

## مقاله پژوهشی

# پایش غیرمخرب خواص سیب‌زمینی در انبار با تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر

منصوره مظفری‌گنبری<sup>۱\*</sup>، بهاره جمشیدی<sup>۲</sup>، جابر سلیمانی<sup>۳</sup> و پریسا زرگری‌پور<sup>۴</sup>

۱، ۳ و ۴- به‌ترتیب: استادیاران؛ و کارشناس آزمایشگاه، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران  
۲- دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات هوشمندسازی کشاورزی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۲

## چکیده

پایش خواص سیب‌زمینی طی انبارداری نقش مهمی در تعیین زنجیره مصرف، عرضه به‌موقع محصول و کاهش ضایعات دارد. در این پژوهش، سامانه پایش غیرمخرب خواص سیب‌زمینی با استفاده از فناوری تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر در محدوده نور مرئی و فروسرخ نزدیک نمونه‌سازی و ارزیابی شد. تصویربرداری طی نگهداری محصول در انبارهای سرد با دماهای ۴ و ۷ درجه سلسیوس و انبار سنتی صورت گرفت. در آزمایش‌ها از دو رقم سیب‌زمینی آگرا و جیلی استفاده شد. خواص محصول شامل درصد رطوبت، میزان نشاسته، مواد جامد حل‌شدنی و سفتی بافت طی انبارداری تعیین شد. ویژگی‌های مبتنی بر تحلیل‌های شدت نور و بافت تصاویر استخراج شد. از مدل شبکه عصبی مصنوعی برای به‌دست آوردن ارتباط بین هریک از خواص مذکور و ویژگی‌های تصاویر استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که طول موج ۶۸۰ نانومتر در پیش‌بینی مقدار رطوبت، طول موج ۸۸۰ نانومتر در پیش‌بینی سفتی و ترکیب دو طول موج در پیش‌بینی مواد جامد حل‌شدنی کل و درصد نشاسته موفق‌تر بودند. بیشترین مقدار ضریب همبستگی در پیش‌بینی مقدار رطوبت، مواد جامد حل‌شدنی، سفتی و درصد نشاسته به‌ترتیب ۰/۷۶، ۰/۸۲، ۰/۷۱ و ۰/۷۳ به‌دست آمد. نتایج پژوهش بیانگر قابلیت استفاده از سامانه تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر در سنجش خواص سیب‌زمینی انبارشده بود.

## واژه‌های کلیدی

آزمون‌های غیرمخرب، انبارداری، پایش کیفی، پراکنش نور

## مقدمه

برای بازارهای تازه و فراوری در تمام سال وجود دارد (Emragi et al., 2022). حفظ کیفیت مطلوب سیب‌زمینی نقش عمده‌ای در مبادله‌های تجاری این محصول دارد و از ایجاد ضایعات جلوگیری می‌کند (Elmasry et al., 2012). شرایط نگهداری پس از برداشت می‌تواند تغییرات گسترده‌ای در خواص کیفی و ترکیبات شیمیایی غده و در نتیجه تغییر در

سیب‌زمینی یکی از پرمصرف‌ترین محصولات کشاورزی در سراسر جهان پس از برنج، گندم و ذرت است. این محصول منبع مهمی از کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و ویتامین‌ها به‌شمار می‌رود. متوسط سرانه مصرف سیب‌زمینی برای هر ایرانی، بین ۵۰ تا ۷۵ کیلوگرم در سال است. تقاضا برای این محصول

بنابراین، یک روش نو و غیرمخرب پایش در سیب‌زمینی باید مورد بررسی قرار گیرد. روش ارائه شده باید تا حد امکان قابل اعتماد و کم‌هزینه باشد (Su & Sun, 2016; Onwude et al., 2018).

از روش‌های غیرمخرب موجود می‌توان به روش‌های نوری اشاره کرد. تغییرات کیفی در غده‌های سیب‌زمینی در دوره انبارداری در اثر کاهش یا افزایش میزان رطوبت بافت آنها در فرایندهای تعریق و تنفس، هیدرولیز شدن گرانول‌های نشاسته و تبدیل آن به گلوکز و تغییر در برخی ترکیبات شیمیایی اتفاق می‌افتد. طی انبارداری، روندی تخریبی در ساختار سلولی و دیواره سلول‌ها ناشی از تغییرات آنزیمی نیز وجود دارد. بنابراین با توجه به تغییرات ساختاری و تغییر در بافت و ترکیبات شیمیایی سیب‌زمینی طی انبارداری، تغییرات خواص نوری محصول شامل جذب و پراکنش نور نیز وجود خواهد داشت. تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر روشی غیرمخرب نوری است که از اصول حاکم بر پراکنش نور در محدوده نور مرئی و فروسرخ نزدیک از طیف الکترومغناطیسی بهره می‌گیرد (Mollazade et al., 2012). هنگامی که پرتو نور با نمونه محصول برخورد می‌کند، بخش کوچکی از نور از سطح نمونه بازتاب می‌شود و بخش عمده آن به درون بافت نفوذ می‌کند. بخش اعظم نور نفوذ کرده پس از برهم‌کنش با اجزای داخلی نمونه، به سمت عقب پراکنده می‌شود، در حالی که بخش باقی‌مانده توسط بافت محصول جذب می‌شود یا از آن عبور می‌کند. محصولات کشاورزی در محدوده مرئی و فروسرخ نزدیک کدر محسوب می‌شوند. در محیط‌های زیستی کدر، پراکندگی نور پدیده غالب است و اطلاعات ارزشمندی درباره آنالیت‌هایی مانند آب و مواد جامد حل‌شدنی کل به‌دست می‌دهد. این

ویژگی‌های محصول ایجاد کند. سیب‌زمینی ممکن است در انبار دچار شیرین‌شدن، پوسیدگی، از دست دادن آب و رشد جوانه شود.

ارزیابی کیفیت داخلی سیب‌زمینی در دوره ذخیره‌سازی چالشی مهم برای ارزش‌گذاران و فعالان صنایع فراوری است. سیب‌زمینی به‌عنوان ماده خام برای صنعت فراوری باید تعدادی از الزام‌ها از جمله مقادیر قند کم، ماده خشک و وزن مخصوص بالا را دارا باشد (Connor et al., 2001). صفاتی که در این زمینه بررسی می‌شوند شامل سفتی بافت، ماده خشک، مواد جامد حل‌شدنی و مقدار نشاسته هستند (Liu et al., 2009; Barrett et al., 2010; Wang et al., 2016; Abasi et al., 2018; Sanchez et al., 2020). در دوره انبارداری سیب‌زمینی تغییرات قابل توجهی در سفتی بافت بسته به رقم، دما و زمان ذخیره‌سازی ایجاد می‌شود (Bentini et al., 2009). اتلاف آب نیز باعث چروکیدگی، افزایش تلفات و افزایش ضرر و زیان می‌شود. تجمع قند طی انبارداری به رقم و دمای ذخیره‌سازی بستگی دارد و در هوای سرد به سرعت اتفاق می‌افتد. افزایش قند باعث قهوه‌ای شدن و تلخ شدن چیپس تولیدشده خواهد شد. مقدار نشاسته سیب‌زمینی ممکن است با کاهش دمای ذخیره‌سازی کاهش و در دمای بالای ۱۰ درجه سلسیوس با تبدیل قند به نشاسته افزایش یابد (Wang et al., 2016).

ارزیابی و پایش خواص کیفی غده‌های سیب‌زمینی در دوره ذخیره‌سازی اهمیت زیادی دارد زیرا نقش مهمی در تعیین زنجیره مصرف، عرضه به‌موقع محصول به بازارهای مصرف، حفظ کیفیت، حفظ قیمت بازاری و کاهش ضایعات دارد (Gomez-Galindo et al., 2007). روش‌های ارزیابی مرسوم زمان‌بر، پرهزینه و مخرب هستند.

دو دیود لیزری با طول موج‌های ۶۶۰ و ۷۸۵ نانومتر به‌عنوان منابع نوری استفاده شد. ملازاده و همکاران (Mollazade et al., 2013) تصویربرداری پس‌پراکنش نور در طول موج ۶۶۰ را به‌عنوان روشی غیرمخرب برای پیش‌بینی خواص مکانیکی محصولات باغبانی به‌کار بردند.

در پژوهشی، از روش تصویربرداری دیجیتال و تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر القا شده در ۶۳۵ نانومتر برای شناسایی سولانین در غده سیب‌زمینی استفاده شد. نمونه‌های سیب‌زمینی بر اساس مقدار سولانین به دو دسته سالم و سمی تقسیم شدند. نتایج طبقه‌بندی با استفاده از ویژگی‌های تصاویر حاصل از دو روش مذکور از طریق مدل‌سازی شبکه عصبی دقت ۹۴/۳ و ۹۸/۷ درصد را نشان داد (Babazadeh et al., 2016).

امیدی ارجنکی و همکاران (Omidi Arjenaki et al., 2018) از روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر برای پیش‌بینی مدل الاستیسیته مماسی، مدل الاستیسیته سکانتی، چقرمگی و حداکثر نیروی شکست سیب‌زمینی استفاده کردند. این محققان پارامترهای مرتبط با شدت نور تصاویر شامل مدل گاوسی و فرکانس تکرار شدت نور را در سه طول موج ۶۵۰، ۷۸۰ و ۹۸۰ نانومتر از تصاویر استخراج و از روش استنتاجی عصبی-فازی برای مدل‌سازی استفاده کردند.

