

## ارزیابی غیرمخرب مواد جامد محلول غده های سیب زمینی در شرایط مختلف انبارداری با استفاده طیف سنجی فرورسرخ نزدیک (Vis/NIR)

عبداله گل محمدی<sup>۱\*</sup>، محمد طهماسبی<sup>۱</sup>، یلاماز بایحان<sup>۲</sup>، اسماعیل کاودیر<sup>۳</sup>، محمت بوراک بیویکجان<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> - گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

<sup>۲</sup> - گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه نامیک کمال، ترکیه

<sup>۳</sup> - گروه مهندسی ماشین های کشاورزی و فناوری، دانشکده کشاورزی دانشگاه هجده مارس چاناکاله، ترکیه

\* ایمیل نویسنده مسئول: golmohammadi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲

### چکیده

طیف سنجی به عنوان یک روش غیرمخرب، سریع و دوستدار محیط زیست به منظور سنجش خواص محصولات کشاورزی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نظر به اینکه محتوای جامد محلول (SSC) یکی از پارامترهای کیفی مهم سیب زمینی به شمار می رود، در این تحقیق تاثیر شرایط مختلف انبارداری بر میزان SSC سه رقم سیب زمینی طی ۶۵ روز نگه داری، مورد بررسی قرار گرفت. طیف سنجی بازتابشی در محدوده طول موج های ۸۰۰-۲۵۰۰ nm طیف، پیش پردازش های اولیه مختلف اعمال و اثرات آن ها مورد بررسی قرار گرفت. مدل مناسب با استفاده از روش حداقل مربعات جزئی (PLS) تعیین گردید. طول موج های مهم براساس ضریب رگرسیون بهترین مدل انتخاب و با استفاده از روش های مختلف مدل سازی شد. براساس آنالیز (PLS) بهترین نتایج با پیش پردازش فیلتر میانه با  $R^2C=0/410$ ،  $RMSEC=0/410$ ،  $R^2C=0/475$ ،  $RMSECV=0/420$ ،  $R^2CV=0/867$  حاصل شد. بر اساس ضریب رگرسیون بهترین مدل، ۱۲ طول موج به عنوان بهترین طول موج ها تعیین شد. در مدل سازی با استفاده از طول موج های موثر، شبکه عصبی مصنوعی بهترین نتیجه را داشت. لذا به نظر می رسد که روش غیر مخرب Vis/NIR قادر به تخمین SSC سیب زمینی در دوره انبارداری را با دقت بالا دارد.

### کلمات کلیدی

"سیب زمینی"، "غیرمخرب"، "طیف سنجی"، "شرایط نگه داری"، "SSC"

### ۱- مقدمه

کمی استفاده شد. اگرچه اخیراً به عنوان یک فناوری جدید نه فقط از نور مرئی بلکه از سایر اشکال تابش های الکترومغناطیسی و غیر الکترومغناطیسی مانند میکروموج ها، امواج رادیویی، اشعه ایکس، الکترون ها، فوتون ها (امواج صوتی) و غیره استفاده می شود. طیف سنجی مادون قرمز نزدیک یک فناوری سریع و غیرمخرب است که تجزیه و تحلیل چند مؤلفه ای تقریباً هر ماتریسی را ارائه می دهد. محدوده طول موجی آن از فرورسرخ متوسط شروع و تا ناحیه مرئی گسترش می یابد (Rai et al, 2015). استفاده از تکنیک طیف سنجی فرورسرخ نزدیک در بسیاری از زمینه ها از جمله پزشکی، کشاورزی، نساجی، تولید لوازم آرایشی و بهداشتی و داروسازی کاملاً شناخته و رو به افزایش است. استفاده از این روش غیرمخرب همراه با تکنیک های شیمی سنجی منجر به ایجاد ابزاری موثر در تعیین ویژگی های متنوعی در بسیاری از زمینه ها گردیده است. از مزایای آن نسبت به سایر روش های غیرمخرب می توان به سرعت، دقت، هزینه کم، اندازه گیری چندین صفت در یکبار آزمایش و عدم نیاز به آماده سازی خاص اشاره کرد. با پیشرفت های اخیر در NIRS و روش های شیمی سنجی و ساخت اسپکترومترهای قابل حمل این امکان فراهم شده تا بتوان با تعیین شاخص های رسیدگی محصول در مراحل مختلف رشد به صورت غیرمخرب و در حجم زیاد نمونه، زمان برداشت به موقع محصول را پیش بینی کرد. سرعت و دقت این روش در تعیین شاخص های کیفی انواع سبزی و میوه باعث گردیده تا در بسیاری از سیستم های درجه بندی و کنترل کیفیت میوه و سبزی

گیاه سیب زمینی از جنس *Solanum tuberosum* (L.) و خانواده سولاناسه است. غده های سیب زمینی یکی از منابع مهم تغذیه در اکثر کشورها است. میزان تولید این محصول در دنیا پس از گندم، برنج و ذرت در رتبه چهارم قرار دارد. سیب زمینی یکی منابع با ارزش تولید نشاسته محسوب می شود. همچنین دارای گروه ویتامین های B و C و مواد معدنی پتاسیم می باشد (FAO, 2012). مواد جامد محلول (SSC) یکی از پارامترهای کیفی مهم سیب زمینی به شمار می رود و بیانگر میزان قند محصول است (Shao et al, 2020). مصرف کنندگان عمدتاً سیب زمینی با محتوای SSC پایین را ترجیح می دهند. در سیب زمینی تازه، چپس یا خلال شده، میزان SSC نقش مهمی در کیفیت و ارزش تجاری آن ها دارد. با این حال میزان SSC در سیب زمینی بسته به محیط رشد و شرایط نگه داری بسیار متفاوت است (Nourian et al, 2003). لذا برای تعیین کیفیت محصول، توسعه روش شناسایی آنالیز میزان SSC به شدت احساس می شود. یکی از بهترین روش ها برای این منظور استفاده از روش طیف سنجی است. طیف سنجی به عنوان مطالعه برهم کنش بین نور و ماده تعریف می شود و پیشینه آن به شاخه ای از علم برمی گردد که از نور مرئی برای مطالعات نظری در ساختار ماده و آنالیزهای کیفی و

