

تعیین ویژگی‌های لزج کشسان (ویسکو الاستیک) دو رقم سیب‌زمینی ذخیره‌شده در انبار فنی و غیر فنی

رؤیا فرهادی^۱، امیرحسین افکاری سیاح^{۲*}، بهاره جمشیدی^۳ و احمد موسی پورگرگی^۴

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳- دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۴- استادیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۹۷/۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۸

چکیده

برای تعیین رفتار مکانیکی (خزشی) سیب‌زمینی تحت بار ثابت از دو نمونه سیب‌زمینی که در شرایط مختلف ذخیره‌شده بودند استفاده و اثر زمان و دمای ذخیره‌سازی بر رفتار خزشی نمونه‌ها بررسی شد. پارامترهای خزش شامل ضریب الاستیک آنی، ضریب الاستیک تأخیری، ضریب ویسکوزیته اولیه (آنی)، ضریب ویسکوزیته تأخیری و زمان تأخیری بود. دو نمونه مورد مطالعه، ویژگی‌های مکانیکی مختلفی نشان دادند اما در هر دو نمونه با افزایش زمان ذخیره‌سازی، تمامی پارامترهای خزش به‌جز زمان تأخیری کاهش معنی‌داری ($P < 0/05$) داشتند. اثر دمای ذخیره‌سازی بر این پارامترها نیز بررسی شد که نتایج آن نشان از شدت کاهش این پارامترها در انبار غیر فنی نسبت به انبار فنی داشت. یک مدل ریاضی به‌خوبی رفتار خزشی سیب‌زمینی‌های ذخیره‌شده را نشان داد. معادلات رگرسیون نتایج خوبی ($R^2 = 0/73 - 0/85$) برای تأثیر زمان و دمای ذخیره‌سازی بر پارامترهای خزش نشان داد. نتایج این معادلات نشان داد که پارامتر ضریب ویسکوزیته اولیه، بیشترین تأثیر را بر پارامترهای خزش دارد. در انبار فنی، در مقایسه با انبار غیر فنی، به دلیل دمای پایین و رطوبت کنترل‌شده نسبت به انبار غیر فنی شرایط بهتری برای ماندگاری غده‌ها وجود داشت. دوره انبارداری رقم آگریا، نسبت به ژنوتیپ کلون، به دلیل افت کمتر درصد رطوبت و نشاسته و عدم جوانه‌زنی طولانی‌تر بود درحالی‌که بافت ژنوتیپ کلون ذخیره‌شده نسبت به بافت نمونه تازه، کمتر از دو ماه در انبار غیر فنی و کمتر از سه ماه در انبار فنی، به دلیل هدر روی‌های رطوبت و کاهش مقدار نشاسته، که تأثیر مستقیم بر بافت می‌گذارند، نرم‌تر شد.

کلیدواژه‌ها

آزمون خزش، رفتار مکانیکی، ذخیره‌سازی، مدل بورگر

مقدمه

وارد شده بر غده‌ها به‌هنگام برداشت، بارگیری و ذخیره‌سازی سیب‌زمینی باعث می‌شود تا مشتری پسندی این محصول کاهش یابد که به ایجاد ضایعات و زیان‌های اقتصادی در تولید این محصول می‌انجامد. فرآیند ذخیره‌سازی سبب ایجاد تنش و

سیب‌زمینی یکی از محصولات کشاورزی است که نقش مهمی در سبد غذایی مردم جهان دارد. این محصول به‌صورت تازه‌خوری یا در صنایع غذایی به‌صورت فرآوری شده مصرف می‌شود. آسیب‌های

آزمون‌های مکانیکی مانند بارگذاری محوری (Alvarez & Canet, 1998; Thybo & Berg, 2002). آزمون کششی (Alvarez & Canet, 1998; Scanlon & Long, 1995) یا پانچ (Morales *et al.*, 1992) و آزمون خزش (Solomon & Jindal, 2007; Ghasemi *et al.*, 2014) برای ارزیابی پارامترهای مکانیکی بافت سیب‌زمینی خام به کار گرفته شده‌اند. با این حال نشان داده شده است که آزمون خزش می‌تواند اطلاعات بیشتری نسبت به سایر آزمون‌ها ارائه دهد. مزیت اصلی آزمون‌های خزش نسبت به آزمون‌های تنش‌آسایی این است که تجزیه و تحلیل را می‌توان با استفاده از مدل‌های خاص تسهیل کرد. با استفاده از این مدل‌ها، تعداد بیشتری از پارامترهای رئولوژیکی را می‌توان برآورد کرد و ویژگی‌های کششی، استحکام کششی و چسبندگی را به صورت جداگانه پیش‌بینی کرد (Sherman, 1966).

اگر محصول تحت تأثیر بار ثابت (تنش ثابت) قرار گیرد دچار تغییر شکل خواهد شد که این تغییر شکل نسبت به زمان باعث ایجاد رفتار رئولوژیک خزش می‌شود که می‌تواند شاخصی برای اندازه‌گیری رفتار لزج کشسان مواد باشد. در محدوده لزج کشسان خطی (تغییر شکل کم)، رفتار مواد غذایی را می‌توان با استفاده از مدل‌های مکانیکی متشکل از فنرها و ضربه‌گیرها (Del Nobile *et al.*, 2007; Bhattacharya, 2010) شبیه‌سازی کرد.

ثابت شده است که اکثر محصولات کشاورزی از جمله سیب‌زمینی (Alvarez & Canet, 1998) در برابر بارگذاری‌های مختلف رفتاری لزج کشسان دارند (Canet, 1980; Alvarez & Canet, 1998; Kaur *et al.*, 2002). برای استفاده از منحنی مشخصه مواد لزج کشسان و بیان میزان کیفیت هر

تغییرات فیزیولوژیکی و از دست دادن آب غده می‌شود که به نوبه خود بر ویژگی‌های مکانیکی آن تأثیر می‌گذارد (Burton *et al.*, 1987). شرایط ذخیره‌سازی از جمله دما، طول دوره نگهداری و رطوبت انبار می‌تواند بر بافت و در نتیجه بر ویژگی‌های مکانیکی محصول تأثیر بسزایی بگذارد. محصولات کشاورزی تحت تأثیر بار وارده تغییر شکل می‌دهند که با اطلاع از خواص مکانیکی محصولات و رفتار آنها نسبت به بارهای وارده می‌توان از آسیب جدی به محصولات، هم در زمان برداشت و هم در زمان ذخیره‌سازی، جلوگیری کرد؛ بنابراین، مطالعه ویژگی‌های مکانیکی برای بهبود و توسعه فناوری‌های مؤثر در مراحل برداشت و بعد از آن بسیار مهم است.

از طیف گسترده‌ای از آزمون‌های ابزاری صنعت برای ارزیابی بافت مواد غذایی و ویژگی‌های مکانیکی آنها استفاده و تلاش‌های زیادی در بهبود ابزار و روش‌های اندازه‌گیری برای برآورد معنی‌دار ویژگی‌های بافتی صرف شده است (Oraguzie *et al.*, 2009, Zdunek *et al.*, 2010). کیفیت بافت به مقاومت سیب‌زمینی نسبت به نیروی اعمال شده بستگی دارد (Nourian *et al.*, 2003, Kaur *et al.*, 2002). رفتار سیب‌زمینی (خام و فرآوری شده) نسبت به نیرو، نشان‌دهنده عملکرد ساختاری در بافت سیب‌زمینی است (Abu-Ghannam & Crowley, 2006). هنگامی که نیرویی به ساختار سیب‌زمینی اعمال می‌شود، شکست یا پارگی در شبکه‌ای از سلول‌های متصل به هم در نقطه کمینه مقاومت رخ می‌دهد. ریزساختار بافت سیب‌زمینی، ویژگی‌های پلیمرهای دیواره سلولی، مقدار نشاسته در سلول‌های سیب‌زمینی و شکل و اندازه دانه‌های نشاسته بر استحکام بافت سیب‌زمینی مؤثرند (Linehan & Hughes, 1969).