مظفری و همکاران (Mozaffari et al., 2017) خواص نوری ورقه‌های سیب شامل ضریب جذب و ضریب پراکنش کاهش‌یافته را با استفاده از تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر و تئوری انتشار فارل استخراج کردند. موه‌دعلی و همکاران (Mohd Ali et al., 2017) امکان طبقه‌بندی هندوانه‌های هسته‌دار و بدون هسته را در دوره

بخش از نور علاوه بر خصوصیات جذب و مواد شیمیایی داخل سلول حاوی اطلاعاتی در زمینه مورفولوژی و ساختار بافت نیز هست (Qin et al., 2009). این فناوری که می‌تواند به‌صورت تک‌طیفی یا چندطیفی استفاده شود، با تحلیل فوتون‌های پس‌پراکنده، ویژگی‌های کیفی محصولات را ارزیابی می‌کند، در حالی‌که تجهیزات موردنیاز آن ساده و از نظر اقتصادی باصرفه هستند. مزیت اصلی تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر - در مقایسه با فنون نوری دیگر مثل طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک، تصویربرداری فراطیفی و چندطیفی-پایین بودن هزینه و پیچیدگی کمتر تجهیزات و تحلیل‌های مورد استفاده است (Qing et al., 2007; 2008). این روش در پیش‌بینی خواص کیفی، خواص مکانیکی و تشخیص عیوب محصول بررسی شده است. در پژوهشی، تجزیه و تحلیل غیرمخرب پارامترهای کیفی شامل مواد جامد حل‌شدنی و سفتی بافت طی رسیدگی سیب با استفاده از روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر مورد مطالعه قرار گرفت. پنج دیود لیزر در محدوده طول‌موجی ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر به‌عنوان منبع نور و فراوانی شدت نور به‌عنوان ویژگی تصاویر استفاده شد (Qing et al., 2007). لورنته و همکاران (Lorente et al., 2013) امکان استفاده از تصویربرداری لیزر را در پنج طول‌موج مختلف در ناحیه نور مرئی و فروسرخ نزدیک برای تعیین خرابی و ناهنجاری‌های قارچی پرتقال بررسی کردند. هاشیم و همکاران (Hashim et al., 2013) از روش غیرمخرب پس‌پراکنش نور لیزر برای نظارت بر تغییرات رنگدانه‌ها به‌خصوص کلروفیل و بافت محصول برای تشخیص ضایعات ناشی از سرمازدگی میوه موز استفاده کردند. در مطالعه مذکور از

هر نقطه در مقایسه با نقاط دیگر در تصاویر پس‌پراکنش دوبعدی بررسی نشده است. بافت ویژگی بسیار مهمی از تصویر است که به‌صورت دوبعدی عمل می‌کند و علاوه بر اینکه مقادیر شدت پیکسل‌ها را در نظر می‌گیرد، ارتباط آنها را با سایر نقاط موجود در تصویر نیز تحلیل می‌کند. از آنجا که بافت و میکروساختار محصول در فرآیند ذخیره‌سازی تغییر می‌کند، کاربرد فنون آنالیز بافت تصاویر پس‌پراکنش ممکن است در پیش‌بینی خواص کیفی محصول در فرآیند ذخیره‌سازی مفید باشد. بنابراین، هدف از این تحقیق کاربرد فن تصاویربرداری پس‌پراکنش لیزر و استخراج ویژگی‌های شدت و بافت تصاویرهای حاصل به‌منظور پایش تغییرات خواص کیفی در فرآیند ذخیره‌سازی سیب‌زمینی در انبارهای مختلف است که در دو طول‌موج در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک و با استفاده از چهار روش آنالیز بافت و سه روش آنالیز شدت اجرا شد. اهداف ویژه عبارت‌اند از: ۱- بررسی دقت استفاده از روش‌های مختلف آنالیز شدت و بافت تصاویر برای پیش‌بینی خواص کیفی سیب‌زمینی در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک و ۲- انتخاب طول‌موج مناسب و مؤثرترین روش استخراج ویژگی از تصاویرهای پس‌پراکنش برای پیش‌بینی تغییرات هر یک از خواص کیفی سیب‌زمینی در فرآیند ذخیره‌سازی.

## مواد و روش‌ها

### تهیه نمونه

نمونه‌های سیب‌زمینی از دو رقم اگریا و جیلی که در سطح ملی کشت می‌شوند، از مزارع منطقه بستان‌آباد از توابع استان آذربایجان شرقی در حین برداشت تهیه و به مدت دو هفته در دمای اتاق به‌منظور گذراندن دوره التیام‌بخشی قرار داده شدند.

انبارداری با روش تصویربرداری پس‌پراکنش لیزر ارزیابی کردند. آنووده و همکاران (Onwude et al., 2018) از ترکیب روش‌های ماشین بینایی و تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر در پیش‌بینی مقدار رطوبت و شاخص‌های رنگ سیب‌زمینی در فرایند خشک‌کردن استفاده کردند. در مدل‌سازی از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و حداقل مربعات جزئی استفاده شد.

گنگ و همکاران (Geng et al., 2019) امکان تشخیص غده‌های سیب‌زمینی از کلوخ و سنگ را در خط سورتینگ با استفاده از تصویربرداری پس‌پراکنش بررسی کردند. منابع نوری مورد بررسی در پژوهش این محققان ۶۸۵، ۶۸۰، ۷۸۰، ۸۳۰ و ۸۵۰ نانومتر بود. پارامترهای توابع لونتزین و توزیع نمایی از تصاویر استخراج شد. در طبقه‌بندی از روش تحلیل تشخیص خطی استفاده شد. طول‌موج ۸۵۰ نانومتر به عنوان مؤثرترین طول‌موج در جداسازی سیب‌زمینی شناسایی شد.

وو و همکاران (Wu et al., 2020) از روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر و مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی عیوب میوه سیب استفاده کردند. آن‌ها از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی ۱۱ لایه استفاده کردند. میزان تشخیص عیوب سیب در این پژوهش ۹۲/۵ درصد به‌دست آمد که در مقایسه با روش مرسوم ماشین بینایی بیشتر بود.

مطابق بررسی‌های موجود، روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر این پتانسیل را دارد تا خواص محصولات کشاورزی را ارزیابی کند، اما پژوهش‌ها در خصوص کاربرد روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر برای پیش‌بینی خواص سیب‌زمینی اندک، بسیار مقدماتی و مبتنی بر تحلیل‌های ساده بر پایه شدت نور تصاویر است و در آن‌ها الگوی شدت پیکسل در

کارت گرافیک ویدئویی NVIDIA GEFORCE 2GB و مجهز به ویندوز ۱۰ (شکل ۱).

طول موج‌های ۶۸۰ و ۸۸۰ نانومتر به‌عنوان دو باند مکمل از ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک در این پژوهش انتخاب شد. باند ۶۸۰ نانومتر اطلاعات مرتبط با رنگدانه‌ها، تغییرات پوست، مواد داخلی و فرایندهای فیزیولوژیک نزدیک سطح را فراهم می‌کند. در حالی که طول موج ۸۸۰ نانومتر با نفوذ بیشتر و حساسیت کمتر به رنگ پوست، اطلاعات مرتبط با بافت، ساختار سلولی و تغییرات ناشی از انبارداری را بررسی می‌کند. این دو طول موج بر اساس نتایج طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ نزدیک و تصویربرداری ابرطیفی سیبزمینی انتخاب شد که حضور باندهای ۶۷۳-۶۸۵ و ۸۶۱-۸۹۰ نانومتر را در میان طول موج‌های مؤثر برای پیش‌بینی ویژگی‌های کیفی گزارش کرده‌اند (López-Maestresalas et al., 2016; 2022; Ye et al., 2018; Farhadi et al., 2020; Wang et al., 2022).

دوربین به‌صورت عمود بر نگهدارنده نمونه نصب شد. تجهیزات موردنیاز برای تنظیم ارتفاع و فاصله از سینی‌ها نیز در طراحی منظور شد، به‌طوری که دوربین بتواند در فاصله دلخواه از نمونه نصب شود و تصویربرداری کند. به‌منظور کاهش نویز و حذف انعکاس‌های محیطی، مجموعه در داخل یک محفظه بسته قرار گرفت. هنگام تصویربرداری تمامی تنظیمات دوربین‌ها از حالت خودکار خارج شد و تنظیم شرایط دستی صورت گرفت. این تنظیمات طی آزمایش‌های اصلی ثابت نگه داشته شد تا امکان مقایسه تصویرها در دوره انبارداری فراهم شود. زاویه قرارگیری منبع نور و دوربین برابر ۲۰ درجه برای طول موج ۶۸۰ و ۱۲ درجه برای طول موج ۸۸۰ نانومتر انتخاب شد.

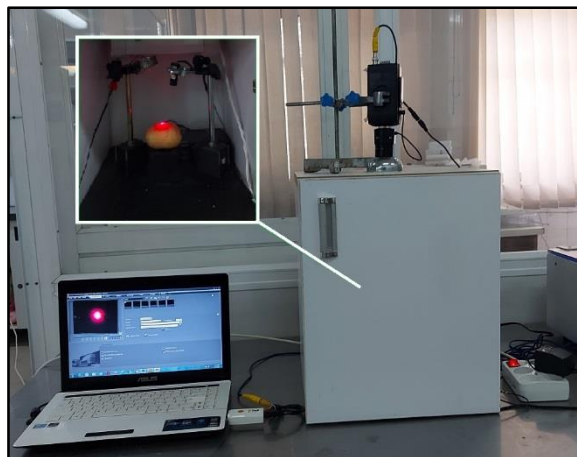
نمونه‌ها به سه قسمت تقسیم و در شرایط مختلف ذخیره‌سازی شدند. شرایط ذخیره‌سازی شامل ۳ انبار با مشخصات زیر بود:

- ۱- ذخیره‌سازی در دمای ثابت ۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۹۰-۸۵ درصد
- ۲- ذخیره‌سازی در دمای ثابت ۷ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۹۰-۸۵ درصد
- ۳- ذخیره‌سازی به روش مرسوم منطقه (در این انبارها از سیستم‌های تهویه طبیعی برای خنک کردن انبار استفاده می‌شود. دمای متوسط انبار در این روش معمولاً بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس متغیر است)

#### سیستم تصویربرداری

در این پژوهش، سامانه پایش و ارزیابی خواص سیبزمینی در انبار بر پایه روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر در محدوده نور مرئی و فروسرخ نزدیک ساخته و ارزیابی شد. اجزای این سامانه مرکب بود از: محفظه تصویربرداری، دوربین (BCP-1050 MT) ساخت کشور کره با حسگر CCD و قابلیت تصویربرداری در محدوده نور مرئی و فروسرخ نزدیک، لنز بزرگ‌نمایی آونیر با فاصله کانونی ۱۰۰-۵ میلی‌متر با f۱/۶ ساخت ژاپن، دو عدد دیود لیزر (Optoelectronics Co. Ltd) ساخت چین با طول موج‌های ۶۸۰ و ۸۸۰ نانومتر به‌عنوان منابع نور لیزر در محدوده طول موج‌های نور مرئی و فروسرخ نزدیک، واحد خنک‌کننده و منبع تغذیه هر یک از دیودهای لیزر، کابل‌های انتقال، کارت گیرنده تصویر Dexatek I-Tek ساخت تایوان و لپ‌تاپ ASUS K43SD با پردازشگر مرکزی Intel core i5-2450M-2.50GHz، حافظه قابل دسترسی تصادفی ۴ گیگابایت، حافظه قابل استفاده ۷۰۰ گیگابایت،

فاصله بین قسمت تحتانی لنز دوربین و نگهدارنده نمونه به منظور اجتناب از اشباع شدن کامل آشکارساز CCD به اندازه ۳۰۰ میلی‌متر تنظیم گردید. برای تصویرگیری، از نرم‌افزار Corel Video Studio 12 استفاده شد. تصویرهای پس‌پراکنش توسط این نرم‌افزار با فرمت BMP در کامپیوتر ذخیره می‌شد.



