مبتنی بر پیش‌پردازش‌های مختلف طیف‌های بازتابی Vis/NIR، تخمین گر SSC در جدول ۳ آورده شده‌اند.

همان‌طور که از نتایج ارائه شده در جدول ۳ مشخص است تنها پیش‌پردازش SG و Baseline دقتی در محدوده طیف‌های خام داشته‌اند و مدل‌های مبتنی بر سایر روش‌های پیش‌پردازش دقت کمتری نسبت به مدل مبتنی بر طیف‌های خام نشان داده‌اند. دلیل چنین امری را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که دقت ابزار ثبت

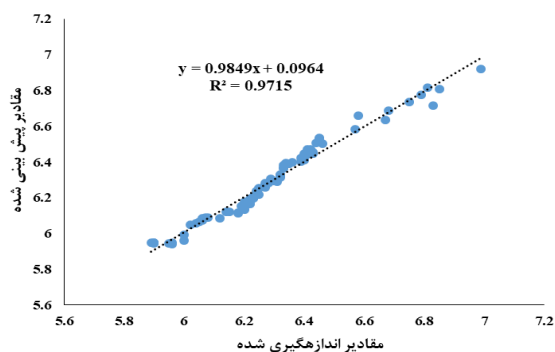
های (۷)، (۸) و (۹) ارائه شده است. عوامل محیطی (نور و گرما) و همچنین کیفیت ابزار طیف سنج باعث ایجاد اغتشاش در طول‌موج‌های ابتدایی و انتهایی طیف‌ها می‌شود، بنابراین این طول‌موج‌ها از مجموعه داده‌ها حذف شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است، با افزایش طول‌موج تا $730+746$ نانومتر بازتاب افزایش پیدا کرده است و در محدوده $730+746$ نانومتر بازتاب افزایش پیدا کرده است و در محدوده $772-746$ دوباره روند نزولی داشته است و بعد از طول‌موج 772 کاملاً روند نزولی داشته است که این امر ممکن است متأثر از رنگ میوه (رنگ‌دانه‌ها شامل کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها) باشد (Clément et al., 2008). با توجه به شکل (۷) و (۸) منحنی‌ها دارای نقاط اکسترمم در محدوده طول‌موج‌های 730 ، 746 و 772 هستند همچنین دارای نقاط عطفی در محدوده طول‌موج‌های 635 ، 684 ، 710 ، 820 ، 870 و 910 نانومتر می‌باشند.

روند طیف‌های Vis/NIR خام و پیش‌پردازش شده با روش SG تا حد زیادی یکسان بود که به دلیل نویز کم ابزار دقیق می‌باشد، در واقع این روش نویزهای بسیار کوچک را حذف می‌کند اما روند کلی طیف را تغییر نمی‌دهد. اعمال پیش‌پردازش‌های SNV، MSC و Baseline باعث نزدیک شدن طیف‌ها به یکدیگر می‌شود که این امر به نوبه خود باعث می‌شود که پیک‌های جذبی نوک‌تیزتری پیدا کند و کاملاً از سایر نقاط مجزا شوند. مشتق‌گیری و کاربرد آن بعد از هموارسازی و نرمال‌سازی طیف‌ها منجر به پیک‌های برجسته‌تر می‌شود و قدرت تفکیکی هر طیف را افزایش می‌دهد. با توجه به پیش‌پردازش‌های اعمالی کاملاً مشخص شد که پیک‌های جذبی در محدوده طول‌موج‌های $460-500$ ، $760-770$ و $960-1000$ نانومتر قرار دارند.



شکل ۷- طیف‌های بازتابی Vis-NIR نمونه‌های چغندر قند

بازتابی Vis/NIR در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده pH آورده شده است.

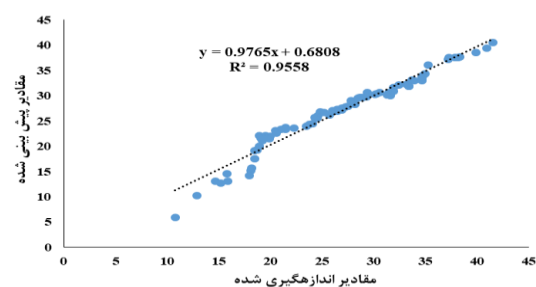


شکل ۱۱- مقادیر تخمینی pH بر اساس مدل بهینه در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده

تشخیص سفتی

در جدول ۵ معیارهای آماری مورد استفاده به منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل های PLS مبتنی بر پیش پردازش‌های مختلف طیف‌های بازتابی Vis/NIR، تخمین گر سفتی ارائه شده است. با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول ۵ تمامی مدل های ایجاد شده به غیر از مدل مبتنی بر پیش‌پردازش مشتق دوم دارای دقت بالایی ($R^2 \geq 0.94$) در پیش‌بینی سفتی هستند. بهترین عملکرد مربوط به پیش‌پردازش Baseline می باشد. همچنین تمامی مدل ها در روش اعتبارسنجی مستقل دارای عملکرد ضعیف‌تری می باشند با این حال دقت مدل ها در روش اعتبارسنجی مستقل نیز در محدوده قابل قبول ($R^2 \geq 0.92$) قرار دارد. در تحقیقات دیگر نیز نتایجی مشابه این تحقیق به دست آمده است که در آن مدل های مبتنی بر طیف‌های Vis/NIR توانایی بهتری در پیش‌بینی سفتی بافت میوه در مقایسه با سایر خواص کیفی میوه‌ها داشتند (لفل دلمه ای (Penchaiya et al, ۲۰۰۹)، گوجه‌فرنگی (Huang et al, ۲۰۱۸) و گلابی (Li et al, ۲۰۱۳)). در شکل ۱۲ مقادیر پیش‌بینی شده سفتی بر اساس بهترین مدل تخمین گر استفاده‌کننده از پیش‌پردازش Baseline طیف‌های بازتابی Vis/NIR در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده سفتی آورده شده است.

طیف‌های بازتابی بسیار بالا بوده و عملاً نویز خاصی در جریان اکتساب طیف‌ها رخ نداده است؛ بنابراین استفاده از روش‌های پیش‌پردازش مانند مشتق‌گیری عملاً نویز اضافی به سیستم تحمیل کرده و باعث کاهش دقت مدل‌سازی شده‌اند. در تحقیقات زیادی از پیش پرداز SG برای از بین بردن نویز استفاده شده است و کارایی آن مورد تأیید قرار گرفته است (گوجه‌فرنگی (Nikbakht et al, ۲۰۱۱) شاه‌بلوط (Moscetti et al, ۲۰۱۴) پرتقال (Jamshidi et al, ۲۰۱۲) و زیتون (Moscetti et al, ۲۰۱۵)). در شکل ۱۰ مقادیر پیش‌بینی شده SSC بر اساس بهترین مدل تخمین گر استفاده‌کننده از پیش‌پردازش SG طیف‌های بازتابی Vis/NIR در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده SSC آورده شده است.



شکل ۱۰- مقادیر تخمینی SSC بر اساس مدل بهینه در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده

تشخیص pH

معیارهای آماری مورد استفاده به منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل های PLS مبتنی بر پیش‌پردازش‌های مختلف طیف‌های بازتابی Vis/NIR، تخمین گر pH در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ مشخص است که همانند مدل‌های تخمین گر SSC، مدل‌های تخمین گر pH نیز بهترین عملکرد را بر اساس داده‌های مربوط به پیش‌پردازش SG و Baseline داشته‌اند و سایر روش‌های پیش‌پردازش عملکرد مناسبی را نداشته‌اند. در شکل ۱۱ مقادیر پیش‌بینی‌شده pH بر اساس بهترین مدل تخمین گر استفاده‌کننده از پیش‌پردازش SG طیف‌های

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی مدل های PLS مبتنی بر روش های مختلف پیش پردازش طیف های بازتابی Vis/NIR برای تخمین چغندر قند

پیش پردازش	LVs	r _c	RMSEC	r _{cv}	RMSECV	r _p	RMSECP	SDR
خام	۲	+۰/۹۵۴	۱/۵۵	+۰/۹۵	۱/۶۶	+۰/۹۳۵	۱/۷۱	۴/۷
SG	۲	+۰/۹۵۵	۱/۵۴	+۰/۹۵۲	۱/۶۱	+۰/۹۴۱	۱/۷۰	۴/۷
D ^۱	۱	+۰/۹۳۱	۲/۰۵	+۰/۹۱۷	۲/۱۳	+۰/۹۰۱	۲/۶۹	۴/۸۳
D ^۲	۲	+۰/۸۸	۳/۱۹	+۰/۷۱	۳/۵	+۰/۸۶	۳/۸۷	۳/۸۴
MSC	۴	+۰/۹۰۹	۲/۲	+۰/۸۹۶	۲/۳۹	+۰/۸۷	۳/۷۴	۴/۵
SNV	۴	+۰/۹۳	۱/۹۳	+۰/۹۱۱	۲/۲۱	+۰/۹۲	۲/۵۲	۴/۶
Baseline	۲	+۰/۹۵۳	۱/۵۶	+۰/۹۴۸	۱/۶۸	+۰/۹۳۹	۲/۳۳	۴/۵۷

