

بررسی تغییرات خواص مکانیکی و رئولوژیکی سیب‌زمینی رقم آگریا (Agria) در طول انبارداری بلندمدت

امید امید ارجنکی^{۱*}، داود قنبریان^۲، مجتبی نادری بلداجی^۳ و کاوه ملازاده^۴

چکیده

در این پژوهش، با انجام آزمون‌های فشاری تک‌محوری و خزش و تعیین ویژگی‌های الاستیک و ویسکوالاستیک، تغییرات خواص مکانیکی و رئولوژیکی سیب‌زمینی رقم آگریا در دوره‌های مختلف انبارداری شش‌ماهه بررسی شد. نتایج نشان داد که برازش معادله چندجمله‌ای درجه سه بر منحنی نیرو - تغییر شکل در آزمون فشاری ($R^2=0.98$) و معادله مدل برگر بر منحنی پاسخ آزمون خزش ($R^2=0.99$) مناسب بود. همچنین نتایج نشان داد در طی شش ماه انبارداری، مقادیر مدول الاستیسیته (به میزان ۱۰/۴۷ درصد)، حداکثر نیروی شکست، میزان چقرمگی و زمان تأخیر کاهش پیدا کردند و ویژگی‌های نرمش آنی و نرمش خزشی نیز روندی افزایشی (به ترتیب ۱۳/۳۳ و ۱۰ درصد) داشتند. همچنین ویژگی‌هایی مانند ویسکوزیته آنی و تأخیری نیز روندی متغیر را در طول انبارداری از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: انبارداری، آزمون فشاری تک‌محوری، آزمون خزش، خواص ویسکوالاستیک.

ارجاع: امید ارجنکی ا. قنبریان د. نادری بلداجی م. و ملازاده ک. ۱۳۹۸. بررسی تغییرات خواص مکانیکی و رئولوژیکی سیب‌زمینی رقم آگریا (Agria) در طول انبارداری بلندمدت. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۸(۱): ۲۵-۳۶.

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

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان.

* نویسنده مسئول: omidi@stu.sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۱

مقدمه

خواص مکانیکی و رئولوژیکی سیب‌زمینی در طول دوره انبارداری به دلیل فعالیت‌های ناشی از زنده‌بودن سلول‌های آن مانند تنفس و تعریق تغییر می‌کند (Burton, 1989). علاوه بر تغییرات رطوبت، تبدیل نشاسته موجود در غده‌های سیب‌زمینی به هیدروکربن و قند در طول انبارداری نیز در جهت کاهش کیفیت سیب‌زمینی نقش بسزایی دارد. تمامی این تغییرات اثرات مشهودی در ساختار مکانیکی و رئولوژیکی غده‌ها می‌گذارند. از آنجاکه خواص مکانیکی و رئولوژیکی محصولات کشاورزی از پارامترهای مهم تعیین میزان رسیدگی و همچنین ارزیابی و درجه‌بندی کیفی آن‌ها در مرحله پس از برداشت هستند، تعیین و پیش‌بینی این خواص به منظور ارتقای دانش طراحی تجهیزات فرآوری، درجه‌بندی، انتقال و همچنین افزایش کیفیت در مصرف و به حداقل رساندن افت محصول در انبارها به نظر ضروری است.

به دلیل پیچیدگی رفتار مواد بیولوژیک، برای مطالعه خواص رئولوژیکی، یا بایستی توصیف ساده‌ای از رفتار ماده ارائه داد و یا از ملاحظات نظری در معادلات پیچیده ریاضی استفاده نمود که ثابت‌های این معادلات بایستی از طریق آزمایش به‌دست آیند. در نظر گرفتن رفتار الاستیک برای سیب‌زمینی در صورتی مجاز است که بار وارد بر آن کوچک و زمان تأثیر آن نیز اندک باشد. این در حالی است که، سیب‌زمینی در مدت زمان‌های نسبتاً طولانی و به سبک انباشت فله‌ای، در انبار نگهداری می‌شود. در این شرایط، محصول به‌طور دائم تحت بار ثابت ناشی از لایه‌های بالایی قرار می‌گیرد. در نتیجه، به‌منظور مطالعه این شرایط، علاوه بر آزمون‌هایی که خواص الاستیک محصول را تعیین می‌کنند و معمولاً بیانگر ویژگی‌های مقاومتی نمونه مورد آزمایش هستند، از آزمون خزش نیز می‌توان برای شبیه‌سازی شرایط بارگذاری استفاده کرد. اطلاعات حاصل از منحنی نیرو- تغییرشکل، نتیجه شده از آزمون‌های مربوط به خواص الاستیک می‌تواند در طراحی، ساخت و بهینه‌سازی ماشین‌های فرآوری، بسته‌بندی، درجه‌بندی و فرآیندهای مشابه به کار گرفته شود. همچنین از نتایج حاصل از آزمون‌های مربوط به خواص رئولوژیکی مانند آزمون خزش می‌توان با تقریب خوبی خواص ویسکوالاستیک محصول را نیز به‌دست آورد (Alvarez et al., 2000). ساختار زنده و سلولی سیب‌زمینی به دلیل محتوای رطوبتی،

در هنگام بارگذاری، ترکیبی از رفتار الاستیک (منتج از ساختار سلولزی و فشار درونی سلول) و ویسکوز (منتج از رفتار غشائی و ارتباط میان سلولی) از خود نشان می‌دهد و سبب بروز رفتاری شبیه مواد ویسکوالاستیک می‌گردد. برای کمی‌سازی و استخراج اطلاعات بافتی از نتیجه حاصل از آزمون‌ها، لزوم استفاده از مدل احساس می‌شود. با مدل‌های معین ثابت‌شده‌ای می‌توان رفتار سیب‌زمینی تحت بار ثابت را به‌صورت ریاضی و کمی بیان کرد (Diehl & Hamann, 1979).

پژوهش‌هایی در زمینه خصوصیات رئولوژیکی محصولات کشاورزی انجام شده است. در پژوهشی ثابت‌های رئولوژیکی را برای سیب‌زمینی، تحت بارهای ثابت مختلف بر روی ابعاد اصلی غده سیب‌زمینی، بررسی و آزمون‌ها در سه سطح نیرو، دو سیستم انبارداری، سه جهت بارگذاری، دو رقم سیب‌زمینی و سه زمان مختلف نگهداری انجام پذیرفت. نتایج آزمون خزش و بازیافت نشان داد که تغییرشکل آنی غده سیب‌زمینی تحت بار ثابت، با زمان نگهداری افزایش می‌یابد. همچنین پارامترها، به‌طور معناداری با مدت‌زمان نگهداری، کاهش یافتند (Abd El-Maksoud et al., 2009). در پژوهشی مشابه، خواص رئولوژی پیاز و سیب‌زمینی نیز با استفاده از آزمون خزش مدل‌سازی شد. در این بررسی از مدل برگر استفاده و ضریب الاستیسیته آنی، ضریب الاستیسیته تأخیری و ویسکوزیته تأخیری، ویسکوزیته نیوتنی و زمان تأخیر تعیین گردید. خطای استاندارد حاصل از نتایج مدل‌سازی برای سیب‌زمینی و پیاز به ترتیب ۰/۸ و ۱/۰۲ به‌دست آمد (Ghasemi & Goodarzi, 2012). به همین منظور رفتار رئولوژیکی گوجه‌فرنگی تحت بارهای ثابت مختلف نیز بررسی شده است. آزمون خزش و بازیافت در سه سطح نیرو (N ۱۰، ۱۴ و ۱۸) و در دو موقعیت بارگذاری (طولی و محور قطر) بررسی و سپس ثابت‌های رئولوژیکی مدل برگر محاسبه شد. نتایج نشان داد که ثابت‌های رئولوژی به‌طور معناداری با افزایش زمان نگهداری، کاهش یافتند (Albaloushi, 2013). با هدف تعیین مجاز نیروی اعمالی از طرف دستگاه‌های فرآوری و تعیین مدت‌زمان بهینه انبارداری، خصوصیات رئولوژیکی دو رقم سیب ایرانی (گلاب و شفیع‌آبادی) با آزمون خزش و آسایش تنش مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای آسایش تنش مدل ماکسول تعمیم‌یافته و برای اندازه‌گیری پارامترهای خزش از مدل برگر استفاده شد. مدول تأخیر، مدول تعادل، زمان