اول و ترکیبی از این روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پیش پردازش مناسب برای مدل سازی روش حداقل مربعات نسبی (PLSR) انتخاب شد. براساس نتایج بدست آمده، مدل‌های تخمین مواد جامد محلول و محتوای رطوبتی در مد بازتابشی و اسیدیته قابل تیتراسیون در مد عبوری منجر به بهترین نتایج شدند. همچنین در بین سه پارامتر مورد بررسی، بهترین نتایج به ترتیب برای مواد جامد محلول، محتوای رطوبتی و اسیدیته قابل تیتراسیون حاصل شد (موکش و همکاران، ۱۳۹۵). امکان پیش‌بینی روزهای قبل از فساد (DBD) میوه هلو با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک (NIR) و بینی الکترونیکی ۷ مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه رگرسیون حداقل مربعات جزئی، حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان ۸ و رگرسیون اتصالات گاوسین ۹ برای کالیبراسیون مدل استفاده شد. بهترین مدل پیش‌بینی نرخ DBD مقدار ۸۲/۲۶٪ را نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که ترکیبی از طیف‌سنجی NIR و بینی الکترونیکی به عنوان یک روش جایگزین، قابل اعتماد و سریع برای پیش بینی DBD از میوه هلو است (Huang et al, 2017). فرهادی و همکاران (Roya et al, 2019) پیش بینی تغییر ترکیبات سیب زمینی در دوره انبارداری را با استفاده طیف سنجی مرئی و مادون قرمز نزدیک، بررسی کردند. رادی (Rady, 2014)، پتانسیل استفاده از طیف سنجی مادون قرمز مرئی و تصویربرداری فراطیفی را برای پیش بینی ترکیبات سیب زمینی فرآوری شده، مورد مطالعه قرار داد. تحقیقاتی از قبیل پیش بینی ترکیبات اصلی سیب زمینی با طیف سنجی مادون قرمز نزدیک توسط آینارا لوپز (Ainara López-Maestresalas, 2017) و تعیین غیرمخرب مواد قندی غده های سیب زمینی با استفاده از طیف سنجی مرئی و مادون قرمز نزدیک توسط جی یو چن و همکاران (Jie Yu CHEN, et al, 2010) انجام شده است. هدف از این مطالعه بررسی امکان استفاده از روش طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک (vis/NIR) در تخمین تغییرات SSC در سه رقم سیب-زمینی در طی دوره نگهداری تحت شرایط مختلف انبارداری است.

## ۲- روش تحقیق

### • آماده سازی نمونه‌ها

سه رقم سیب زمینی شامل ارقام MARABEL، SANTE و GRANA که از نظر میزان عملکرد در واحد سطح، کیفیت محصول و مدت ماندگاری، با هم دیگر متفاوت بودند، از مزرعه نزدیک دانشگاه Çanakkale Onsekiz Mart در کشور ترکیه تهیه و تحت شرایط متفاوت انبارداری نگه داری شد. سیب زمینی ها پس از برداشت به آزمایشگاه دانشگاه منتقل و با استفاده یک برس نرم تمیز و به مدت ۱۵ روز در دمای ۱۵-۱۸°C با رطوبت نسبی ۹۰-۹۵ درصد جهت التیام زخم های احتمالی نگهداری شدند. سپس دمای نگه داری به تدریج یعنی هر روز یک درجه سلیسیوس کاهش داده شد تا به دمای مورد نظر برای ذخیره سازی برسد. از هر رقم به مقادیر مورد نیاز انتخاب و تحت سه شرایط مختلف شامل دمای ۴°C با رطوبت نسبی ۹۰ درصد، دمای ۷°C با رطوبت نسبی ۸۰-۹۰ درصد و دمای متغیر ۱۸-۲۲°C با رطوبت نسبی ۷۰-۹۰ درصد، به مدت ۶۵ روز نگه داری شد. برای اندازه گیری،

از این روش استفاده شود (Lin and Ying, 2009). نخستین بار بن-گرا و کارل نوریس (Ben-gera, I., Norris, K.h.1968) از طیف سنجی NIR در آنالیز ترکیبات غلات استفاده کرد. پارک و همکاران (Park et al, 2003) نیز با انجام آزمایش بر روی سیب و با استفاده از طیف در محدوده طول موج ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر، مقادیر  $(R^2=0.96, SEP=0.34)$  و  $(R^2=0.65, SEP=7.3)$  را برای تخمین به ترتیب SSC و سفتی آن گزارش کردند. شائو و همکاران (Shao et al, 2007) با استفاده از طیف سنجی بازتابشی مادون قرمز نزدیک به بررسی خصوصیات کیفی گوجه فرنگی مانند سفتی، مواد جامد محلول و اسیدیته آن پرداختند و این خصوصیات را با ضریب همبستگی بالا به صورت غیرمخرب پیش‌بینی کردند. ضریب همبستگی برای پیش بینی SSC برابر با ۰/۸۹ و میزان خطا نیز برابر با ۰/۳۷۷ درجه بریکس بود. پژوهشی توسط سد و همکاران (Saad et al, 2015) به منظور بررسی غیرمخرب کیفیت گوجه فرنگی‌های ذخیره شده با استفاده از طیف‌سنجی جذبی vis/NIR از ۳۵۰ تا ۱۰۵۰ نانومتر صورت گرفت. تمام اندازه‌گیری‌ها، از جمله جمع‌آوری داده‌های طیفی، کاهش وزن و پارامترهای کیفی فیزیکی و شیمیایی (رنگ، SSC، شیرینی، شاخص SSC/TA و محتوای لیکوپن) در زمان برداشت و ۴، ۸، ۱۲ روز پس از ذخیره سازی انجام گرفت. از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) برای ایجاد مدل‌های خطی پیش‌بینی بین داده‌های طیفی و خواص کیفی میوه استفاده کردند. مدل کالیبراسیون (PLSR) برای SSC در ۱۲ روز ذخیره سازی، بالاترین ضریب همبستگی  $R^2=0.91$  و  $RMSEP=0.285$  را نشان داد. نتایج نشان داد که پارامترهای کیفی فیزیکی و شیمیایی در زمان ذخیره‌سازی گوجه‌فرنگی، به طور قابل ملاحظه ای تغییر می‌کند و این روش در زمینه پس از برداشت، کاربرد بالقوه‌ای دارد. در پژوهشی، برای پیش‌بینی کمی میزان نیترات در آناناس از روش طیف سنجی vis/NIR استفاده شد. طیف هر یک از آناناس‌ها با استفاده از یک اسپکتروفتومتر vis/NIR در حالت بازتابشی با طول موج در ناحیه ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر به دست آمد. مقدار واقعی نیترات در آناناس توسط HPLC تعیین شد. بهترین مدل از طیف پیش پردازش با مشتقات اولیه در محدوده ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر به دست آمد. پیش‌بینی‌ها بر اساس این مدل برای نیترات، با ضریب همبستگی بالا  $R^2=0.95$  و  $RMSEP=0.77$  ppm به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که طیف‌سنجی vis/NIR را می‌توان برای غربالگری آناناس استفاده کرد (Srivichien et al, 2015). در تحقیقی، با استفاده از روش غیرمخرب طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ نزدیک با طول موج کوتاه ۱ (Vis/SW NIR)، به منظور تخمین پارامترهای مواد جامد محلول، محتوای رطوبت و اسیدیته قابل تیتراسیون لیموشیرین مورد مطالعه قرار گرفت. داده های طیف سنجی ۱۲۰ نمونه لیموشیرین در محدوده‌ی طول موج ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر در دو وضعیت بازتابشی و عبوری جمع‌آوری کردند. اثر پیش‌پردازش‌های مختلف نظیر الگوریتم ساویتسکی-گوالی ۲ (SG)، تصحیح پراکنش افزاینده ۳ (MSC)، تصحیح خط پایه ۴ (BC) متغیر نرمال استاندارد ۵ (SNV)، مشتق