نوع مصرف (تازه‌خوری یا استفاده در صنعت فرآوری) متفاوت بودند. در ابتدا نمونه‌ها به دو قسمت تقسیم شدند، یک قسمت به انبار غیر فنی با دمای متغیر بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس با رطوبت نسبی ۸۰ تا ۹۰ درصد و یک قسمت به انبار فنی با دمای ثابت ۷ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۹۵ درصد منتقل شدند. به دلیل کوتاه بودن دوره خواب (۴۵ روز) و تغییرات فیزیولوژیکی سریع نمونه کلسون ۸-۳۹۷۰۰۹، نمونه‌ها به مدت سه ماه (بدون احتساب دوره التیام دهی) هرماه برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی تحت بارگذاری ثابت (آزمون خزش) در ۵ تکرار در آزمایشگاه خواص بیوفیزیک گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه محقق اردبیلی آزمایش شدند. بارگذاری روی سیب‌زمینی‌های تازه و ذخیره‌شده به مدت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز اجرا شد. آزمون خزش روی قطعات استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر با استفاده از دستگاه آزمون کشش- فشار مدل *STM-20* ساخت شرکت طراحی مهندسی سنتام^۲ ایران دنبال شد. دستگاه آزمون مجهز به حسگر *BONGSHIN* مدل *DBBP-100* با ظرفیت $10 \cdot kgf$ و دارای پروب صفحه‌ای بود. نمونه‌ها در ۵ تکرار به مدت ۱۰ دقیقه در بین دو صفحه موازی تحت بار ثابت ۳۰ نیوتن قرار داده شدند. هم‌زمان، داده‌ها در کامپیوتر ذخیره و منحنی تغییر شکل- زمان با نرم‌افزار مربوط رسم شد. روش تعیین پارامترهای خزش همان است که آیمان ایسا و همکاران و سلومون و جیندال مشخص کرده‌اند. (Ayman et al., 2012; Solomon & Jindal, 2007) برای برآزش معادله بر اساس مقادیر زمان و تغییر شکل، داده‌ها به نرم‌افزار Table Curve 2D (5.01.01) منتقل شد. مدل چهار جزئی بورگر (Burgers, 1935) که ترکیبی از مدل

محصول، مدل‌سازی رفتار آن ضروری است (Hamann, 1992)، مدل‌های رئولوژیکی متفاوتی برای پیش‌بینی رفتار مواد لزج کشسان تحت شرایط متفاوت تنش و کرنش استفاده می‌شود، از جمله مدل ماکسول، مدل بورگر و مدل کلون (Steffe, 1996) که این مدل‌ها شامل ترکیبات مختلفی از جسم جامد هوکی (فتر) و سیال نیوتنی (دمپر) است که رفتار پیچیده مواد لزج کشسان را نشان می‌دهد (Rao et al., 1986).

تحقیقاتی محدود در مورد ویژگی‌های رئولوژیکی سیب‌زمینی با استفاده از آزمون‌های خزش گزارش شده است (Purkayastha et al., 1985, Alvarez et al., 1998). اما تأثیر شرایط و زمان ذخیره‌سازی به صورت محدود در مدل‌سازی رفتار سیب‌زمینی در سراسر دوره انبارمانی بررسی شده است که مطالعه این شرایط از هدف‌های این مقاله است.

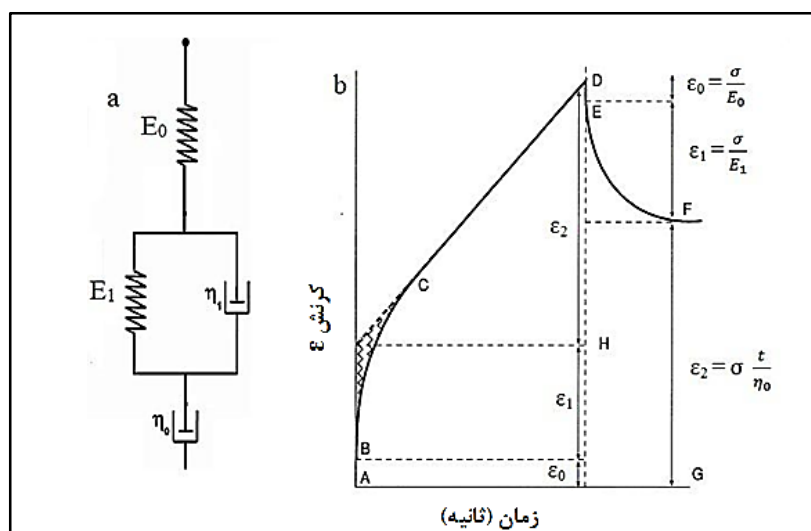
مواد و روش‌ها

چهارصد عدد سیب‌زمینی از دو نمونه مورد مطالعه، رقم آگریا و ژنوتیپ کلسون ۸-۳۹۷۰۰۹ در اواسط اردیبهشت و در شرایط یکسان در ایستگاه تحقیقات کشاورزی آلاروق شهرستان اردبیل کشت و محصول آنها در نیمه دوم مهرماه برداشت شدند. این ژنوتیپ حاصل انتخاب از میان ۲۶ جمعیت اصلاحی دریافتی از مرکز تحقیقات بین‌المللی سیب‌زمینی (CIP^۱) در سال ۱۳۸۳ و ده سال تحقیق در موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و مراکز تحقیقاتی تابعه است. غده‌های سالم با اندازه‌های مختلف، پس از برداشت به مدت دو هفته در دمای اتاق (۲۰-۱۵ درجه سلسیوس) همراه با تهویه طبیعی برای گذراندن دوره کیورینگ قرار داده شدند. این دو نمونه از نظر کیفی و دوره انبارمانی و

ایجاد می‌کند که با خزش تأخیری ϵ_I نشان داده شده است. در این منطقه، میزان تنش به تدریج کاهش می‌یابد، زیرا پیوندهای شیمیایی بافت سیبزمینی در شبکه شروع به گسستن می‌کند. با افزایش بارگذاری به سمت نقطه C، تعداد اتصالاتی که شکسته می‌شود نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که همه پیوندهای موجود در نمونه، توان یکسانی ندارند، پیوندهای ضعیف بعد از مدتی کوتاه از بین می‌روند (بخش الاستیک تأخیری).

منطقه C-D منطقه‌ای است خطی با خزش نیوتنی ϵ_2 که در آن میزان کرنش ثابت است؛ در این ناحیه، برخی از ارتباطها به‌طور دائم پاره می‌شود اما اگر تنش در نقطه D برداشته شود و پس از آن اعمال نشود، نمونه به‌واسطه رفتار نیوتنی تا حدودی بهبود می‌یابد (Alvarez & Canet, 1998; Yang *et al.*, 2006).

کلوین و ماکسول است به دلیل نتایج ساده و قابل قبول (Dolz *et al.*, 2008) برای بررسی رفتار لزج کشسان مواد در این مطالعه به کار گرفته شد که شماتیکی از این مدل در شکل a-1 و منحنی بارگذاری و باربرداری یک جسم لزج کشسان در بار ثابت در شکل b-1 دیده می‌شود. طبق شکل b-1، این منحنی را می‌توان به سه منطقه اصلی تقسیم کرد. فرض بر این است که نمونه شامل شبکه‌ای پیچیده از رشته‌ها (تارهای) مرتبط با یکدیگر است، منطقه A-B مربوط به کرنش لحظه‌ای ϵ_0 است که در آن ارتباط بین واحدهای ساختاری و کشش الاستیک است. اگر تنش قبل از زمان رسیدن به نقطه B برداشته شود، ساختار اصلی نمونه به طور کامل بازیابی می‌شود (بخش الاستیک آنی). با افزایش مدت‌زمان بارگذاری، منطقه B-C یک منطقه الاستیک ضعیف وابسته به زمان



شکل ۱- (a) مدل بورگر شامل مدل‌های ماکسول و کلوین به صورت سری، (b) نمودار بین کرنش و زمان برای مدل چهارگانه بورگر در آزمون خزش (Canet *et al.*, 2009)

کرنش کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - \frac{t}{T_{ret}} \right) + \frac{t}{\eta_0} \right] = \epsilon_0 + \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (1)$$

که در آن،

اما بیان ریاضی برای مدل بورگر با توجه به

شکل ۱، به صورت رابطه ۱ است (Mohsenin, 1986).