غده با ابعاد 15×15 mm استفاده شد. نمونه‌ها روی یک سطح صلب قرار گرفتند و توسط فک متحرک، با نیرو، سرعت و شرایط معین در هر آزمون بارگذاری شدند. به‌منظور برش نمونه استوانه‌ای، دو قالب سیلندری شکل برنده از جنس استیل با ابعاد 15×30 mm برای برش نمونه با قطر ثابت از منطقه تصادفی میانی بافت سیب‌زمینی و 15×15 mm برای برش دو سر نمونه با تیغ تیز به‌منظور تهیه نمونه با ارتفاع معین 15 mm ساخته شد. طبق بررسی‌های انجام‌شده، اثر موقعیت‌های مختلف روی استوای میوه برای استخراج نمونه، در خواص مکانیکی اختلاف معناداری ندارد (Masoodi *et al.*, 2006; Abbott & Lu, 1996). در ادامه، روند انجام هر آزمون شرح داده شده است. آزمون فشاری تک‌محوری به‌عنوان یکی از ساده‌ترین روش‌های اندازه‌گیری خواص مکانیکی به‌صورت اعمال یک نیروی مشخص بر محور عمودی نمونه به کار می‌رود. در این روش آزمون، مدول الاستیسیته یا مدول یانگ با تقسیم تنش بر کرنش حاصل می‌شود. این ویژگی برای تعیین خواص رئولوژیکی مواد حیاتی است (Bu-Contreras & Rao, 2002; Ramana *et al.*, 1992). از فواید استفاده از پارامتر تنش به‌جای نیرو این است که تنش توانایی سطوح ماده را برای پاسخگویی به نیروی خارجی بدون وابستگی به شکل و اندازه نمونه مشخص می‌کند. در آزمون فشاری، نمونه استوانه‌ای با سرعت 50 میلی‌متر بر دقیقه تحت فشار قرار گرفت (Solomon & Jindal, 2007). هم‌زمان با اجرای آزمون، نرم‌افزار مربوط به‌دستگاه، منحنی نیرو - تغییرشکل محصول را رسم و داده‌های هر لحظه را ثبت می‌کرد. در این آزمون ویژگی‌های مکانیکی مانند ضرایب الاستیسیته مماسی و سکانتی، تنش گسیختگی، کرنش گسیختگی، انرژی گسیختگی و چقرمگی از نمودار نیرو - تغییرشکل و تنش - کرنش حاصل به‌دست آمدند. با برازش یک چندجمله‌ای درجه سه (معادله (۱)) با داده‌های منحنی نیرو - تغییرشکل، مقادیر شیب لحظه‌ای موردنیاز برای معادله (۲) به‌دست آمد. به‌دلیل غیرخطی بودن منحنی نیرو - تغییرشکل بافت سیب‌زمینی، مدول الاستیسیته مماسی مطابق تراکم‌های $2/5$ ، 5 ، $7/5$ و 10 درصد محاسبه شد (Solomon & Jindal, 2007).

$$f(\Delta L) = a_0 \Delta L + a_1 \Delta L^2 + a_2 \Delta L^3 \quad (1)$$

$$E_a = \left(\frac{F/A}{\Delta L/L} \right) = \frac{df}{d(\Delta L)} \Big|_{\% Comp.} \cdot \left(\frac{L}{A} \right) \quad (2)$$

آسایش تنش و ویسکوزیته در آزمون آسایش تنش و مدول الاستیسیته لحظه‌ای، زمان تأخیر و ویسکوزیته نیوتنی در آزمون خزش تعیین شدند. در این پژوهش گزارش شده است که زمان تأخیر برای رقم شفیع‌آبادی یک‌چهارم دقیقه و برای رقم گلاب یک‌پنجم دقیقه به‌دست آمد. بنابراین بافت سیب‌های رقم شفیع‌آبادی نسبت به رقم گلاب در برابر گذر زمان سفت‌تر بودند و مدت‌زمان نگه‌داری سیب رقم شفیع‌آبادی در انبار بیشتر از رقم گلاب بود (Gorji-Chakespari *et al.*, 2010).

در پژوهش‌های پیشین و مورد مطالعه، بررسی هم‌زمان درباره خواص رئولوژی و مکانیکی سیب‌زمینی رقم آگریا در طول انبارداری بلندمدت مشاهده نشد. همچنین نظر به رفتار متفاوت رقم‌های سیب‌زمینی در انبارداری، در پژوهش حاضر، اثر زمان انبارداری شش‌ماهه بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی سیب‌زمینی واریته آگریا کشت‌شده در مناطق مرکزی ایران با استفاده از آزمون فشاری تک‌محوری و خزش مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است و معیارهای کمی برای مطالعه تأثیر شرایط نگه‌داری بر کیفیت سیب‌زمینی حاصل شد. همچنین در محدود پژوهش‌های انجام‌شده، غالباً آزمون‌ها توسط روش‌های دستی و غیردقیق و با مدت‌زمان انبارداری کمتر و در شرایط آزمایشگاهی انجام‌شده‌اند. بنابراین در این پژوهش خواص مکانیکی و رئولوژیکی محصول سیب‌زمینی رقم آگریا، در شرایط نگهداری صنعتی، در مدت‌زمان شش ماه و با استفاده از ابزار دقیق آزمون مکانیکی مواد مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

انتخاب و برداشت محصول سیب‌زمینی واریته آگریا در پاییز ۱۳۹۴ از مزرعه‌ای در شهرستان شلمزار استان چهارمحال و بختیاری صورت گرفت. پس از برداشت، سیب‌زمینی‌ها به سردخانه‌ای صنعتی و ویژه سیب‌زمینی منتقل شدند تا به مدت شش ماه در دمای $3^{\circ}C$ الی $4^{\circ}C$ ، بدون حضور نور و با تهویه و رطوبت مناسب انبار شوند. قبل از ذخیره‌سازی، سطح نمونه‌ها از گل و خاک و مواد خارجی پاک‌سازی شد. برای بررسی خواص مکانیکی سیب‌زمینی توسط آزمون‌های فشاری تک‌محوری و خزش از ماشین آزمون مواد SANTAM مدل STM-20 (ساخت ایران) با ظرفیت 20 تن و مجهز به نیروسنج 500 نیوتنی (بونگشین، کره) استفاده شد. در آزمون‌ها از نمونه‌های استوانه‌ای استخراج‌شده از هر

(Solomon & Jindal, 2007)، به میزان رسیدن به نیروی اولیه $N = 50$ پس از رسیدن به نیروی مذکور به مدت ۴۰ ثانیه، ثابت و پس از طی این زمان، آزمون به مدت ۳۰۰ ثانیه (۵ دقیقه) برای هر نمونه انجام شد. هم‌زمان با طی آزمون منحنی جابجایی- زمان توسط نرم‌افزار دستگاه رسم و داده‌های هر لحظه آزمون ثبت شدند. یک مدل چهارعنصری شامل فنر و دشیات به‌عنوان اجزای تشکیل‌دهنده بخش‌های کلویین و ماکسول آن، برای توصیف منحنی‌های آزمون خزش بر اساس معادله (۳) استفاده شد.