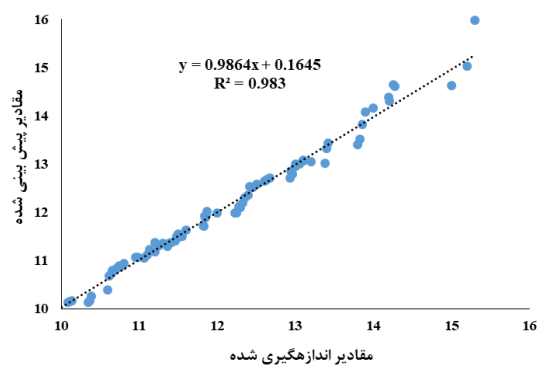
جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی مدل های PLS مبتنی بر روش های مختلف پیش پردازش طیف های

پیش پردازش	LVs	r _c	RMSEC	r _{cv}	RMSECV	r _p	RMSECP	SDR
خام	۲	+۰/۹۶۹	+۰/۰۴	+۰/۹۶۶	+۰/۰۴۳	+۰/۹۴	+۰/۶۲	۵/۲
SG	۲	+۰/۹۷	+۰/۰۴۱	+۰/۹۶۷	+۰/۰۴۳	+۰/۹۴۱	+۰/۵۹	۵/۹
D ^۱	۴	+۰/۹۱۵	+۰/۰۶۷	+۰/۸۸۱	+۰/۰۸۸	+۰/۸۹۱	۱/۰۶	۹/۶
D ^۲	۲	+۰/۸۷	+۰/۰۸۳	+۰/۸۴	+۰/۰۹۲	+۰/۸۵۲	۱/۳۹	۶/۴
MSC	۳	+۰/۸۹۳	+۰/۰۷۶	+۰/۸۷۱	+۰/۰۸۴	+۰/۸۷	۱/۱	۵/۷
SNV	۵	+۰/۸۹	+۰/۰۷۴	+۰/۸۶	+۰/۰۸۶	+۰/۸۶۵	۱/۱۸	۷/۲
Baseline	۲	+۰/۹۶۸	+۰/۰۴۲	+۰/۹۶۴	+۰/۰۴۴	+۰/۹۳۴	+۰/۶۲	۴/۸

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی مدل های PLS مبتنی بر روش های مختلف پیش پردازش طیف های Vis/NIR برای تخمین سفتی چغندر قند

پیش پردازش	LVs	r _c	RMSEC	r _{cv}	RMSECV	r _p	RMSECP	SDR
خام	۱	+۰/۹۶۹	۲/۸۲	+۰/۹۶۶	۳/۰۳	+۰/۹۳۵	۴/۰۲	۴/۶
SG	۱	+۰/۹۷۲	۲/۸۱	+۰/۹۶۹	۳/۰۱	+۰/۹۴	۳/۹	۴/۶
D ^۱	۴	+۰/۹۴۵	۳/۸	+۰/۹۲۶	۴/۴	+۰/۹۲	۴/۲	۳/۹
D ^۲	۲	+۰/۸۶۴	۶/۰۱	+۰/۸۴۱	۶/۵۶	+۰/۸۳	۷/۳	۶/۱
MSC	۴	+۰/۹۴۳	۳/۸۶	+۰/۹۳۳	۴/۲۵	+۰/۹۲۱	۵/۲	۴/۳
SNV	۵	+۰/۹۵۱	۳/۵۶	+۰/۹۳۳	۴/۲۶	+۰/۹۳	۵/۱	۴/۳
Baseline	۲	+۰/۹۷۸	۲/۳۶	+۰/۹۷۴	۲/۶۸	+۰/۹۴۵	۳/۲	۳/۹

پیش‌بینی عیار قند چغندر قند با استفاده از طیف سنجی متمرکز بود مدل‌های حاصل دقت بالایی در پیش‌بینی داشتند اما با این تفاوت که پیش‌پردازش مشتق دوم در تحقیق (آقای سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷) و پیش‌پردازش MSC در تحقیق (باقریپور و همکاران، ۱۳۹۴) دقت بالاتری را نسبت به سایر روش‌های پیش‌پردازش نشان دادند. با توجه به عملکرد مدل‌های مختلف تخمین‌گر خواص کیفی چغندر قند می‌توان نتیجه گرفت که قانون مشخصی برای تشخیص بهترین روش پیش‌پردازش وجود ندارد و در موارد مختلف و تحقیقات دیگر ممکن است روش‌های پیش‌پردازش دیگری عملکرد بهتری از خود نشان دهند. در شکل ۱۴ مقادیر پیش‌بینی شده عیار قند بر اساس بهترین مدل تخمین‌گر استفاده‌کننده از پیش‌پردازش Baseline طیف‌های بازتابی Vis/NIR در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده عیار قند آورده شده است.