- 1 Short Wavelength Near-Infrared
- 2 Savitzky -Golay Algorithm
- 3 Multiplicative Scatter Correction
- 4 Baseline Correction
- 5 Standard Normal Variety Transformation

- 6 Days Before Decay
- 7 Nose Techniques
- 8 Least-Squares Support Vector Machines
- 9 Multiple Gaussian Fitting Regressions

• تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA) به منظور حذف نمونه-

های پرت

در طول انجام تصویربرداری طیفی به دلایل مختلف، ممکن است برخی از داده‌های به دست آمده از نمونه‌ها نامناسب باشند. به منظور حذف نمونه‌های اریب، قبل از هرگونه پردازش روی داده‌ها، از تجزیه مولفه‌های اصلی استفاده شد.

• پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های حاصل از تصویربرداری طیفی ممکن است در اثر پراکنش نور توسط آشکارساز با تغییر نمونه، تغییر اندازه نمونه، ناهمواری‌های سطحی در نمونه، نویزهای ایجاد شده به علت افزایش دمای دستگاه و بسیاری عوامل دیگر، تحت تاثیر قرار گیرد و اطلاعات ناخواسته بر دقت مدل‌های کالیبراسیونی تاثیر بگذارد. از این رو برای دستیابی به مدل‌های واسنجی پایدار، دقیق و قابل اعتماد، نیاز به پیش‌پردازش داده‌ها است (Rossel, 2008).

در این پژوهش میانگین متحرک، فیلتر گوسین، فیلتر میانه، هموارسازی ساویتزکی-گولای، نرمال‌سازی، تصحیح پخش افزاینده (MSC) و توزیع نرمال استاندارد (SNV) بر روی داده‌ها اعمال شد.

• رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و تعیین طول

موج‌های موثر

بکارگیری روش‌های غیرمخرب مبتنی بر طیف سنجی در بازه کامل از طول موج‌ها، نیازمند صرف وقت و هزینه‌های بسیار بالاست که کاربرد عملی این روش را تقریباً غیر ممکن می‌سازد؛ لذا باید به دنبال راهی برای یافتن طول موج‌های بهینه 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 به منظور ساخت مدل‌ها، داده‌ها به صورت تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند: ۸۰ درصد نمونه‌ها به منظور آموزش و اعتبارسنجی متقاطع و از باقی داده‌ها جهت اعتبارسنجی مستقل استفاده شد. مدل‌های (PLS) برای کلیه پیش-پردازش‌های صورت گرفته روی داده‌ها، استخراج شد و از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) (روابط ۲ و ۳) به منظور تعیین بهترین مدل استفاده شد (طهماسی و همکاران، ۱۳۹۶).

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - p_i)^2}{N}} \quad (3)$$

از ضریب رگرسیون بهترین مدل کالیبراسیون (PLS) برای انتخاب طول موج‌های بهینه استفاده شد. طول موج‌های با مقادیر بالای قدرمطلق ضریب رگرسیون نشان می‌دهد که متغیرها تاثیرات مهمی در پیش‌بینی متغیر وابسته دارند و در نتیجه می‌توانند به عنوان طول موج‌های بهینه انتخاب شوند (Zhu et al, 2017).

• مدل سازی با استفاده از طول موج‌های موثر

به منظور یافتن بهترین مدل برازش کننده رابطه بین طول موج‌های بهینه و تغییرات SSC سیب زمینی ها در طول دوره نگهداری، مدل-

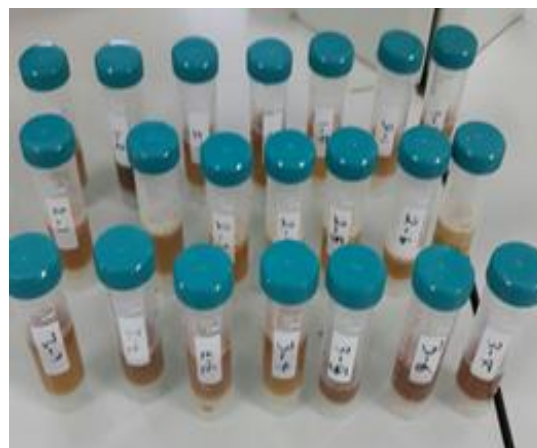
نمونه‌ها دو ساعت قبل از شروع آزمایش از شرایط ذخیره سازی خارج و تحت شرایط محیط آزمایشگاه قرار گرفت. آزمایشات یک هفته در میان تکرار شد.

طیف سنجی

طیف سنجی با استفاده از دستگاه آنالیزور چند منظوره (MPA) طیف سنج (FT-NIR) (SSCuker Optik, GmbH, Ettlingen Germany) مجهز به دکتور (TE-InGaAs internal for Germany reflectance and RT-InGaAs external for transmittance) و لامپ ۲۰ وات هالوژن- تنگستن با منبع نور NIR انجام شد. برای اندازه گیری، سیب زمینی کامل در دستگاه قرار داده شد و طیف سنجی بازتابشی با استفاده از یک پراب فیبر نوری (نوع IN 261) در محدوده طول موج ۸۰۰-۲۵۰۰ nm انجام شد. تعداد ۳۲ اسکن برای هر طیف بازتابشی به مدت تقریبی ۱۵/۳۲ ثانیه انجام شد. رزولوشن برای طیف سنجی ۸ cm<sup>-1</sup> بود. کنترل دستگاه و آنالیز طیف با استفاده از نرم افزار (OPUS) (SSCuker Optik, GmbH, Ettlingen Germany) انجام شد. در حین اندازه گیری طیف، پراب فیبر نوری مستقیماً روی نمونه‌ها قرار داده شد. پراب فیبر نوری پیکربندی لازم را برای هدایت نور به سمت نمونه‌ها و دریافت نور بازتابی توسط دکتور فیبر (TE-InGaAs) را داشت. در اندازه گیری‌ها سر فیبر نوری پراب، منبع و دکتور فیبر برای حس سطحی تقریبی برابر با ۱۱/۷ mm<sup>2</sup> تنظیم شده بود.

