ارزیابی و پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب‌زمینی در طول انبارداری با استفاده از تصویربرداری پس پراکنش لیزری

امید امیدی ارجنکی[1*]، داود قنبریان[2]، مجتبی نادری بلداجی[3]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۹٦/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹٦/۱۰/۳۰)

چکیده

در این پژوهش، تغییرات بافت سیب‌زمینی در طول انبارداری با استفاده از روش تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر توسط مدل‌های فیزیکی و ریاضی و با توجه به نتایج آزمون‌های مخرب مکانیکی ارزیابی شد. همچنین، با استفاده از ویژگی‌های حاصل از تصاویر سعی بر توسعه مدل‌هایی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب‌زمینی شد. در ابتدا، از ٥٩٤ عدد سیب‌زمینی تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر صورت گرفت. از این تصاویر پروفایل پس پراکنش هر نمونه به‌دست آمد. سپس، نمونه‌های استوانه‌ای شکل استخراج‌شده از سیب‌زمینی‌ها مورد آزمون فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. پروفایل‌های پس پراکنش از تصاویر، با برازش مدل گاوسی درجه اول بر داده‌های حاصل از تصویر نهایی و همچنین محاسبه فرکانس تکرار شدت‌های مختلف در تصاویر، پارامترهایی مرتبط با جذب و پراکنش نور بازگشتی از درون بافت غده‌ها در سه طول‌موج ٦٥٠، ۷۸۰ و nm ۹۸۰ در شش دوره انبارداری سرد به دست آمد. نتایج آزمون مکانیکی و همچنین تغییرات پارامترهای تخمین زده‌شده از برازش مدل گاوسی و فرکانس‌های شدت حاصل از تصاویر و مقایسه و بررسی رفتار آن‌ها در طول شش ماه انبارداری، بیانگر اثر تغییرات ساختار مکانیکی بر خواص نوری نمونه‌ها بود. درنهایت، ۵ مدل برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته مماسی، مدول الاستیسیته سکانتی، چقرمگی و حداکثر نیروی شکست با کمک سیستم استنتاجی عصبی ـ فازی، به ترتیب با دقت های ۰/۸۲۷، ۰/۸۱۵، ۰/۸۰۸، ۰/۸٤۷، و ۰/۸۱۱ حاصل شد. نتایج و اطلاعات حاصل در این پژوهش اساساً برای درک اثر جذب و پراکنش نور متأثر از تغییرات ناشی از انبارداری و به‌منظور طراحی حس‌گرهای پربازده و سامانه‌های تعیین کیفیت برای ارزیابی کیفیت مکانیکی غیر مخرب در غدد سیب‌زمینی مفید خواهد بود.

کلید واژگان: تصویربرداری پس پراکنش لیزری، غیر مخرب، مدل گاوسی، خواص مکانیکی

* مسئول مکاتبات: omidmac@gmail.com

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

۱- مقدمه

روش‌های مرسوم برای تعیین و بررسی بافت فیزیکی و خواص مکانیکی محصولات کشاورزی شامل روش‌های آزمون مرجع مکانیکی مانند آزمون‌های کشش، فشار، خزش[1] و تنش آسایی[2] است. آزمون‌های مرجع، همگی با تخریب محصول و مبتنی‌بر مشخصه‌های نیرو، جابجایی و ضربه، نتایج مکانیکی را به پژوهشگران ارائه می‌کنند. این روش ها نیازمند تجهیزات و ابزار دقیق و همچنین کاربران آموزش دیده و متخصص برای اجرا هستند. علاوه بر این آزمون هایی زمانبر نیز محسوب می‌شوند، سازگاری همیشگی ندارند و غالباً منجر به هدر رفت محصول میشوند. در بازارهای رقابتی امروز، جایی که اهمیت نظارت کیفی افزایش می‌یابد، لزوم توسعه روش‌های غیر مخرب سریع، اقتصادی و امن برای افزایش بازدهی اندازه‌گیری شاخص‌های کیفی وجود دارد. یکی از روش‌هایی که به این منظور توسعه‌یافته است، روش تصویربرداری پس پراکنش نور است. تصویربرداری از نور پس پراکنش شده، در عین غیر مخرب بودن، دارای اهداف توأمان تصویربرداری و طیف‌نگاری است و می‌توان تحلیل اثر آن را در تصویر خروجی در یک آشکارساز به‌عنوان یک روش اندازه‌گیری غیرمستقیم از ویژگی‌های کیفی بافت محصول (مانند مقادیر سفتی و نرمی) به‌حساب آورد. در برخورد نور با محصولات کشاورزی، تنها در حدود ٤ تا ٥ درصد تابش اعمال‌شده به‌صورت بازتابش از سطح محصول بازمی‌گردد و باقیمانده آن از سطح محصول عبور کرده، وارد مولکول‌های بافت پوست شده و در میان فضای متخلخل بافت نفوذپذیر اجزای داخلی محصول پراکنده می‌شود [١]. بخش زیادی از این تابش نفوذ کرده، دوباره توسط اجزای میانی در درون محصول به‌طرف سطح پراکنده و از آن خارج می‌شود. این نوع بازتابش، بازتابش پخشی داخلی یا پراکنش نامیده می‌شود. این بازتابش حاوی اطلاعاتی مانند اطلاعات ساختاری و مورفولوژی بافت و خواص مکانیکی [٢] و یا محتوای آب بافت است [٣ و ٤]. در محصولات کشاورزی مهم‌ترین عامل که باعث این نوع بازتابش می‌شود، سطوح مشترک دیواره سلولی است؛ زیرا این سطوح باعث تغییرات ناگهانی در ضرایب بازتابش می‌شوند [٥]. بااین‌حال، ذرات معلق مانند ذرات نشاسته، کلروپلاست‌ها و میتوکندری‌ها نیز ممکن است از طریق شکست نور در سطح خود باعث ایجاد پراکنش شوند [٦]. پرتوهای باقیمانده در درون میوه ممکن است توسط مولکول‌های مواد سازنده بافت جذب شوند و یا درون عمق بیشتری از میوه پخش و از طرف دیگر آن خارج شوند. اجزاء مختلف سازنده در مواد غذایی می‌توانند مقادیر مشخصی از این تابش را جذب کنند. بررسی و تحلیل این فرآیندهای نوری می‌تواند سبب کشف مشخصات معینی در محصولات کشاورزی شود [٧]. جذب نور اساساً مربوط به اجزای شیمیایی محصولات کشاورزی مانند آمینواسیدها، یون‌های غیر ارگانیک، کربوهیدرات‌ها، آب یا رنگ‌دانه‌ها است [٨]. پراکنش نور در پدیده‌های طبیعی متأثر از ویژگی‌های ساختاری بافت جسم مانند چگالی، اندازه ذرات تشکیل‌دهنده و ساختار سلولی (در بافت‌های زنده) است [٩]. بر همین اساس، بسیاری از پژوهش‌ها به‌منظور بررسی شرایط کیفی محصولات از سامانه‌های تصویربرداری پس پراکنش نور استفاده کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، کینگ و همکاران (٢٠٠٧)، خاصیتی مکانیکی (سفتی) و همچنین مواد جامد محلول (به‌عنوان یک خاصیت محتوایی) را در سیب‌درختی توسط نور لیزر در پنج طول‌موج متفاوت در حوزه مرئی و مادون‌قرمز نزدیک (٦٨٠،٧٨٠ nm، ٨٨٠، ٩٤٠ و ٩٨٠) تخمین زدند [١٠]. به‌منظور کشف کوفتگی‌های سیب‌درختی، لوو و همکاران (٢٠١٠) نیز خواص نوری شامل ضرایب جذب و پراکنش کاهش‌یافته را از بافت سیب‌درختی سالم و کوفته شده بررسی کردند و دریافتند که تغییرات ضرایب با زمان بعد از آسیب کوفتگی توسط سیستم پس پراکنش نور در طول‌موج‌های ٥٠٠ تا ١٠٠٠ nm را می‌توان تعیین کرد [١٢]. در پژوهشی دیگر، بررسی کیفی برش‌های موز و همچنین تغییرات رطوبت آن در شرایط متفاوت خشک شدن، با استفاده از لیزر ٦٧٠ nm مورد بررسی قرار گرفت [١١ و ١٦]. همچنین از این روش به‌منظور بررسی مراحل مختلف رسیدگی انبه، با ویژگی‌های محتوای جامد محلول، قند، نشاسته، ماده خشک، و برخی پارامترهای کیفی دیگر نیز بهره برده و نتایج قابل توجهی حاصل شده است [٥٤]. علاوه بر این تحقیقات، روش تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر برای تعیین خواص مکانیکی مانند مدول ارتجاعی نیز در محصولاتی مانند آلو، گوجه فرنگی و قارچ، که متأثر از میزان رسیدگی و زمان برداشت آنها است، استفاده شده است [٢]. این روش در ارزیابی سرمازدگی موز نیز استفاده شده

1. Creep test
2. Stress relaxation test

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

است [۳]. همچنین، با استفاده از این روش، رطوبت، محتوای جامد محلول و سختی سیب درختی حین فرآیند خشک شدن نیز بررسی گردیده است [٤].