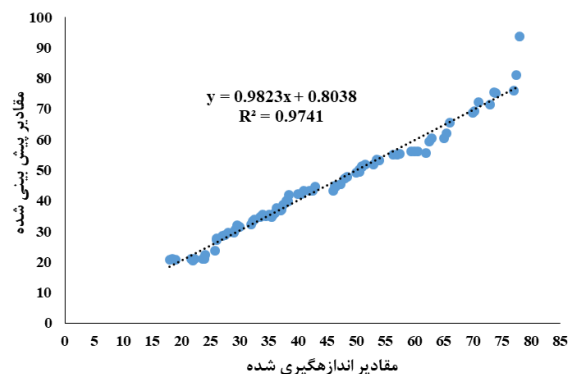


شکل ۱۴- مقادیر تخمینی عیار قند بر اساس مدل بهینه در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده

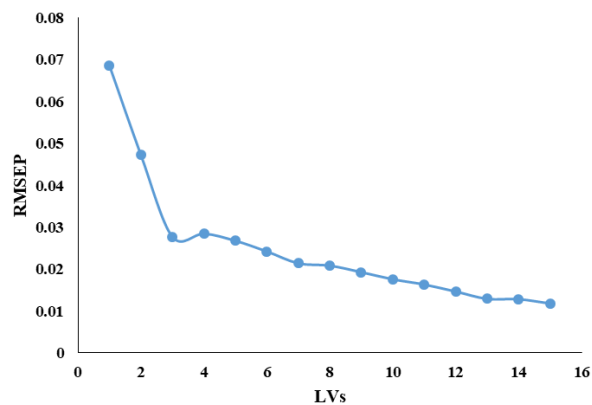
۴- نتیجه‌گیری

نمونه‌های نگهداری شده در زیرخاک با افزایش دوره انبارداری در هر سه رقم خاصیت اولیه خود را بهتر حفظ کرده‌اند و کمترین تغییرات در SSC) آن‌ها رخ داد؛ همچنین نمونه‌های پوشش‌دار نسبت به نمونه‌های آزاد تغییرات کمتری داشتند که نشان‌دهنده تأثیر سیستم حفاظتی بر حفظ کیفیت نمونه‌هاست.

با افزایش دوره انبارداری pH تمامی ارقام چغندر قند کاهش یافت؛ همچنین نمونه‌های نگهداری شده در شرایط آزاد نسبت به سایر نمونه‌ها pH کمتری داشتند. از سوی دیگر نمونه‌های انبارشده در زیرخاک و همچنین نمونه‌های پوشش‌دار در اثر گذر زمان تغییرات pH بسیار کمتری نسبت به نمونه‌های آزاد داشتند.



شکل ۱۲- مقادیر تخمینی سفتی بر اساس مدل بهینه در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل ۱۳- تغییرات RMSEP در برابر LVs برای تخمین سفتی با استفاده از پیش‌پردازش مشتق دوم تشخیص عیار قند

در جدول ۶ معیارهای آماری مورد استفاده به منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های PLS مبتنی بر پیش‌پردازش‌های مختلف طیف‌های بازتابی Vis/NIR، تخمین‌گر عیار قند ارائه شده است.

با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول ۶ نمایان است که تمامی مدل‌های ایجاد شده به غیر از مدل بر پایه پیش‌پردازش مشتق دوم توانایی بالایی ($R^2 \geq 0.94$) در پیش‌بینی عیار قند دارند. بهترین عملکرد مربوط به پیش‌پردازش Baseline و SG می‌باشد. همچنین تمامی مدل‌ها در روش اعتبارسنجی مستقل دارای عملکرد ضعیف‌تری می‌باشند با این حال دقت مدل‌ها در روش اعتبارسنجی مستقل نیز در محدوده قابل قبول ($R^2 \geq 0.91$) قرار دارد. در تحقیقات دیگری نیز که بر

مدل‌های مبتنی بر سایر روش‌های پیش‌پردازش دقت کمتری نسبت به مدل مبتنی بر طیف‌های خام داشته‌اند. تمامی مدل‌های ایجاد شده به غیر از مدل مبتنی بر پیش‌پردازش مشتق دوم دارای دقت بالایی در پیش‌بینی سفتی بافت بودند. بهترین عملکرد مربوط به پیش‌پردازش Baseline بود. تمامی مدل‌های ایجاد شده به غیر از مدل بر پایه پیش‌پردازش مشتق دوم توانایی بالایی در پیش‌بینی عیار قند داشتند.