تعیین ویژگی‌های لزج کشسان (ویسکو الاستیک) دو رقم...

الاستیک تأخیری، ضریب ویسکوزیته اولیه، ضریب ویسکوزیته تأخیری و زمان تأخیری در پنج تکرار اجرا شد. میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با هم مقایسه شدند. از آنالیز رگرسیون خطی چندگانه برای تخمین روند تأثیر زمان انبارداری و دمای ذخیره‌سازی بر پارامترهای آزمون خزش و برای مقایسه روند این تأثیر، از ضریب تبیین (R^2) و انحراف معیار (SD) استفاده شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS 16.0 و Excel 2010 تجزیه و تحلیل شدند.

نتایج و بحث

درصد نشاسته و رطوبت

میانگین داده‌های مربوط به مقدار نشاسته و درصد رطوبت در جدول ۱ آمده است. مشاهده می‌شود که میزان نشاسته و درصد رطوبت در هر دو نمونه سیب‌زمینی و در هر دو نوع انبار در دوره انبارمانی کاهش یافته است. این تغییرات می‌تواند ناشی از تنفس و تعرق و در نتیجه تغییر در ترکیبات سیب‌زمینی باشد. طبق جدول ۱ میزان نشاسته غده‌های ذخیره‌شده در انبار فنی پایین‌تر از میزان نشاسته غده‌های ذخیره‌شده در انبار غیر فنی است زیرا قرار گرفتن در دمای پایین به مدت طولانی می‌تواند باعث آبکافت (هیدرولیز) نشاسته و تبدیل آن به قند و کاهش میزان نشاسته شود. در ژنوتیپ کلون ذخیره‌شده در انبار غیر فنی در دوره انبارداری سه ماهه، نمونه‌های کلون شروع به جوانه‌زنی می‌کنند و از آنجا که آبکافت (هیدرولیز) نشاسته با جوانه‌زنی تسریع می‌شود (Ding *et al.*, 2002) میزان کاهش نشاسته آن نسبت به ژنوتیپ اگریای ذخیره‌شده در انبار غیر فنی بیشتر خواهد شد. جوانه‌زنی در دماهای پایین مهار می‌شود و از این رو

$\varepsilon(t)$ کرنش کل در زمان T ؛ $\sigma = T$ تنش ثابت (مگاپاسکال)؛ $E_0 =$ مدول الاستیک اولیه (مگاپاسکال)؛ $E_1 =$ مدول الاستیک تأخیری (مگاپاسکال)؛ $\eta_0 =$ ضریب ویسکوزیته اولیه یا آنی (مگاپاسکال. ثانیه)؛ $\eta_1 =$ ضریب ویسکوزیته تأخیری (مگاپاسکال در ثانیه)؛ T_{ret} : زمان تأخیری (ثانیه) $E_1 / \eta_1 = T$ زمان (ثانیه).
کرنش (ε) یا تغییر شکل خزشی با توجه به رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

که در آن،

$L_0 =$ ارتفاع اولیه نمونه؛ $\Delta L =$ تغییر ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر، در آزمون خزشی. همچنین، با توجه به شرایط ذکر شده در بالا، تنش اولیه وارد بر نمونه‌های استوانه‌ای شکل در اثر بار ثابت ۳۰ نیوتن نیز از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{30\text{N}}{490.62\text{mm}^2} = 61.14 \text{ KPa} \quad (3)$$

اندازه‌گیری میزان نشاسته و درصد رطوبت

قبل از آغاز آزمایش‌ها، نمونه‌ها برای اندازه‌گیری میزان نشاسته و درصد رطوبت به آزمایشگاه فرستاده شدند. میزان نشاسته نمونه‌ها مطابق روش نودا (Noda *et al.*, 2004) و درصد رطوبت به روش (Bu- Contreras & Rao, 2001) در ۵ تکرار اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش‌ها در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با متغیرهای مستقل مدت‌زمان انبارداری و دمای انبار و متغیرهای وابسته شامل مدول الاستیک اولیه، مدول

در انبار فنی جوانه‌زنی برای دو ژنوتیپ مشاهده نشد اما دلیل کاهش نشاسته در این انبار، آبکافت (هیدرولیز) نشاسته و تبدیل آن به قند بود. کاهش مقدار رطوبت نیز می‌تواند به دلیل تبخیر آب و تغییر در ترکیبات ساختاری از جمله مقدار رطوبت و میزان نشاسته و قند غده در دوره ذخیره‌سازی باشد.

جدول ۱- میانگین میزان نشاسته و درصد رطوبت نمونه‌های سیب‌زمینی در دو انبار فنی و غیر فنی

ژنوتیپ	نوع انبار	ویژگی	
		نشاسته (%)	رطوبت (%)
آگریا	تازه	۱۵/۸۹ ^a ± ۱/۴۸	۸۳/۲۲ ^a ± ۴/۶۷
	انبار غیر فنی	۱۴/۱۰ ^b ± ۱/۴۸	۷۲/۳۵ ^c ± ۱/۵۶
	انبار فنی	۱۳/۰۷ ^c ± ۱/۳۷	۷۸/۵۰ ^b ± ۰/۵۹
کلون	تازه	۱۵/۷۶ ^a ± ۱/۵۴	۸۱/۹۴ ^a ± ۵/۰۴
	انبار غیر فنی	۱۳/۴۸ ^c ± ۱/۴۰	۶۸/۸۴ ^d ± ۲/۰۸
	انبار فنی	۱۲/۳۲ ^d ± ۱/۶۷	۷۳/۸۰ ^c ± ۱/۸۸

در هر ستون، میانگین‌هایی که در حرف لاتین مشترک نیستند بر اساس آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد معنادار هستند.

آزمون خزش

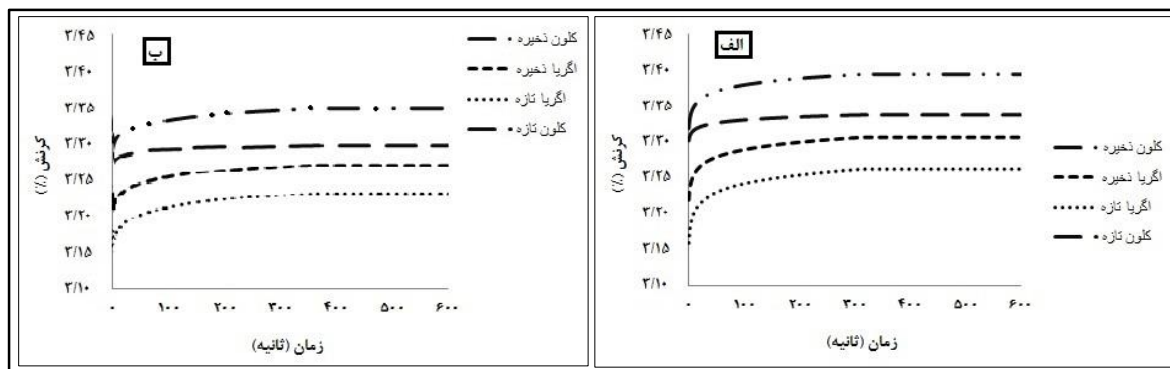
گفت که در دوره ذخیره‌سازی میزان رطوبت غده‌ها بر اثر تبخیر در انبار فنی ۶ و ۱۰ درصد و در انبار غیر فنی ۱۰ و ۱۶ درصد به ترتیب برای رقم آگریا و ژنوتیپ کلون کاهش پیدا کرده است، در نتیجه این اتلاف رطوبت، حجم سلول‌ها کاهش و فضای بین سلولی نسبت به غده‌های تازه بیشتر شده که این می‌تواند بر ویژگی‌های بافت غده تأثیر بگذارد (Falk *et al.*, 1958) و بافت غده‌ها را نرم‌تر کند (Niklas, 1989) و در نتیجه سفتی نمونه نیز کاهش و میزان تغییر شکل‌پذیری و سرانجام میزان کرنش نمونه نسبت به زمان افزایش یابد. پژوهش‌هایی وجود دارد که سفتی نمونه را متأثر از حجم آب درون نمونه‌ها می‌دانند (Praeger *et al.*, 2009; Bentini *et al.*, 2009) کاهش نشاسته به دلیل تبدیل آن به قندهای احیا یا مصرف آن توسط جوانه (ژنوتیپ کلون ذخیره‌شده در انبار غیر فنی) نیز دلیل دیگر کاهش سفتی نمونه‌هاست (مقدار نشاسته در انبار فنی ۱۷ و ۲۲ درصد و در انبار غیر فنی ۱۱ و ۱۵ درصد به ترتیب برای رقم آگریا و ژنوتیپ کلون