برای بررسی خواص بافت در روش تصویربرداری پس پراکنش نور، به طول‌موج معینی نیاز است. در این زمینه، محققان بسیاری طول‌موج‌های معینی را در تحقیقات گوناگون برای محصولات و مواد مختلف پیشنهاد کردند. برخی پیشنهادها برای ارزیابی کیفی میوه‌ها در بازه طول‌موج ٤۰۰ تا ۱۰۰۰ nm (NIR) است. محققان طول‌موج‌های ٦٨۰، ٨٦۰ و ٨۰۰ تا ۱۱۰۰ nm را برای تعیین سفتی در سیب‌درختی، کیوی و آلو مناسب دیدند [۵، ١٤، ۱۵ و ۱۳]. کینگ و همکاران (۲۰۰۷)، طول‌موج ۹۱۰ nm را به‌عنوان طول‌موج مناسب برای تعیین محتوای رطوبت پیشنهاد داد [۱۳]. جذب‌کننده اصلی نور در ناحیه موج‌کوتاه مادون‌قرمز نزدیک[1] را مولکول‌های آب موجود در سلول‌های بافت تشکیل می‌دهد. همچنین، با رسیدگی محصولات کشاورزی مانند میوه‌ها و غده‌ها، میزان کلروفیل یا سبزدانه‌های محصول تغییر می‌کند [١٦]. با کاهش مقادیر سبزدانه‌ها، میزان جذب نور در طول‌موج‌های ٦۵۰ تا ٦٨۰ nm کاهش می‌یابد و نور بیشتری پراکنش می‌شود [۱۷]. در طیف استفاده‌شده در پژوهش ناگاتا و همکاران (۲۰۰٦)، جذب بالا در ٦۷۵ nm به علت وجود کلروفیل و در بازه ۹٦۰ تا ۹۸۰ nm به علت رطوبت گزارش شده است [۱۸]. در کیفیت‌سنجی انبه طول‌موج ۹۸۰ nm به‌عنوان باند جذبی سلولز و نشاسته عنوان شده است [۱۹]. همچنین بیان شده است که اثر جذبی در این طول‌موج حاصل از اثر مکمل آب، نشاسته و سلولز در سلول‌های بافت است [۲۰ و ۲۱]. در بررسی طیف حاصل از سیب‌زمینی، قله نزدیک به طیف ۹۷۰ و ۷٦۰ nm مربوط به آب است و تفاوت در ارتفاع قله‌ها نشان‌دهنده از دست رفتن وزن غده‌ها به سبب افت و یا تبدیل برخی مواد و آب در طول انبارداری است. قله‌های جذب در طیف‌های nm ٦۷۰، ۷۱۰، ۷۹۸، ۸۳۰ و ۹٦۲ نیز وجود دارد [۲۲]. همچنین، یک قله جذبی گلوکز و فروکتوز حوالی طیف ٦۷۰ نانومتر نیز وجود دارد. علاوه بر این، اگر دمای انبارداری نیز از □ ۲۵ به □ ۵ کاهش یابد، طیف حاصل از سیب‌زمینی تغییرات زیادی در حوالی ٦۷۰ تا ۷۱۰ nm نشان داده است. بر این اساس، تغییرات طیف مربوط به این بازه به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم بر پایه تغییرات مقدار شکر غده‌های سیب‌زمینی در طول انبارداری است. مقادیر طیف در ۷۹۸ و ۸۲٦ nm نیز می‌تواند مربوط به فروکتوز و گلوکز باشد [۲۳].

سیب زمینی گیاهی سرمادوست و متعلق به خانواده سولانوم (Solanum) است. تکثیر این گیاه به وسیله غده یا با استفاده از بذر انجام می‌شود. سیب زمینی جزء گیاهان دولپه‌ای یکساله و علفی است که به علت توانایی تکثیر از طریق غده ظرفیت بالقوه چند ساله بودن را نیز دارد. این محصول از نظر اهمیت و ارزش غذایی، بعد از تخم مرغ، در ردیف دومین منبع غذایی ساده جهان قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه هدف اصلی از کشت سیب‌زمینی، استفاده خوراکی انسان است، غده‌ها پس از برداشت باید به‌گونه‌ای نگهداری شوند که ازنظر کیفیت تأمین‌کننده این هدف باشند. برخلاف سیب‌زمینی‌های بهاره و تابستانه، سیب‌زمینی‌های پاییزه خاصیت انبارداری و نگه‌داری بیشتری دارند و تحت شرایط مطلوب در انبارهای تجاری می‌توان آن‌ها را به مدت ۱۰ تا ۱۲ ماه ذخیره نمود. محل ذخیره‌سازی باید تاریک، دارای تهویه مناسب و برای ذخیره‌سازی طولانی‌مدت، دمای محیط نزدیک به □ ٤ باشد [٢٤ و ۲۵].

تغییرات کیفی در غدد سیب‌زمینی در طول انبارداری در اثر کاهش یا افزایش میزان رطوبت بافت آن‌ها در فرآیندهای تعریق و تنفس، تغییر میزان کلروفیل، هیدرولیز شدن گرانول‌های نشاسته و تبدیل به گلوکز، و تغییر در برخی محتواهای شیمیایی است. همچنین، در این دوران مانند همه محصولات کشاورزی روندی تخریبی در ساختار سلولی و دیواره سلول‌ها ناشی از تغییرات آنزیمی نیز وجود دارد [۵۲ و ۵۳]. بنابراین، با توجه به تغییرات ساختاری و تغییرات در خواص مکانیکی و محتوای شیمیایی سیب‌زمینی در طول انبارداری، تغییرات خواص نوری مرتبط با آن‌ها نیز مورد انتظار است و می‌توان از پتانسیل روش تصویربرداری پس پراکنش نور در نظارت و ارزیابی این تغییرات استفاده کرد. با اینحال تاکنون تنها ویژگی مکانیکی بررسی شده در پژوهش ها خاصیت سفتی بوده است. بنابراین هدف کلی پژوهش حاضر، ارزیابی پتانسیل روش تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر به‌عنوان ابزاری برای مشاهده، بررسی و پیش‌بینی تغییرات مکانیکی ایجادشده در بافت سیب‌زمینی در ناحیه مرئی و مادون‌قرمز طیف الکترومغناطیس در طول انبارداری بلند مدت شش ماه بود.

1 . NIR

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

آزمایش‌ها بر روی ۵۹٤ غده سیب‌زمینی (رقم آگریا) برداشت‌شده از یک مزرعه واقع در استان چهارمحال و بختیاری در اواخر تابستان ۱۳۹٤ به‌صورت تصادفی و انتخابی صورت گرفت. خاک غده‌ها تمیز و غده‌ها در مجموعه‌های ۹۹ تایی بسته‌بندی شدند و به یک سردخانه صنعتی و در مخزنی تاریک، در دمای ۳ ^{0}C الی ۵ ^{0}C و رطوبت ۷۵ الی ۸۵ درصد، برای مدت شش ماه نگه‌داری شدند. در سررسید هرماه، یک مجموعه از غده‌ها به‌منظور تصویربرداری به آزمایشگاه منتقل شدند. قبل از انجام آزمون‌ها، غده‌های سیب‌زمینی به مدت ۱۲ ساعت در فضای محیطی آزمایشگاه قرار گرفتند تا به دمای طبیعی محیط برسند. بر روی غده‌های موجود در هر مجموعه، در ابتدا تصویربرداری لیزری پس پراکنش و سپس آزمون مکانیکی فشاری تک‌محوری انجام شد.