شکل ۱- سامانه تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر در حال تصویربرداری در طول موج ۶۸۰ نانومتر  
Fig. 1- Laser light backscatter imaging system imaging at 680 nm wavelength

درصد رطوبت، میزان نشاسته، مواد جامد حل‌شدنی و سفتی بافت پیش از انبار کردن و هر ماه یک‌بار در دوره انبارداری به مدت ۶ ماه ادامه داشت. در هر نوبت، ۵ نمونه سیب‌زمینی از هر رقم و در کل ۲۱۰ نمونه آزمایش شد. برای تصویربرداری پس‌پراکنش در هر طول‌موج، دیود موردنظر روشن، دوربین متناسب با آن طول‌موج تنظیم گردید و از چهار نقطه مختلف از هر نمونه تصویربرداری شد. پس از آن از روش‌های استاندارد موجود برای اندازه‌گیری خواص محصول، استفاده شد. سفتی بافت نمونه‌ها با استفاده از نفوذسنج Lutron FR-5120 با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شد. پروب با قطر ۸ میلی‌متر برای آزمون سفتی به کار گرفته شد. حداکثر نیروی لازم برای نفوذ به نمونه برحسب کیلوگرم به‌عنوان سفتی نمونه ثبت شد. برای تعیین مقدار رطوبت از روش آون استفاده شد. با استفاده از رفاکتومتر دیجیتالی Milwaukee MA871 با دقت ۰/۱ ساخت چین مواد جامد

#### طرح آزمایشی مورد استفاده

در این پژوهش، اثر رقم (در ۲ سطح)، نوع انبار (در ۳ سطح) و زمان انبارداری (در ۷ سطح) با استفاده از آزمون فاکتوریل با سه فاکتور و ۵ تکرار بر پایه طرح کامل تصادفی بررسی شد تا نمونه‌های سیب‌زمینی با طیف گسترده‌ای از تغییرات کیفی، که در شرایط واقعی انبارداری رخ می‌دهد، برای تصویربرداری ایجاد شود. به‌منظور بررسی وجود تغییرات معنی‌دار در ویژگی‌های کیفی و فراهم کردن مبنای آماری لازم برای توسعه و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر این آزمون به اجرا درآمد. نرم‌افزار مورد استفاده در تحلیل داده‌ها، IBM SPSS Statistics 21 بود.

#### روش آزمون

تصویربرداری پس‌پراکنش از نمونه‌ها و آزمون‌های مخرب برای تعیین خواص محصول شامل

### قطعه‌بندی تصویرهای پس‌پراکنش

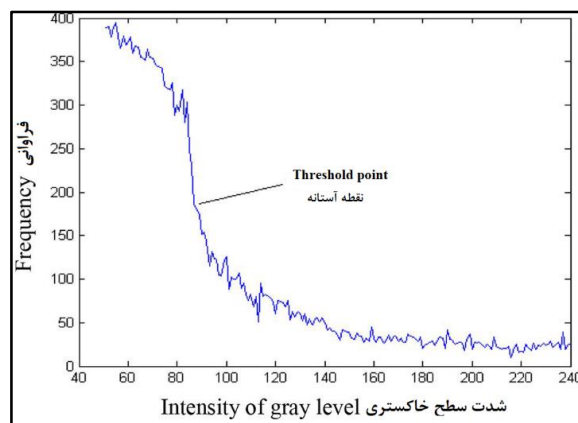
برای قطعه‌بندی تصویرهای پس‌پراکنش باید ناحیه پس‌پراکنش تصویر را از دو ناحیه پس‌زمینه و ناحیه اشباع جدا کرد. برای جداسازی ناحیه پس-پراکنش از زمینه از روش اولین نقطه عطف هیستوگرام استفاده شد که نتایج خوبی در قطعه‌بندی تصاویر پس‌پراکنش دارد (Mollazade *et al.*, 2013; Mozaffari *et al.*, 2017). این روش یک آستانه استاتیک را برای جداسازی ناحیه پس‌پراکنش از ناحیه پس‌زمینه تأمین می‌کند (Qing *et al.*, 2007). برای یافتن این آستانه، نمودار هیستوگرام تصاویرها رسم و محل تقریبی تغییر ناگهانی توزیع شدت خاکستری به-عنوان آستانه یادداشت شد (شکل ۲). این عمل برای ۵۰ تصویر دنبال گردید و میانگین مقادیر حاصل به‌عنوان آستانه استاتیک برای جداسازی ناحیه پس‌پراکنش از زمینه تعیین شد.

ناحیه پس‌پراکنش از ناحیه اشباع جدا شد. به این منظور از نحوه برهم‌کنش و توزیع نور در اطراف نقطه برخورد و انطباق آن با اصول فیزیکی حاکم بر این پدیده استفاده شد. ناحیه اشباع ناحیه‌ای است که فوتون‌های نور پس از برخورد به نمونه مستقیماً به حسگر دوربین برمی‌گردند و شدت بالایی دارند.

حل‌شدنی کل اندازه‌گیری شد، چند قطره آب سیب‌زمینی روی رفراکتومتر ریخته شد و عدد به‌دست آمده به صورت درصد ثبت گردید. برای تعیین میزان نشاسته، غده‌های سیب‌زمینی با آب مقطر شسته و به قطعات کوچک تقسیم شد. وزن مشخصی از قطعات سیب‌زمینی با آب مقطر در مخلوط‌کن همگن و ابتدا از الک فلزی ۲۵۰ و سپس از الک ۱۰۶ میکرومتری عبور داده شد. محلول نشاسته به مدت ۲ ساعت ثابت نگه داشته شد. دانه‌های نشاسته با استفاده از قیف جداکننده استخراج شد. نشاسته باقیمانده چندین بار با آب شسته شد و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس خشک و مقدار و درصد نشاسته تعیین شد (Farhadi *et al.*, 2020).

### پردازش تصویرهای پس‌پراکنش و استخراج ویژگی

پردازش تصویرهای پس‌پراکنش شامل قطعه‌بندی تصویر و جداسازی ناحیه پس‌پراکنش از کل تصویر و سپس استخراج ویژگی‌های تصویر بر اساس روش‌های مختلف تحلیل شدت و بافت تصاویر پس‌پراکنش نور لیزر بود. الگوریتم‌های پردازش تصویر با استفاده از نرم‌افزار Matlab R2015b کدنویسی شد.



شکل ۲- نمونه هیستوگرام یک تصویر پس‌پراکنش اخذ شده در ۶۵۰ نانومتر

Fig. 2- Sample histogram of a backscattering image taken at 650 nm

## استخراج ویژگی از تصویرهای پس‌پراکنش

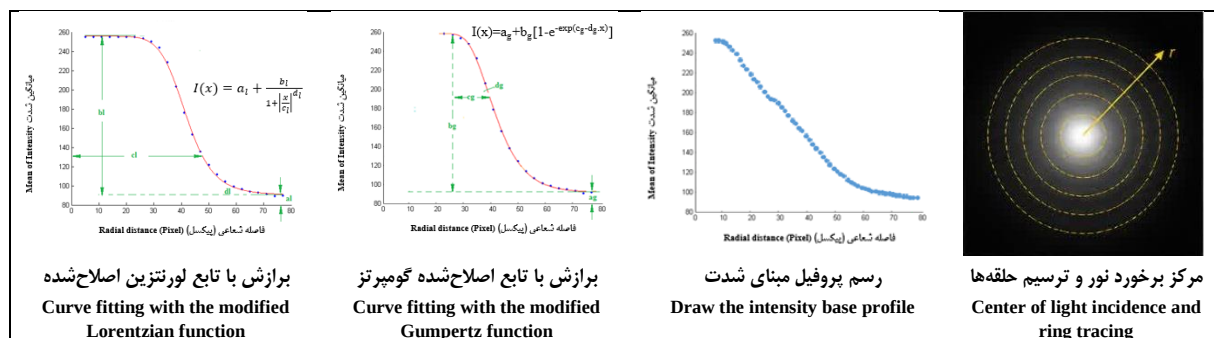
استخراج ویژگی از تصویرهای پس‌پراکنش به دو صورت اجرا شد: آنالیز شدت و آنالیز بافت.

## آنالیز شدت نور

آنالیز شدت نور تصویرها شامل استخراج ویژگی‌های آماری شدت، پارامترهای تابع اصلاح‌شده گومپرتز و پارامترهای تابع لورنتزین اصلاح‌شده بود. ویژگی‌های آماری شدت شامل مساحت ناحیه پس‌پراکنش، شعاع پراکنش، میانگین شدت، طول اقلیدسی، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی، کشیدگی، میانگین هندسی شدت نور، میانگین هارمونیک شدت نور، مجموع مساحت ناحیه اشباع و پس‌پراکنش بود که با استفاده از کدنویسی در محیط متلب از تصویرها استخراج شد.

برای استخراج پارامترهای تابع اصلاح‌شده گومپرتز و پارامترهای تابع لورنتزین اصلاح‌شده ابتدا

پروفیل مبنای تصویرها رسم شد. برای رسم پروفیل مبنای شدت نور تصویرها، پس از انتقال تصویرها به فضای خاکستری و جداسازی ناحیه پس‌پراکنش از زمینه، مرکز جرم ناحیه اشباع به‌عنوان مرکز ثقل تصویر پس‌پراکنش در نظر گرفته شد و از میانگین‌گیری مقادیر شدت پیکسل‌ها در حلقه‌های با ضخامت ثابت در اطراف نقطه برخورد استفاده شد. مقدار میانگین شدت پیکسل‌های موجود بین دو حلقه متوالی از مرکز تصویر تا انتهای ناحیه پس‌پراکنش به ترتیب یادداشت شد. پروفیل مبنای شدت نور تصویرها به‌صورت تابعی از فاصله حلقه تا مرکز ثقل ناحیه اشباع رسم شد (Lorente *et al.*, 2015). پس از آن پروفیل مبنای هر تصویر با توابع ریاضی اصلاح‌شده گومپرتز و لورنتزین اصلاح‌شده برازش داده شد و پارامترهای آنها استخراج شد (شکل ۳).



شکل ۳- مراحل پردازش و استخراج پارامترهای توابع گومپرتز و لورنتزین اصلاح‌شده (از راست به چپ)

Fig. 3 – Steps for processing and extracting parameters of the modified Gompertz and Lorentzian functions (from right to left)

## آنالیز بافت

برای آنالیز بافت تصویرهای پس‌پراکنش از سه روش آماری و یک روش تبدیل مبنا استفاده شد.

## آماره‌های درجه اول هیستوگرام تصویر

در این روش، برای استخراج ویژگی از هیستوگرام نرمال شده استفاده شد. از این رو بعد از

قطعه‌بندی تصویرها، ماتریس هیستوگرام که شامل فراوانی هر یک از سطوح خاکستری تصویر است از هر تصویر استخراج و بر تعداد درایه‌های تصویر تقسیم شد. پس از آن با استفاده از ماتریس هیستوگرام نرمال‌شده مذکور و روابط مبتنی بر احتمال وقوع سطح خاکستری، ده ویژگی شامل

میانگین سطح خاکستری، انحراف استاندارد، چولگی، نرمی، انرژی، آنتروپی، دومین ممان، سومین ممان، چهارمین ممان، و ضریب تغییرات مطابق با بیوک و کوننکو (Bevk & Kononenko, 2002) برای هر تصویر استخراج شد.