$$\varepsilon(t) = \left(\frac{\sigma_0}{E_1} \right) + \left(\frac{\sigma_0}{\eta_1} \right) \cdot t + \left(\frac{\sigma_0}{E_2} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\eta_2}} \right) \quad (3)$$

در معادله بالا، مقادیر σ_0 تنش اولیه (MPa)، t زمان آزمون (s)، E_1 و E_2 به ترتیب پارامتر الاستیک جزء ماکسول و جزء کلویین مدل (Pa)، مقدار $\varepsilon(t)$ کرنش در لحظه t و η_1 و η_2 به ترتیب پارامتر ویسکوز جزء ماکسول و جزء کلویین مدل (Pa.s) است. مدل استفاده‌شده برای استخراج ویژگی‌های رئولوژیکی، یک مدل چهارعنصری برگر است که توسط معادله (۴) توصیف می‌شود. این رابطه، با تقسیم کرنش $\varepsilon(t)$ در زمان مشخص t به تنش ثابت اعمال‌شده σ ، به‌عنوان رابطه نرمی خزشی حاصل می‌شود (Martinez et al., 2007):

$$D(t) = D_1 + \left(\frac{t}{\eta_1} \right) + D_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\eta_2}} \right) \quad (4)$$

پارامترهای رابطه، از جمله نرمش آنی^۱ (D_1) در زمان $t=0$ ، نرمش تأخیری^۲ (D_2)، مقدار ویسکوزیته (η_1) و زمان تأخیر (T_{ret}) با برازش توسط رگرسیون غیرخطی به همراه الگوریتم «Levenberg-Marquardt» تعیین شدند. برای ارزیابی مدل از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. ثابت‌های مدل و شاخص‌های آماری ارزیابی مدل از برازش آن بر روی داده‌های آزمون به‌دست آمدند. ابتدا با داشتن تنش اولیه $282/94$ kPa از منحنی کرنش- زمان، منحنی نرمی- زمان، به‌دست آمد و سپس مدل بر روی این منحنی برازش شد. تمامی فرآیند فوق برای ۱۲۰ نمونه سیب‌زمینی، برای کل ۶ دوره انبارداری تکرار شد. آماده‌سازی داده‌ها و محاسبات و تجزیه و تحلیل آن‌ها، توسط نرم‌افزارهای MATLAB و Excel به‌منظور بررسی خواص مکانیکی واریته سیب‌زمینی

در معادله بالا، A مساحت سطح مقطع استوانه‌ای نمونه (mm^2)، نیرو F (N)، L طول نمونه ΔL (mm)، تغییرشکل a_i (mm) ها مقادیر ثابت و E_a ضریب الاستیسیته در آزمون فشاری تک‌محوری (Pa) هستند. با به‌دست آمدن اولین نقطه گسیختگی در منحنی نیرو- تغییرشکل، 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 و همچنین تنش و کرنش گسیختگی به ترتیب از تنش و کرنش متناظر با نقطه گسیختگی در نمودار تنش- کرنش به‌دست آمد. انرژی گسیختگی و مقدار چقرمگی نیز به ترتیب از محاسبه سطح زیر منحنی‌های نیرو- جابجایی (Aalami et al., 2006) و تنش- کرنش هر نمونه حاصل شد. انرژی گسیختگی مقدار انرژی لازم برای شکست محصول است؛ درحالی‌که چقرمگی به معنای مقاومت یک ماده در برابر شکستگی و یا قابلیت آن در جذب انرژی مکانیکی بدون شکسته شدن است. در واقع چقرمگی از نظر عددی مشخص‌کننده کار لازم برای ایجاد گسیختگی در ماده است.

به منظور انجام آزمون خزش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توسط دستگاه آزمون مکانیکی مواد استفاده‌شده در این پژوهش نیز نیاز به تعیین چهار پارامتر زمان نگهداری، نیروی ثابت اولیه، مدت‌زمان آزمون و سرعت حرکت فک متحرک و تنظیم آن‌ها در نرم‌افزار دستگاه بود. زمان نگهداری مدت‌زمان نگه‌داشتن نیروی ثابت روی نمونه است تا نمونه به تعادل اولیه و پایداری لازم برسد. در واقع این زمان قبل از اجرای آزمون طی می‌شود. زمان آزمون زمانی است که دستگاه اقدام به داده‌برداری از نتایج آزمون می‌کند. زمان نگهداری در آزمایش‌های اولیه توسط آزمون‌وخطا، با مشاهده تغییرات نیرو در نتایج حسگر نیروی دستگاه، در حدود ۴۰ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین نیروی اولیه نیز با فرض درصدی از نیروی نقطه شروع اولین تغییرات تخریبی در سلول‌های بافت میوه (نقطه PI) در آزمون‌های ابتدایی به مقدار 50 N تعیین و در نظر گرفته شد. انتخاب این مقدار نیرو برای اطمینان از عدم رخداد هرگونه تخریب در بافت سلولی نمونه در آزمون خزش صورت گرفت. همچنین مدت‌زمان آزمون نیز ۵ دقیقه تنظیم شد (Solomon & Jindal, 2007). بعد از قرارگیری نمونه استوانه‌ای روی فک ثابت و هم‌زمان با شروع آزمون خزش، فک متحرک دستگاه با سرعت ثابت 50 میلی‌متر بر دقیقه

1- Initial Compliance

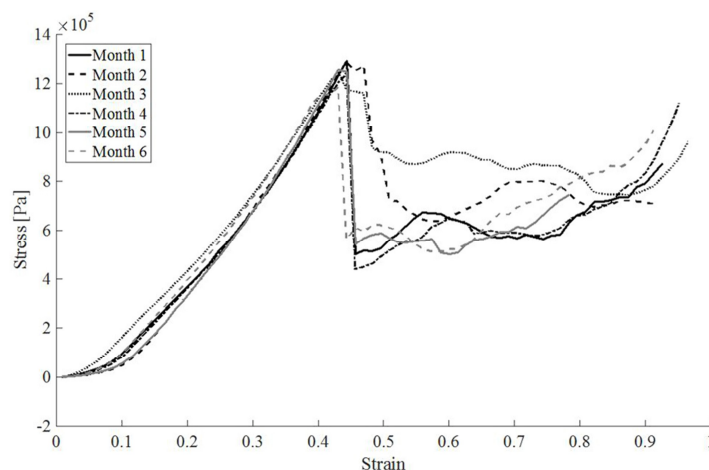
2- Retarded Compliance

دوره انبارداری نشان می‌دهد. روند کاهشی در قله منحنی در طول دوره انبارداری مشهود است. در آزمون فشاری تک‌محوری مجموعاً ۵۷۶۰ مقدار به‌عنوان خروجی (۶ دوره \times ۱۲۰ غده سیب‌زمینی در هر دوره \times اندازه‌گیری ۸ ویژگی) حاصل شد. شکل‌های ۲ تا ۴ مقایسه میانگین هفت ویژگی (مدول الاستیسیته ظاهری در چهار تراکم مختلف، حداکثر نیروی شکست، مدول الاستیسیته سکانتی و چقرمگی) را برای سیب‌زمینی نشان می‌دهد. در هر منحنی حروف یکسان نشان از نبود تفاوت معنادار در $p > 0.05$ است.