با افزایش دوره کاهش جرم بیشتری در نمونه‌ها رخ داد و همچنین رقم موریل در تمامی شرایط کاهش جرم بیشتری را نسبت به ارقام دیگر داشت. برای نمونه‌های آزاد کاهش جرم نسبت به زمان شدیدتر بود و با شیب تندتری کاهش یافت؛ در حالی که نمونه‌های انبار شده در زیر خاک در طول دوره انبارداری به صورت جزئی کاهش جرم داشتند و نمونه‌های پوشش‌دار نیز از این نظر در جایگاه بعدی قرار گرفتند. در تشخیص pH و SSC تنها پیش‌پردازش SG و Baseline دقتی در محدوده طیف‌های خام داشته‌اند و

جدول ۶- نتایج اعتبارسنجی مدل‌های PLS مبتنی بر روش‌های مختلف پیش‌پردازش طیف‌های Vis/NIR برای تخمین عیار قند چغندر قند								
پیش‌پردازش	LVs	r_c	RMSEC	r_{cv}	RMSECV	r_p	RMSECP	SDR
خام	۲	۰/۹۷۵	۰/۱۸	۰/۹۶۹	۰/۲۱	۰/۹۰۵	۰/۳۱۱	۴/۶
SG	۲	۰/۹۸۵	۰/۱۶	۰/۹۸۳	۰/۱۷۳	۰/۹۷۱	۰/۲۱۱	۴/۶
D1	۴	۰/۹۴	۰/۳۲۵	۰/۹۲۱	۰/۳۷۱	۰/۹۰۵	۰/۴۳۲	۳/۹
D2	۲	۰/۸۷	۰/۴۷۴	۰/۸۵	۰/۵۱۸	۰/۸۲	۰/۶۱۲	۶/۱
MSC	۴	۰/۹۳۸	۰/۳۲۸	۰/۹۲۵	۰/۳۶۶	۰/۹۰۷	۰/۴۱۱	۴/۳
SNV	۵	۰/۹۴۱	۰/۳۲۱	۰/۹۲	۰/۳۸	۰/۹۱۴	۰/۵۲	۴/۳
Baseline	۲	۰/۹۸۵	۰/۱۶	۰/۹۸۳	۰/۱۷۳	۰/۹۶۵	۰/۲۴۴	۳/۹

منابع

- آقای سعیدی، مهرداد، مینایی، سعید، جمشیدی، بهاره، عبداللهیان نوقابی، محمد. (۱۳۹۷). 'سنجش غیرمخرب عیار چغندر قند با بهره‌گیری از ترکیب طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIR) با روش‌های شیمی‌سنجی، مهندسی بیوسیستم ایران، ۴۹(۱)، ۶۶-۷۸. doi: ۱۰.۲۲۰۵۹/ijbse.۲۰۱۷.۲۰۸۴۱۳.۶۶۴۷۸۵. pp. ۹-۱۸.
- حزیره، ف.س. ۱۳۹۰، بررسی امکان حذف مواد شیمیایی شفاف‌کننده در فرآیند عیار سنجی چغندر قند در کارخانه‌های قند کشور با استفاده از سیستم عصاره‌گیری اتوفیل Autofil، پایان‌نامه کارشناسی ارشد شیمی تجزیه، عبداللهیان نوقابی، م. (استاد راهنما)، دانشکده علوم شیمی دانشگاه پیام نور مشهد.
- شفیعی، فاطمه، و عباس نژاد، اعظم. ۱۳۸۴. بررسی راهکارهای کاهش میزان ضایعات چغندر قند پس از برداشت. همایش ملی بررسی ضایعات محصولات کشاورزی. <https://sid.ir/paper/۸۱۴۰۶۰/fa>. SID.
- گلمحمدی، عبدالله، رضوی، مهسا سادات، طهماسبی، محمد. پیش‌بینی فعالیت آنزیم پراکسیداز با استفاده از تصویربرداری فراطیفی فروسرخ نزدیک در سیب ردلیشز طی دوره نگهداری. فناوری‌های جدید در صنعت غذا، ۱۴۰۱؛ (۳): ۲۳۹-۲۵۴. doi: ۱۰.۲۲۱۰۴/ift.۲۰۲۲.۵۴۱۴.۲۰۸۵.
- Ali, J., Pandey, S., Singh, V., & Joshi, P. (۲۰۱۶). Effect of coating of aloe vera gelon shelf life of grapes. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, ۴(۱), ۵۸-۶۸.
- Bagherpour, H., Minaei, S., & Abdollahian Noghabi, M. (۲۰۱۴). Non-destructive determination of sugar content in root beet by near infrared spectroscopy (NIRS). *Journal of Food Science & Technology* (۲۰۰۸-۸۷۸۷), ۱۲.(۴۶)
- Bourtoom, T. (۲۰۰۸). Edible films and coatings: characteristics and properties. *International food research journal*, ۱۵(۳), ۲۳۷-۲۴۸.