#### ماتریس هموقوعی

ماتریس هموقوعی (GLCM) حاوی اطلاعاتی در زمینه ارتباط بین مقادیر پیکسل‌های مجاور در هر تصویر است. این روش کاربرد زیادی در تحلیل بافت تصویر دارد و ویژگی‌های آماری درجه دوم سطح خاکستری از این ماتریس استخراج می‌شود. این ماتریس نشان‌دهنده تعداد تکرار جفتی پیکسل‌های سطح خاکستری  $i$  و  $j$  در فاصله و زاویه مشخص است. در این مطالعه، برای اینکه تغییرات موجود به‌طور دقیق بررسی شود مقدار فاصله برابر یک پیکسل و زاویه برابر صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه منظور شد. هر یک از درایه‌های ماتریس‌های هموقوعی حاصل، بر مجموع درایه‌های همان ماتریس تقسیم و نرمال‌سازی شد. پس از آن ۱۰ ویژگی از هر ماتریس هموقوعی نرمال‌شده شامل ماکزیمم احتمال، واریانس، کنتراست، همبستگی، همگنی، انرژی، آنتروپی، عدم شباهت، سایه خوشه، و برجستگی خوشه مطابق با هارالیک و همکاران (Haralick et al., 1973) و در کل ۴۰ ویژگی از هر تصویر استخراج شد.

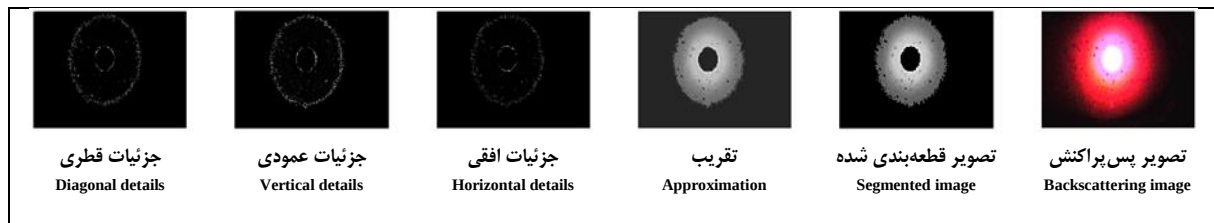
#### ماتریس طول گام سطح خاکستری

ماتریس طول گام سطح خاکستری (GLRLM) میزان ساییدگی بافت را در هر یک از جهت‌های

صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه مشخص می‌کند و برای استخراج ویژگی‌های آماری مراتب بالا به کار می‌رود. در این مطالعه، ماتریس طول گام سطح خاکستری در هر چهار جهت محاسبه و یازده ویژگی شامل درصد گام، غیریکنواختی سطح خاکستری، غیریکنواختی طول گام، گام کوتاه، گام بلند، گام سطح خاکستری کوتاه، گام سطح خاکستری بلند، گام کوتاه سطح خاکستری کوچک، گام بلند سطح خاکستری کوچک، و گام بلند سطح خاکستری بزرگ مطابق با نتایج تحقیقات ملازاده و همکاران (Mollazade et al., 2013) از هر ماتریس و در مجموع ۴۴ ویژگی از هر تصویر استخراج شد.

#### تبدیل موجک گسسته

در این روش، تصویر به شکل جدید تبدیل می‌شود به‌طوری‌که بافت در این فضای جدید راحت‌تر قابل تشخیص باشد. این روش مبتنی بر اعمال فیلتر است. در این بررسی، تبدیل موجک در چهار سطح با استفاده از موجک مادر دابوچی درجه ۴ اجرا شد (Mollazade et al., 2013) و چهار ویژگی: میانگین، انحراف معیار، انرژی، و آنتروپی از هر تصویر زیرنمونه‌برداری شده و در کل ۶۴ ویژگی از هر تصویر پس‌پراکنش استخراج گردید. شکل ۴ تصویر اصلی، قطعه‌بندی‌شده و جزئیات سطوح موجک به‌دست آمده برای تصویر پس‌پراکنش یک نمونه سیب‌زمینی در طول موج ۶۵۰ نانومتر با موجک مادر دابوچی درجه ۴ در سطح تجزیه اول را نشان می‌دهد.



شکل ۴- جزئیات موجک یک تصویر پس پراکنش سیب زمینی در طول موج ۶۸۰ نانومتر با موجک مادر دابوچی درجه ۴ در سطح یک

Figure 4- Wavelet decomposition of a potato backscattering image at 680 nm using a Db4 mother wavelet at 1 level

داده‌ها در آزمون مدل ساخته شده به کار گرفته شد و در هر مورد مدلی به عنوان مناسب ترین مدل انتخاب شد که توانست کمترین مجذور میانگین مربعات خطا را در مجموعه های آزمون و اعتبارسنجی حاصل کند و مقادیر ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطای سه مجموعه آموزش، اعتبارسنجی و آزمون در آن مدل به هم نزدیک باشند.

#### ارزیابی مدل‌ها

صحت برازش مدل های حاصل با داده های آزمایشی، با استفاده از ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و شاخص SDR ارزیابی گردید. شاخص SDR (که در برخی منابع RPD نامیده می شود) برابر نسبت انحراف استاندارد متغیر پاسخ به مجذور میانگین مربعات مجموعه آزمون است (Nicolăi et al., 2007).

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n Y_i P_i - (\sum_{i=1}^n Y_i)(\sum_{i=1}^n P_i)}{\sqrt{n((\sum_{i=1}^n Y_i^2) - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2 / n)((\sum_{i=1}^n P_i^2) - (\sum_{i=1}^n P_i)^2 / n)}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

که در آنها،

$n$  = تعداد مشاهدات؛  $Y_i$  = مقدار واقعی و اندازه گیری شده؛ و  $P_i$  = مقدار پیش بینی شده توسط مدل.

#### مدل سازی بین ویژگی های تصویرهای پس پراکنش و خواص کیفی سیب زمینی

به منظور مدل سازی و ایجاد ارتباط بین نتایج حاصل از تصویربرداری و آزمون های مخرب آزمایشگاهی، پس از نرمال سازی و کاهش داده ها با استفاده از آنالیز اجزای اصلی (PCA)، از شبکه عصبی مصنوعی برای تدوین مدل های واسنجی و پیش بینی کننده استفاده شد. ورودی مدل ها شامل ویژگی های مستخرج از تصویرهای برداشت شده در یک طول موج یا ترکیب این ویژگی ها در طول موج های مورد بررسی و نیز ویژگی های مستخرج از یک روش پردازش یا ترکیب روش ها بود. خروجی مدل ها شامل خواص کیفی حاصل از آزمون های مرجع بود. به منظور طراحی شبکه عصبی مصنوعی از شبکه پرسپترون چندلایه با ساختار پس انتشار خطا و یک لایه پنهان با قانون یادگیری و کمینه سازی خطای لئونبرگ-مارکوات استفاده شد. در این پژوهش از تابع فعال سازی غیرخطی تانژانت سیگموئید در لایه پنهان و از تابع خطی در لایه خروجی استفاده گردید. تعداد نورون در لایه مخفی بین ۲ تا ۳۰ برای تعیین مناسب ترین مدل مورد بررسی قرار گرفت. آموزش شبکه پنج بار تکرار شد. به منظور جلوگیری از بیش آموزش و بیش برازش داده ها، ۶۰ درصد داده ها در آموزش شبکه، ۱۵ درصد داده ها در اعتبارسنجی و ۲۵ درصد

## نتایج و بحث

## تأثیر فاکتورهای مورد بررسی بر خواص کیفی سیبزمینی

نتایج حاصل از آنالیز واریانس تغییرات مربوط به آزمون‌های کیفی نمونه‌های سیبزمینی در سه نوع انبار و طی ۶ ماه انبارداری در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر نوع انبار و مدت زمان انبارداری بر تمام صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. اثر رقم و اثر متقابل سه فاکتور مورد بررسی به استثنای سفتی بر سایر پارامترها معنی‌دار است. جدول ۲ نتایج مقایسه میانگین صفات کیفی ارقام آگریا و جیلی را طی شش ماه نگهداری در شرایط مختلف انبارداری نشان

می‌دهد. این نتایج بیانگر کاهش معنی‌دار رطوبت، سفتی و درصد نشاسته و افزایش مواد جامد حل‌شدنی کل در هر دو رقم در دوره نگهداری است. کمترین کاهش رطوبت و سفتی در انبار با دمای ۷ درجه سلسیوس مشاهده شد که بیانگر تأثیر مثبت آن در حفظ کیفیت غده‌هاست. رقم آگریا در مقایسه با رقم جیلی کاهش رطوبت و سفتی کمتری داشته و درصد نشاسته بالاتری را در دوره انبارداری حفظ کرده است؛ در حالی که افزایش مواد جامد حل‌شدنی کل در رقم جیلی بیشتر است. به طور کلی، نتایج تحقیق نشان داد که رقم آگریا قابلیت انبارمانی بالاتری دارد و کیفیت خود را طی ذخیره‌سازی بهتر از رقم جیلی حفظ می‌کند.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس خواص کیفی سیبزمینی

Table 1- Results of variance analysis of quality properties of potato

| میانگین مربعات (MS) |                  |                                    |                                 | درجه آزادی | منبع تغییرات                    |
|---------------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------|---------------------------------|
| سفتی<br>firmness    | نشاسته<br>Starch | مواد جامد حل‌شدنی<br>Soluble Solid | میزان رطوبت<br>Moisture content | df         | Source of variance              |
| 0.300 <sup>ns</sup> | **۲۱/۶۸۷         | 6.554**                            | **۲۱۲/۲۰۹                       | ۱          | Variety (V) رقم                 |
| **۱/۳۴۰             | **۳۳/۹۲۸         | **۱/۵۳۳                            | **۱۵/۵۶۶                        | ۲          | Storage type (S) نوع انبار      |
| **۷/۴۲۵             | **۹/۲۴۴          | **۱۷/۲۹۱                           | 28.867**                        | ۶          | Storage time (T) زمان انبارداری |
| ۰/۶۳۸ <sup>ns</sup> | **۶/۳۸۷          | ۰/۳۴۴ <sup>ns</sup>                | 10.040**                        | 2          | V×S رقم×نوع انبار               |
| ۰/۳۷۲ <sup>ns</sup> | **۴/۰۴۰          | **۲/۲۰۳                            | 1.138 <sup>ns</sup>             | ۶          | V×T رقم×زمان انبارداری          |
| ۰/۱۴۵ <sup>ns</sup> | **۲/۴۱۲          | **۱/۹۳۴                            | **۳/۱۹۲                         | ۱۲         | S×T انبار×زمان انبارداری        |
| ۰/۱۹۶ <sup>ns</sup> | **۱/۱۲۸          | **۰/۳۸۹                            | **۱/۲۴۵                         | ۱۲         | V×S×T رقم×انبار×زمان انبارداری  |
| ۰/۲۴۲               | ۰/۰۷۲            | ۰/۱۴۰                              | ۰/۵۳۹                           | ۱۶۸        | Error خطا                       |

\*, \*\*: Significant at 5% and 1% level respectively. ns: non significant.