• مواد جامد محلول نمونه‌ها (SSC)

برای اندازه گیری مواد جامد محلول در نمونه‌ها، از هر رقم سیب زمینی تعداد ۷ نمونه به صورت تصادفی انتخاب و به مدت ۲ ساعت در محیط آزمایشگاه و دمای ۲۲ °C نگه داری شد. پس از پوست گیری سیب زمینی‌ها، با استفاده از یک آب میوه گیر معمولی، آب نمونه‌ها استخراج و از صافی کاغذی برای جدا کردن ذرات باقی مانده از مایع استفاده شد. آب نمونه‌ها، شکل (۱) در ظروف در بسته برای آزمایش‌های بعدی نگه داری شد. میزان مواد جامد محلول در نمونه‌ها SSC با استفاده از رفرکتومتر دیجیتالی مدل (ATAGO, PR 32α, Japan) برحسب Brix، اندازه گیری شد. طول دوره انبارداری ۶۵ روز بود و آزمایشات به صورت یک هفته در میان انجام و داده‌های لازم جمع آوری شد.



شکل ۱- نمونه‌های آب تهیه شده از سه رقم سیب زمینی

نگهداری را می‌توان به افزایش میزان قند در طول فرآیند رسیدگی (Cordenunsi et al, 2005) و هیدرولیز نشاسته برای حفظ فعالیت‌های فیزیولوژیکی محصول در دوره پس از برداشت نسبت داد (Nourian et al, 2003). نتایج مشابه در مورد افزایش SSC سیب زمینی و یا سایر محصولات کشاورزی با گذشت زمان گزارش شده است (Nourian et al, 2003; Koehler et al, 2012).

#### • تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA)

براساس نتایج آنالیز (PCA) که در شکل (۳-الف) ارائه شده است، اولین مولفه اصلی (PC-1) ۶۳٪ و دومین مولفه اصلی (PC-2) ۲۶٪ از واریانس نمونه‌های مورد آزمایش را توصیف می‌کنند. در نتیجه دو مولفه اصلی اول مجموعاً ۹۹٪ از داده‌ها را بیان می‌کنند. با توجه به اینکه ممکن است میزان ارتباط بین خواص نمونه‌ها در ارقام مختلف سیب زمینی، مدت زمان و دمای نگهداری در طول انجام آزمایشات، به دلایل مختلفی نظیر مشکلات فنی تجهیزات، جمع آوری داده، نمونه‌گیری نادرست و ... در برخی از نمونه‌ها نامناسب و یا به اصلاح پرت باشد (Cozzolino et al., 2011; Heidari et al., 2019; Jamshidi et al., 2012)؛ لذا در این پژوهش برای تشخیص نمونه‌های پرت از توزیع تی‌مربع هاتلینگ-F باقیمانده استفاده شد. در این روش باقیمانده F فاصله نمونه تا مدل را بیان می‌کند و توزیع تی-مربع هاتلینگ توصیف نمونه توسط مدل را نشان می‌دهد (Abasi et al., 2019). طبق نتایج حاصل که در شکل (۳-ب) ارائه شده است، تعداد یازده عدد از کل نمونه‌ها به عنوان داده‌های پرت تعیین شد که با علامت دایره نشان داده شده‌اند که در آن‌ها مقادیر توزیع تی‌مربع هاتلینگ بالاتر از ۶ است. داده‌های پرت شناسایی شده در آنالیزهای بعدی حذف شدند.

های (PLS)، رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه عصبی مصنوعی (NNA) پیاده سازی شد. مطابق با آنچه در بخش قبلی گفته شد به منظور ساخت مدل‌ها، داده‌ها به صورت تصادفی به دو قسمت تقسیم شدند و از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) (روابط ۲ و ۳) به منظور تعیین 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 بهینه و لایه خروجی با یک نورون SSC و با یک 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 لونبرگ-مارکوارت برای به هنگام‌سازی 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.

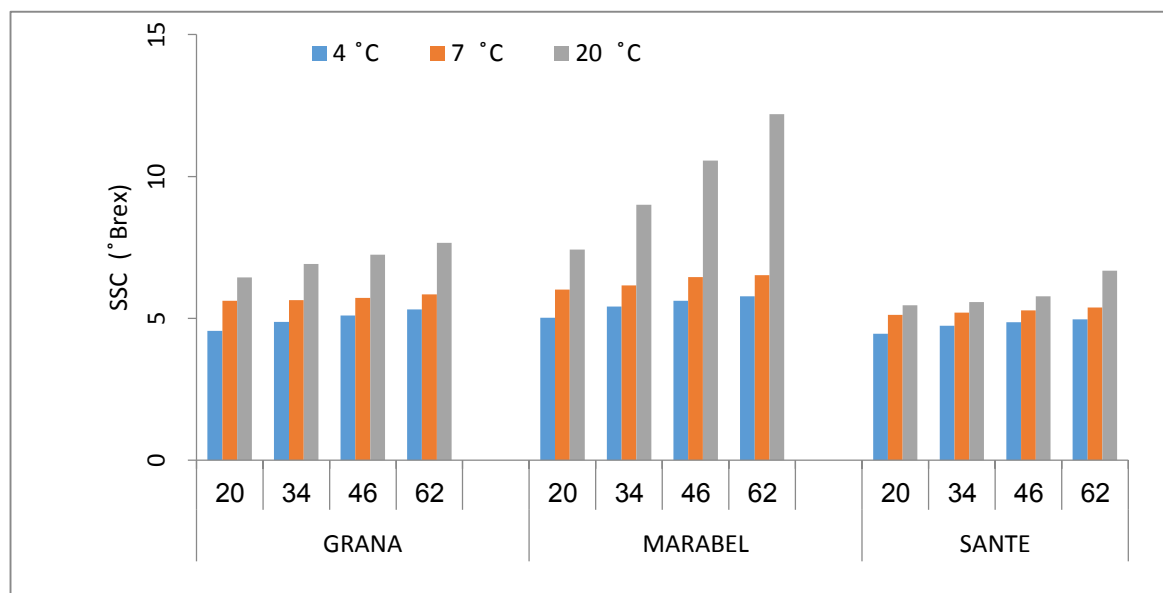
#### • آنالیز آماری

این تحقیق در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت آزمایش فاکتوریل با سه عامل شامل: ارقام در سه سطح (MARABEL، SANTE و GRANA)، دما ذخیره سازی در سه سطح (۴، ۷ و ۲۰ °C) و مدت ذخیره سازی در چهار سطح (۲۰، ۳۴، ۴۶ و ۶۲ روز) انجام شد. تمامی آزمایش‌ها با پنج تکرار انجام شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار The Unscrambler X 10.4 استفاده شد.