۲-۲- تصویربرداری

سیستم تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر استفاده‌شده (شکل ۱)، متشکل از یک دوربین با حس‌گر CMOS (DH-IPC-HF8301E، چین) به همراه عدسی بزرگنمایی (۲/۸ mm تا ۱۲، CCTV 1.3 اینچ)، سه دیود لیزر با طول‌موج نور ٦۵۰، ۷۸۰ و ۹۸۰ nm، در نوع کم‌توان (۵ mW) و با قطر ۳ mm به‌عنوان منابع نور و یک سیستم رایانه‌ای جهت کنترل دوربین و ثبت و ذخیره تصاویر بود. جهت تصویربرداری لیزری از نمونه‌ها و به جهت جلوگیری از رسیدن نورهای اضافی محیط به دوربین، یک اتاقک تاریک ساخته و استفاده شد. علاوه بر این، از فیلترهای مرتبط با هر طول‌موج نیز استفاده شد. زاویه برخورد نور با نمونه در حدود ۳۰ درجه نسبت به راستای محور دوربین با نمونه بود و فاصله دوربین تا نمونه در حدود ۸۰ mm و فاصله دیود لیزر تا نمونه به میزان ۲۰۰ mm تنظیم شد. این تنظیمات به جهت دست یافتن به قرینگی لازم و ضروری در تصاویر پس پراکنش نهایی انجام شد [۲٦]. در هرماه و برای هر طول‌موج لیزر، تعداد ۳۳ عدد سیب‌زمینی در روبروی دوربین و لیزر و در فواصل معین مستقر و به‌صورت نقطه‌ای پرتودهی شدند. بعد از ورود نور به بافت میوه، بخشی از نور پس پراکنش شده به سطح میوه توسط دوربین ضبط و به رایانه منتقل می‌شد. تصاویر حاصل در قالب BMP و در اندازه ۵۷٦ × ۷۰٤ پیکسل در رایانه ذخیره شدند. درنهایت، برای هر غده سیب‌زمینی، یک تصویر پس پراکنش تهیه و ذخیره شد.

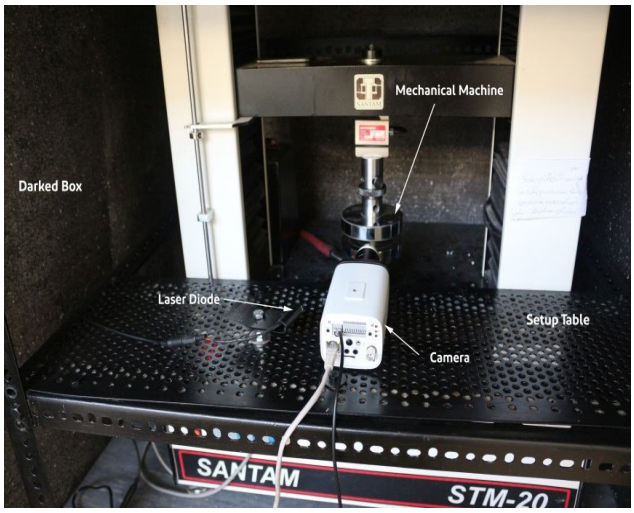

Fig 1 Mechanical test machine and backscattering imaging system

۲-۳- پردازش تصاویر پس پراکنش

طبق آزمون‌های اولیه، تصاویر تهیه‌شده بدون پیش‌پردازش خاصی نیازهای پژوهش را به‌خوبی فراهم کردند. پراکندگی روشنایی در تصاویر پس پراکنش به‌دست‌آمده، به‌صورت متقارن و حول نقطه برخورد نور بودند و شدت پیکسل‌ها از مرکز نقطه اشباع به سمت بیرون و به‌صورت شعاعی به‌صورت تدریجی کاهش پیدا کرد (شکل ۲-a تا ۲-c).

۲-۳-۱- فرکانس شدت نور

در این بخش تصاویر رنگی پس پراکنش با محاسبه میزان درخشندگی به تصاویر تک‌رنگ تبدیل شدند (رابطه ۱) [۲۷]:

$$I = 0.3I_r + 0.59I_g + 0.11I_b \qquad (1)$$

در رابطه فوق I به‌عنوان مقیاس خاکستری شدت نور و متشکل از ضرایبی از میزان شدت نور در مؤلفه‌های رنگی سه‌گانه سبز، قرمز و آبی است. مقادیر خاکستری پیکسل‌ها در تصاویر برای محاسبه هیستوگرام تصویر در نظر گرفته شدند (شکل ۲-d). همان‌طور که در شکل ۲-d نمایان است، فرکانس در مقادیر خاکستری کمتر از ٤۰ (سطح خاکستری) به دلیل نویز پس‌زمینه همانند مقادیر بالاتر از ۲٤۰ (سطح خاکستری) به دلیل بازتابش مستقیم نور لیزر افزایش می‌یابد. الگوریتم آستانه گیری دوگانه برای تنظیم آستانه عمومی تصاویر استفاده شد. در این الگوریتم، اولین عطف هیستوگرام، الگوریتم را برای جداسازی سیگنال بخش روشن پس پراکنش از پس‌زمینه توانمند کرد. اولین نقطه عطف هیستوگرام در نقطه ٤۰ برای میانگین تمامی

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

سیب‌زمینی‌ها با انحراف معیار ۷/۰۷ به دست آمد. بنابراین، مقادیر بالاتر از ٤٠ برای جداسازی نقاط پراکنش نور از پس‌زمینه در نظر گرفته شد. پس‌ازآن، تمامی نقاطی که مقادیر خاکستری فراتر از صفر داشتند، به میزان برابر یا مساوی آستانه قرار گرفتند. همچنین، به‌منظور حذف نویز یک فیلتر سطح میانه بر روی تصاویر اعمال گردید. نقاط برخورد نور نیز به دلیل اثر کم یا عدم تأثیر روی نتایج در تمامی تصاویر حذف نشدند [۱۰]. به‌منظور پیش‌بینی مقادیر خواص مکانیکی میزان فرکانس تکرار شدت به مقدار بیش از ٤٠، در سه طول‌موج ٦٥٠ nm، ۷۸۰ و ۹۸۰ مورداستفاده قرار گرفت. ماتریس نهایی ویژگی‌ها در این بخش در اندازه ۳ (طول‌موج) در ۲۰ (مقدار فرکانس در محدوده ٤٠ تا ۲٤٠ واحد سطح خاکستری) حاصل شد.

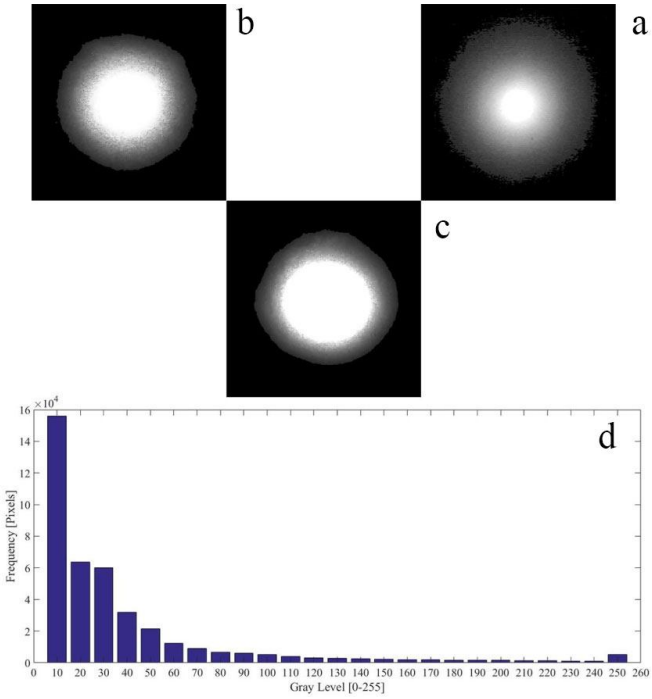

Fig 1 The segmented image at wavelength of (a) 650 nm, (b) 780 nm, and (c) 980 nm; and (d) the histogram of the resulted image at 650 nm

۲-۳-۲- تابع گوسی درجه اول

برای هر تصویر پس پراکنش به‌دست‌آمده از هر نمونه، مقادیر ضریب دامنه (a_1) و ضریب عرض در نصف (مقدار عرض در نیمی از حداکثر مقدار دامنه) (c_1) از برازش تابع گوسی درجه اول روی خروجی پس پراکنش مؤلفه قرمز به دست آمد. رابطه ۲ تابع منحنی گوسی درجه اول را نشان می‌دهد:

$$f(x) = a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} \qquad (2)$$

که در آن مقادیر a1، b1 و c1 به ترتیب معرف ضریب دامنه، ضریب مرکزی و ضریب عرض در نصف حداکثر هستند. در این رابطه، x و f(x) نشان‌دهنده موقعیت و شدت ردیفی از پیکسل‌ها است که در آن ردیف پیکسلی با حداکثر شدت نور در مؤلفه قرمز آن وجود دارد.