\*, \*\*: به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد. ns: غیرمعنی‌دار

جدول ۲- مقایسه میانگین خواص کیفی سیب‌زمینی طی ذخیره‌سازی با آزمون چند دامنه‌ای دانکن

Table 2-Comparing the mean potato quality attributes during storage based on Duncan's multiple range test

| نوع انبار    |                     | زمان (ماه)    | رطوبت (درصد)         | مواد جامد حل‌شدنی کل |                    | سفتی (نیوتن)        | نشاسته (درصد)        |
|--------------|---------------------|---------------|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Storage type |                     | time (mounth) | Moisture (%)         | TSS (%) (درصد)       |                    | Firmness (%)        | Starch (%)           |
| Jili         | Agria               | Jili          | Agria                | Jili                 | Agria              | Jili                | Agria                |
|              |                     | fresh         |                      |                      |                    |                     |                      |
| 1            | انبار سرد           | 1             | 79.85 <sup>d</sup>   | 5.68 <sup>a</sup>    | 5.80 <sup>a</sup>  | 11.01 <sup>b</sup>  | 14.40 <sup>d</sup>   |
| 2            | ۴ درجه سلسیوس       | 2             | 79.88 <sup>d</sup>   | 5.46 <sup>a</sup>    | 5.82 <sup>a</sup>  | 10.93 <sup>b</sup>  | 13.07 <sup>c</sup>   |
| 3            |                     | 3             | 77.28 <sup>b</sup>   | 5.90 <sup>a</sup>    | 6.02 <sup>a</sup>  | 10.83 <sup>b</sup>  | 12.58 <sup>bc</sup>  |
| 4            |                     | 4             | 79.27 <sup>bcd</sup> | 6.78 <sup>b</sup>    | 6.52 <sup>b</sup>  | 10.71 <sup>b</sup>  | 12.44 <sup>ab</sup>  |
| 5            |                     | 5             | 78.82 <sup>bc</sup>  | 7.14 <sup>bc</sup>   | 6.62 <sup>b</sup>  | 9.85 <sup>a</sup>   | 11.95 <sup>c</sup>   |
| 6            | Cold storage 4°C    | 6             | 77.16 <sup>b</sup>   | 7.44 <sup>cd</sup>   | 6.96 <sup>bc</sup> | 10.66 <sup>b</sup>  | 12.36 <sup>ab</sup>  |
|              |                     |               | 78.33 <sup>ab</sup>  | 7.92 <sup>d</sup>    | 7.12 <sup>c</sup>  | 9.76 <sup>a</sup>   | 12.17 <sup>ab</sup>  |
|              |                     |               | 77.64 <sup>a</sup>   |                      |                    | 9.64 <sup>a</sup>   | 11.52 <sup>b</sup>   |
|              |                     |               | 77.46 <sup>a</sup>   |                      |                    | 9.33 <sup>a</sup>   | 10.64 <sup>a</sup>   |
|              |                     | fresh         |                      |                      |                    |                     |                      |
| 1            | انبار سرد           | 1             | 79.82 <sup>b</sup>   | 5.68 <sup>a</sup>    | 5.80 <sup>a</sup>  | 11.01 <sup>c</sup>  | 14.40 <sup>e</sup>   |
| 2            | ۷ درجه سلسیوس       | 2             | 80.91 <sup>c</sup>   | 5.90 <sup>a</sup>    | 5.88 <sup>a</sup>  | 11.07 <sup>c</sup>  | 13.33 <sup>d</sup>   |
| 3            |                     | 3             | 78.19 <sup>b</sup>   | 6.00 <sup>a</sup>    | 5.90 <sup>a</sup>  | 11.89 <sup>c</sup>  | 12.91 <sup>c</sup>   |
| 4            |                     | 4             | 79.79 <sup>b</sup>   | 6.12 <sup>a</sup>    | 6.08 <sup>ab</sup> | 10.66 <sup>ab</sup> | 12.24 <sup>de</sup>  |
| 5            |                     | 5             | 77.27 <sup>ab</sup>  | 7.20 <sup>b</sup>    | 6.46 <sup>bc</sup> | 10.34 <sup>ab</sup> | 12.61 <sup>bc</sup>  |
| 6            | Cold storage-7°C    | 6             | 78.18 <sup>a</sup>   | 7.20 <sup>b</sup>    | 6.46 <sup>bc</sup> | 10.32 <sup>ab</sup> | 12.53 <sup>abc</sup> |
|              |                     |               | 78.18 <sup>a</sup>   | 7.50 <sup>b</sup>    | 6.58 <sup>c</sup>  | 10.29 <sup>ab</sup> | 12.39 <sup>a</sup>   |
|              |                     |               | 76.40 <sup>a</sup>   | 7.62 <sup>b</sup>    | 6.78 <sup>c</sup>  | 10.15 <sup>ab</sup> | 12.39 <sup>a</sup>   |
|              |                     |               | 78.27 <sup>a</sup>   |                      |                    | 10.02 <sup>a</sup>  | 10.95 <sup>a</sup>   |
|              |                     | fresh         |                      |                      |                    |                     |                      |
| 1            | انبار سنتی          | 1             | 79.82 <sup>c</sup>   | 5.68 <sup>a</sup>    | 5.80 <sup>a</sup>  | 11.01 <sup>c</sup>  | 14.40 <sup>d</sup>   |
| 2            |                     | 2             | 76.10 <sup>b</sup>   | 5.98 <sup>a</sup>    | 5.86 <sup>a</sup>  | 10.99 <sup>c</sup>  | 14.30 <sup>d</sup>   |
| 3            |                     | 3             | 78.69 <sup>b</sup>   | 5.70 <sup>a</sup>    | 5.84 <sup>a</sup>  | 10.65 <sup>bc</sup> | 14.81 <sup>d</sup>   |
| 4            |                     | 4             | 76.07 <sup>b</sup>   | 6.00 <sup>a</sup>    | 6.56 <sup>b</sup>  | 10.59 <sup>bc</sup> | 14.19 <sup>d</sup>   |
| 5            | Traditional storage | 5             | 79.77 <sup>c</sup>   | 9.20 <sup>c</sup>    | 7.12 <sup>c</sup>  | 10.39 <sup>b</sup>  | 12.60 <sup>ab</sup>  |
| 6            |                     | 6             | 78.75 <sup>b</sup>   | 8.72 <sup>c</sup>    | 7.82 <sup>d</sup>  | 10.23 <sup>b</sup>  | 12.48 <sup>a</sup>   |
|              |                     |               | 74.71 <sup>a</sup>   | 7.24 <sup>b</sup>    | 6.10 <sup>ab</sup> | 10.16 <sup>b</sup>  | 12.86 <sup>b</sup>   |
|              |                     |               | 78.49 <sup>b</sup>   |                      |                    | 9.95 <sup>abc</sup> | 13.55 <sup>c</sup>   |
|              |                     | fresh         |                      |                      |                    |                     |                      |
| 1            | انبار سنتی          | 1             | 79.82 <sup>c</sup>   | 5.68 <sup>a</sup>    | 5.80 <sup>a</sup>  | 11.01 <sup>c</sup>  | 14.40 <sup>d</sup>   |
| 2            |                     | 2             | 76.10 <sup>b</sup>   | 5.98 <sup>a</sup>    | 5.86 <sup>a</sup>  | 10.99 <sup>c</sup>  | 14.30 <sup>d</sup>   |
| 3            |                     | 3             | 78.69 <sup>b</sup>   | 5.70 <sup>a</sup>    | 5.84 <sup>a</sup>  | 10.65 <sup>bc</sup> | 14.81 <sup>d</sup>   |
| 4            |                     | 4             | 76.07 <sup>b</sup>   | 6.00 <sup>a</sup>    | 6.56 <sup>b</sup>  | 10.59 <sup>bc</sup> | 14.19 <sup>d</sup>   |
| 5            | Traditional storage | 5             | 79.77 <sup>c</sup>   | 9.20 <sup>c</sup>    | 7.12 <sup>c</sup>  | 10.39 <sup>b</sup>  | 12.60 <sup>ab</sup>  |
| 6            |                     | 6             | 78.75 <sup>b</sup>   | 8.72 <sup>c</sup>    | 7.82 <sup>d</sup>  | 10.23 <sup>b</sup>  | 12.48 <sup>a</sup>   |
|              |                     |               | 74.71 <sup>a</sup>   | 7.24 <sup>b</sup>    | 6.10 <sup>ab</sup> | 10.16 <sup>b</sup>  | 12.86 <sup>b</sup>   |
|              |                     |               | 78.49 <sup>b</sup>   |                      |                    | 9.95 <sup>abc</sup> | 13.55 <sup>c</sup>   |

- میانگین‌هایی که با حروف لاتین مشترک مشخص شده اند، در یک گروه قرار می‌گیرند و اختلاف معنی‌دار ندارد.

- Means with similar letters are in a statistical group and there is no significant difference.

### پیش‌بینی خواص کیفی سیب‌زمینی با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده از تصویرها

مطابق جدول ۳، بهترین عملکرد در پیش‌بینی رطوبت متعلق است به ویژگی‌های استخراج‌شده از روش تبدیل موجک به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی که در طول موج ۶۸۰ نانومتر نتایج بهتری را نسبت به دیگر مدل‌ها ارائه داده است. شبکه عصبی طراحی‌شده در طول موج ۶۸۰ نانومتر با ۱۴ نورون در لایه مخفی بالاترین عملکرد ممکن را با

### پیش‌بینی خواص کیفی سیب‌زمینی با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده از تصویرها

در این قسمت خواص کیفی محصول طی انبارداری با استفاده از تغییرات موجود در تصویرهای پس‌پراکنش پیش‌بینی شد. تغییرات ایجاد شده در تصویرهای پس‌پراکنش به‌دلیل تغییرات ترکیبات و صفات فیزیولوژیکی سیب‌زمینی ناشی از تنفس در انبار است که منجر به تغییر در میزان جذب و پراکنش نور می‌شود.