- Chrysargyris, A., Nikou, A., & Tzortzakis, N. (۲۰۱۶). Effectiveness of Aloe vera gel coating for maintaining tomato fruit quality. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, ۴۴(۳), ۲۰۳-۲۱۷.
- Cole, D. F., & Bugbee, W. M. (۱۹۷۶). Changes in resident bacteria, pH, sucrose, and invert sugar levels in sugarbeet roots during storage. *Applied and environmental microbiology*, ۳۱(۵), ۷۵۴-۷۵۷.
- Ding, J., Zhang, R., Ahmed, S., Liu, Y., & Qin, W. (۲۰۱۹). Effect of sonication duration in the performance of polyvinyl alcohol/chitosan bilayer films and their effect on strawberry preservation. *Molecules*, ۲۴(۷), ۱۴۰۸.
- FAO, ۲۰۲۳. Crops and livestock products in ۲۰۲۱, <http://www.fao.org/faostat>, Jan. ۲۲.
- Hazrati, S., Beyraghdar Kashkooli, A., Habibzadeh, F., Tahmasebi-Sarvestani, Z., & Sadeghi, A. R. (۲۰۱۷).
- Hernandez-Munoz, P., Almenar, E., Del Valle, V., Velez, D., & Gavara, R. (۲۰۰۸). Effect of chitosan coating combined with postharvest calcium treatment on strawberry (*Fragaria × ananassa*) quality during refrigerated storage. *Food chemistry*, ۱۱۰(۲), ۴۲۸-۴۳۵.
- Huang, Y., Lu, R., & Chen, K. (۲۰۱۸). Prediction of firmness parameters of tomatoes by portable visible and near-infrared spectroscopy. *Journal of food engineering*, ۲۲۲, ۱۸۵-۱۹۸.
- Jaggard, K. W., Clark, C. J. A., May, M. J., McCullagh, S., & Draycott, A. P. (۱۹۹۷). Changes in the weight and quality of sugarbeet (*Beta vulgaris*) roots in storage clamps on farms. *The Journal of Agricultural Science*, ۱۲۹(۳), ۲۸۷-۳۰۱.
- Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., & Ghassemian, H. (۲۰۱۲). Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. *Computers and Electronics in Agriculture*, ۸۵, ۶۴-۶۹.
- Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., & Ghassemian, H. (۲۰۱۴). Effect of Spectral Pre-Processing Methods on Non-Destructive Quality Assessment of Oranges Using NIRS. *Journal of Agricultural Engineering Research*, ۱۵(۲), ۲۷-۴۴.
- Kenter, C., & Hoffmann, C. M. (۲۰۰۹). Changes in the processing quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) during long-term storage under controlled conditions. *International journal of food science & technology*, ۴۴(۵), ۹۱۰-۹۱۷.
- Kenter, C., & Hoffmann, C. M. (۲۰۰۹). Changes in the processing quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) during long-term storage under controlled conditions. *International journal of food science & technology*, ۴۴(۵), ۹۱۰-۹۱۷.
- Li, J., Huang, W., Zhao, C., & Zhang, B. (۲۰۱۳). A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by Vis/NIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, ۱۱۶(۲), ۳۲۴-۳۳۲.
- Li, J., Rao, X., & Ying, Y. (۲۰۱۱). Detection of common defects on oranges using hyperspectral reflectance imaging. *Computers and electronics in agriculture*, ۷۸(۱), ۳۸-۴۸.
- Liebe, S., & Varrelmann, M. (۲۰۱۶). Effect of environment and sugar beet genotype on root rot development and pathogen profile during storage. *Phytopathology*, ۱۰۶(۱), ۶۵-۷۵.
- Mioduszevska, N., Pilarska, A. A., Pilarski, K., & Adamski, M. (۲۰۲۰). The influence of the process of sugar beet storage on its biochemical methane potential. *Energies*, ۱۳(۱۹), ۵۱۰۴.
- Moghimi, A., Aghkhani, M. H., Sazgarnia, A., & Sarmad, M. (۲۰۱۰). Vis/NIR spectroscopy and chemometrics for the prediction of soluble solids content and acidity (pH) of kiwifruit. *Biosystems engineering*, ۱۰۶(۳), ۲۹۵-۳۰۲.
- Moscetti, R., Haff, R. P., Saranwong, S., Monarca, D., Cecchini, M., & Massantini, R. (۲۰۱۴).