آگرا در دوره انبارداری انجام و نتایج به‌دست‌آمده به‌منظور مقایسه دوره‌های مذکور از نظر مشخصه‌های مکانیکی بررسی شدند. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به شاخص‌های آزمون فشاری تک‌محوری نمونه‌های موردبررسی در جدول ۱ آمده است. شکل ۱ نیز الگوی منحنی تنش و کرنش غده‌ها را برای هرکدام از شش



شکل ۱- الگوی منحنی تنش - کرنش غده‌های سیب‌زمینی در ۶ ماه انبارداری

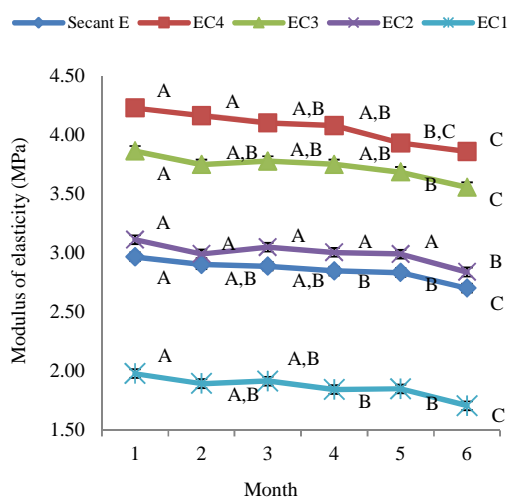
سفتی و چسبندگی درونی سلول‌ها در میوه‌ها شدیداً وابسته به مواد پکتیک لایه میانی است. فرآیند حل شدن مواد پکتیک سبب کاهش اثر آن‌ها به‌عنوان ماده سیمانی شده و سبب نرم‌شدگی بافت و جدا شدن سلول‌ها می‌شود (Kunzek et al., 1999). در شکل ۲، به‌غیر از کاهش در منحنی EC2، غالب تغییرات در مدول الاستیسیته معنادار بوده است.

جدول ۱- شاخص‌های آماری مکانیکی موردبررسی در غده‌های سیب‌زمینی

شاخص*	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	حداقل
(MPa) EC1	۱/۸۷	۰/۳۸	۳/۰۹	۰/۳۸
(MPa) EC2	۳/۰۰	۰/۳۹	۴/۶۸	۱/۳۷
(MPa) EC3	۳/۷۳	۰/۴۱	۵/۷۷	۲/۴۱
(MPa) EC4	۴/۰۶	۰/۷۱	۸/۰۱	۰/۶۰
(MPa) ESec	۲/۸۶	۰/۳۱	۴/۲۶	۱/۹۲
بیشینه نیرو (N)	۲۲۱/۸	۳۲/۲۱	۳۴۳/۹۴	۱۱۷/۵۱
بیشینه کرنش $\times 10^{-2}$ (/.)	۰/۸۶	۰/۷۶	۰/۹۰	۰/۶۷
چقرمگی (MJ/m^3)	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۴۰	۰/۰۸

* نشان E بیانگر مدول الاستیسیته؛ C بیانگر عبارت فشردگی و اعداد ۱ تا ۴ به‌ترتیب بیان‌کننده میزان فشردگی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱۰ درصد و Secant بیانگر حالت سکانتی مدول الاستیسیته است.

آزمایشگاهی این پژوهش با اینکه روندی کاهشی را در تمامی منحنی‌های مدول الاستیسیته داشته است اما نمی‌توان در این تحقیق آن را به‌عنوان معیار کاملی برای تشریح تغییرات ساختاری میانگین برای غدد سبب‌زمینی در طول ۶ ماه انبارداری دانست، زیرا تغییرات کاهشی چشم گیر و بارز در مقدار مدول الاستیسیته به‌دست نیامده است. هرچند این تغییرات کاهشی در تحقیقات معدود مشابهی در این زمینه نیز تکرار شده است (Solomon & Jindal, 2007; Praeger et al., 2009; Bentini et al., 2009). البته در برخی از این پژوهش‌ها اثر طول دوره انبارداری در تغییرات مدول الاستیسیته در حالت بی‌معنا در آزمون‌های مقایسه میانگین نیز مشاهده شده است (Alvarez & Canet, 2000). بنابراین علاوه بر مدول الاستیسیته خواص مکانیکی دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲- مقایسه میانگین مدول‌های الاستیسیته استخراج شده از آزمون فشاری تک‌محوری در طول دوره انبارداری؛ E نشانگر مدول الاستیسیته، C نشانگر عبارت فشردگی و شاخص عددی معرف میزان فشردگی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد و Secant بیانگر حالت سکانتی است.

در شکل ۳ روند کاهشی حداکثر نیرویی که نمونه‌های استخراج شده از غدد سبب‌زمینی قبل از شکست می‌توانستند تحمل کنند در شش دوره انبارداری نشان داده شده است. این کاهش در ماه چهارم و ماه ششم معنادار است. کیفیت و روند تغییرات حداکثر نیروی شکست سبب‌زمینی در تحقیقات مشابه پیشین متفاوت است. تعدادی از پژوهشگران با استفاده از مدل‌های ساده سلولی

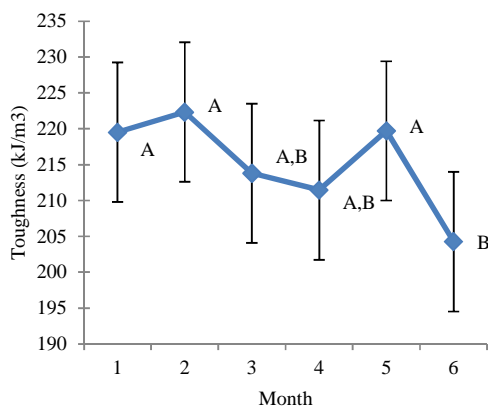
در هر مرحله که کاهشی در مقادیر مدول الاستیسیته مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده اثر گذر زمان در طول انبارداری روی بخش‌هایی از بافت مانند لایه میانی، سلول‌ها و دیواره‌های سلولی و همچنین نشان‌دهنده تلفات و افت در یکپارچگی ساختاری کل نمونه و افزایش تغییرشکل پذیری آن است. به عبارتی افت چسبندگی بین سلول‌ها و افت در فرآیند انتقال جرم از طریق غشای آسیب‌دیده (تلفات 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 است (Varela et al., 2007). بنابراین، به نظر می‌رسد شرایط نگهداری، نوع سیستم انبار و سردخانه و احتمالاً نوع وارته سبب‌زمینی سبب کاهش نرخ این افت مدول الاستیسیته شده است. همچنین وجود نشاسته احتمالاً از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی سبب‌زمینی است (Vandijk et al., 2002). این ماده غالباً در مناطق بیرونی غده (قشر) وجود و تجمع دارد (Nourian et al., 2003).

پژوهش‌های بسیاری برای مطالعه خواص مکانیکی موادی مانند نشاسته و اثرات تغییر پارامترهای فرآیندهای مختلف روی این خواص تأثیرپذیر مانند اصطکاک داخلی، جریان‌پذیری و الاستیسیته صورت پذیرفته است (Murase et al., 1980; Mościcki et al., 2012; Zavareze et al., 2012). بنابراین، کاهش مدول الاستیسیته ممکن است به سبب افت میزان نشاسته و تبدیل آن به قند محلول باشد (Nourian et al., 2003; Gottschalk & Ezekiel, 2006). از طرفی در شکل ۲ نمایان است که با افزایش میزان تراکم یا کرنش، مدول الاستیسیته محاسبه شده نیز افزایش یافته است (ترتیب منحنی‌های EC1 تا EC4).