(Hashim *et al.*, 2013; Kalaj *et al.*, 2016) پیش بینی مواد جامد حل شدنی کل سیب زمینی با استفاده از ویژگی های استخراج شده از تصویرها در پیش بینی مواد جامد حل شدنی کل، بهترین عملکرد مربوط به شبکه های عصبی مصنوعی با ترکیب ویژگی های بافت در دو طول موج با ۴ نورون در لایه مخفی و  $R_p = 0.82$  و  $RMSEP = 0.52$  است (جدول ۳). ارتباط بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده مناسب ترین مدل در شکل ۵ نشان داده شده است. کینگ و همکاران (Qing *et al.*, 2008) به ضریب همبستگی  $0.89$  در پیش بینی مواد جامد حل شدنی کل سیب با تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر دست یافتند. سانچز و همکاران (Sanchez *et al.*, 2020) در پیش بینی مواد جامد حل شدنی کل سیب زمینی با تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر در  $658$  نانومتر در بهترین شرایط  $R = 0.66$  و  $RMSE = 1.16$  را به دست آوردند. تغییرات مواد جامد حل شدنی در محصولات غده ای به معنای تغییرات پیوند C-H نمونه است. این پیوندها می تواند محل جذب طول موج هایی از طیف الکترومغناطیسی باشد. فرهادی و همکاران (Farhadi *et al.*, 2020) در بررسی رفتار طیفی سیب زمینی در محدوده فروسرخ نزدیک چند پیک در نقاط  $680$ ،  $750$  و  $840$  نانومتر مشاهده کردند. طول موج  $680$  به طور مستقیم و غیرمستقیم با مقدار رطوبت و مواد جامد حل شدنی کل در غده سیب زمینی مرتبط است. پیک های جذب قوی در محدوده  $700$  تا  $1000$  نانومتر از طیف مغناطیسی به دلیل ارتعاش اورتون های O-H و C-H مرتبط با ترکیبات داخلی محصول وجود دارند (Basati *et al.*, 2018; Rady & Guyer, 2015)

$R_p = 0.76$  و  $RMSEP = 1.01$  کسب کرده است که ارتباط بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از مدل فوق در شکل ۵ نمایش داده شده است. محاسبه پارامتر SDR این مدل که برابر نسبت انحراف معیار پاسخ به مجذور میانگین مربعات خطای مجموعه پیش بینی است مقدار  $2.57$  را حاصل کرده است. مطابق تحقیقات نیکولای و همکاران (Nicolai *et al.*, 2007)، مدل هایی که دارای مقدار SDR بالاتر از  $2.5$  باشند می توانند به خوبی در برآزش داده ها و پیش بینی پارامتر مورد بررسی به کار گرفته شوند. ترکیب ویژگی ها در دو طول موج مورد بررسی نتوانست موجب بهبود عملکرد مدل های پیش بینی کننده شود. این امر نشان می دهد که برخی از ویژگی ها تأثیر منفی بر یکدیگر داشته اند، به طوری که افزایش ویژگی ها موجب کاهش دقت و قدرت پیش بینی مدل شده است. این وضعیت در برخی از پژوهش ها مشاهده می شود که در علم الگویابی و انتخاب ویژگی تحت عنوان پیک زنی از آن یاد می شود که در آن، افزایش تعداد ویژگی موجب ثابت ماندن یا کاهش دقت مدل های پیش بینی می شود (Sima & Dougherty, 2008).

عملکرد پایین تری بین میزان رطوبت و پارامترهای پراکنش سیب زمینی در پژوهش های سانچز و همکاران (Sanchez *et al.*, 2020) و بابازاده و همکاران (Babazade *et al.*, 2016) مشاهده شده بود که به تغییرات کم میزان رطوبت طی انبارداری نسبت داده بودند. بازه تغییرات کم در داده های مرجع عاملی مؤثر در نتایج همبستگی کمتر در مطالعات عنوان شده است (Romano *et al.*, 2011;

جدول ۳- نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی میزان رطوبت ترپایه و مواد جامد حل‌شدنی کل سیب‌زمینی

Table 3- The results of artificial neural network in predicting of MC and TSS of potato

| TSS (%)     |                   |                |          | MC (%)      |                   |                |           | طول موج<br>Wavelength<br>(nm) | روش استخراج<br>Extraction method               |
|-------------|-------------------|----------------|----------|-------------|-------------------|----------------|-----------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| SDR         | RMSE <sub>p</sub> | R <sub>p</sub> | NNHL     | SDR         | RMSE <sub>p</sub> | R <sub>p</sub> | NNHL      |                               |                                                |
| 1.29        | 1.08              | 0.32           | 19       | 1.67        | 1.56              | 0.34           | 7         | 680                           | روش آماری<br>Statistical method                |
| 1.03        | 1.35              | 0.34           | 18       | 1.43        | 1.81              | 0.44           | 6         | 880                           |                                                |
| 1.63        | 0.85              | 0.31           | 13       | 1.41        | 1.85              | 0.44           | 19        | MBI*                          |                                                |
| 1.11        | 1.24              | 0.5            | 14       | 1.24        | 2.09              | 0.36           | 21        | 680                           | تابع اصلاح‌شده گومپرتز<br>Modified Gumpertz    |
| 1.00        | 1.39              | 0.29           | 27       | 1.57        | 1.65              | 0.34           | 23        | 880                           |                                                |
| 1.31        | 1.06              | 0.38           | 6        | 1.49        | 1.74              | 0.42           | 10        | MBI                           |                                                |
| 1.72        | 0.81              | 0.46           | 3        | 1.36        | 1.91              | 0.24           | 5         | 680                           | تابع اصلاح‌شده لورنتزین<br>Modified Lorentzian |
| 1.62        | 0.86              | 0.30           | 15       | 1.51        | 1.72              | 0.42           | 28        | 880                           |                                                |
| 1.90        | 0.73              | 0.60           | 4        | 1.38        | 1.88              | 0.46           | 27        | MBI                           |                                                |
| 1.46        | 0.96              | 0.47           | 7        | 1.15        | 2.26              | 0.51           | 15        | 680                           | مجموع ویژگی‌های شدت<br>All intensity Features  |
| 1.61        | 0.87              | 0.44           | 17       | 1.37        | 1.90              | 0.48           | 9         | 880                           |                                                |
| 1.63        | 0.85              | 0.56           | 14       | 1.15        | 2.27              | 0.33           | 2         | MBI                           |                                                |
| 1.59        | 0.83              | 0.42           | 10       | 1.43        | 1.82              | 0.25           | 22        | 680                           | هیستوگرام نرمال شده<br>Normalized Histogram    |
| 1.84        | 0.76              | 0.39           | 21       | 1.34        | 1.95              | 0.31           | 22        | 880                           |                                                |
| 1.55        | 0.90              | 0.38           | 5        | 1.33        | 1.96              | 0.37           | 12        | MBI                           |                                                |
| 1.43        | 0.97              | 0.37           | 28       | 1.57        | 1.64              | 0.42           | 3         | 680                           | ماتریس هم وقوعی<br>GLCM                        |
| 1.26        | 1.11              | 0.22           | 15       | 1.28        | 2.04              | 0.30           | 16        | 880                           |                                                |
| 1.46        | 0.95              | 0.38           | 8        | 1.08        | 2.42              | 0.27           | 9         | MBI                           |                                                |
| 1.83        | 0.77              | 0.66           | 7        | 1.25        | 2.06              | 0.34           | 2         | 680                           | ماتریس طول گام سطح<br>خاکستری<br>GLRLM         |
| 1.13        | 1.23              | 0.30           | 17       | 0.66        | 3.90              | 0.38           | 22        | 880                           |                                                |
| 1.37        | 1.01              | 0.46           | 13       | 1.28        | 2.03              | 0.33           | 17        | MBI                           |                                                |
| 1.05        | 1.32              | 0.39           | 13       | <b>2.57</b> | <b>1.01</b>       | <b>0.76</b>    | <b>14</b> | 680                           | تبدیل موجک<br>Wavelet                          |
| 1.30        | 1.07              | 0.31           | 9        | 0.92        | 2.80              | 0.3            | 16        | 880                           |                                                |
| 2.14        | 0.65              | 0.75           | 17       | 1.24        | 2.10              | 0.46           | 12        | MBI                           |                                                |
| 1.66        | 0.84              | 0.55           | 11       | 1.31        | 1.98              | 0.5            | 5         | 680                           | ترکیب ویژگی‌های بافت<br>All texture features   |
| 1.17        | 1.19              | 0.21           | 9        | 1.07        | 2.45              | 0.44           | 21        | 880                           |                                                |
| <b>2.68</b> | <b>0.52</b>       | <b>0.82</b>    | <b>4</b> | 1.04        | 2.51              | 0.4            | 9         | MBI                           |                                                |
| 1.79        | 0.78              | 0.59           | 20       | 2.02        | 1.29              | 0.72           | 21        | 680                           | ترکیب ویژگی‌های<br>استخراج شده<br>All features |
| 1.15        | 1.21              | 0.32           | 9        | 2.05        | 1.27              | 0.74           | 9         | 880                           |                                                |
| 2.04        | 0.68              | 0.71           | 8        | 1.16        | 2.23              | 0.33           | 14        | MBI                           |                                                |

MBI\*: Backscattering imaging in several wavelengths

MBI\*: تصویربرداری پس‌پراکنش چندطیفی.

NNHL: number of neurons in hidden layer

NNHL: تعداد نورون در لایه مخفی

جدول ۴- نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی درصد نشاسته و سفتی سیب زمینی

Table 4- The results of artificial neural network in predicting of starch and Firmness of potato

| سفتی (kg)<br>Firmness (kg) |                   |                |           | نشاسته (%)<br>Starch (%) |                   |                |          | طول موج<br>Wavelength<br>(nm) | روش استخراج<br>Extaction method                  |
|----------------------------|-------------------|----------------|-----------|--------------------------|-------------------|----------------|----------|-------------------------------|--------------------------------------------------|
| SDR                        | RMSE <sub>p</sub> | R <sub>p</sub> | NNHL      | SDR                      | RMSE <sub>p</sub> | R <sub>p</sub> | NNHL     |                               |                                                  |
| 1.46                       | 0.96              | 0.24           | 7         | 1.43                     | 1.14              | 0.49           | 28       | 680                           | روش آماری<br>Statistical method                  |
| 1.51                       | 0.93              | 0.32           | 2         | 1.71                     | 0.95              | 0.46           | 18       | 880                           |                                                  |
| 1.51                       | 0.93              | 0.21           | 13        | 2.42                     | 0.67              | 0.47           | 10       | MBI*                          |                                                  |
| 1.36                       | 1.03              | 0.21           | 20        | 1.48                     | 1.10              | 0.64           | 30       | 680                           | تابع اصلاح شده گومپرتز<br>Modified Gumpertz      |
| 1.41                       | 0.99              | 0.38           | 17        | 1.45                     | 1.12              | 0.31           | 17       | 880                           |                                                  |
| 1.52                       | 0.92              | 0.25           | 24        | 1.92                     | 0.85              | 0.49           | 26       | MBI                           |                                                  |
| 1.87                       | 0.75              | 0.23           | 4         | 1.70                     | 0.96              | 0.44           | 7        | 680                           | تابع اصلاح شده لورنتزین<br>Modified Lorentzian   |
| 0.97                       | 1.45              | 0.16           | 23        | 1.61                     | 1.01              | 0.39           | 7        | 880                           |                                                  |
| 1.32                       | 1.06              | 0.22           | 22        | 1.48                     | 1.10              | 0.60           | 23       | MBI                           |                                                  |
| 1.33                       | 1.05              | 0.38           | 20        | 1.75                     | 0.93              | 0.38           | 19       | 680                           | مجموع ویژگی های<br>شدت<br>All intensity Features |
| 1.63                       | 0.86              | 0.27           | 9         | 2.20                     | 0.74              | 0.55           | 12       | 880                           |                                                  |
| 1.41                       | 0.99              | 0.38           | 12        | 1.43                     | 1.14              | 0.44           | 18       | MBI                           |                                                  |
| 1.30                       | 1.08              | 0.33           | 23        | 2.01                     | 0.81              | 0.39           | 18       | 680                           | هیستوگرام نرمال شده<br>Normalized histogram      |
| 2.37                       | 0.59              | 0.32           | 8         | 1.58                     | 1.03              | 0.53           | 16       | 880                           |                                                  |
| 2.59                       | 0.54              | 0.68           | 23        | 1.81                     | 0.90              | 0.56           | 8        | MBI                           |                                                  |
| 1.37                       | 1.02              | 0.19           | 7         | 2.03                     | 0.80              | 0.51           | 10       | 680                           | ماتریس هم وقوعی<br>GLCM                          |
| 1.46                       | 0.96              | 0.15           | 7         | 1.33                     | 1.22              | 0.36           | 23       | 880                           |                                                  |
| 1.46                       | 0.96              | 0.23           | 5         | 1.79                     | 0.91              | 0.43           | 2        | MBI                           |                                                  |
| 1.79                       | 0.78              | 0.33           | 9         | 1.52                     | 1.07              | 0.48           | 16       | 680                           | ماتریس طول گام سطح<br>خاکستری<br>GLRLM           |
| 0.92                       | 1.53              | 0.32           | 12        | 1.47                     | 1.11              | 0.28           | 3        | 880                           |                                                  |
| 1.34                       | 1.04              | 0.15           | 17        | 1.68                     | 0.97              | 0.48           | 17       | MBI                           |                                                  |
| 1.54                       | 0.91              | 0.43           | 26        | 1.39                     | 1.17              | 0.55           | 7        | 680                           | تبدیل موجک<br>Wavelet                            |
| 2.00                       | 0.7               | 0.66           | 18        | 1.22                     | 1.33              | 0.35           | 19       | 880                           |                                                  |
| 1.32                       | 1.06              | 0.25           | 5         | 1.44                     | 1.13              | 0.53           | 9        | MBI                           |                                                  |
| 1.15                       | 1.22              | 0.28           | 11        | 1.61                     | 1.01              | 0.54           | 14       | 680                           | ترکیب ویژگی های بافت<br>All texture features     |
| 1.24                       | 1.13              | 0.16           | 15        | 1.37                     | 1.19              | 0.46           | 18       | 880                           |                                                  |
| 1.33                       | 1.05              | 0.32           | 15        | 1.25                     | 1.30              | 0.44           | 9        | MBI                           |                                                  |
| 2.06                       | 0.68              | 0.63           | 16        | 2.33                     | 0.7               | 0.66           | 3        | 680                           | ترکیب ویژگی های<br>استخراج شده<br>All features   |
| <b>2.64</b>                | <b>0.53</b>       | <b>0.71</b>    | <b>20</b> | 2.26                     | 0.72              | 0.61           | 8        | 880                           |                                                  |
| 1.4                        | 1.00              | 0.38           | 18        | <b>2.67</b>              | <b>0.61</b>       | <b>0.73</b>    | <b>8</b> | MBI                           |                                                  |