۲-٤- آزمون فشاری تک محوری

پس از تصویربرداری، برای بررسی خواص مکانیکی سیب‌زمینی‌ها توسط آزمون‌های فشاری تک‌محوری از ماشین آزمون مواد ستام مدل STM-20 (ساخت ایران) با ظرفیت ۲۰ ton و مجهز به نیروسنج ۵۰۰ N (بونگشین، کره[1]) استفاده شد. در این آزمون، از نمونه‌های استوانه‌ای استخراج‌شده از هر غده با ابعاد ۱۵×۱۵ mm استفاده گردید. برای استخراج این نمونه‌ها، از قالب‌های فولادی ضدزنگ که به‌دقت تیز شده بودند، استفاده شد. نمونه‌ها روی یک سطح صلب قرار گرفتند و توسط فک متحرک دستگاه با سرعت ۵۰ mm/min [۲۸] تا لحظه گسیختگی بارگذاری شدند. هم‌زمان با شروع آزمون فشار، نرم‌افزار مربوط به دستگاه، منحنی نیرو ـ جابجایی محصول (شکل ۳) را رسم و داده‌های هرلحظه را ثبت کرد. در آزمون فشار تک‌محوری، ویژگی‌های مکانیکی مانند ضرایب الاستیسیته مماسی و سکانتی، تنش گسیختگی، کرنش گسیختگی، انرژی گسیختگی و چقرمگی از نمودار نیرو ـ تغییر شکل، و تنش ـ کرنش حاصل به دست آمدند.

1. Bongshin, Korea

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

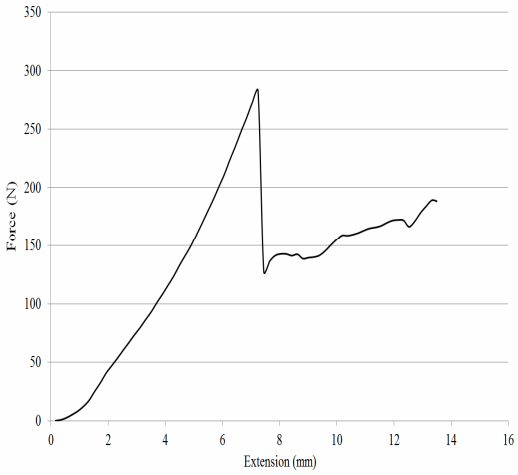

Fig 3 Force vs Extension curve resulted by uniaxial compression test of potato

با برازش یک چندجمله‌ای درجه سه (رابطه ۳) با داده‌های منحنی نیرو ـ تغییر شکل مقادیر شیب لحظه‌ای موردنیاز برای رابطه ٤ به دست آمد. به دلیل غیرخطی بودن منحنی نیرو ـ تغییر شکل بافت سیب‌زمینی، مدول الاستیسیته مماسی مطابق تراکم‌های ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰ درصد محاسبه شد [۲۸].

$$F(\Delta L) = a_0 \cdot \Delta L + a_1 \cdot \Delta L^2 + a_2 \cdot \Delta L^3$$

(3)

$$E_a = \left(\frac{F/A}{\Delta L/L} \right) = \frac{dF}{d(\Delta L)}\Big|_{\%Comp.} \cdot \left(\frac{L}{A} \right)$$

(4)

در رابطه بالا، A مساحت سطح مقطع استوانه‌ای نمونه (mm^2)، F نیرو (N)، L طول نمونه (mm)، ΔL تغییر شکل (mm)، a_i ها مقادیر ثابت و E_a ضریب الاستیسیته در آزمون محوری (در واحد Pa) هستند. با به دست آمدن اولین نقطه گسیختگی در منحنی نیرو ـ تغییر شکل هر آزمون، نیروی گسیختگی تعیین شد. مقادیر تنش با تقسیم مقدار نیروی هر نقطه به مساحت سطح مقطع و کرنش آن با تقسیم به طول اولیه نمونه استوانه‌ای به دست آمدند. تنش و کرنش گسیختگی به ترتیب از تنش و کرنش متناظر با نقطه گسیختگی در نمودار تنش ـ کرنش به دست آمد. همچنین، انرژی گسیختگی و مقدار چقرمگی به ترتیب از محاسبه سطح زیر منحنی‌های نیرو ـ جابجایی [۲۹] و تنش ـ کرنش هر نمونه حاصل شد. آزمون فشار در ۹۹ تکرار برای هرماه انجام شد و در هر تکرار یک نمونه سیب‌زمینی مورداستفاده قرار گرفت.

۲-۵- مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها

برای هر نمونه پارامترهای a1، c1 از تابع گوسی و مساحت سطح پراکنش و همچنین ۲۰ فرکانس شدت نور به‌عنوان ورودی برای ساخت، آموزش و آزمون مدل پیش‌بینی خواص مکانیکی استفاده شد. در آغاز فرآیند مدل‌سازی، از یک مدل غیرخطی مبتنی بر روش‌های مدل‌سازی عصبی ـ فازی[1] و به‌منظور کاهش تعداد قوانین فازی، از روش‌های خوشه‌بندی[2] استفاده شد. یکی از معمول‌ترین ابزارهای خوشه‌بندی، روش خوشه‌بندی فازی c-means یا FCM[3] است [۳۰]. در این روش، فضای عملیاتی سیستم به مناطق مختلف پیکربندی می‌شود؛ به‌طوری‌که هر قانون نشان‌دهنده یک مدل خطی محلی در منطقه مربوط به خودش است [۳۱]. به جهت ارزیابی نتایج حاصل از تکرار فرآیند این الگوریتم و احراز شرایط توقف در تکرارها، شاخص‌های اعتبار و ارزیابی مختلفی پیشنهادشده است. یکی از این توابع توسط ژی و بنی[4] [۳۲] ارائه گردیده است. این تابع وابسته به واریانس کل از اندازه‌گیری مسافت هندسی و جداسازی مراکز خوشه‌ها است که توسط رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$J_{XB} = \sum \sum (u_i^k)^r (D_{ik})^2 / \left(m \cdot \min_{i \neq k} (D_{ik})^2 \right)$$

(5)

در رابطه فوق u درجه عضویت، D فاصله مراکز خوشه‌ها با هر داده، m تعداد نقاط داده‌ها و c بیانگر تعداد خوشه‌ها است. در انتهای فرآیند نیز به‌منظور افزایش اعتبار و اطمینان‌پذیری مدل‌ها، عملیات بهینه‌سازی با استفاده از روش اعتبارسنجی k ـ بخشی[5] مورداستفاده قرار گرفت. در این پژوهش، k برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد. بنابراین، عمل تغییر مکان تصادفی داده‌ها ۱۰ بار تکرار گردید؛ به‌گونه‌ای که ۱۰ مجموعه داده مشابه با مجموعه اصلی، اما با تفاوت در نحوه چیدمان داده‌ها نسبت به هم تشکیل و در هرکدام از این مجموعه‌های جدید، تقسیم‌بندی دوگانه داده‌ها برای ساخت و ارزیابی تقاطعی صورت پذیرفت. بهترین مدل در مرحله ارزیابی از بین ده مدل به‌دست‌آمده بر اساس محاسبه میانگین مربعات خطای به‌دست‌آمده و ضریب تبیین به دست آمد.

1. Neuro-Fuzzy Modeling Techniques
2. Clustering
3. Fuzzy C-Means
4. Xie and Beni
5. K-fold Cross Validation

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

آماده‌سازی داده‌ها، محاسبات و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها و فرآیند مدل‌سازی با نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۱۶، به‌منظور بررسی تغییرات خواص مکانیکی و نوری در شش دوره انبارداری و پیش‌بینی این خواص انجام و نتایج به‌دست‌آمده برای مقایسه دوره‌های مذکور ازنظر تمامی مشخصه‌های هدف بررسی شدند. همچنین، در این گزارش بررسی و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت پذیرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توصیف نتایج آزمون فشاری تک‌محوری

شکل ٤ الگوی منحنی تنش و کرنش غده‌ها را برای هرکدام از ٦ دوره انبارداری نشان می‌دهد. طبق نتایج روند کاهشی در قله منحنی در طول دوره انبارداری وجود دارد؛ هرچند این قله‌ها بسیار به هم نزدیک‌اند. در این آزمون مجموعاً ٤١٥٨ مقدار به‌عنوان خروجی (٦ دوره × ۹۹ غده سیب‌زمینی در هر دوره × ۷ ویژگی) حاصل شد. شکل‌های ۵ تا ۷ مقایسه میانگین هفت ویژگی استخراج‌شده شامل مدول الاستیسیته ظاهری در چهار مقدار تراکم مختلف، حداکثر نیروی شکست و مدول الاستیسیته سکانتی و چقرمگی را برای شش دوره انبارداری سیب‌زمینی نشان می‌دهد. در تمامی شکل‌ها، حروف لاتین یکسان نشان از نبود تفاوت معنادار در محدوده ۵ درصد است.