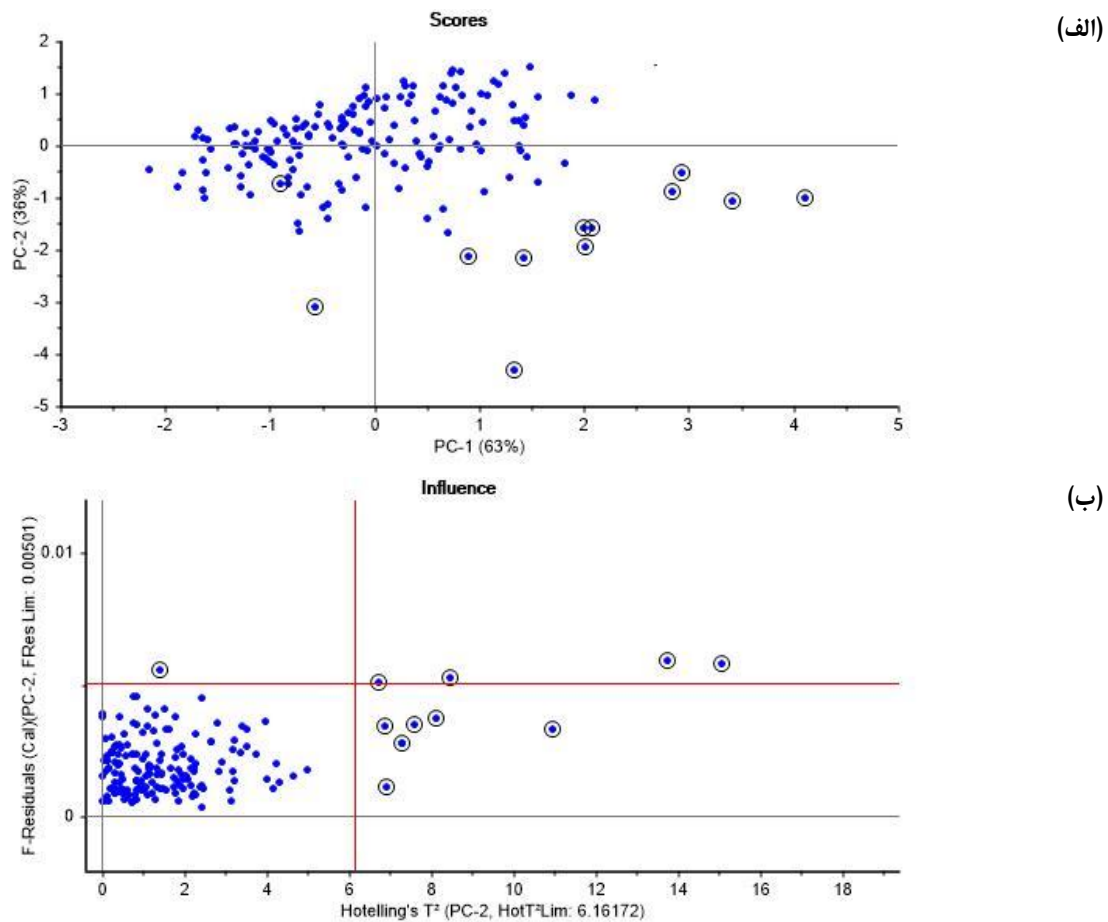
#### ۳- نتایج

#### • تغییرات SSC نمونه‌ها در طول دوره نگهداری

شکل ۲ مقادیر SSC نمونه‌های سیب زمینی را در مراحل مختلف نگهداری نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصل با گذشت زمان مقدار SSC در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این روند افزایشی در طول زمان



شکل ۲- تغییرات SSC نمونه‌ها در طول دوره نگهداری در شرایط مختلف انبارداری در سه رقم سیب زمینی



شکل ۳- تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA)

نرمال استاندارد (SNV) تخمین دقیق‌تری از مقدار SSC در پی خواهد داشت. کیم و همکاران (kim et al, 2021) در تخمین SSC خربزه شرقی با استفاده از طیف سنجی مادون قرمز نزدیک در بین روش‌های مختلف پیش‌پردازش شامل هموارسازی ساویتزکی-گولای، نرمال‌سازی با بیشینه و کمینه، نرمال‌سازی استواری، استانداردسازی، متغیر نرمال استوار، توزیع نرمال استاندارد (SNV) و تصحیح پخش افزایشده (MSC) گزارش نمودند 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 محصول بهتر است، مقایسه‌ای بین داده‌های حاصل از پژوهش‌های مختلف با یکدیگر مورد مقایسه قرار نگیرد (Jamshidi et al, 2012).

#### • طول موج‌های موثر

براساس ضرایب رگرسیونی مدل (PLS)، داده‌های پیش‌پردازی با فیلتر میانه ۱۲ طول موج که در محدوده ۱۴۰۰ تا ۲۵۰۰nm قرار دارند به عنوان طول موج‌های موثر شناسایی شدند (شکل ۴). براساس چگونگی توزیع اورتون‌های پیوندهای اصلی (Magwaza et al, 2012)، تفکیک نمونه‌های سیب زمینی براساس شاخص کیفی SSC را می‌توان به اورتون‌های دوم C-H، CH<sub>2</sub> و CH<sub>3</sub> در محدوده طول موج ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰nm، اورتون‌های اول C-H، CH<sub>2</sub>

#### • رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)

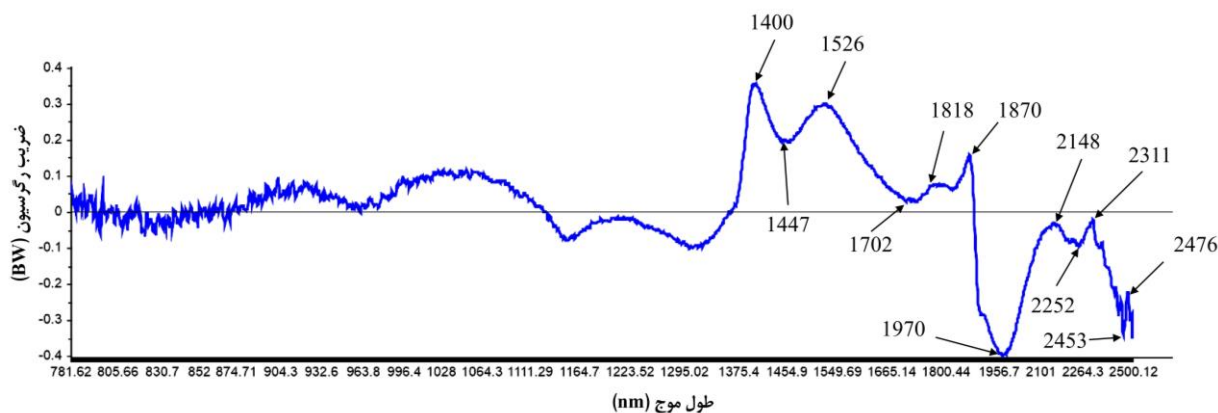
مقادیر  $R^2$ ، RMSE برای مجموعه‌های کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل‌های مختلف رگرسیون (PLS) با داده‌های خام و پردازش شده با توابع مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که همه پیش‌پردازش‌های انجام شده و همچنین طیف‌های بدون پیش‌پردازش قادر به پیش‌بینی SSC با دقت مطلوب هستند و بهترین نتایج در مدل تدوین شده در پیش‌پردازش فیلتر میانه با  $RMSEC=0/410$ ،  $R^2_{CV}=0/867$ ،  $RMSECV=0/420$ ،  $R^2_e=0/875$  (Khodabakhshian et al, 2017) همکاران و پتانسیل طیف سنجی مرئی و مادون قرمز برای طبقه بندی مرحله رسیدگی و پیش‌بینی صفات کیفی رقم انار شامل SSC، pH) و اسیدیته قابل تیتراسیون را بررسی نمودند. از بین روش‌های مرکزسازی، هموارسازی ساویتزکی-گولای، فیلتر میانه، متغیر نرمال استاندارد، تصحیح پخش افزایشده (MSC) و تمایز با مشتق اول و مشتق دوم، استفاده از تصحیح پخش افزایشده (MSC) بالاترین دقت در تشخیص پارامترهای کیفی انار را در پی داشت. ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2018) در تخمین SSC سیب قرمز فوجی با استفاده از طیف سنجی مادون قرمز نزدیک برای کاهش نویزها از توابع تصحیح پخش افزایشده (MSC) و توزیع نرمال استاندارد (SNV) استفاده و گزارش نمودند که روش تصحیح پخش افزایشده (MSC) در مقایسه با توزیع

• مدل سازی با استفاده از طول موج های موثر  
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲ کلیه مدل های ایجاد شده با دقت قابل قبول قادر به پیش بینی SSC سیب زمینی در طول دوره نگهداری بر اساس طول موج های موثر هستند اما در بین این مدل ها، مدل شبکه عصبی (ANN) با  $RMSEC=0/215$ ،  $R^2_c=0/974$ ،  $RMSECV=0/927$ ،  $R^2_{cv}=0/280$  دارای بالاترین دقت در پیش بینی SSC است.

و  $CH_3$  در محدوده ۱۵۰۰ تا ۲۱۰۰nm ترکیب اورتون این پیوندها در محدوده ۲۲۰۰ تا ۲۵۰۰nm نسبت داد که همگی در ساختار هیدروکربن های نظیر قندها وجود دارند. همچنین در این محدوده های طول موجی، شاهد حضور اورتون های  $H_2O$  نیز هستیم که احتمالاً با تغییرات محتوای رطوبتی نمونه ها سیب زمینی در طول دوره نگهداری مرتبط است. نتایج مشابه در تشخیص SSC با استفاده از طیف سنجی فروسرخ نزدیک در نمونه های پرتال (Jamshidi et al, 2012)، کیوی (Zhu et al, 2017) و سیب زمینی شیرین (Shao et al, 2020) نیز گزارش شده است.

جدول ۱- مقادیر  $RMSE$ ،  $R^2$  برای مجموعه های کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل های مختلف رگرسیون (PLS)

پیش پردازش	$R^2_c$	RMSEC	$R^2_{cv}$	RMSECV
بدون پیش پردازش	۰/۸۷۲	۰/۴۱۲	۰/۸۶۳	۰/۴۱۲
میانگین متحرک	۰/۸۷۲	۰/۴۱۲	۰/۸۶۶	۰/۴۲۷
فیلتر گوسین	۰/۸۷۳	۰/۴۱۲	۰/۸۶۳	۰/۴۲۹
<b>فیلتر میانه</b>	<b>۰/۸۷۵</b>	<b>۰/۴۱۰</b>	<b>۰/۸۶۷</b>	<b>۰/۴۲۰</b>
هموار سازی ساویتزکی-گولای	۰/۸۷۲	۰/۴۱۲	۰/۸۶۲	۰/۴۳۱
نرمال شده	۰/۷۴۶	۰/۵۳۸	۰/۶۸۱	۰/۶۵۳
تصحیح پخش افزاینده (MSC)	۰/۷۳۱	۰/۶۰۰	۰/۶۰۶	۰/۷۲۹
توزیع نرمال استاندارد (SNV)	۰/۷۵۳	۰/۵۷۴	۰/۶۳۸	۰/۷۰۴



شکل ۴- طول موج های موثر بر اساس تغییرات ضرایب رگرسیونی بهترین مدل PLS

جدول ۲- مقادیر  $RMSE$ ،  $R^2$  برای مجموعه های کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل های مختلف رگرسیون ایجاد شده با طول موج های موثر

مدل	$R^2_c$	RMSEC	$R^2_{cv}$	RMSECV
رگرسیون کمترین مربعات جزئی (PLSR)	۰/۸۱۲	۰/۵۰۱	۰/۷۹۲	۰/۵۳۲
رگرسیون مؤلفه های اصلی (PCR)	۰/۸۱۰	۰/۵۰۴	۰/۷۹۴	۰/۵۲۴
رگرسیون خطی (MLR)	۰/۸۹۰	۰/۴۰۰	۰/۸۹۰	۰/۳۸۴
ماشین بردار پشتیبان (SVM)	۰/۸۱۲	۰/۵۷۹	۰/۷۲۴	۰/۶۶۴
<b>شبکه عصبی مصنوعی (ANN)</b>	<b>۰/۹۷۴</b>	<b>۰/۲۱۵</b>	<b>۰/۹۲۷</b>	<b>۰/۲۸۰</b>

در سال های اخیر، قابلیت شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) جهت محاسبات تکمیلی نسبت به مدل های رگرسیونی به علت یادگیری مستقیم از روی داده ها، بدون نیاز به برآورد مشخصات آماری آن ها در بسیاری از زمینه ها و در علوم مختلف گزارش شده است (طهماسبی و

مطالعات علوم محیط زیست، دوره ششم، شماره سوم، فصل پاییز، سال ۱۴۰۰، صفحه ۳۹۷۵-۳۹۸۴)

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 با استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی شد. براساس آنالیز (PLS) بهترین نتایج با پیش‌پردازش فیلتر میانه حاصل شد. بر اساس ضریب رگرسیون بهترین مدل، ۱۲ طول موج به عنوان بهترین طول موج‌ها تعیین شد. در مدل‌سازی با استفاده از طول موج‌های موثر، شبکه عصبی مصنوعی بهترین نتیجه را داشت. در نتیجه به نظر می‌رسد که روش غیر مخرب Vis/NIR قادر به تخمین SSC سیب زمینی در دوره انبارداری را با دقت بالا دارد.