البته انتخاب مقادیر دلخواه برای تراکم‌های چندگانه برای محاسبه مدول الاستیسیته مماسی در معادله (۲)، بر روی مقادیر نتیجه شده و حساسیت این ویژگی در بیان وضعیت مقدار کیفی سفتی نمونه‌ها و همچنین به‌دست آوردن شیب منحنی در نمودار نیرو-جابجایی برای تخمین مناسب مدول الاستیسیته ظاهری اثر مستقیم و مهم دارد (Solomon & Jindal, 2007). مقدار کاهش مقادیر EC1، EC2، EC3 و EC4 در انتهای دوره نسبت به ابتدای دوره انبارداری به‌ترتیب برابر با ۱۵/۹۰، ۹/۶۷، ۸/۶۳ و ۹/۵۵ درصد بوده است. تغییرات حاصل در مدول الاستیسیته در شرایط

نظر می‌رسد زمانی که فشار داخلی سلول‌ها بالاست و دیواره سلول متوجه فشار است، یک نیروی کم منتج به شکست سلولی می‌شود (Pang & Scanlon, 1996). در این پژوهش، نتایج تحقیق که حاکی از کاهش حداکثر نیروی شکست، خصوصاً در ماه‌های انتهایی دوره انبارداری است (و همین امر برای مدول الاستیسیته رخ داده است)، با توجه به مباحث فوق، بیشتر نمایانگر افزایش در فشار تورژانس داخلی سلول‌های غده‌های سیب‌زمینی به دلیل غلبه فرآیند تولید آب با تنفس بر فرآیند از دست دادن آب با تخییر است. این تغییرات منجر به کاهش در مدول ارتجاعی کلی بافت نمونه‌ها شده است.

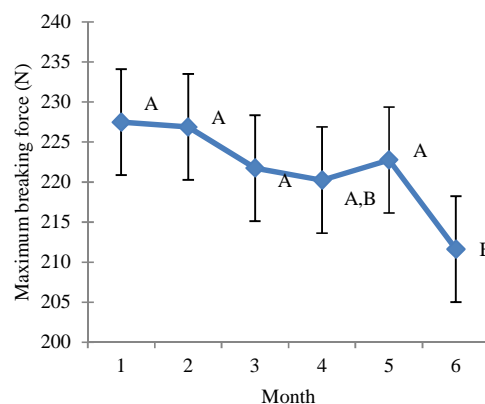
طبق نتایج، در طول دوره انبارداری روند افزایشی در حداکثر کرنش شکست نمونه‌ها مشاهده شد، اما این افزایش در شرایط آزمایشگاهی، انبارداری و آزمون این پژوهش در تمام دوره انبارداری معنادار به دست نیامد. در حین بارگذاری فشاری روی نمونه‌های سیب‌زمینی ذرات نشاسته، پیکربندی و چیده‌مان تخت‌تری پیدا خواهند کرد و سبب آزاد شدن و هدر رفت انرژی می‌شوند (Khan & Vincent, 1993). با افزایش زمان ذخیره‌سازی، نمونه‌ها در این آزمون نیاز به تغییر شکل بیشتری برای ذخیره مورد نیاز انرژی کرنشی برای ترک خوردگی در هنگام اعمال نیرو دارند. در شکل ۴ روند کاهشی میزان چقرمگی در طول دوره انبارداری مشهود است.



شکل ۴- مقایسه میانگین چقرمگی استخراج شده از آزمون فشاری تک‌محوری در طول دوره انبارداری

این کاهش در تحقیقات پیشین نیز گزارش شده است و بیانگر کاهش مقدار انرژی برای وارد آوردن فشار به غده با افزایش زمان انبارداری است (Laza *et al.*, 2001; Fahloul

تجزیه و تحلیلی نظری انجام دادند و دریافتند که افزایش فشار تورژانس اولیه سبب افزایش سفتی بافت می‌شود اما تنش و کرنش تسلیم و مقاومت بافت را کاهش می‌دهد (Pitt, 1982; Pitt & Chen, 1983; Pitt & Davis, 1984). همچنین گزارش دادند که تنش شکست، کرنش شکست و سفتی بافت سیب‌زمینی متناسب باحالت شکست و فشار تورژانس است (Lin & Pitt, 1986). نتایج عملی ارائه شده توسط برخی دیگر نیز نشان داد که تنش در نقطه شکست بافت سیب‌زمینی با کاهش پتانسیل آبی نمونه افزایش می‌یابد (De Baerdemaeker *et al.*, 1978; Brusewitz *et al.*, 1989).



شکل ۳- مقایسه میانگین حداکثر نیروی شکست در طول دوره انبارداری

از طرفی کاهش حداکثر نیروی شکست سیب‌زمینی در طول انبارداری در مواجهه با شرایطی که سبب افزایش فشار سلولی محصول می‌شد نیز گزارش شده است (Diehl *et al.*, 1979). همچنین در این تحقیقات تغییرات در ویژگی‌های نتیجه شده از آزمون فشاری تک‌محوری، وابسته به تغییرات فشار سلولی عنوان شده است. از طرف دیگر، تحقیقات محدود موجود در بررسی و تخمین فشار سلولی تورژانس سیب‌زمینی حین انبارداری سرد، دارای نتایج ضعیف و با روندی غیرروشن هستند. در پژوهشی گزارش شده است که فشار داخلی سلول‌های بافت سیب‌زمینی در ۱۴ روز اول کاهش و سپس تا روز ۴۹ ام افزایش یکنواختی داشته است (Brusewitz *et al.*, 1989). در پژوهش مشابه دیگری بیان شده است که فشار تورژانس سیب‌زمینی تا روز ۱۴ ام کاهش، سپس تا روز ۲۸ ام افزایش و بعد از این مدت به‌طور یکنواخت دوباره کاهش می‌یابد (Alvarez *et al.*, 2000). به

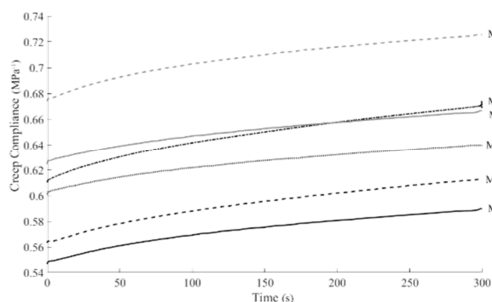
انبارداری بلندمدت رخ می‌دهند و اثرات انبارداری کوتاه‌مدت، روی ویژگی‌های الاستیک بافت، به دلیل تغییرات در وضعیت آب غده‌ها تمایز قائل شد. این مسئله پیش‌تر روی نوعی سیبزمینی بررسی و تأیید شده است (Landahl *et al.*, 2004). پژوهش‌های بسیاری بر اثبات این مدعا که خواصی مانند مدول الاستیسیته ظاهری و یا سفتی، متأثر از حجم آب درون نمونه آزمایشی است صحه گذاشته‌اند (Falk *et al.*, 1958; Nilsson *et al.*, 1958; Murase *et al.*, 1980). اندازه‌های آماری مربوط به تمامی شاخص‌های آزمون خزش در تمامی نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۲ آمده است.