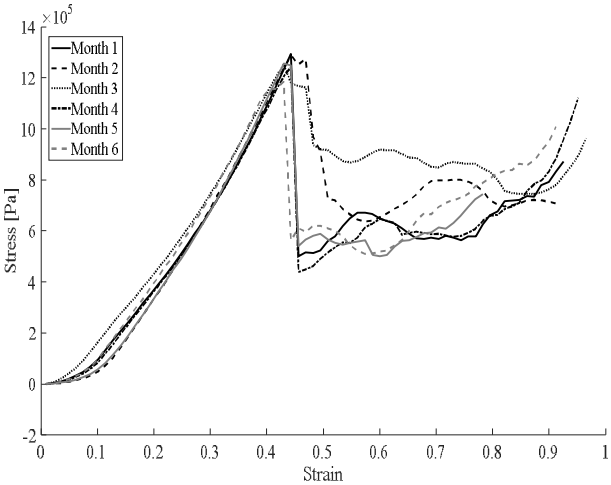

Fig 4 Stress-Strain curves of potato tubers for each month during storage

سفتی و چسبندگی درونی سلول‌ها در میوه‌ها شدیداً وابسته به مواد پکتیکی لایه میانی است. فرآیند حل شدن مواد پکتیک سبب کاهش اثر آن‌ها به‌عنوان ماده سیمانی شده و سبب نرم شدگی بافت و جدا شدن سلول‌ها می‌گردد [۳۳]. در شکل ۵، به‌غیراز کاهش در منحنی تغییرات مدول الاستیسیته در تراکم ۵ درصد (EC2)، غالب تغییرات در مدول الاستیسیته معنادار بود. در هر مرحله که در مقادیر مدول الاستیسیته کاهشی مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده اثر گذر زمان در طول انبارداری روی بخش‌هایی از بافت مثل لایه میانی، سلول‌ها و دیواره‌های سلولی و همچنین نشان‌دهنده تلفات و افت در یکپارچگی ساختاری کل نمونه و افزایش تغییرشکل پذیری آن است. به عبارتی، افت چسبندگی بین سلول‌ها و افت در فرآیند انتقال جرم از طریق غشای آسیب‌دیده (اتلاف آب و املاح) در فرآیند تخریب در طول ذخیره‌سازی نقش مؤثری داشتند. معمولاً پاره شدگی‌های گسترده در غشای سلولی و خارج شدن و نشت آب سبب تغییرات بزرگ در مدول الاستیسیته می‌شود [٣٤]. بنابراین، به نظر می‌رسد شرایط نگهداری، نوع سیستم انبار و سردخانه و نوع واریته سیب‌زمینی سبب کاهش نرخ این افت شده است. همچنین، وجود نشاسته از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی سیب‌زمینی است [۳۵]. این ماده غالباً در مناطق بیرونی غده (قشر) وجود و تجمع دارد [٣٦]. بنابراین، کاهش مدول الاستیسیته می‌تواند به سبب افت میزان نشاسته و تبدیل آن به قند محلول باشد [۳۷ و ۳۸].

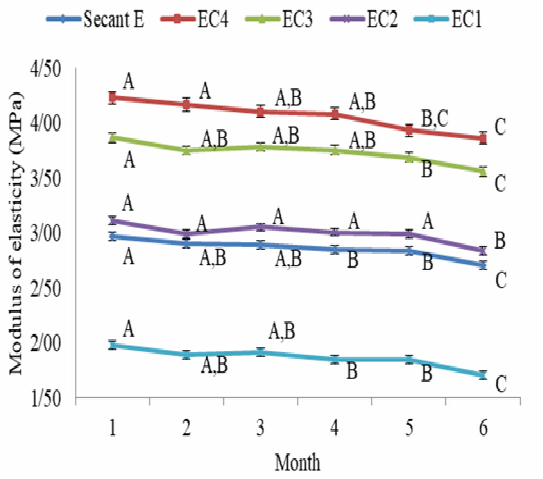

Fig 5 Comparison of the mean tangent and secant elastic modulus during storage; E represents the modulus of elasticity, C represents the compression term and the numerical index represents a compression rate of 2.5, 5.0, 7.5 or 10 %.

با توجه به نتایج، مقدار کاهش مقادیر EC4، EC3، EC2 و EC1 در انتهای دوره نسبت به ابتدای دوره انبارداری به ترتیب برابر با ۱۵/۹۰، ۹/٦۷، ۸/٦۳ و ۹/۵۵ درصد بود. در شرایط

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

آزمایشگاهی این پژوهش، مدول الاستیسیته روندی کاهشی در طول انبارداری داشته است. این‌گونه تغییرات کاهشی در تحقیقات معدود مشابهی نیز پیشتر گزارش شده است [۲٤، ۳۹ و ٤۰]. البته در برخی از این پژوهش‌ها، اثرات طول دوره انبارداری روی تغییرات مدول الاستیسیته به صورت غیر معنی دار در آزمون‌های مقایسه میانگین گزارش‌شده است [٤۱].

در شکل ٦ روند کاهشی حداکثر نیرویی که نمونه‌های استخراج شده از غدد سیب‌زمینی قبل از شکست می‌توانستند تحمل کنند، در شش دوره انبارداری نشان داده‌شده است. طبق آزمون مقایسه میانگین دانکن، این کاهش در ماه چهارم و ماه ششم معنادار است. کیفیت و روند تغییرات حداکثر نیروی شکست سیب‌زمینی نسبت به شرایط مختلف فشار درون‌سلولی نمونه در تحقیقات مشابه پیشین متفاوت است. نتایج عملی ارائه‌شده توسط دبائردیمیکر و همکاران (۱۹۷۸) [٤۲] و بروسویتز و همکاران (۱۹۸۹) [٤۳] نشان داد که تنش در نقطه شکست بافت سیب‌زمینی با کاهش پتانسیل آبی نمونه افزایش می‌یابد. دیل و همکاران (۱۹۸۰) نیز کاهش حداکثر نیروی شکست سیب‌زمینی در طول انبارداری را در مواجهه با شرایطی که سبب افزایش فشار سلولی محصول می‌شد، گزارش کردند [٤٤].

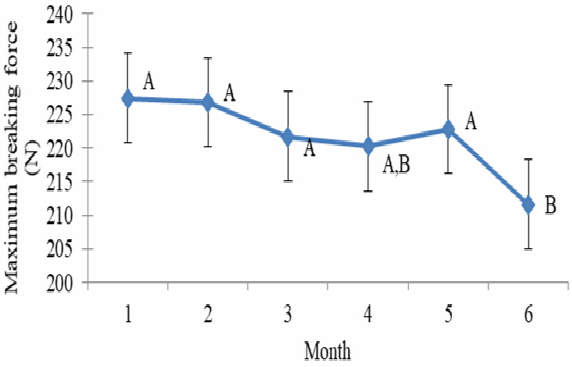

Fig 6 Comparison of the mean of the maximum failure force during the storage

به نظر می‌رسد زمانی که فشار داخلی سلول‌ها بالا است و دیواره سلول در معرض فشار است، یک نیروی کم منجر به شکست سلولی می‌شود [٤٥]. در این پژوهش، نتایج تحقیق که حاکی از کاهش حداکثر نیروی شکست، خصوصاً در ماه‌های انتهایی دوره انبارداری است، با توجه به مباحث فوق، بیشتر نمایانگر افزایش در فشار تورژسانس داخلی سلول‌های غده‌های سیب‌زمینی به دلیل غلبه فرآیند تولید آب با تنفس بر فرآیند از دست دادن آب با تبخیر است. این تغییرات منجر به کاهش در مدول ارتجاعی کلی بافت نمونه‌ها شده است.

در شکل ۷ روند کاهشی میزان چقرمگی در طول دوره انبارداری مشهود است. این کاهش در تحقیقات پیشین نیز گزارش شده است [٤٦، ٤۷ و ٤۸]. در حین انبارداری ماده خشک، خصوصاً کربوهیدرات در غده‌ها تبدیل به دی‌اکسید کربن و آب می‌شود. در همین حین، تبخیر نیز سبب کاهش مقدار آب و افت وزنی سیب‌زمینی‌ها می‌شود. کاهش در میزان چقرمگی در طول انبارداری آهسته است؛ اما در این دوره افت غیرقابل بازگشتی در یکپارچگی غشای سلولی ایجاد می‌شود [٤٦]. پژوهش‌های بسیاری بر اثبات این ادعا که خواصی مانند مدول الاستیسیته ظاهری و یا سفتی متأثر از حجم آب درون نمونه آزمایشی هستند، صحه گذاشته‌اند [٤۹، ٥۰ و ٥۱].