رفتار خزشی نمونه‌های سیب‌زمینی تازه و ذخیره‌شده در انبار غیر فنی و فنی تحت بار ثابت ۳۰ نیوتن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ذخیره‌سازی، تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) در رفتار خزش هر دو نمونه در ۶۰۰ ثانیه بارگذاری ایجاد شده است که این تفاوت به دلیل تغییرات ساختاری نمونه‌ها (دیواره سلولی و لایه میانی) به‌هنگام ذخیره‌سازی بر اثر فعالیت‌های فیزیولوژیک و تغییر در ترکیبات نمونه و در نتیجه تأثیر این عوامل بر بافت نمونه و رفتار رئولوژیک نمونه‌هاست. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است در ابتدا میزان کرنش اولیه در رقم آگریا کمتر است تا در ژنوتیپ کلون که دلیلی است بر بالا بودن میزان نشاسته و مواد جامد بالاتر رقم آگریا و در نتیجه سفت‌تر بودن بافت آن نسبت به ژنوتیپ کلون، ولی با گذشت زمان ذخیره‌سازی، میزان کرنش در هر دو نمونه روند افزایشی طی کرده است. دلیل این روند افزایشی را می‌توان این‌گونه

تعیین ویژگی‌های لزج کشسان (ویسکو الاستیک) دو رقم...

از دوره انبارمانی در مورد سیب‌زمینی (Morales *et al.*, 1992; Omid- Arjenaki *et al.*, 2018) و سایر محصولات کشاورزی مثل سیب (Harker *et al.*, 2002)، گوجه‌فرنگی (Desmet *et al.*, 2002; Thiagu *et al.*, 2006; Lien *et al.*, 2009) نیز گزارش شده است.

کاهش پیدا کرده است) در ژنوتیپ کلون به دلیل جوانه‌زنی و مصرف آب و مواد جامد محلول توسط جوانه (Lu *et al.*, 2012) این تغییر رفتار شدت بیشتری نسبت به رقم آگریا داشته است و بافت ژنوتیپ کلون تغییر شکل‌پذیری بیشتری نسبت به رقم آگریا از خود نشان داده است. کاهش سفتی بعد



شکل ۲- منحنی زمان- کرنش (خزش) سیب‌زمینی تازه و ذخیره‌شده به مدت سه ماه در الف) انبار غیر فنی، ب) انبار فنی

کلون بافت سفت‌تر و در نتیجه مدول الاستیسیته بالاتری داشته باشد.

برابر جدول ۲، مقادیر E_0 نسبت به E_1 خیلی کوچک‌تر است چون در سیب‌زمینی درصد رطوبت سلول‌ها بالاست، تراکم‌پذیری کمتر است و در نتیجه، کرنش اولیه یا آنی در آنها کم و از این رو مدول الاستیک آنی کمتر از مدول الاستیک تأخیری است (Solomon & Jindal, 2007).

با توجه به جدول ۲ و شکل ۳، در دوره ذخیره‌سازی در هر دو نمونه سیب‌زمینی، هم در انبار فنی و هم در انبار غیر فنی تغییر شکل آنی نمونه‌ها (E_0) که مستقل از زمان است با گذشت زمان به دلیل فعالیت‌های بیولوژیکی و تنفس و کاهش میزان رطوبت (Burton, 1987) و تجزیه نشاسته (Van Buren, 1979) طی ذخیره‌سازی ۳ ماهه و کاهش فشار تورگر (فشار داخلی سلول‌ها) و به دلیل وابستگی شدید ضریب الاستیسیته آنی به فشار

برای به‌دست آوردن مدل ریاضی رفتار سیب‌زمینی‌های تازه و انبار شده در برابر بار ثابت و به‌دست آوردن ثابت‌های E_0 ، E_1 ، η_0 و η_1 مربوط به معادله بورگر، با توجه به شکل ۱ و معادله ۱، با نرم افزار Table Curve 2D نسخه ۵،۰۱،۰۱ و از طریق تجزیه و تحلیل رگرسیون غیر خطی، داده‌های زمان- تغییر شکل به‌دست آمد. تمام معادله‌های رگرسیون غیرخطی در سطح $P < 0.01$ از نظر آماری معنی‌دار بودند. تغییرات ثابت‌های خزش در جدول ۲ و شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

طبق جدول ۲، مقادیر E_0 مربوط به رقم آگریا و کلون ۸-۹-۳۹۷۰۰ در حالت تازه تفاوت معنی‌داری ندارند ($P > 0.05$)؛ اما این مقدار، هم در حالت تازه و هم در دوره ذخیره‌سازی نسبت به ژنوتیپ کلون بیشتر است که به احتمال زیاد به دلیل بالا بودن مقدار ماده خشک از جمله میزان نشاسته این نمونه است که باعث می‌شود رقم آگریا نسبت به ژنوتیپ

درصد در انبار فنی به ۱۸/۳۰ مگاپاسکال و کاهش ۳۳ درصد در انبار غیر فنی به ۱۶/۴۴ مگاپاسکال رسید. همچنین، مقدار این ضریب در نمونه‌های تازه ژنوتیپ کلون ۲۳/۸۸ مگاپاسکال بود که با کاهش ۳۲ درصد در انبار فنی به ۱۶/۲۷ مگاپاسکال و کاهش ۴۰ درصد در انبار غیر فنی به ۱۴/۵۰ مگاپاسکال رسید. مقادیر به‌دست آمده نزدیک است با نتایج به‌دست آمده از تحقیقات (Purkayastha *et al.*, 1985; Solomon & Jindal, 2007) در سیب‌زمینی.

تفاوت در خواص لزج کشسان و مکانیکی بافت نمونه‌های تازه و ذخیره‌شده را می‌توان به پارگی غشا و کاهش فشار تورگر، انقباض بافت و تخریب دیواره‌های سلولی در غده‌ها بر اثر انبارمانی نسبت داد. به همین علت نتایج چنین آزمون می‌تواند تا حدی بیانگر تغییرات کیفی غده‌ها در مرحله ذخیره‌سازی باشد.

پارامتر η_0 منعکس کننده چسبندگی مولکول‌ها و سیالیت بافت است. طبق جدول ۲، ضریب ویسکوزیته اولیه η_0 در حدود ۸ تا ۹ برابر ضریب ویسکوزیته مربوط به بخش الاستیک تأخیری η_1 و بیانگر سیالیت کمتر در بخش الاستیک تأخیری است (Ghasemi *et al.*, 2014). تغییرات ضریب ویسکوزیته اولیه η_0 با افزایش زمان ذخیره‌سازی در هر دو نمونه سیب‌زمینی و در هر دو نوع انبار روند کاهشی طی کرده است. ام؛ این روند کاهشی در ژنوتیپ کلون ذخیره‌شده در انبار غیر فنی بیشترین مقدار را دارد. مقدار ضریب لزج کشسان اولیه η_0 برای رقم آگریا تازه ۶۳۰۵/۶۷، آگریا ذخیره‌شده در انبار فنی ۵۳۴۶/۱۲ و آگریا ذخیره‌شده در انبار غیر فنی ۴۸۹۰/۰۴ مگاپاسکال در ثانیه و برای ژنوتیپ کلون تازه ۵۹۹۷/۳۴، کلون ذخیره‌شده در انبار فنی

تورگر، کاهش یافته است (Pitt, 1992). مدول اولیه (E_0) یا مدول الاستیک آنی با سفتی یا کشش مرتبط است که کاهش آنها در دوره ذخیره‌سازی نشان دهنده از دست دادن فشار تورگر است که می‌تواند سفتی دیواره سلولی و حمایت مکانیکی برای حفظ شکل سلولی و بافت را کاهش دهد. از سوی دیگر، مقادیر E_1 و یا مدول الاستیک تأخیری نیز در دوره ذخیره‌سازی کاهش یافته است ($P < 0.05$). از آنجا که E_1 منعکس کننده خاصیت الاستیک مولکول‌ها و سیالیت بافت است و تغییرات وابسته به زمان را مشخص می‌کند؛ بنابراین، بخشی از کاهش این پارامتر در دوره ذخیره‌سازی می‌تواند به علت کاهش سیالیت دیواره سلولی به دلیل تخریب پکتین و تخریب غشای سلولی باشد. این کاهش در انبار غیر فنی کمی بیشتر از است تا در انبار فنی.