همکاران، ۱۳۹۶؛ Razavi Mousavi-Avval, et al., 2017. کیم و همکاران (et al, 2020) در تخمین SSC خربزه شرقی با استفاده از طیف سنجی مادون قرمز نزدیک نیز گزارش نمودند که از بین سه روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و شبکه عصبی کانولوشن (CNN)، مدل ایجاد شده با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بهترین عملکرد را به منظور پیش‌بینی SSC دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر شرایط مختلف انبارداری بر میزان SSC سه رقم سیب زمینی به مدت ۶۵ روز نگه داری شد. طیف سنجی بازتابشی در محدوده طول موج‌های ۸۰۰ تا ۲۵۰۰ nm انجام

#### منابع

- طهماسبی، م.، و همکاران. ۱۳۹۶، اندازه‌گیری دبی جرمی شلتوک با استفاده از حسگر خازنی و مدل‌سازی آن با رگرسیون چندگانه، ANN و ANFIS. مجله مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۴۸، شماره ۲، ص ۲۲۱-۲۲۷.
- موکش، ش.، و همکاران. ۱۳۹۵. تخمین پارامترهای کیفی لیموشیرین (limetta Citrus) با استفاده از روش غیرمخرب طیف‌سنجی SWNIR/V. مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۴۷، شماره ۴، ص ۶۰۳-۶۱۳.
- Ahmed M. et al. 2014. The potential use of visible/near infrared spectroscopy and hyperspectral imaging to predict processing-related constituents of potatoes. Journal of Food Engineering, Vol. 135. P. 11-25
- López-Maestresalás, A., et al. 2017. Prediction of Main Potato Compounds by NIRS. Chemical Engineering Transactions, Vol. 58, P. 1-9.
- Ben-gera, I., Norris, K.h. 1968. Determination of moisture content in soybeans by direct spectrophotometry. The Israel journal of agricultural research, Vol. 18, P. 125-132.
- Cen, H., He, Y. 2007. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. Trends in Food Science & Technology, Vol. 18. P. 72-83.
- Cordenunsi, B. R., et al. 2003. Physico-chemical changes related to quality of five strawberry fruit cultivars during cool-storage. Food Chemistry, Vol. 83, No. 2, P. 167-173.
- Cozzolino, D., et al. 2011. Multivariate data analysis applied to spectroscopy: Potential application to juice and fruit quality. Food Research International, Vol. 44, No. 7, P. 1888-1896.
- Heidari, P., et al. 2019. Phenotypic variability of Pyrus boissieriana Buhse: implications for conservation and breeding. Scientia Horticulturae, Vol. 247, P. 1-8.
- Huang, L., et al. 2017. A primary study on forecasting the days before decay of peach fruit using near-infrared spectroscopy and electronic nose techniques. Postharvest Biology and Technology, Vol. 133, P. 104-112.
- Jamshidi, B., et al. 2012. Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 85, P. 64-69.
- Chen, J. Y., et al. 2010. Nondestructive determination of sugar content in potato tubers using visible and near infrared spectroscopy. Japan Journal of Food Engineering, Vol. 11, No. 1, P. 59-64.
- Khodabakhshian, R., et al. 2017. Non-destructive evaluation of maturity and quality parameters of pomegranate fruit by visible/near infrared spectroscopy. International Journal of Food Properties, Vol. 20, No. 1, P. 41-52.
- Kim, S. Y., et al. 2021. Neural Network based Prediction of Soluble Solids Concentration in Oriental Melon using VIS/NIR spectroscopy. Applied Engineering in Agriculture, (in press). doi: 10.13031/aea.14332.
- Koehler, G., et al. 2012. Proteomic study of low-temperature responses in strawberry cultivars (Fragaria × ananassa) that differ in cold tolerance. Plant physiology, Vol. 159, No. 4, P. 1787-1805.
- Lin, H., Ying, Y. 2009. Theory and application of near infrared spectroscopy in assessment of fruit quality: a review. Sensing and instrumentation for food quality and safety, Vol. 3, No. 2, P. 130-141.



- Magwaza, L. S., et al. 2012. NIR spectroscopy applications for internal and external quality analysis of citrus fruit—a review. *Food and Bioprocess Technology*, Vol. 5, No. 2, P. 425-444.
- Mousavi-Avval, S. H., et al. 2017. Combined application of Life Cycle Assessment and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for modeling energy and environmental emissions of oilseed production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78, P. 807-820.
- Nourian, F., et al. 2003. Kinetics of quality change associated with potatoes stored at different temperatures. *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 36, No. 1, P. 49-65.
- Rai, M., et al. 2015. *Nanotechnologies in food and agriculture*. Springer New York.
- Razavi, M. S., et al. 2020. Prediction of bruise volume propagation of pear during the storage using soft computing methods. *Food science & nutrition*, Vol. 8, No. 2, P. 884-893.
- Rossel, R. A. V. 2008. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, Vol. 90, No. 1, P. 72-83.
- Farhadi, R., et al. 2019. Prediction of internal compositions change in potato during storage using visible/near-infrared (Vis/NIR) spectroscopy. *International Journal of Food Engineering*, Vol. 16, No. 4, P. 90-110.
- Saad, A., et al. 2016. Non-destructive quality monitoring of stored tomatoes using VIS-NIR spectroscopy. *Engineering in agriculture, environment and food*, Vol. 9, No. 2, P. 158-164.
- Shao, Y., et al. 2007. Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato 'Heat wave' (*Lycopersicum esculentum*) quality characteristics, *Journal of Food Engineering*, Vol. 85, P. 672-678.
- Shao, Y., et al. 2020. Application of hyperspectral imaging for spatial prediction of soluble solid content in sweet potato. *RSC Advances*, Vol. 10, No. 55, P. 33148-33154.
- Sivertsen, A. H., et al. 2009. Ridge detection with application to automatic fish fillet inspection. *Journal of Food Engineering*, Vol. 90, No. 3, P. 317-324.
- Zhang, N., et al. 2018. The Handling Approach of Near-Infrared Spectroscopy for Apple Quality Prediction Based on Digital Signal Processing. In 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). P. 4136-4140.
- Zhu, H., et al. 2017. Hyperspectral imaging for predicting the internal quality of kiwifruits based on variable selection algorithms and chemometric models. *Scientific reports*, Vol. 7, No. 1, P. 1-13.