(Scanlon, 1996; Schoorl & Holt, 1983). در حین انبارداری، ماده خشک در غده‌ها، خصوصاً کربوهیدرات، به دی‌اکسید کربن و آب تبدیل می‌شوند و از دست می‌روند. همچنین تبخیر و تنفس نیز به ترتیب می‌توانند مسبب کاهش یا افزایش مقدار آب و تغییر وزن سیبزمینی‌ها شود. بنابراین تغییرات در خواص مکانیکی سیبزمینی مربوط به تعریق و تنفس غدد سیبزمینی است. کاهش در میزان چقرمگی در طول انبارداری آهسته است اما در این دوره افت غیرقابل بازگشتی در یکپارچگی غشای سلولی ایجاد می‌شود (Laza *et al.*, 2001). باید میان فرآیندهای منظم فیزیولوژیکی مانند انطباق و سازگاری الاستیکی که در طول

جدول ۲- شاخص‌های آماری از خواص ویسکوالاستیک در غده‌های سیبزمینی

شاخص	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	حداقل
$D_1(1/MPa) \times 10^{-1}$	۶۲/۵۸	۹/۴۴	۱۱۰/۰۰	۲۸/۱۹
$D_2(1/MPa) \times 10^{-1}$	۲/۱۳	۱/۲۱	۱۱/۵۹	-۰/۳۷
$T_{ret}(s)$	۷۱/۱۷	۹/۱۸	۱۱۷/۸۰	۲۱/۸۲
$\eta_1(kPa.s)$	۱۱/۷۰	۲/۵۹	۲۴/۱۰	۴/۹۲
$\eta_2(kPa.s)$	۳/۸۲	۱/۳۷	۹/۸۶	-۹/۸۳

به عبارت دیگر، در اثر اعمال بار ثابت روی نمونه، تغییر شکل آنی نمونه در زمان انبارداری افزایش می‌یافت که این امر، نظر به رابطه معکوس نرمی با مدول الاستیسیته منجر به کاهش معنادار مقدار EI شده است. افزایش در میزان نرمی خزشی آنی به نظر می‌رسد مطابق با جزء پلاستیکی و نشان‌دهنده تغییر انبساطی برگشت‌ناپذیر بافت سیبزمینی در زمان آماسیدگی (دارای حداکثر فشار تورژانس سلولی) باشد (Alvarez & Canet, 2000).



شکل ۵- الگوی منحنی خزش غده‌ها برای هر ۶ دوره انبارداری

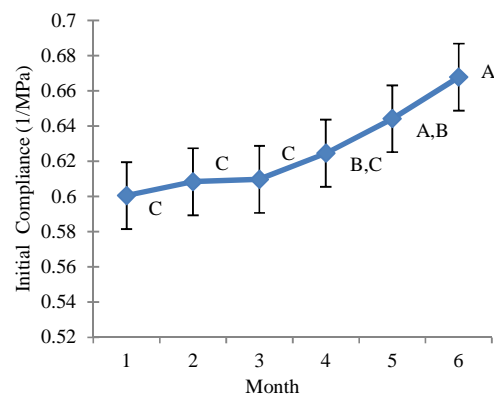
همچنین، شکل ۵ نیز نشان‌دهنده رفتار خزشی نمونه‌ها در حین بارگذاری ایستا برای هر ماه انبارداری است. در هر شش منحنی نمایان است که روند تغییر شکل در سیبزمینی‌ها کاملاً یک‌روند با افت در شیب و وابسته به زمان است. به علاوه، با افزایش دوره انبارداری و بالاتر رفتن منحنی‌ها نسبت به منحنی ماه‌های قبل، میزان نرمش خزشی در طول زمان افزایش یافته است. مجموعاً ۳۶۰۰ مقدار به عنوان خروجی (۶ دوره \times ۱۲۰ غده سیبزمینی در هر دوره \times ۵ ویژگی) حاصل شد. شکل‌های ۶ تا ۱۰ مقایسه میانگین ویژگی‌های استخراج شده (نرمش‌های آنی و تأخیری، مقادیر ویسکوزیته آنی و تأخیری و زمان تأخیر) را برای دوره انبارداری سیبزمینی نشان می‌دهد. منحنی‌های خزش به خوبی ($R^2=0.99$, $RMSE=0.0001 \sim 0.0016$) توسط مدل چهارعنصری برگر برازش شدند.

نرمش آنی (D_1) با مدول الاستیسیته آنی نسبت عکس دارد و برابر با $1/E_1$ است. در شکل ۶ نمایان است که روند تغییرات نرمش آنی در طول دوره انبارداری افزایشی بوده که این روند در ماه‌های چهارم به بعد معنادار و نرخ آن رو به افزایش بوده است.

در ماه اول انبارداری مقدار نرمش تأخیری (D_2) حدود $30/44$ برابر کوچک‌تر از نرمش آنی (D_1) است که با توجه به رابطه عکس نرمی با مدول الاستیسیته، این تفاوت نشان‌دهنده وجود الاستیسیته بزرگ‌تری در بخش تأخیری از مدل چهارعنصری است. در بررسی اثرات انبارداری بر روی سیب‌زمینی گزارش شده است که افزایش میزان نرمش تأخیری در انبارداری ۲۸ روزه نشانگر تغییرات پلاستیک دیواره سلولی و با احتساب افزایش سختی آن است (Alvarez & Canet, 2000).

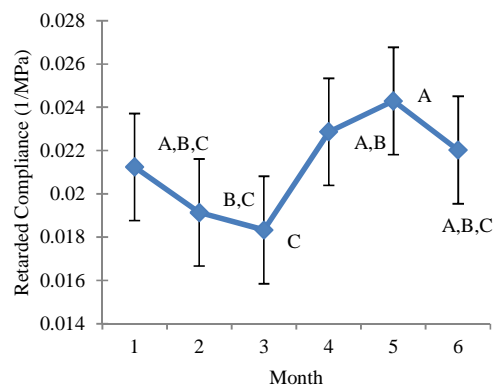
در شکل ۸ زمان تأخیر با افزایش زمان انبارداری در ماه چهارم کاهش معنادار داشته و بعد از افزایش در ماه پنجم تا انتهای دوره انبارداری ثابت مانده است. همچنین با توجه به الگوی منحنی‌های خزش در شکل ۵ که نمایانگر افزایش کرنش کلی در طول انبارداری است، با توجه به تعریف و ماهیت زمان تأخیر، در ماه‌های انتهایی انبارداری، نمونه توانسته است سریع‌تر به ۶۳ درصد کرنش کلی نمونه برسد. به عبارت دیگر در عین افزایش میزان کرنش کلی، زمان رسیدن به درصد معینی از این کرنش در هنگام ثابت نگه‌داشتن بار ۵۰ نیوتنی بر روی نمونه کمتر شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در ماه‌های پایانی دوره انبارداری از صلبیت نمونه کاسته شده است و نمونه‌ها قابلیت ارتجاع بیشتری پیدا کرده‌اند.

شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات ویسکوزیته اولیه (η_1) و ویسکوزیته تأخیری (η_2) میانگین برای نمونه‌های استخراج شده از غدد سیب‌زمینی برای همه دوره‌های انبارداری هستند. ویسکوزیته آنی در ماه دوم کاهش، تا ماه چهارم افزایش و در ادامه تقریباً روند ثابتی را طی کرده است. این تغییرات در منحنی میانگین ویسکوزیته تأخیری تا ماه سوم افزایشی، از ماه سوم تا ماه پنجم کاهش و در ادامه روندی افزایشی داشته است. فرآیند تغییرات شش‌ماهه نرمش تأخیری در شکل ۷ در مقایسه با تغییرات ویسکوزیته تأخیری در شکل ۱۰، یک فرآیند هم‌ارز است. افزایش نرمش خزشی تأخیری (یا کاهش مدول الاستیسیته تأخیری) از ماه سوم تا پنجم و کاهش در مقدار ویسکوزیته تأخیری در همین بازه زمانی می‌تواند به دلیل افت میزان مواد پکتیک در نمونه‌ها باشد؛ چراکه تقریباً ۵۲ درصد از دیواره سلول سیب‌زمینی را مواد پکتیک تشکیل می‌دهند که مسئولیت اتصال سلول‌ها را به هم بر عهده دارند (Scanlon et al., 1996; Alvarez et al., 2000).