به‌طور کلی، مقادیر E_0 و E_1 در دوره ذخیره‌سازی کاهش می‌یابد که همان نتیجه‌ای است که (Ayman, 2012, Nabil, 2013) در محصولات مانند گلابی و گوجه‌فرنگی در دوره ذخیره‌سازی مشاهده کردند که این می‌تواند باعث نرم شدن بافت میوه‌ها شود. مقدار مدول الاستیک آنی E_0 برای رقم آگریا تازه ۲/۶۲، آگریا ذخیره‌شده در انبار فنی ۲/۰۴ و آگریا ذخیره‌شده در انبار غیر فنی ۱/۷۷ مگاپاسکال و برای ژنوتیپ کلون تازه ۲/۵۹، کلون ذخیره‌شده در انبار فنی ۱/۸۲ و کلون ذخیره‌شده در انبار غیر فنی ۱/۶۹ مگاپاسکال به‌دست آمد. میزان کاهش این پارامتر برای رقم آگریا ۲۳ و ۳۲ درصد و برای ژنوتیپ کلون ۲۷ و ۳۴ درصد به ترتیب در انبار فنی و غیر فنی است. میانگین مدول الاستیک تأخیری E_1 که با سختی بافت در ارتباط است در نمونه‌های تازه رقم آگریا ۲۴/۵۰ مگاپاسکال بود که با کاهش ۲۵

به ۶۳ درصد از تغییر شکل کلی است (Martinez *et al.*, 2007) برای هر دو نمونه سیب‌زمینی هم در حالت تازه و هم بعد از ذخیره‌سازی متفاوت است. پارامتر زمان تأخیر فاکتور مهمی در زمان ذخیره‌سازی است (Gorji Chakespari *et al.*, 2010). از آنجا که طولانی بودن زمان تأخیر نشان دهنده پایین بودن سرعت برگشت تغییر شکل و برگشت به حالت اولیه است، مشاهده می‌شود که زمان تأخیر T_{ret} در مقایسه با ضریب الاستیسیته تأخیری، روند متضاد را نشان می‌دهد، زمانی که ضریب الاستیسیته تأخیری، کاهش یافته، زمان تأخیری افزایش داشته است. این یعنی با افزایش زمان و دمای ذخیره‌سازی، زمان (زمان تأخیر) بیشتری برای آزادسازی تنش وارد شده بر نمونه لازم است. با توجه به جدول ۲ و شکل ۳ مشاهده می‌شود که زمان تأخیر، برخلاف سایر پارامترهای خزش، با گذشت دوره ذخیره‌سازی افزایش داشته است. زمان تأخیر T_{ret} برای رقم آگریا تازه ۳۰/۹۳، آگریا ذخیره‌شده در انبار فنی ۳۶/۴۲ و آگریا ذخیره‌شده در انبار غیر فنی ۳۱/۲۷ ثانیه و برای ژنوتیپ کلون تازه ۲۹/۳۸، کلون ذخیره‌شده در انبار فنی ۳۰/۹۰ و کلون ذخیره‌شده در انبار غیر فنی ۳۲/۲۵ ثانیه به دست آمد. این داده‌ها برای زمان تأخیر، به داده‌های تحقیقاتی (Alvarez & Canet, 1998; Canet *et al.*, 2009) برای سیب‌زمینی پخته و تازه نزدیک است.

۴۸۳۲/۵۹ و کلون ذخیره‌شده در انبار غیر فنی ۴۲۲۱/۶۹ مگاپاسکال در ثانیه به دست آمد. این داده‌ها با نتایج تحقیقات (Solomon & Jindal, 2007) بسیار نزدیک است. مشاهده می‌شود که ضریب ویسکوزیته تأخیری η_1 با افزایش زمان ذخیره‌سازی، هم در شرایط ذخیره‌سازی فنی و هم در شرایط ذخیره‌سازی غیر فنی، کاهش می‌یابد. این کاهش در η_1 و حتی E_2 به احتمال زیاد به علت تخریب مواد پکتینی است که ۵۲ درصد دیواره سلولی سیب‌زمینی را تشکیل می‌دهند و در انعطاف سلول‌ها نقش دارند (Alvarez *et al.*, 2000; Scanlon *et al.*, 1996). کاهش این پارامتر نشان دهنده افزایش در تغییر شکل دائمی نمونه تحت بار ثابت است. میانگین ضریب ویسکوزیته تأخیری η_1 در نمونه‌های تازه رقم آگریا ۷۵۷/۸۹ مگاپاسکال در ثانیه است که با کاهش ۱۲ درصد در انبار فنی به ۶۶۶/۶۰ مگاپاسکال در ثانیه و کاهش ۳۲ درصد در انبار غیر فنی به ۵۱۴/۰۵ مگاپاسکال در ثانیه رسید. همچنین، مقدار این ضریب در نمونه‌های تازه ژنوتیپ کلون ۷۰۱/۶۴ مگاپاسکال در ثانیه است که با کاهش ۲۸ درصد در انبار فنی به ۵۰۲/۷۴ مگاپاسکال و کاهش ۳۳ درصد در انبار غیر فنی به ۴۶۷/۶۳ مگاپاسکال در ثانیه رسید. زمان تأخیر T_{ret} که بیانگر مدت‌زمان مورد نیاز برای فشار بر عناصر ساختاری مرتبط با رفتار لزج کشسان برای رسیدن