# Non-destructive evaluation of soluble solids content in potato tubers under different storage conditions using near-infrared spectroscopy

Abdollah Golmohammadi<sup>1\*</sup>, Yılmaz Bayhan<sup>2</sup>, Ismail Kavdir<sup>3</sup>, Mehmet. Burak Buyukcan<sup>3</sup>,  
Mohammad Tahmasebi<sup>1</sup>

\*1.Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, P.O. Box 179, Ardabil, Iran

2.Department of Biosystems Engineering, University of Namık Kemal, 59030- Tekirdag, Turkey

3.Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering, University of Onsekiz Mart Çanakkale, 17100- Çanakkale, Turkey

\*EmailAddress: golmohammadi@uma.ac.ir

## Abstract

### Introduction

Potato tubers are one of the most important sources of nutrition in most countries. This product is the world's fourth important food crop after wheat, rice and maize because of its higher yield potential along with high nutritive value. Soluble solids content (SSC) is one of the quality parameters of potatoes and it play an important role in quality and commercial value of potato. The amount of SSC in potatoes varies greatly depending on the cultivars, growing environment and storage conditions. Today, the development of fast, non-destructive, accurate and online technique identification methods to determine product quality is strongly felt. One method for this purpose is Near-infrared spectroscopy. The high speed and accuracy of near-infrared spectroscopy to determine of vegetables and fruits quality in high tonnage, has led to the use of this method in many grading and quality control systems. Shao, et al., Using reflection Near-infrared spectroscopy for investigating the qualitative properties of tomatoes, including firmness, SSC and treatable acidity, and predicted these properties to be non-destructive with a high correlation coefficient. A study was conducted by Saad, et al. to evaluate the non-destructive quality of stored tomatoes using vis/NIR absorption spectroscopy in wavelength range from 350 to 1050 nm. In another study, the main compounds of potatoes were determined by near-infrared spectroscopy by Ainara Lopez. The sugar content of potato tubers was determined using visible and near infrared spectroscopy by Ji Yu Chen et al. Khodabakhshian et al., using reflection Near-infrared spectroscopy for classify the maturity stage and to predict the quality attributes of pomegranate, Principal component analysis was used to distinguish among different maturities and several preprocessing methods were utilized including centering, smoothing (Savitzky-Golay algorithm, median filter), normalization (multiplicative scatter correction and standard normal variate) and differentiation (first derivative and second derivative). The results of this study concluded that different preprocessing techniques had effects on the classification performance of the model using the principal component analysis method. The aim of this study was to investigate the possibility of using near-infrared spectroscopy (vis/NIR) in estimating changes of SSC in three potato cultivars during storage under different storage conditions.

### Methodology

Three potato cultivars, including SANTE, MARABEL and GRANA, which were different in terms of yield, crop quality and shelf life, were prepared from a farm near the University of Onsekiz Mart Çanakkale in Turkey and were stored under different storage conditions. Required values of each cultivar was stored under three different conditions including 4 °C temperature with relative humidity of 90%, 7 °C temperature with relative humidity of 80-90% and 22-28 °C variable temperature with relative humidity of 70-90%, for 65 days. Spectroscopy was performed using a multi-purpose analyzer (MPA) FT-NIR spectrometer in the range of 800-2500 nm. To measure the SSC in the samples, 7 samples from each potato cultivar were randomly selected and kept in the laboratory for 2 hours at 22 °C before analysis. After peeling the potatoes, the juice of the samples was extracted by using a common juicer and then filtered through filter paper to remove any remaining pulps. The amount of SSC in the samples was measured by using a digital refractometer at 25 °C as a Brix. In order to remove the outlier data, principal component analysis (PCA) was used before any processing on the data. Moving averages, Multiple Gaussian Fitting Regressions, Median filter, Savitzky-Golay smoothing, normalization, Multiplicative Scatter Correction (MSC) and Standard Normal Variety

Transformation (SNV) were applied to the data and compared. Partial least squares regression (PLS) models for all Pre-processed data were extracted and the statistical indicators include correlation coefficient ( $R^2$ ) and Root Mean Square Error (RMSE) were used to find the best model. To extract the models, the data were randomly divided into two parts: 80% of the data was used for training and cross-validation and the rest of the data was used for independent validation. To select the effective wavelengths and reduce the wavelengths to a limited number, the regression coefficients of the best calibration model obtained from (PLS) model were used. In order to find the best fitting model for the relationship between effective wavelengths and SSC changes of potatoes during storage, Partial least squares regression (PLS), Principal Component Regression (PCR), Multiple Linear Regression (MLR), Support Vector Machine (SVM) and Artificial Neural Network (ANN) were employed. This research were performed with factorial design on a completely randomized design (CRD) base include cultivar in three levels (SANTE, MARABEL and GRANA), storage temperature in three levels (4, 7 and 20 °C) and storage time in four levels (20, 34, 46 and 62 days) with five replications. The statistical analysis was performed using the Unscrambler X 10.4 statistical software.

### Conclusion

According to results, the amount of SSC was increases during storage. This increasing trend during storage can be attributed to the increase in sugar content during the ripening process and the hydrolysis of starch to maintain the physiological activities of the crop in the postharvest period. The results also show that the raw and all Pre-processed spectral data are able to predict SSC with acceptable accuracy. The best results were obtained from the Median filter Pre-processed model with  $RMSEC = 0.410$ ,  $R^2_c = 0.875$ ,  $RMSECV = 0.420$ ,  $R^2_{CV} = 0.867$ . Based on the regression coefficients of best the (PLS) model, 12 wavelengths in the range of 1400 to 2500 nm were identified as effective wavelengths. Based on distribution of main overtone bond, the discriminated of potato samples according to SSC quality index can be attributed second overtones of C-H, CH<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub> in the wavelength range from 1400 to 1500 nm, the first overtones of C-H, CH<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub> in the wavelength range from 1500 to 2100 nm and composition overtone of these bonds in the wavelength range from 2200 to 2500 nm which all this overtone are present in the structure of hydrocarbons such monomeric sugars (glucose and xylose) and oligosaccharides (starch). According to the results, all models are able to predict SSC of potatoes during storage based on effective wavelengths with acceptable accuracy but among these models, the Artificial Neural Network (ANN) model with  $RMSEC = 0.215$ ,  $R^2_c = 0.974$ ,  $RMSECV = 0.927$ ,  $R^2_{CV} = 0.280$  has the highest accuracy to prediction of SSC of potatoes during storage.

### Keywords

Potato; Non-Destructive; Spectroscopy; Storage conditions; SSC