- Moscetti, R., Haff, R. P., Stella, E., Contini, M., Monarca, D., Cecchini, M., & Massantini, R. (۲۰۱۵).
- Mostofi, Y., Dehestani Ardakani, M. & Razavi, S. H. (۲۰۱۱). The effect of chitosan on postharvest life extension and qualitative characteristics of table grape "Shahroodi", Iranian Journal of Sci. and Technol., ۸: ۹۳-۱۰۲.
- Nicolau-Lapena, I., Colas-Meda, P., Alegre, I., Aguilo-Aguayo, I., Muranyi, P., & Vinas, I. (۲۰۲۱). Aloe vera gel: An update on its use as a functional edible coating to preserve fruits and vegetables. Progress in Organic Coatings, ۱۵۱, ۱۰۶۰۰۷.
- Nikbakht, A. M., TAVAKKOLI, H. T., Malekfar, R., & Gobadian, B. (۲۰۱۱). Nondestructive determination of tomato fruit quality parameters using Raman spectroscopy.
- Pan, L., Lu, R., Zhu, Q., McGrath, J. M., & Tu, K. (۲۰۱۵). Measurement of moisture, soluble solids, sucrose content and mechanical properties in sugar beet using portable visible and near-infrared spectroscopy. Postharvest Biology and Technology, ۱۰۲, ۴۲-۵۰.
- Pan, L., Lu, R., Zhu, Q., Tu, K., & Cen, H. (۲۰۱۶). Predict compositions and mechanical properties of sugar beet using hyperspectral scattering. Food and Bioprocess Technology, ۹(۷), ۱۱۷۷-۱۱۸۶.
- Penchaiya, P., Bobelyn, E., Verlinden, B. E., Nicolai, B. M., & Saeys, W. (۲۰۰۹). Non-destructive measurement of firmness and soluble solids content in bell pepper using NIR spectroscopy. Journal of Food Engineering, ۹۴(۳-۴), ۲۶۷-۲۷۳.
- Salehi, F. (۲۰۲۰). Edible coating of fruits and vegetables using natural gums: A review. International Journal of Fruit Science, ۲۰(sup۲), S۵۷۰-S۵۸۹.
- Sogvar, O. B., Saba, M. K., & Emamifar, A. (۲۰۱۶). Aloe vera and ascorbic acid coatings maintain postharvest quality and reduce microbial load of strawberry fruit. Postharvest Biology and Technology, ۱۱۴, ۲۹-۳۵.
- Valero, D., Martínez, D., Riquelme, F., & Serrano, M. (۱۹۹۸). Polyamine response to external mechanical bruising in two mandarin cultivars. HortScience, ۳۳(۷), ۱۲۲۰-۱۲۲۳.
- Wei, J., Ma, F., Shi, S., Qi, X., Zhu, X., & Yuan, J. (۲۰۱۰). Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit. Postharvest Biology and Technology, ۵۶(۲), ۱۴۷-۱۵۴.
- Xu, W. T., Huang, K. L., Guo, F., Qu, W., Yang, J. J., Liang, Z. H., & Luo, Y. B. (۲۰۰۷). Postharvest grapefruit seed extract and chitosan treatments of table grapes to control Botrytis cinerea. Postharvest Biology and Technology, ۴۶(۱), ۸۶-۹۴.

Investigating the qualitative properties of sugar beet using hyperspectral imaging