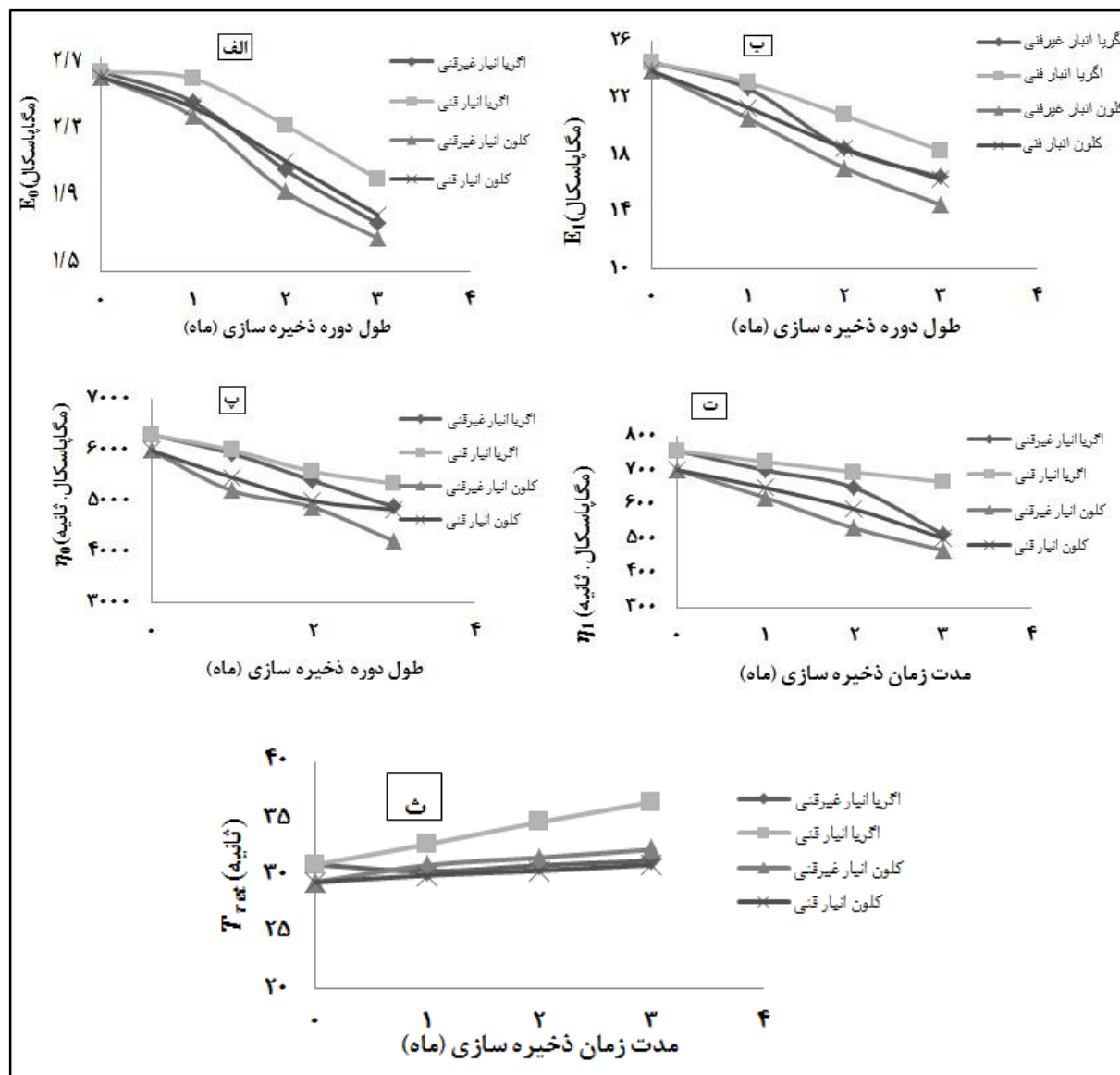
جدول ۲: پارامترهای آزمون خزش در دو نمونه سیب‌زمینی تازه و ذخیره‌سازی شده

میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده آزمون خزش					رقم	زمان
E_0 (Mpa)	E_1 (Mpa)	η_0 (Mpa.s)	η_1 (Mpa.s)	T_{ret} (s)		
۲/۶۳ ^a	۲۴/۵۰ ^a	۶۳۰۵/۶۷ ^a	۷۵۷/۸۹ ^a	۳۰/۹۳ ^c	آگریا	قبل از انبار کردن
۲/۵۹ ^a	۲۳/۸۸ ^a	۵۹۹۷/۳۴ ^b	۷۰۱/۶۴ ^b	۲۹/۳۸ ^d	کلون	
۲/۰۴ ^b	۱۸/۳۰ ^b	۵۳۶۴/۱۲ ^c	۶۶۶/۶۰ ^c	۳۶/۴۳ ^a	آگریا	بعد از انبار فنی
۱/۸۳ ^c	۱۶/۲۷ ^c	۴۸۳۲/۵۹ ^e	۵۰۲/۷۴ ^d	۳۰/۹۰ ^c	کلون	
۱/۷۷ ^c	۱۴/۶۴ ^d	۴۸۹۰/۰۴ ^d	۵۱۴/۰۵ ^d	۳۱/۲۷ ^{b,c}	آگریا	بعد از انبار غیر فنی
۱/۶۹ ^d	۱۴/۵۰ ^d	۴۲۲۱/۶۹ ^f	۴۶۷/۶۳ ^e	۳۲/۲۵ ^b	کلون	

در هر ستون، تفاوت میانگین‌هایی که در حرف لاتین مشترک نیستند بر اساس آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، معنی‌دار هستند.

فیزیولوژیکی و تنفس و اتلاف آب که همگی بر بافت و خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارند کمتر است در نتیجه تغییر در پارامترهای مکانیکی کمتر یا دیرتر رخ خواهد داد.

با توجه به این یافته‌ها می‌توان مشاهده کرد که در انبار فنی، نسبت به انبار غیر فنی، به دلیل دمای پایین و رطوبت کنترل شده شرایط بهتری برای ماندگاری غده‌ها وجود دارد؛ در دمای پایین، فعالیت



شکل ۳- تغییرات الف: E₀ (مدول الاستیک اولیه) ب: E₁ (مدول الاستیک تأخیری) پ: η₀ (ضریب ویسکوزیته اولیه یا آنی) ت: η₁ (ضریب ویسکوزیته تأخیری) ث: T_{ret} (زمان تأخیری) نسبت به مدت زمان انبارمانی در دو نمونه سیب زمینی ذخیره شده در دو نوع انبار

ژنوتیپ کلون است، با توجه به شکل ۳ و تغییر مقادیر پارامترهای آزمون خزش به خصوص مدول اولیه (E₀) یا مدول الاستیک آنی که با سفتی مرتبط

به نظر می‌رسد دوره انبارمانی رقم آگریا نسبت به دوره انبارمانی ژنوتیپ کلون طولانی تر است که این نشان دهنده بافت سفت تر رقم آگریا نسبت به

به‌طور کلی عمده تغییرات در ویژگی‌های خزش سیب‌زمینی در دوره ذخیره‌سازی به علت از دست دادن فشار تورگر و دیگرواکشن‌های بیوشیمیایی است که به تغییر در زمان ذخیره‌سازی برمی‌گردد و بر دیواره سلولی و لایه میانی بافت تأثیر می‌گذارد؛ اما برای بررسی بهتر مدل و بررسی تأثیر زمان (X ، بر حسب ماه) و دمای ذخیره‌سازی (Y ، بر حسب درجه سلسیوس) بر پارامترهای خزش، از رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد که نتایج آن در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

است، درصد نشاسته نمونه کلون در انبار فنی در پایان ماه دوم ۱۴/۲۵ و در انبار غیر فنی ۱۴/۶۰ بود که این مقادیر در پایان ماه سوم به ترتیب به ۱۲/۳۲ و ۱۳/۴۸ درصد تغییر یافت. همچنین درصد رطوبت نمونه کلون در انبار فنی در پایان ماه دوم ۷۶/۲۹ و در انبار غیر فنی ۷۱/۶۵ درصد بود که این مقادیر در پایان ماه سوم ذخیره‌سازی در انبار به ترتیب به ۷۳/۸ و ۶۸/۸۴ درصد رسید. به نظر می‌رسد نمونه کلون کمتر از دو ماه در انبار غیر فنی و کمتر از سه ماه در انبار فنی به بافت نرم می‌رسد و برای ذخیره‌سازی به مدت طولانی مناسب نیست.

جدول ۳: نتایج آنالیز رگرسیون خطی چندگانه بین تأثیر زمان (X ، بر حسب ماه) و دمای ذخیره‌سازی (Y ، بر حسب درجه سلسیوس) بر پارامترهای آزمون خزش

رقم	پارامتر	معادله	R^2	SD
آگریا	E_0	$E_0 = -0.206X - 0.06Y + 2.69$	۰/۸۰۳	۰/۸۹۷
	E_1	$E_1 = -0.456X - 0.107Y + 1.803$	۰/۸۴۱	۰/۶۵۲
	η_0	$\eta_0 = -1.043X - 2.502Y + 6.225/34$	۰/۸۵۸	۱/۲۰۲
	η_1	$\eta_1 = -0.326X - 0.146Y + 6.54/0.8$	۰/۸۲۷	۱/۰۸۲
	T_{ret}	$T_{ret} = +0.326X + 0.146Y + 2.6/1.0$	۰/۷۳۵	۱/۲۶۲
کلون	E_0	$E_0 = -0.314X - 0.09Y + 2.54$	۰/۸۲۳	۰/۶۲۹
	E_1	$E_1 = -0.522X - 0.221Y + 1.8/99$	۰/۷۳۷	۰/۷۹۷
	η_0	$\eta_0 = -1.543X - 2.891Y + 0.930$	۰/۸۴۴	۱/۲۳۹
	η_1	$\eta_1 = -0.479X - 0.098Y + 0.69$	۰/۸۱۵	۱/۱۸۰
	T_{ret}	$T_{ret} = +0.407X + 0.193Y + 2.4/39$	۰/۷۶۷	۱/۳۱۲