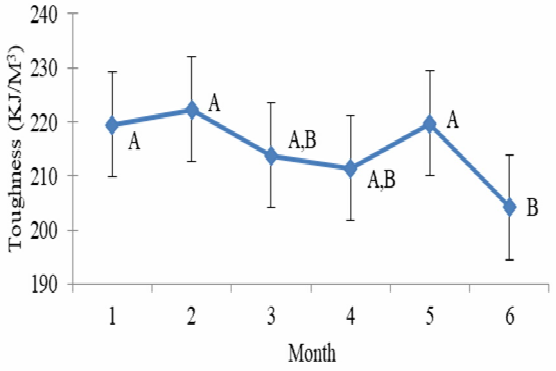

Fig 7 Comparison of the mean of toughness extracted from the uniaxial compression test during storage

۳-۲- توصیف نتایج تصویربرداری پس پراکنش

شکل ۸ تصویر مؤلفه قرمز پراکنش نور حاصل از یک نمونه غده سیب‌زمینی در طول‌موج ٦٥۰ nm در ماه اول را به همراه منحنی گاوسی برازش شده نشان می‌دهد. در شکل ۸ نمایان است که با دور شدن از یک مساحت مرکزی حوالی پیکسل ۳۰۰، میزان شدت نور پراکنش شده کاهش می‌یابد. همچنین، در شکل ۸ مقادیر سه ثابت تابع گوسی درجه اول به همراه خطا و دقت برازش تابع بر داده‌های شدت نور پراکنش شده نشان داده‌شده‌اند. مساحت منطقه مرکزی برای طول‌موج‌های ۷۸۰ و به دنبال آن برای ۹۸۰ nm به‌مراتب مساحت وسیع‌تری از طول‌موج ٦٥۰ nm است (شکل ۷ و ۸). همچنین، شیب کاهش شعاعی شدت نور در انتها و ابتدای منحنی نسبت به طول‌موج ٦٥۰ nm سریع‌تر است.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

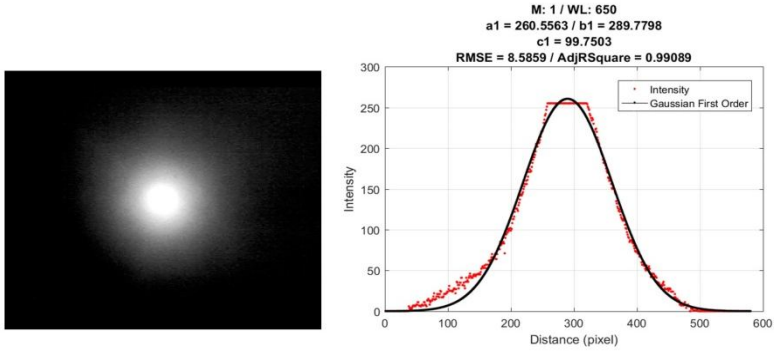

Fig 6 Red component of light diffusion from a potato tuber sample at 650 nm in the first month

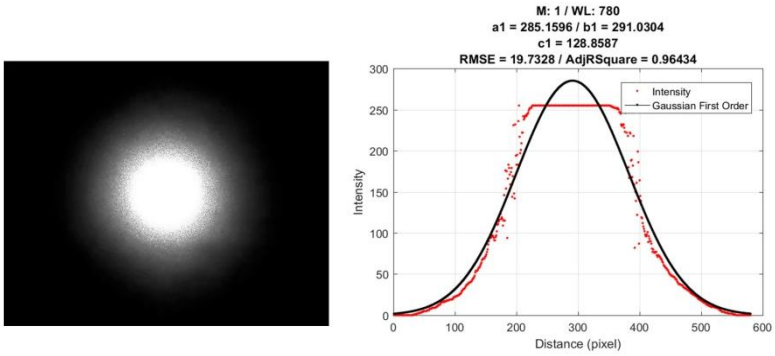

Fig 7 Red component of light diffusion from a potato tuber sample at 780 nm in the first month

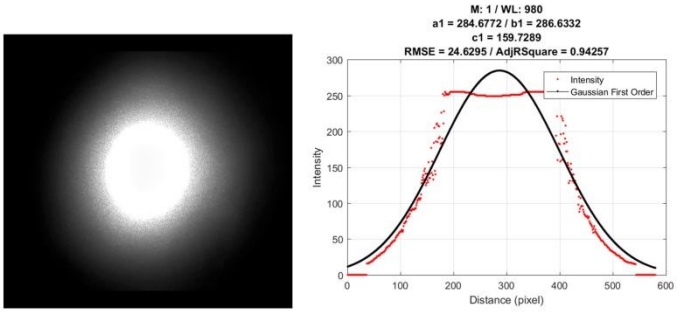

Fig 8 Red component of light diffusion from a potato tuber sample at 980 nm in the first month

میانگین ضرایب دامنه، مرکزیت و نصف حداکثر برای هر سه طول‌موج ٦٥٠ nm، ٧٨٠ و ٩٨٠ در شش ماه در شکل ٩ باهم مقایسه و نشان داده‌شده‌اند. با توجه به شکل ٩-a روشن است که میزان ضریب دامنه (به‌غیراز طول‌موج ٦٥٠ nm که تقریباً روند نامشخصی دارد)، در طول‌موج‌های ٧٨٠ و ٩٨٠ nm پس از یک کاهش تا ماه سوم، ادامه یک‌روند افزایشی را در طول شش ماه داشته است. این یعنی هرچه از زمان انبارداری سیب‌زمینی‌ها گذشته است، با تغییر ماهیت و افت پراکنش کننده‌های حساس به طول‌موج‌های ٧٨٠ و ٩٨٠ nm، نور از منطقه با مساحت بیشتری پراکنش شده است. تغییرات رطوبتی نمونه‌ها و همچنین تغییر ساختار پراکنش کننده‌های نشاسته و تبدیل آن‌ها به قند می‌تواند عامل این اتفاق باشد. در شکل ٩-b روند تغییراتی در ضریب مرکز، یک‌روند نامشخص و رو به ثباتی را نشان داد. پایین بودن مقدار ضریب نصف حداکثر به معنای نرم‌تر بودن شیب صعود و فرود کناره‌های منحنی شدت نور است. نمود این تفاوت شیب در مقایسه شکل‌های ٦ تا ٨ مشاهده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، نور توانسته است به میزان بیشتری نفوذ و پراکنش شود. در غیر این صورت، نور پس از ورود به نمونه، به هنگام نفوذ در عمق بافت توسط ذرات ساختاری نمونه جذب‌شده است. در طول‌موج ٦٥٠ nm، پارامتر نصف حداکثر پس از کاهش در ماه دوم تا انتهای دوره روند ثابتی را طی کرده است. می‌توان این تغییر را متأثر از حذف کلروفیل های نمونه‌ها دانست. همچنین، در طول‌موج ٧٨٠ nm روند تا ماه سوم افزایشی و سپس تا انتهای دوره کاهشی بوده است و این طول‌موج توانسته است به عمق بیشتری از نمونه وارد شود که نشان‌دهنده تغییر و افت جذب‌کننده‌های این طول‌موج مانند آب است. در طول‌موج ٩٨٠ nm نیز درگذر دوره انبارداری این ضریب روندی کاهشی داشته است. با حساسیت نشاسته به این طول‌موج و تبدیل این ذرات به قند در طول انبارداری، دیگر جذبی صورت نگرفته و نفوذ بیشتر و بیشتر شده است.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

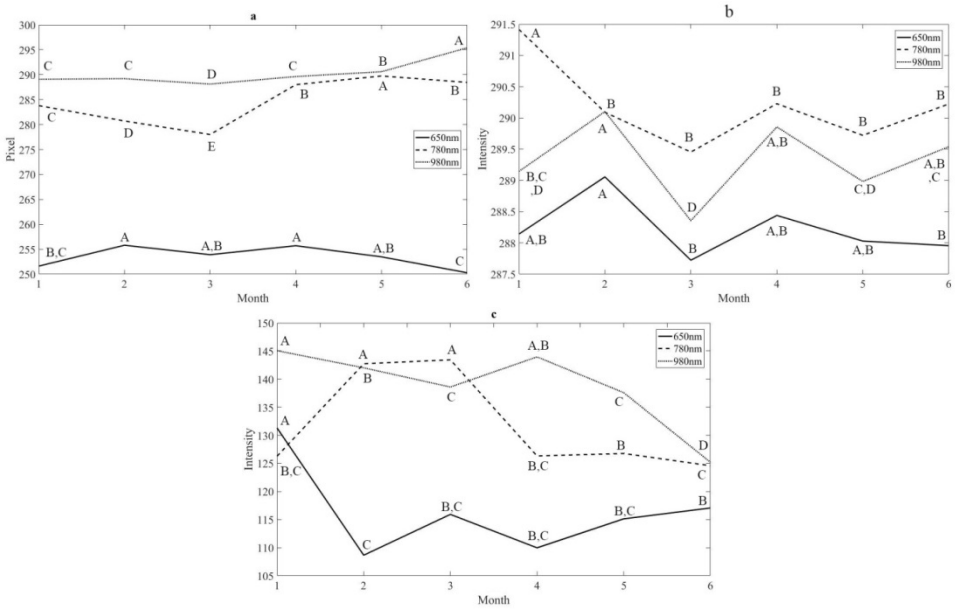

Fig 9 Comparison of the mean values of the (a) amplitude, (b) center and (c) maximum half; at 650, 780 and 980 nm in six months