MBI: Backscattering imaging in several wavelengths

MBI\*: تصویربرداری پس پراکنش چندطیفی.

NNHL: number of neurons in hidden layer

NNHL: تعداد نورون در لایه مخفی

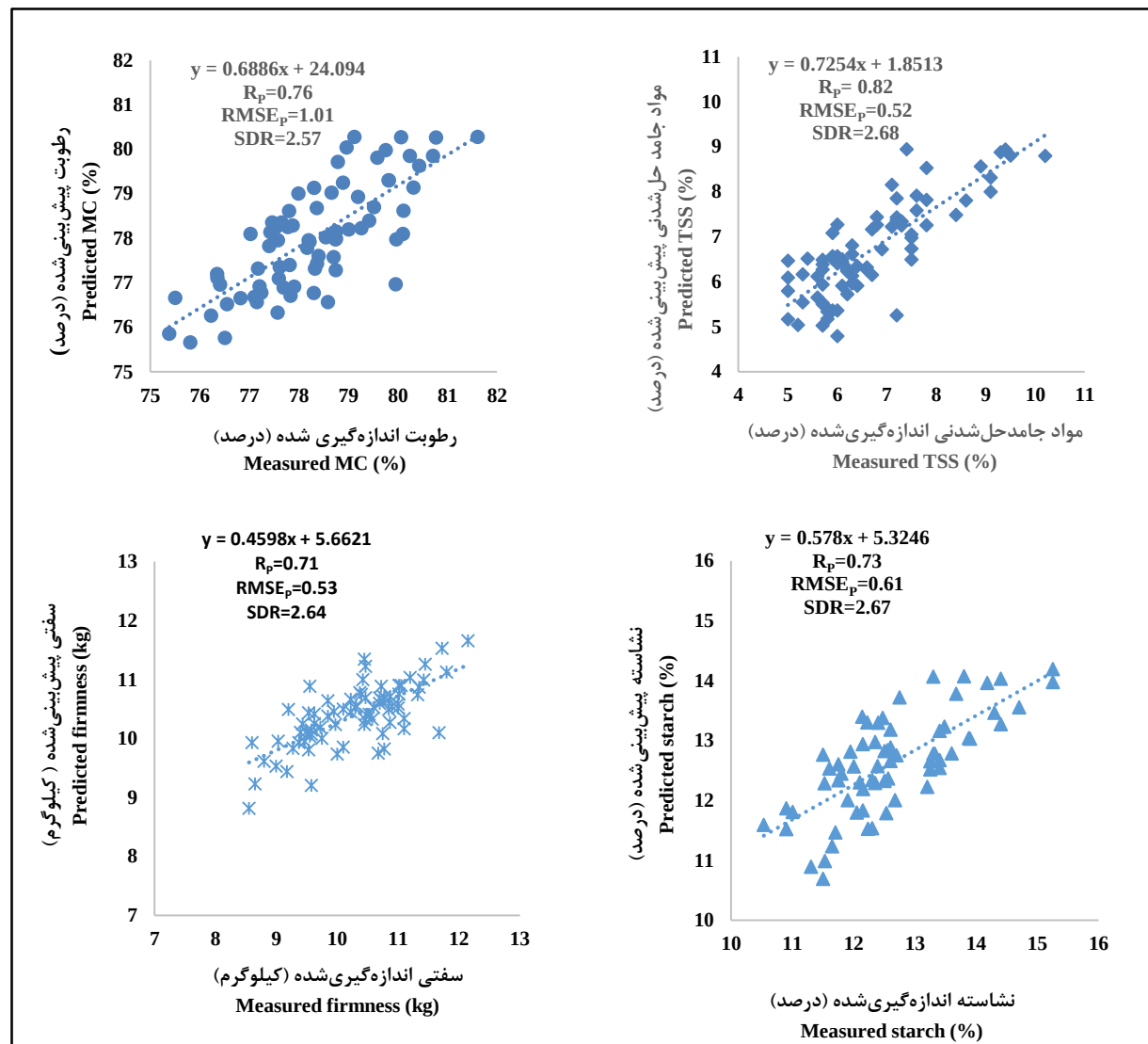
است که توانست با ۱۸ نورون در لایه مخفی و  $R_p=0.73$  و  $RMSE_p=0.61$  بالاترین عملکرد را داشته باشد (جدول ۴). شکل ۵ دقت مناسب ترین مدل در پیش بینی درصد نشاسته در مجموعه آزمون نشان را می دهد.

پیش بینی درصد نشاسته سیب زمینی با استفاده از ویژگی های استخراج شده از تصویرها در پیش بینی درصد نشاسته، بهترین عملکرد مربوط به شبکه های عصبی مصنوعی با ترکیب کل ویژگی های استخراج شده از تصویرها در دو طول موج

۸۸۰ نانومتر با ۲۰ نورون در لایه مخفی و  $R_p=0.71$  و  $RMSE_p=0.53$  به‌دست آمد که ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده مدل در مجموعه آزمون در شکل ۵ به نمایش گذاشته شده است.

پیش‌بینی سفتی سیب‌زمینی با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده از تصویرها

در پیش‌بینی سفتی (جدول ۴)، بالاترین مقدار SDR مربوط به مدل شبکه عصبی طراحی‌شده با ترکیب تمام ویژگی‌های استخراج‌شده در طول موج



شکل ۵- دقت مناسب‌ترین مدل‌های شبکه عصبی طراحی شده در پیش‌بینی خواص کیفی سیب‌زمینی

Fig. 5- The accuracy of the most suitable neural network models in predicting the potato qualitative properties

سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2020) به ضریب همبستگی  $0.54$  در پیش‌بینی سفتی سیب‌زمینی با استفاده از پارامترهای پس‌پراکنش دست یافتند. احمدخانی و همکاران (Ahmadkhani

مدل شبکه عصبی طراحی‌شده با ویژگی‌های هیستوگرام نرمال شده در دو طول موج با ۲۳ نورون در لایه مخفی و  $R_p=0.68$  و  $RMSE_p=0.54$  در مرتبه دوم قرار داشت.

(2015, *et al.*) با ترکیب برخی از ویژگی‌های شدت و بافت تصاویر در طول موج ۶۵۰ نانومتر و استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی، توانستند به نتایج قابل قبولی در پایش‌بینی سفتی هلووی تازه دست یابند. مندوزا و همکاران (2011, *Mendoza et al.*) گزارش کردند که رفتار جذب نور در محدوده طول موج‌های ۷۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر به سفتی بافت سیب حساس است. چنین نتیجه‌ای توسط پنگ و لو (Peng & Lu., 2006) در مورد هلو نیز به دست آمد.

رومانو و همکاران (2011, *Romano et al.*) در بررسی ارتباط بین سفتی بافت سیب طی خشک کردن و مساحت ناحیه پس‌پراکنش و شدت نور تصاویر پس‌پراکنش نور لیزر از طول موج ۶۳۵ نانومتر برای تصویربرداری استفاده کرده بودند که نتایج مناسبی حاصل نکردند.

### نتیجه گیری

این تحقیق با هدف بررسی امکان استفاده از روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک و استخراج ویژگی‌های تصاویر با روش‌های مختلف تحلیل شدت و بافت در

پایش و پایش‌بینی خواص کیفی سیب زمینی در طول انبارداری اجرا شد. مقایسه نتایج مدل سازی با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده با روش‌های مختلف نشان داد که روش تبدیل موجک در ۶۸۰ نانومتر در پایش‌بینی میزان رطوبت و در حالت چند طیفی در پایش‌بینی مواد جامد حل‌شدنی مناسب ترین نتایج را حاصل کرد. ترکیب این ویژگی‌ها با سایر ویژگی‌های استخراج شده از تصویرها در حالت چند طیفی در پایش‌بینی مواد جامد حل‌شدنی موجب افزایش دقت مدل‌های پایش‌بینی شد. ترکیب کل ویژگی‌های شدت و بافت استخراج شده از تصویرها در حالت چند طیفی در پایش‌بینی در صد نشاسته و در طول موج ۸۸۰ نانومتر در پایش‌بینی سفتی موثرتر بودند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر می‌تواند به عنوان روشی غیرمخرب و ارزان در پایش خواص کیفی سیب زمینی به کار رود. تلاش‌های بیشتری در جهت استخراج ویژگی‌های دیگر و ارتقای سامانه تصویربرداری از نظر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، برای افزایش دقت مدل‌های پایش‌بینی کننده، با استفاده از این روش ضروری است.

### تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

### مراجع

- Abasi, S., Minaei, S., Jamshidi, B., & Fathi, D. (2018). Dedicated non-destructive devices for food quality measurement: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.009>
- Ahmadkhani, S., Mahmoudi, A., Mollazade, K., & Ghaffari, H. (2015). Prediction of firmness in peach fruit by means of laser light backscattering imaging system. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 46, 3, 229-234. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2015.56863>. (in persian)

- Babazadeh, S., Ahmadi Moghaddam, P., Sabatyan, A., & Sharifian, F. (2016). Classification of potato tubers based on solanine toxicant using laser induced light backscattering imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 129, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.09.009>.
- Barrett, D., Beaulieu, J., & Shewfelt, R. (2010). Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: Desirable levels, instrumental and sensory, measurement, and the effects of processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50, 369–389. <https://doi.org/10.1080/10408391003626322>.
- Basati, Z., Jamshidi, B., Rasekh, M., & Abbaspour-Gilandeh, Y. (2018). Detection of sunn pest-damaged wheat samples using visible/nearinfrared spectroscopy based on pattern recognition. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*; 203, 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.05.123>.
- Bentini, M., Caprara, C., & Martelli, R. (2009). Physico-mechanical properties of potato tubers during cold storage. *Journal Bio Systems Engineering*, 104, 1, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.03.007>.
- Bevk, M., Kononenko, I. (2002). *A statistical approach to texture description of medical images: A preliminary study. Proceedings of the 15th IEEE Symposium on Computer-based Medical Systems (CBMS 2002)*, June 4-7, 2002, Maribor, Slovenia.
- Connor, C. J., Fisk, K. J., Smith, B. J., & Melton, L. D. (2001). Fat uptake in French fries as affected by different potato varieties and processing. *Journal of Food Science*, 66(6), 903-908. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb15194.x>.
- Elmasry, G., Cubero, S., Moltó, E., Blasco, J. (2012). In-line sorting of irregular potatoes by using automated computer-based machine vision system. *Journal of Food Engineering*, 112, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.027>.
- Emragi, E., Katila, D., & Jayanty, S. S. (2022). Effect of edible coating on physical and chemical properties of potato tubers under different storage conditions. *LWT, Food Science and Technology*, 153, 112580. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112580>.
- Farhadi, R., Afkari-Sayyah, A. H., Jamshidi, B., & Mosapour-Gorji, A. (2020). Prediction of internal compositions change in potato during storage using Visible/Near-infrared (Vis/NIR) spectroscopy. *International Journal of Food Engineering*. 16(4), 1-9. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0110>.
- Geng, J., Xiao, L., He, X., & Rao, X. (2019). Discrimination of clods and stones from potatoes using laser backscattering imaging technique. *Computers and Electronics in Agriculture* 160(4), 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.014>.
- Gomez-Galindo, F., Sjöholm, I., Rasmusson, A., Widell, S., & Kaack, K. (2007). plant stress physiology: opportunities and challenges for the food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47, 749-763. <https://doi.org/10.1080/10408390601062211>.

- Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural features of image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC, 3(6), 610-621. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>
- Hashim, N., Pflanz, M., Regen, C., Janius, R. B., Abdul Rahman, R., Osman, A., Shitan, M., & Zude, M. (2013). An approach for monitoring the chilling injury appearance in bananas by means of backscattering imaging. *Journal of Food Engineering*, 116, 28-36. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14127>.
- Kalaj, Y. R., Mollazade, K., Herppich, W., Regen, C., & Geyer, M. (2016). Changes of backscattering imaging parameter during plum fruit development on the tree and during storage. *Science Horticulture*, 202, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.029>.
- Liu, Q., Donner, E., Tarn, R., Singh, J., & Chung, H. J. (2009). Advanced analytical techniques to evaluate the quality of potato and potato starch. *Advances in Potato Chemistry and Technology*, 2009, 221-248. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374349-7.00008-8>.
- López-Maestresalas, A., Keresztes, J. C., Goodarzi, M., Arazuri, S., Jarén, C., Saeys, W. (2016). Non-destructive detection of blackspot in potatoes by Vis-NIR and SWIR hyperspectral imaging. *Food Control*, 70, 229-241. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.001>.
- López-Maestresalas, A., Ocaña-López, G., López-Maestresalas, C., Jarén, C., Riquelme, J. A., Pérez-Aparicio, C., & Arazuri, S. (2022). Evaluation of near-infrared hyperspectral imaging for the assessment of potato processing aptitude. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 999877. <https://doi.org/10.3389/fnut.999877>.
- Lorente, D., Zude, M., Idler, C., Gomez-Sanchis, J., & Blasco, J. (2015). Laser-light backscattering imaging for early decay detection in citrus fruit using both a statistical and a physical model. *Journal of Food Engineering*, 154, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.004>.
- Lorente, D., Zude, M., Regen, C., Palou, L., Gomez-Sanchis, J., & Blasco, J. (2013). Early decay detection in citrus fruit using laser-light backscattering imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 424-430. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.07.021>.
- Mendoza, F. A., Lu, R., & Cen, H. (2011). Multi-sensor data fusion for improved prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, June 3, Orlando, Florida, United States, 8027:80270M-80270M-14. <https://doi.org/10.1117/12.883649>.
- Mohd Ali, M., Hashim, N., Khairunniza Bejo, S., & Shamsudin, R. (2017). Laser-induced backscattering imaging for classification of seeded and seedless watermelons. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 311-316. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.010>.
- Mollazade, K., Omid, M., Akhlaghian Tab, F., & Mohtasebi, S. S. (2012). Principles and applications of light backscattering imaging in quality evaluation of agro-food products: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1465–1485. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0821-x>.

- Mollazade, K., Omid, M., Akhlaghian Tab, F., Rezaei Kalaj, Y., Mohtasebi, S. S., & Zude, M. (2013). Analysis of texture-based features for predicting mechanical properties of horticultural products by laser light backscattering imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.07.011>.
- Mozaffari, M., Mahmoudi, A., Mollazade, K., & Jamshidi, B. (2017). Low-cost optical approach for noncontact predicting moisture content of apple slices during hot air drying. *Dry Technol.* 35, 1530–1542. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1262394>.
- Nicolăi, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I., & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46, 99–118. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.024>.
- Omidi-Arjenaki, O., Ghanbarian, D., & Naderi-Boldaji, M. (2018). Evaluation and prediction of mechanical properties of potato during storage by laser light backscattering imaging. *Journal of food science technology*, 83(15), 237-250. (in persian)
- Onwude, D., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2018). Combination of computer vision and backscattering imaging for predicting the moisture content and colour changes of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.015>.
- Peng, Y., & Lu, R. (2006). An LCTF-based multispectral imaging system for estimation of apple fruit firmness. Part1: Acquisition and characterization of scattering images. *Transaction of the ASAE*, 49, 259-267. <https://doi.org/10.13031/2013.20225>.
- Qing, Z., Ji, B., & Zude, M. (2007). Predicting soluble solid content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. *Journal of Food Engineering*, 82, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.01.016>.
- Qing, Z., Ji, B., & Zude, M. (2008). Non-destructive analyses of apple quality parameters by means of laser-induced light backscattering imaging. *Postharvest Biology and Technology* 48(2), 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.10.004>.
- Qin, J., Lu, R., & Peng, Y. (2009). Prediction of apple internal quality using spectral absorption and scattering properties. *Transactions of the ASABE*, 52(2), 499-507. <https://doi.org/10.13031/2013.26807>.
- Rady, A. M., & Guyer, D. E. (2015). Evaluation of sugar content in potatoes using NIR reflectance and wavelength selection techniques. *Postharvest Biology and Technology*, 103, 17-26. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1461-0>.
- Romano, G., Nagle, M., Argyropoulos, D., & Muller, J. (2011). Laser light backscattering to monitor moisture content, soluble solid content and hardness of apple tissue during drying. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 657-662. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.026>.

- Sanchez, Ph. D. C., Hashim, N., Shamsudin, R., & Mohd nor, M. Z. (2020). Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 208-221. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.027>.
- Sima, C., & Dougherty, E. R. (2008). The peaking phenomenon in the presence of feature selection. *Pattern Recognition Letters*, 29, 1667-1674. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2008.04.010>.
- Su, W. H., & Sun, D. W. (2016). Potential of hyperspectral imaging for visual authentication of sliced organic potatoes from potato and sweet potato tubers and rapid grading of the tubers according to moisture proportion. *Computers and Electronics in Agriculture*, 125, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.034>.
- Wang, S., Nie, S., & Zhu, F. (2016). Chemical constituents and health effects of sweet potato. *Food Research International*, 89, 90-116. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.032>.
- Wang, F., Wang, C., Song, S., Xie, S., & Kang, F. (2021). Study on starch content detection and visualization of potato based on hyperspectral imaging. *Food science & nutrition*, 9(8), 4420-4430. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2415>.
- Wu, A., Zhu, J., & Ren, T. (2020). Detection of apple defect using laser-induced light backscattering imaging and convolutional neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81(106454), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106454>.
- Ye, D., Sun, L., Tan, W., Che, W., & Yang, M. (2018). Detecting and classifying minor bruised potato based on hyperspectral imaging. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 177, 129-139. <https://doi.org/10.1010101: ahamalah 2010 01.000>.

## Non-Destructive Monitoring of Potato Quality Properties in Storage by Laser Light Backscattering Imaging

Mansoureh Mozaffari Gonbari\*, Bahareh Jamshidi, Jaber Soleimani  
and Parisa Zargaripour

\*Corresponding Author: Assistant professor of Agricultural Engineering Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education center, AREEO, Tabriz, Iran. Email: [m.mozaffary@areeo.ac.ir](mailto:m.mozaffary@areeo.ac.ir), [4mozaffari@gmail.com](mailto:4mozaffari@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-2757-3859>

Received: 20 May 2026, Accepted: 3 August 2026  
<https://doi.org/10.22092/amsr.2026.372864.1536>

### Abstract

Monitoring potato quality attributes during storage is essential for optimizing supply chain management, ensuring timely product distribution, and minimizing postharvest losses. In this study, a non-destructive monitoring system for potato quality assessment was developed and evaluated using laser light backscattering imaging in the visible and near-infrared spectral regions. Backscattering images were acquired throughout the storage period under three storage conditions: cold storage at 4°C, cold storage at 7°C, and traditional storage. Two potato cultivars, Agria and Jelly, were included in the experiments. Key quality attributes, including moisture content, starch content, total soluble solids (TSS), and texture firmness, were measured periodically during storage. Features based on intensity and texture analyses of images were extracted. An artificial neural network model was employed to establish the relationship between the mentioned properties and image features. The results indicated that the 680 nm wavelength was the most effective for predicting moisture content, whereas the 880 nm wavelength provided superior performance for predicting firmness. The combination of both wavelengths performed well in predicting starch content and total soluble solid content. The highest correlation coefficients obtained for the prediction of moisture content, total soluble solids, firmness, and starch content were 0.76, 0.82, 0.71, and 0.73, respectively. These findings demonstrate the possibility of using laser backscattering imaging system for assessing the attributes of stored potatoes.

**Keywords:** Light scattering, Non-destructive tests, Quality monitoring, Storage



© 2024 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)