ویسکوزیته آنی η_0 دارای بیشترین ضریب رگرسیون است که می‌توان نتیجه گرفت این پارامتر بیشترین حساسیت را به دما و زمان ذخیره‌سازی دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت که زمان و شرایط ذخیره‌سازی در هر دو نمونه، بر رفتار خزشی و پارامترهای خزشی تأثیر گذاشته‌اند، البته باید به این نکته توجه داشت که پاسخ الاستیک بافت گیاه به

از معادله‌های رگرسیون می‌توان فهمید که رابطه بین مدت‌زمان ذخیره‌سازی و دمای ذخیره‌سازی با پارامترهای خزشی به‌جز زمان تأخیر، منفی است که به این معنی است که با افزایش زمان ذخیره‌سازی یا افزایش دمای ذخیره‌سازی، پارامترهای خزشی به‌جز زمان تأخیر به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا می‌کنند. همچنین

نتیجه‌گیری

برای به‌دست آوردن رفتار خزشی دو نمونه سیب‌زمینی تازه و ذخیره‌شده در انبار فنی و غیر فنی، از مدل بورگر استفاده شد. در این مدل، ثابت‌های مدل رئولوژیکی که به‌عنوان شاخصی از استحکام بافت بودند تعیین شدند. همه پارامترهای رئولوژیکی روندی مشابه نداشتند اما سفتی نمونه که از شاخص‌های مهم ویژگی‌های مکانیکی بود با طولانی‌تر شدن زمان و افزایش دمای ذخیره‌سازی کاهش یافت که دلیل آن تغییرات درصد رطوبت و میزان مواد جامد محلول به‌خصوص میزان نشاسته در زمان ذخیره‌سازی است. در ژنوتیپ کلون، به دلیل جوانه‌زنی، این کاهش بیشتر بود. معادلات رگرسیون نتایج خوبی ($R^2 = 0.73 - 0.85$) برای تأثیر زمان و دمای ذخیره‌سازی بر پارامترهای خزش نشان داد. نتایج این معادله‌ها نشان داد که پارامتر ضریب ویسکوزیته اولیه، بیشترین تأثیر را بر پارامترهای خزش دارد. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که در انبار فنی به دلیل دمای پایین و رطوبت کنترل شده نسبت به انبار غیر فنی، شرایط بهتری برای ماندگاری غده‌ها وجود دارد. همچنین دوره انبارداری رقم آگریا، نسبت به ژنوتیپ کلون، به دلیل افت کمتر میزان رطوبت و نشاسته، طولانی‌تر است. این نتایج، اهمیت آزمایش‌های مکانیکی را برای توصیف بافت غده و تمایز رفتار ارقام مختلف برای هر دو محصول تازه و ذخیره‌شده نشان می‌دهد و این‌که توصیف رفتار آنها تحت بار استاتیک، برای طراحی تجهیزات برداشت و حمل‌ونقل، تخمین مقدار مواد آسیب‌دیده تحت بار اعمالی و حتی پیش‌بینی آن یا تغییر شکل آنها در زمان‌های مختلف ضروری است.

عواملی از جمله ساختارهای تشکیل‌دهنده گیاه به‌خصوص دیواره سلولی گیاه (Pitt, 1992; John & Dey, 1986) تغییرات ایجادشده در بافت گیاه در زمان بعد از برداشت و انبارمانی، تغییرات فشار تورگر و شرایط ذخیره‌سازی بستگی دارد (Bourne, 1976; Alzamora *et al.*, 2000).

در محصولاتی که به‌صورت تازه مصرف می‌شوند، کیفیت بافت را شاید بتوان از روش‌های تقریباً استاندارد، مانند روش‌های حسی یا روش تحلیل بافت (Texture Profile Analysis) TPA، بررسی کرد. در این صورت، ارائه برخی شاخص‌های بافت مانند سفتی، تردی یا آبدار بودن امکان‌پذیر است؛ اما در محصولاتی مانند سیب‌زمینی تغییرات بافت به‌صورت نسبی (نسبت به زمان و رقم) گزارش می‌شود. با این همه در این تحقیق از مدل رئولوژیکی معتبر چهار جزئی بورگر با استخراج ضریب‌های استاندارد رئولوژیکی استفاده شده است که با توجه به اجرای آزمون روی نمونه استاندارد، مقادیر به‌دست آمده به‌راحتی با هر نوع بافت مشابه قابل مقایسه خواهد بود. مثلاً برای مؤلفه‌های کشسان یا جریان نیوتنی یا برای مدت‌زمان تأخیر این حالت صادق است و با تحقیقات مشابه (Ghasemi *et al.*, 2014) در مورد سیب‌زمینی در شرایط متفاوت قابل مقایسه است؛ اما در ارتباط با تفسیر نحوه تغییرات بافت و علل این تغییرات طی زمان انبارمانی، اصولاً به مطالعه دقیق‌تر بافت از لحاظ ریزساختار نیاز است، مانند مشاهده بافت با استفاده از میکروسکوپ نوری (LM) یا میکروسکوپ با اسکن الکترونیکی (SEM) تحت عنوان بررسی Ultrastructural Characteristics که امکان بررسی تأثیر شکل، اندازه و ضخامت دیواره سلولی را بر کیفیت بافت به ما می‌دهد.

مراجع

- Abu-Ghannam, N. and Crowley, H. 2006. The effect of low temperature blanching on the texture of whole processed new potatoes. *Journal of Food Engineering*. 74, 335–344.
- Alvarez, M. D. and Canet, W. 1998. Rheological characterization of fresh and cooked potato tissues (cv. *Monalisa*). *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*. 207, 55–65.
- Alvarez, M. D., Canet, W., Cuesta, F. and Lamua, M. 1998. Viscoelastic characterization of solid foods from creep compliance data: application to potato tissues. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*. 207, 356–362.
- Alvarez, M. D., Saunders, D. E. and Vineent, J. F. 2000. Effect of turgor on the cutting energy of stored potatoes. *European Food Research Technology*. 210, 331-339.
- Alzamora, S. M., Castro, M. A., Nieto, A. B., Vidales, S. L. and Salvatori, D. M. 2000. The Role of Tissue Microstructure in the Textural Characteristics of Minimally Processed Fruits and Vegetables. Maryland: Aspen Publishers Inc. pp. 153–171.
- Ayman, H. A. E., Abdul, R. O. A. and Mustafa, M. A. 2012. Mathematical evaluation changes in rheological and mechanical properties of pears during storage under variable conditions. *Journal of Food Science and Engineering*. 2, 564 -575.
- Bentini, M., Caprara, C. and Martelli, R. 2009. Physico-mechanical properties of potato tubers during cold storage. *Biosystems Engineering*. 104, 25–32.
- Bhattacharya, S. 2010. Stress relaxation behavior of moth bean flour dough: product characteristics and suitability of model. *Journal of Food Engineering*. 97(4): 539–546.
- Bourne, M. C. 1976. Texture of Fruits and Vegetables. In: J.M. DeMan, P.W. Voisey, V.F. Rasper, and D.W. Stanley (Eds.), *Rheology and Texture in Food Quality*. New York: Van Nostrand Reinhold. pp: 275–307.
- Bu-Contreras, R. and Rao, M. A. 2001. Influence of heating conditions and starch on the storage modulus of Russet Burbank and Yukon Gold potatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 81, 1504–1511.
- Burgers, J. M. 1935. Mechanical Considerations-Model Systems-Phenomenological Theories of Relaxation and of Viscosity. In: J. M. Burgers (Ed.), *First Report on Viscosity and Plasticity*. Nordemann Publishing Company, New York.
- Burton, C. L., Shulte-Pason, N. L., Brown, G. K. and Timm, E. J. 1987. The effect of impact bruising on apples and subsequent decay development. ASAE Paper No. 87-6516. St. Joseph, MI: ASAE.
- Canet, W. 1980. Estudio de la influencia de los tratamientos termicos de escaldado, congelacion y descongelacion en la textura y estructura de patata (*Solanum tuberosum*, L.) (Ph.D. thesis). Universidad Politecnica de Madrid, Madrid.
- Canet, W., Fernandez, C. and Alvarez, M. d., 2009. Some Objective Instrumental Methods for Evaluating the Texture of Solid Potato Tissue (*solanum tuberosum* L.). Global Science Books.
- Del Nobile, M. A., Chillo, S., Mentana, A. and Baiano, A. 2007. Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods. *Journal of Food Engineering*. 78(3): 978–983.
- Desmet, M., Lammertyn, J., Verlinden, B. E. and Nicolai, B. M. 2002. Mechanical properties of tomatoes as related to puncture injury susceptibility. *Journal of Texture Studies*. 33(5): 415-429.
- Ding, C. K., Chachin, Y., Ueda, Y., Imahori, Y. and Wang, C. Y. 2002. Modified atmosphere packaging maintains postharvest quality of loquat fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 24, 341-348.