۳-۳- مدل‌سازی

مجموعه‌ای از تمام جواب‌های غیرمغلوب در تمام فضای جستجوی الگوریتم NSGA-II در تمامی مدل‌های شرکت داده‌شده در فرآیند بهینه‌سازی برای رسیدن به مدل نهایی به دست آمد و مورد تحلیل قرار گرفت تا بهترین نتیجه به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شود. برای تمام ویژگی‌ها (فرکانس شدت نور + ثابت‌های تابع گوسی درجه اول + مساحت سطح پراکنش) و برای خاصیت‌های مکانیکی، مقادیر تابع اعتبارسنجی (J_{XB}) برای تعداد خوشه‌های ۲ تا ۱۲ تخمین زده شد. نتایج حاصل نشان داد که در نظر گرفتن ۱۱ مرکز خوشه برای مدل به‌منظور پوشش دامنه تغییرات متغیرها مناسب است. با به دست آوردن سه پارامتر تعداد بهینه خوشه، موقعیت مراکز خوشه و توابع عضویت متناسب با آن‌ها، ساختار مدل فازی تعریف گردید. به جهت بهینه‌سازی مدل‌ها، الگوریتم ANFIS بر روی مدل های فازی اعمال شد. گزارش انجام فرآیند مدل‌سازی و تحلیل نتایج حاصل از آن در پیش‌بینی شاخص‌های مکانیکی غده‌های سیب‌زمینی، با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده از تصاویر پیسه لیزری تهیه‌شده در مرحله پیش از آزمون‌های مکانیکی، در جدول ۱ ارائه‌شده است. با توجه به نتایج، در پیش‌بینی مقادیر مدول الاستیسیته به‌ویژه در تراکم اول و چهارم و بیشینه نیرو، استفاده از لیزر با طول‌موج ٦٥٠ nm و برای مدول الاستیسیته سکانتی استفاده از طول‌موج ۷۸۰ nm کارامدتر بوده است. در پیش‌بینی پارامتر چقرمگی نیز طول‌موج ۹۸۰ nm نتایج بهتری ارائه کرد. در بین تمامی مدل‌های استخراج‌شده از مجموع ٢٤ مدل نهایی (۳ طول‌موج × ۱ مجموعه ویژگی × ۸ خاصیت مکانیکی)، مدل‌های پیش‌بینی مدول الاستیسیته در تراکم اول با (R_{CV}=0.894, R_P=0.815, RMSECV≈0.329, RMSEP=0.434) و در تراکم چهارم با (R_{CV}=0.891, R_P=0.827, RMSECV=0.163, RMSEP=0.209) و با استفاده از طول‌موج ٦٥٠ nm بیشترین دقت را کسب کردند.

Table 1 Specifications of the best models to predict the mechanical properties of potatoes

Wavelength	Mechanical property	Num. features	RMSECV	RMSEP	R_{CV}	R_P
650 (nm)	EC4 (Mpa)	10	0.163	0.209	0.891	0.827
	EC1 (Mpa)	9	0.329	0.434	0.898	0.815
	F_{max} (kN)	10	0.017	0.019	0.864	0.811
780 (nm)	ESec (Mpa)	9	0.146	0.172	0.870	0.808
980(nm)	Toughness (MJ/m^3)	7	0.022	0.029	0.800	0.874

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کاربرد عملیاتی تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر برای پیش‌بینی خواص مکانیکی بافت سیب‌زمینی در طول انبارداری بررسی و تا حد رضایت‌بخشی تأیید شد. از این روش با سه دیود لیزر با طول‌موج‌های مختلف در بازه مرئی و مادون‌قرمز نزدیک برای ارزیابی غیر مخرب تغییرات مکانیکی موجود در بافت سیب‌زمینی‌ها و همچنین ساختار متشکله آن استفاده شد. تابع گوسی درجه اول با سه پارامتر مستقل با دقت مناسب پروفایل‌های پس پراکنش را با مقدار میانگین ضریب تبیین ۰/۹۹۸ توصیف کرد. پارامترهای این تابع بسته به وضعیت سیب‌زمینی که در کدام ماه انبارداری باشد و نسبت به طول‌موج استفاده‌شده، متفاوت حاصل شدند. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر تابع برازشی استفاده‌شده نشان داد که استفاده از طول‌موج‌های محدوده مرئی و نزدیک به مادون‌قرمز به همراه استفاده از مدل‌های منتج از ویژگی‌های تابع گوسی و همچنین مقادیر فرکانس شدت می‌تواند در ارزیابی خواص مکانیکی سیب‌زمینی مؤثر باشد. روش نوری تشریح شده در این پژوهش، مبتنی بر پدیده پس پراکنش نور لیزر ارائه کننده یک روش نوآورانه و قابل اطمینان برای کشف غیرمخرب و سریع خواص مکانیکی است. اگرچه پیش از کاربردهای عملی و تجاری، تحقیقات بیشتری برروی این روش تصویربرداری در انواع دیگر سیب‌زمینی ضروری به‌نظر می‌رسد. علاوه‌براین، برخی مسائل مانند قابل‌حمل‌بودن تجهیزات برای بررسی تمامی سطح غده و یا توانایی تصویربرداری در طول‌موج‌های متنوع و با سرعت بالا نیز در عملی کردن این روش در کاربردهای تجاری نیز بایستی در نظر گرفته شوند. همچنین بایستی عملکرد مدل‌ها و مدت زمان لازم برای تصویربرداری را ارتقاء داد. اجرای روش بررسی شده در این پژوهش نسبت به روش-های مرسوم قدیمی و همچنین روش‌های هزینه‌بر مانند روش-های طیف‌نگاری ابرطیفی و چندطیفی، صرفه اقتصادی بهتری دارد؛ چراکه در این روش، هزینه تجهیزات لازم نسبت به ماشین های آزمون و تجهیزات طیف‌سنجی مواد بسیار پایین‌تر است.

۵- منابع

[1] Abbott, J.A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. Postharvest Biology Technology. 15, 207-225.
[2] Mollazade, K., Omid, M., Akhlaghian Tab, F., Kalaj, Y.R., Mohtasebi, S.S. and 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.
[3] Hashim, N., Pflanz, M., Regen, C., Janius, R.B., Abdul Rahman, R., Osman, A., Shitan, M. and Zude, M. 2013. An approach for monitoring the chilling injury appearance in bananas by means of backscattering imaging. Journal of Food Engineering. 116(1), 28-36.
[4] Romano, G., Nagle, M., Argyropoulos, D. and Müller, 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.
[5] McGlone, V.A., Abe, H., Kawano, S. 1998. Kiwifruit firmness by near infrared light scattering. Journal of Near Infrared Spectroscopy. 5(2), 83-89.
[6] Nicolaï, 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 Technology. 46, 99-118.
[7] Salguero-Chaparro, L., Baeten, V., Abbas, O., Peña-Rodríguez, F. 2014. On-line analysis of intact olive fruits by vis–NIR spectroscopy: optimisation of the acquisition parameters. Journal of Food Engineering. 112, 152-157.
[8] Williams, P.C., Norris, K.H. 2001. Near-infrared technology in the agricultural and food industries, 2th ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, USA.
[9] Seifert, B., Zude, M., Spinelli, L., Torricelli, A. 2014. Optical properties of developing pip and stone fruit reveal underlying structural changes. Physiologia Plantarum. 153(2), 327-336.
[10] 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.
[11] Romano, G., Baranyai, L., Gottschalk, K., Zude, M. 2008. An approach for monitoring

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

the moisture content changes of drying banana slices with laser light backscattering imaging. Food and Bioprocess Technology. 1, 410–414.

[12] Lu, R., Cen, H., Huang, M., Ariana, D.P. 2010. Spectral absorption and scattering properties of normal and bruised apple tissue. Transactions of the ASABE. 53, 263-269.

[13] Qing, Z., Ji, B. and Zude, M. 2007. Wavelength selection for predicting physicochemical properties of apple fruit based on near-infrared spectroscopy. Journal of Food Quality. 30(4), 511-526.

[14] Moons, E., Sinnaeve, G., Dardenne, P. 1998. Nondestructive visible and NIR spectroscopy measurement for the determination of apple internal quality, In: XXV International Horticultural Congress, Part 7: Quality of Horticultural Products 517 (pp. 441-448), Bornova Izmir Turkey.

[15] Paz, P., Sánchez, M.T., Pérez-Marín, D., Guerrero, J.-E., Garrido-Varo, A. 2008. Nondestructive determination of total soluble solid content and firmness in plums using near-infrared reflectance spectroscopy. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 56(8), 2565-2570.

[16] Norhashila, H., Rimfiel, B.J., Russly, A.R., Osman, A., Shitan, M., Zude, M. 2014. Changes of backscattering parameters during chilling injury in bananas. Journal of Engineering Science and Technology. 9(3), 314 – 325.

[17] Abbott, J. A., Lu, R., Upchurch, B.L., Stroshine, R.L. 1997. Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables. Horticultural Reviews. 20, 1-120.