شکل ۶- مقایسه میانگین نرمش خزشی اولیه استخراج شده از آزمون خزش در طول دوره انبارداری

در شکل ۷ نیز روند افزایشی در مقدار نرمی خزشی تأخیری (D_2) در طول انبارداری نمایان است. طبق نتایج، مقدار نرمی خزشی تأخیری تا ماه سوم کاهش و در ادامه افزایش داشته است. این افزایش در تحقیقات پیشین نیز گزارش شده است (Abd El-Maksoud et al., 2009; Alvarez & Canet, 2000). افزایش مقادیر نرمی خزشی که گویای اثر مستقیم زمان انبارداری در مقادیر الاستیسیته آنی و تأخیری هستند ناشی از تغییرات در فشار داخلی سلول‌ها یا همان فشار تورژسانس است. حتی در برخی تحقیقات عنوان شده است که به دلیل نزدیکی مقدار مدول الاستیسیته آنی با مدول الاستیسیته ظاهری، مدول الاستیسیته آنی امکان ارتباط بیشتری با فشار تورژسانس و فشار داخلی سلول‌ها دارد (Alvarez & Canet, 1998). این تأثیرپذیری در تحقیقاتی نیز مورد کنکاش و در نتایج به تأیید رسیده است (Jackman & Stanley, 1995).



شکل ۷- مقایسه میانگین نرمش خزشی تأخیری استخراج شده از آزمون خزش در طول دوره انبارداری

مقدار ویسکوزیته اولیه در ماه اول انبارداری در حدود ۳/۱۰ برابر ویسکوزیته تأخیری است و این نشان‌دهنده جریان پذیری کمتر اجزای ساختاری مرتبط با واحد آنی مدل است.

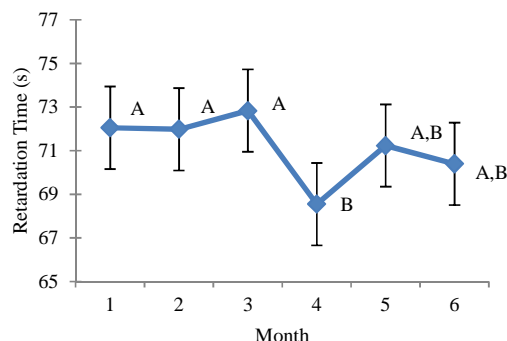
نتیجه‌گیری

بارگذاری در آزمون‌های فشاری تک‌محوری و آزمون خزش، طبق نتایج به‌دست‌آمده توانست، تغییرات وضعیت بافت سیبزمینی رقم آگریا را در طی ۶ ماه انبارداری مشخص و قابل ارزیابی کند. مدل برگر استفاده‌شده در تحلیل نتایج آزمون خزش رفتار خزشی سیبزمینی را در طی انبارداری پیش‌بینی کرد. در طی شش ماه انبارداری، علاوه بر مقدار مدول الاستیسیته، پارامترهای حداکثر نیروی شکست، میزان چقرمگی و زمان تأخیر تا ماه چهارم نیز کاهش داشتند. ویژگی‌های نرمش آنی و نرمش خزشی نیز در این دوره روندی افزایشی از خود نشان دادند. ویژگی‌هایی مانند ویسکوزیته آنی و تأخیری نیز روندی متغیر را در طول انبارداری از خود نشان دادند. از مطالعه و بررسی روند تغییرات معنادار مدول الاستیسیته در تراکم‌های متفاوت سیبزمینی و تغییرات پارامترهای رئولوژیکی دیگر می‌توان برای بهینه کردن شرایط انبارداری مانند تعیین دمای مناسب انبار برای طراحی سیستم تهویه و ارتفاع بهینه انبار به‌منظور کنترل تنفس و تعریق غده‌ها بهره جست، به‌نحوی که باگذشت زمان کمترین آسیب به بافت محصول برسد و افت آن نیز کاهش یابد. نتایج نشان از حساسیت بالاتر مقادیر خواص خزشی سیبزمینی نسبت به بازه‌های مختلف زمان انبارداری داشت و بنابراین مطالعه تغییرات این خواص در طول زمان‌های مختلف برای تعیین صحیح زمان انبارداری به‌منظور کاهش ضایعات به نظر سودمند خواهد بود.

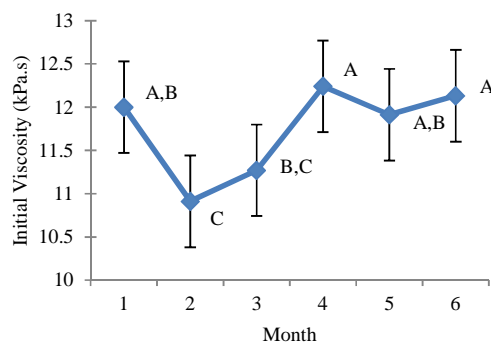
منابع

1. Aalami, H. Khoshtaghaza, M. H. and Minaie, S. 2006. Mechanical properties of soybean under static load. *Journal of Food Science and Technology*, 6(2): 113-124. (In Farsi)
2. Abbott, J. A. and Lu, R. 1996. Anisotropic mechanical properties on apple. *Trans. of the ASAE*, 1451-1459.
3. Abd El-Maksoud, M. A. Gamea, G. R. and Abd El-Gawad, A. M. 2009. Rheological Constants Of The Four Elements Burgers Model For Potato Tubers Affected By Various Fixed Loads Under Different Storage

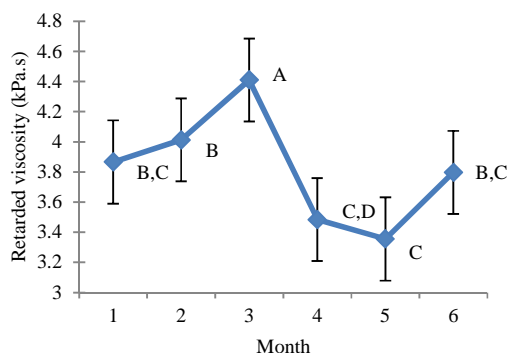
ویسکوالاستیک مواد پکتیک و مواد شبه سلولزی دیواره و لایه میانی سلول، بر روی ویسکوزیته عناصر درون مدل برگر مؤثر است. در پژوهشی دیگر عنوان‌شده است که در بررسی منحنی‌های خزشی با مدل شش عنصری برگر، دو جزء کلونین در مدل بازتاب‌دهنده خواص ویسکوالاستیک مواد پکتیک و شبه سلولزی هستند (Alvarez & Canet, 1998).