Mohsen Molayi^۱, Abdollah Golmohammadi^{۲*}, Mohammad Tahmasebi^۳

^۱ Former MS student, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

^{۲*} Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

^۳ Former PhD student, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

Abstract

In recent decades, various non-destructive technologies have been used to evaluate the quality of fruits and vegetables. Among these methods, hyperspectral imaging has been noticed by researchers as a non-destructive, fast and minimal environmental pollution method to evaluate the properties of agricultural products. The purpose of the research was to investigate the effect of variety, duration and storage conditions on the quality properties of sugar beet and also the feasibility of using hyperspectral images as a new and non-destructive technique in measuring quality properties. Three sugar beet cultivars including Agrit, Muriel and Shokofa cultivars in three different storage conditions (۱- in storage conditions with protection ۲- without protection i.e., in atmospheric conditions ۳- subsoil and the same field conditions) for ۴۰ days of storage and then ultraspectral imaging in the mode Reflectance and in the wavelength range of ۴۰۰ to ۱۱۰۰ nm was measured once every ۱۰ days. In the next step, the properties of the samples (including soluble solids (SSC), mechanical properties, sugar content, moisture percentage and pH) were determined based on destructive methods. Because the acquired spectra have noise, the effects of disturbing factors were minimized through various pre-processing to provide clearer data for modeling the qualitative characteristics of the samples. Finally, modeling was done using the resulting data from hyperspectral imaging and reference tests based on the least square regression (PLS) method, and in the last step, after validating the resulting models, the most appropriate model was selected. The results show that the hyperspectral imaging method can be used as a valuable tool to predict the quality properties of sugar beet during the storage period.

Introduction

The ever-increasing population growth and increasing demand for food products have made the importance of modern agriculture more visible. Considering that the quality of food is directly related to human health, measuring the quality of agricultural products as one of the important activities in post-harvest technology has received more attention. Sugar beet with the scientific name *Beta vulgaris* is a biennial plant from the spinach family that is cultivated as an annual plant. During the vegetative growth period, sugar beet has no stem and is seen as a set of large horizontal to vertical leaves. The growth period for sugar production is ۶ to ۹ months. Iran is the ۱۲th largest producer of this product with the production of ۱۳,۵ million tons and the cultivated area of ۱۸,۹ thousand hectares (FAO, ۲۰۲۳). Currently, the capacity of the country's sugar factories is less than the amount of beet that is harvested daily, so it is necessary to store the produced beet until the conditions for processing are available (Hazireh, ۲۰۱۹). In the process of sugar production, the quality of sugar beet is one of the most effective and important factors, and in sugar factories, the production product is largely dependent on the quality of sugar beet. Research has shown that the increase in sugar waste and sugar beet weight during the storage period causes a decrease in sugar extraction. The aim of this research is to investigate the variety, time and storage conditions on the quality properties of sugar beet and also the feasibility of using hyperspectral images as a new and non-destructive technique in measuring the quality properties of different varieties of sugar beet under different conditions of time and storage method.

Methodology

Three sugar beet cultivars including Agrit, Muriel and Shokofa cultivars in three different storage conditions (۱- in storage conditions with protection ۲- without protection i.e. in atmospheric conditions ۳- subsoil and the same field conditions) for ۴۵ days of storage and then ultraspectral imaging in the mode Reflectivity and in the wavelength range of ۴۰۰ to ۱۱۰۰ nm was measured for each sample once every ۱۵ days. In the next step, the properties of the samples (including soluble solids (SSC), mechanical properties, sugar content, moisture percentage and pH) were determined based on destructive methods. Because the acquired spectra have noise, the effects of disturbing factors were minimized through various pre-processings to provide clearer data for modeling the qualitative characteristics of the samples. Finally, modeling was done using the resulting data from hyperspectral imaging and reference tests based on the least square regression (PLS) method, and in the last step, after validating the resulting models, the most appropriate model was selected.

Conclusion

According to the diagram in Figure ۱ for SSC, it is clear that the samples stored under the soil with the increase of the storage period in all three cultivars have better preserved their original properties and the least changes in their SSC have occurred and the most changes are related to the free samples. Also, in all storage periods and in all storage conditions, morel variety had the least changes in SSC, and the samples stored underground were less affected by the increase in the storage period than other samples. The results of the comparison of the average data in Figure ۴ showed that with the increase of the period, more mass reduction occurred in the samples and also Muriel cultivar had more mass reduction than other items in all conditions. For free samples, the decrease in mass was more intense and occurred with a steeper slope, while the samples stored under the soil had a partial decrease in mass during the storage period. According to the results presented in Figure ۵ and ۶, it is clear that the sugar content of all cultivars decreased with the increase of the storage period; Muriel variety had the highest and Agrit variety had the lowest sugar level in all periods. However, Muriel variety is more sensitive to time change and the sugar level of this variety has decreased more strongly than the other two varieties. And it is also known that the storage of sugar beet underground moderates the process of sugar reduction to a great extent and the quality of sugar beet is maintained during the storage period. Protected samples also have less reduction in sugar than free samples. The information presented in Table ۵ shows that except for the model based on the second derivative preprocessor, all the created models are highly accurate in predicting stiffness and the best performance is related to the Baseline preprocessor.

Keywords: "Storage", "Hyperspectral Imaging", "Beet Sugar", "Physical Properties", "Least Square Regression (PLS)"