[18] Nagata, M., Tallada, J.G., Kobayashi, T. 2006. Bruise detection using NIR hyperspectral imaging for strawberry (Fragaria * ananassa Duch.). Environmental Control in Biology. 44(2), 133-142.

[19] Theanjumpol, P., Self, G., Rittiron, R., Pankasemsuk, T., Sardsud, V. 2013. Selecting variables for near infrared spectroscopy (NIRS) evaluation of mango fruit quality. Journal of Agricultural Science. 5(7), 146 – 159.

[20] Zude, M. 2009. Optical monitoring of fresh and processed agricultural crops, CRC Press, Taylor & Francis Group.

[21] Contal, L., Leon, V., Downey, G. 2002. Detection and quantification of apple adulteration in strawberry and raspberry purees using visible and near infrared spectroscopy. Journal of Near Infrared Spectroscopy. 10, 289-299.

[22] Slaughter, D.C. (1995). Nondestructive determination of internal quality in peaches and nectarines. Transactions of the ASABE. 38, 617-623.

[23] Chen, J.Y., Zhang, H., Miao, Y., Asakura, M. 2010. Nondestructive determination of sugar content in potato tubers using visible and near infrared spectroscopy. Japan Journal of Food Engineering. 11(1), 59 - 64.

[24] Rastovski, A., Van, A. 1987. Storage of potatoes: post-harvest behaviour store design, storage practice handling. Centre for agricultural publishing and documentation.

[25] Kohli, P. 2009. Potato storage and value preservation: the basics. Crosstree thechno-visors.

[26] Mollazade, K., Omid, M., Tab, F.A., 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(5), 1465-1485.

[27] Peng, Y., Lu, R. 2005. Modeling multispectral scattering profiles for prediction of apple fruit firmness. Transactions of the ASABE. 48, 235–242.

[28] Solomon, W.K., Jindal, V.K. 2007. Modeling changes in rheological properties of potatoes during storage under constant and variable conditions. LWT- Food Science and Technology, 40, 170-178.

[29] Aalami, H., Khoshtaghaza, M.H., Minaie, S. 2007. Determination of mechanical properties of soybean seeds in quasi-static loading. Journal of Food Science and Technology, 6(2). (In Farsi)

[30] Pal, N.R., Pal, K., Keller, J.M., Bezdek, J.C. 2005. A possibilistic fuzzy c-means clustering algorithm. IEEE Transactions on Magnetics. Fuzzy Set and System. 13, 517-530.

[31] Johansen, T.A., Foss, B.A. 1995. Identification of non-linear system structure and parameters using regime decomposition. Automatica 31, 321-326.

[32] Xie, X.L., Beni, G. 1991. A validity measure for fuzzy clustering. IEEE Transactions. Pattern Analysis and Machine 13, 841-847.

[33] Kunzek, H., Kabbert, R., Gloyna, D. 1999. Aspects of material science in food processing: changes in plant cell walls of

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

fruits and vegetables. Zeitschrift fur Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung A 208, 233–250.
[34] Varela, P., Salvador, A., Fiszman, S. 2007. Changes in apple tissue with storage time: Rheological, textural and microstructural analyses. Journal of Food Engineering. 78, 622-629.
[35] Van Dijk, C., Beekhuizen, J.G., Gibcens, T., Boeriu, C., Fischer, M., Stolle-Smits, T. 2002. Texture of cooked potatoes (solanum tuberosum). 2. Changes in pectin composition during storage of potatoes. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 50, 5089-5097.
[36] Schick, R., Klinkowski, M. 1961. Die Kartoffel, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
[37] Gottschalk, K., Ezekiel, R. 2006. Storage. in: Gopal, J., Khurana, S.M.P. (Eds.), handbook of potato production, improvement and postharvest management, Harworth Press, Oxford, UK, pp 489-517.
[38] Nourian, F., Ramaswamy, H.S., Kushalappa, A.C. 2003. Kinetics of quality changes associated with potatoes stored at different temperatures. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie. 36, 49-65.
[39] Bentini, M., Caprara, C., Martelli, R. 2009. Physico-mechanical properties of potato tubers during cold storage. Biosystems Engineering. 104, 25–32.
[40] Praeger, U., Herppich, W.B., Konig, C., Herold, B., Geyer, M. 2009. Changes of water status, elastic properties and blackspot incidence during storage of potato tubers, Journal of Applied Botany and Food Quality. 83, 1-8.
[41] Alvarez, M.D., Canet, W. 2000. Storage time effect on the rheology of refrigerated potato tissue (cv. Monalisa). European Food Research and Technology. 212, 48–56.
[42] De Baerdemaeker, J.G., Segerlind, L.J., Murase, H., Merva, G.E. 1978. Water potential effect in tensile and compressive failure stress of apple and potato tissue. ASAE paper No. 78-3057, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
[43] Brusewitz, G.H., Pitt, R.E., Gao, Q. 1989. Effects of time and static preloading on the rheology of potato tissue. Journal of Texture Studies. 20, 267- 284.
[44] Diehl, K.C., Hamann, D.D., Whitfield, J.K. 1979. Structural failure in selected raw fruits and vegetables. Journal of Texture Studies. 10, 371-400.
[45] Pang, C.H., Scanlon, M.G. 1996. Mechanical properties of the parenchyma of potato (Solanum tuberosum cv. Russet Burbank), Canadian Journal of Botany. 74(6), 859-869.
[46] Laza, M., Scanlon, M.G., Mazza, G. 2001. The effect of tuber pre-heating temperature and storage time on the mechanical properties of potatoes. Food Research International. 34, 659–667.
[47] Fahloul, D., Scanlon, M.G. 1996. A fracture mechanics analysis of the texture of potatoes. Journal of Texture Studies. 27, 545–557.
[48] Schoorl, D., Holt, J.E. 1983. Cracking in potatoes. J. Texture Stud. 14, 61–70.
[49] Falk, S., Hertz, C.H., Virgin, H.T. 1958. On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. Plant Physiology and Biochemistry. 802-817.
[50] Nilsson, S.B., Hertz, C.H., Falk, S. 1958. On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. 2. Theoretical calculations on model systems. Physiologia Plantarum. 11, 818-837.
[51] Murase, H., Merva, G.E., Segerlind, L.J. 1980. Variation of young's modulus of potato as a function of water potential. Transactions of the ASABE. 23, 794-796, 800.
[52] Rahemi, M. 2005. Postharvest physiology: an introduction to physiology and handling of fruits, vegetables and ornamental plants. Shiraz University Publication, Shiraz, Iran. (In Farsi)
[53] Szymanska-Chargot, M., A. Adamiak, A. Zdunek. 2012. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of the biospeckle method. Scientia Horticulturae. 145, 23–28.
[54] Nagle, M., Tadokoro T., Mahayothee B., Vicha S., Muller J. 2012. Monitoring of Ripening Processes in Mango Fruits Using Laser Backscattering: An Innovative Optical Technique. In Tropentag. Göttingen - Kassel/Witzenhausen, Germany.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]

Evaluation and prediction of mechanical properties of potato during storage by laser light backscattering imaging

Omidi-Arjenaki , O. [1*], Ghanbarian, D. [1], Naderi-Boldaji, M. [1]

1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

(Received: 2017/11/14 Accepted:2018/02/19)

In this research, changes in potato texture during storage were evaluated by laser light backscattering imaging method and using physical and mathematical models according to the results of mechanical destructive tests. Using the characteristics of the images, we tried to develop models for predicting the mechanical properties of potatoes. At first, the backscattering images were taken from 594 potatoes. Backscattering profiles were obtained for each sample. Then, cylindrical samples were extracted from potatoes and subjected to uniaxial compression test. By fitting the first order Gaussian model to the obtained data from the final image and calculating the frequency of repetition of different intensities in the images, the parameters related to the absorption and scattering of reflected light from the tissue of the tubers were obtained at three wavelengths of 650 nm, 780 nm and 980 nm and in six months of the cold storage. The behavior comparison of the mechanical test results and the changes in the Gaussian model fitting estimated parameters and the intensity frequencies during storage showed the effect of mechanical structure changes on the optical properties of the samples. Finally, five models with satisfactory results were obtained to predict the tangent modulus of elasticity (R=0.827, 0.815), secant modulus of elasticity (R=0.808), toughness (R=0.874) and maximum fracture force (R=0.811) with the fuzzy-neural inference system. The results in this study could mainly useful for understanding the effect of tissue changes during storage on light scattering and absorption. It can be useful to design high-performance sensors and quality determination systems for non-destructive mechanical properties evaluation of potato tubers.

Keywords: Backscattering imaging, Non-destructive tests, Gaussian model, Mechanical properties.

*Corresponding Author E-Mail Address: omidmac@gmail.com

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-04-25]