شکل ۸- مقایسه میانگین زمان تأخیر در طول دوره انبارداری



شکل ۹- مقایسه میانگین ویسکوزیته آنی (آزاد) در طول دوره انبارداری



شکل ۱۰- مقایسه میانگین ویسکوزیته تأخیری در طول دوره انبارداری

- Tissue Rigidity. *Physiologia Plantarum*, 802-817.
18. Ghasemi, A. and Goodarzi, A. A. 2012. Modeling the Rheological Properties of Onions and Potatoes Using Creep Test. 7th National Congress of Agricultural Engineering and Mechanization. Shiraz University. (In Farsi)
 19. Gorji-Chakespary, A. Rajabipour, A. and Mobli, H. M. 2010. Anisotropic Relaxation and Creep Properties of Apple (cv. Shafi Abadi and Golab Kohanz). *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2(4): 200-205.
 20. Gottschalk, K. and Ezekiel, R. 2006. Storage. In: Gopal, J. and Khurana, S. M. P. (eds.), *Handbook of Potato production, improvement and postharvest management*, 489-517. Harworth Press. Oxford, UK.
 21. Jackman, R. L. and Stanley, D. W. 1995. Creep behavior of tomato pericarp tissue as influenced by ambient temperature ripening and chilled storage. *Journal of Texture Studies*, 26: 537-552.
 22. Khan, A. A. and Vincent, J. F. V. 1993. Compressive stiffness and fracture properties of apple and potato parenchyma. *Jornal of Texture Studies*, 24: 423-435.
 23. Kunzek, H. Kabbert, R. and Gloyna, D. 1999. Aspects of material science in food processing: changes in plant cell walls of fruits and vegetables. *Zeitschrift fur Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung A*, 208: 233-250
 24. Landahl, S. Herppich, W. B. Herold, B. Geyer, M. and De Baerdemaeker, J. 2004. A Comprehensive Evaluation of the Interactions between Produce Elasticity and Water Status. *European Journal of Horticultural Science*, 69: 250-257.
 25. Laza, M. Scanlon, M. G. and 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.
 26. Lin, T. and Pitt, R. E. 1986. Rheology of apple and potato tissue as affected by cell turgor pressure. *Journal of Texture Studies*, 17: 291-313.
 27. Martinez, V. Y. Nieto, A. B. Castro, M. A. Salvatori, D. and Alzamora, S. M. 2007. Viscoelastic characteristics of Granny Smith apple during glucose osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 83, 394-403.
 28. Masoodi, H. Tabatabaiefar, S. A. Borqei, A. M. and Shahbeik, M. A. 2006. Evaluation of Mechanical properties of three varieties of apples for export after five months Storage. *Journal of Agricultural Engineering*, 7(27): 215-231. (In Farsi)
 - Conditions. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 26(1): 359-384.
 4. Albaloushi, N. S. 2013. Rheological behavior of tomato fruits affected By Various Loads under Storage Conditions. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 02: 36-43.
 5. Alvarez, M. D. and Canet, W. 1998. Rheological characterization of fresh and cooked potato tissues. *Zlebensm Unters Forsch*, 207: 55-66.
 6. Alvarez, M. D. and Canet, W. 2000. Storage time effect on the rheology of refrigerated potato tissue (cv. Monalisa). *European Food Research and Technology*, 212: 48-56.
 7. Alvarez, M. D. Canet, W. Cuesta, F. and Lam'ua, M. 1998. Viscoelastic characterization of solid foods from creep compliance data: application to potato tissues. *European Food Research and Technology*, 207: 356-362.
 8. Alvarez, M. D. Saunders, D. E. and Vincent, J. F. 2000. Effect of Turgor Pressure on the Cutting Energy of Stored Potatoes. *European Food Research Technology*, 210: 331-339.
 9. Bentini, M. Caprara, C. and Martelli, R. 2009. Physico-mechanical properties of potato tubers during cold storage. *Biosystems Engineering*, 104: 25-32.
 10. Brusewitz, G. H. Pitt, R. E. and Gao, Q. 1989. Effects of time and static preloading on the rheology of potato tissue. *Journal of Texture Studies*, 20: 267-284.
 11. Bu-Contreras, R. and Rao, M. A. 2002. Review: Dynamic rheological behaviour of heated potatoes. *Food Science and Technology International*, 8(1): 3-10.
 12. Burton, W. G. 1989. *The Potato*. 3rd ed., Longman Scientific and Technical, Harlow, UK.
 13. DeBaerdemaeker, J. G. Segerlind, L. J. Murase, H. and 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.
 14. Diehl, K. C. and Hamann, D. D. 1979. Relation between Sensory Profile Parameters and Fundamental Mechanical Parameters for Raw Potato, Melons and Apples. *Journal of Texture Studies*, 10: 401-420.
 15. Diehl, K. C. Hamann, D. D. and Whitfield, J. K. 1979. Structural failure in selected raw fruits and vegetables. *Journal of Texture Studies*, 10: 371-400.
 16. Fahloul, D. and Scanlon, M. G. 1996. A fracture mechanics analysis of the texture of potatoes. *Journal of Texture Studies*, 27: 545-557.
 17. Falk, S. Hertz, C. H. and Virgin, H. T. 1958. On the Relation between Turgor Pressure and

42. Solomon, W. K. and Jindal, V. K. 2007. Modeling changes in rheological properties of potatoes during storage under constant and variable conditions. *LWT*, 40: 170-178.
43. Vandijk, C. Beekhuizen, J. G. Gibcens, T. Boeriu, C. Fischer, M. and 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.
44. Varela, P. Salvador, A. and Fiszman, S. 2007. Changes in apple tissue with storage time: Rheological, textural and microstructural analyses. *Journal of Food Engineering*, 78: 622-629.
45. Zavareze, E. R. Pinto, V. Z. Klein, B. Halal, S. L. M., Elias, M. C. Prentice-Hernandez, C. and Dias, A. R. G. 2012. Development of oxidized and heat-moisture treated potato starch film. *Food Chemistry*, 132: 344-350.
29. Mościcki, L. Mitrus, M. Wójtowicz, A. Oniszczyk, T. Rejak, A. and Janssen, L. 2012. Application of extrusion-cooking for processing of thermoplastic starch (TPS). *Food Research International*, 47: 291-299.
30. Murase, H. Merva, G. E. and Segerlind, L. J. 1980. Variation of Young's modulus of potato as a function of water potential. *T. ASAE*, 23, 794-796, 800.
31. Nilsson, S. B. Hertz, C. H. and Falk, S. 1958. On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. 2. Theoretical calculations on model systems. *Physiologia Plantarum*, 11: 818-837.
32. Nourian, F. Ramaswamy, H. S. and Kushalappa, A. C. 2003. Kinetics of quality changes associated with potatoes stored at different temperatures. *Lebensm. Wiss. Technology*, 36: 49-65.
33. Pang, C. H. and Scanlon, M. G. 1996. Mechanical properties of the parenchyma of potato (*Solanum tuberosum* cv. Russet Burbank). *Canadian Journal of Botany*, 74(6): 859-869.
34. Pitt, R. E. 1982. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. *Transactions of the ASAE*, 25(6): 1776-1784.
35. Pitt, R. E. and Davis, D. C. 1984. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. *Transactions of the ASAE*, 27(6): 1976-1983.
36. Pitt, R. E. and Chen, H. L. 1983. Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. *Transactions of the ASAE*, 26(4): 1275-1280.
37. Praeger, U. Herppich, W. B. Konig, C. Herold, B. and 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.
38. Ramana, S. Wright, C and Taylor, A. 1992. Measurement of firmness in carrot tissue during cooking using dynamic, static and sensory tests. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 60: 369-375.
39. Scanlon, M. G. Pang, C. H. and Billaderis, C. G. 1996. The effect of osmotic adjustment on the mechanical, properties of potato parenchyma. *Food Research International*, 29,: 481-488.
40. Schick, R. and Klinkowski, M. 1961. *Die Kartoffel*. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin.
41. Schoorl, D. and Holt, J. E. 1983. Cracking in potatoes. *Journal of Texture Studies*, 14: 61-70.