- Dolz, M., Hernandez, M. J. and Delegido, J. 2008. Creep and recovery experimental investigation of low oil content food emulsions. *Food Hydrocolloids*. 22(1): 421-427.
- Falk, S., Hertz, H. and Virgin, H. 1958. On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. I. experiments on resonance frequency and tissue rigidity. *physiologia plantarum*. 11: 802-817.
- Ghasemi, A., Godarzi, A. and Hemmat, A. 2014. Study of changes in potato rheology properties using creep test during storage. *Journal of Agricultural Machinery*. 4(2): 305-313. (in Persian)
- Gorji Chakespari, A., Rajabipour, A. and Mobli, H. 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.
- Hamann, D. D. 1992. Visco-elastic Properties of Surimi Seafood Products. In: M.A. Rao, and J.F. Steffe, (Eds.), *Visco-elastic Properties of Foods*. Barking, Essex, UK: Elsevier Science Publishing Inc.
- Harker, F. R., Maindonald, J., Murray, S. H., Gunson, F. A., Hallett, I. C. and Walker, S. B. 2002. Sensory interpretation of instrumental measurements texture of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 24 (1): 225-239.
- John, M. A. and Dey, P. M. 1986. Postharvest changes in fruit cell walls. *Advances in Food Research*. 30, 139-193.
- Kaur, L., Singh, N., Sodhi, N. S. and Gujral, H. S. 2002. Some properties of potatoes and their starches I. Cooking, textural and rheological properties of potatoes. *Food Chemistry*. 79(1): 177-181.
- Lien, C. C., Ay, C. and Ting, C. H. 2009. Non-destructive impact test for assessment of tomato maturity. *Journal of Food Engineering*. 91, 402-407.
- Linehan, D. J. and Hughes, J. C. 1969. Texture of cooked potatoes. I. Introduction. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 20(1): 110-112.
- Lu, Z. H., Donner, E., Yada, R. Y. and Liu, Q. 2012. Rheological and structural properties of starches from γ irradiated and stored potatoes. *Journal of Carbohydrate Polymers*. 87, 69- 75
- 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(1): 394-403.
- Mohsenin, N. N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Press, New York.
- Morales, A., Bourne, A. and Shomer, M. C. 1992. Cultivar, specific gravity and location in tuber affect puncture force of raw potatoes. *Journal of Food Science*. 57(6): 1353-1356.
- Nabil, S. A. 2013. Rheological behavior of tomato fruits affected by various loads under storage conditions. *American Journal of Engineering Research*. 2(3): 36 - 43.
- Niklas, K. J. 1989. Mechanical behavior of plant tissues as inferred from the theory of pressurized cellular solids. *American Journal of Botany*. 76(6): 929-937.
- Noda, T., Tsuda, Sh. and Mori, M. 2004. The effect of harvest dates on the starch properties of various potato cultivars. *Journal of Food Chemistry*. 86(1): 119-125.
- Nourian, F., Ramaswamy, H. S. and Kushalappa, A. C. 2003. Kinetics of quality changes associated with potatoes stored at different temperatures. *Journal of Food Science and Technology*. 36(1): 49-65.
- Omidi-Arjenaki, O., Ghanbarian, D. and Naderi-Boldaji, M. 2018. Evaluation and prediction of mechanical properties of potato during storage by laser light backscattering imaging. *Journal of Food Science and Technology*. 83(15): 237-250. (in Persian)
- Oraguzie, N., Alspach, P., Volz, R., Whitworth, C., Ranatunga, C., Weskett, R. and Harker, R. 2009. Postharvest assessment of fruit quality parameters in apple using both instruments and an expert panel. *Postharvest Biology and Technology*. 52(3): 279-287.

- Pitt, R. E. 1992. *Viscoelastic Properties of Fruits and Vegetables*. Edited by M.A. Rao and J.F. Steffe. Elsevier Science Publishers Ltd., London. pp. 49-76.
- 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): 1-8.
- Purkayastha, S., Peleg, M., Johnson, E. A. and Normand, M. D. 1985. A computer aided characterization of the compressive creep behavior of potato and cheddar cheese. *Journal of Food Science*. 50, 45-50.
- Rao, M. V. N. and Skinner, G. E. 1986. Rheological properties of solid foods. In: M.A. Rao, S.S.H. Rizvi (Eds.), *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker, New York. pp. 215-226.
- Scanlon, M. G. and Long, A. F. 1995. Fracture strengths of potato tissue under compression and tension at two rates of loading. *Food Research International*. 28(4): 397-402.
- 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.
- Sherman, P. 1966. The texture of ice cream 3. Rheological properties of mix and melted ice cream. *J. Food Science*. 31, 707-716.
- Solomon, W. K. and Jindal, V. K. 2007. Modeling changes in rheological properties of potatoes during storage under constant and variable conditions. *Swiss Society of Food Science and Technology. LWT*. 40, 170-178.
- Steffe, J. F. 1996. *Rheological methods in food process engineering* (2nd Ed.). East Lansing, MI, USA: Freeman Press.
- Thiagu, R., Chand, N. K. V. and Ramana, R. 2006. Evolution of mechanical characteristics of tomatoes of two varieties during ripening. *Journal of Food Science and Agriculture*. 62 (2): 175-183.
- Thybo, A. K. and Berg, V. D. F. 2002. Full uniaxial compression curves for predicting sensory texture quality of cooked potatoes. *Journal of Texture Studies*. 33(2): 119-134.
- Van Buren, J. P. 1979. The chemistry of texture in fruits and vegetables. *Journal of Texture Studies*. 10: 1-23.
- Yang, J. L., Zhang, Z., Schlarb, A. K. and Friedrich, K. 2006. On the characterization of tensile creep resistance of polyamide 66 composites. Part II: Modeling and prediction of long-term performance. *Polymer*. 47(19): 6745-6758.
- Zdunek, A., Cybulsk, J., Konopacka, D. and Rutkowski, K, 2010. New contact acoustic emission detector for texture evaluation of apples. *Journal of Food Engineering*. 99(1): 83-91.

Determination of Elastic Characteristics (Viscoelastic) in Two Potato Cultivars Stored in Non-Technical and Technical Storage

R. Farhadi, A. M. Afkari-Sayyah*, B. Jamshidi, and A. Mosapour-Gorji

* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: acafkari@gmail.com

Received: 8 September 2018 , Accepted: 8 January 2020

Abstract

To determine the mechanical behavior (creep) of potato under constant load, two potato cultivars were stored in two different conditions and the effects of storage time and temperature were investigated on creep behavior of the samples. Creep parameters included instantaneous elastic coefficient, delay elastic coefficient, initial viscoelastic coefficient, delayed viscoelastic coefficient and delay time. Two samples showed different mechanical properties, However, in both samples, there was a significant decrease ($P < 0.05$) in all creep parameters except retardation time with increasing storage time. The effect of storage temperature on these parameters was also checked that results showed the reduction of these parameters in the non-technical storage especially in the Clone variety compared to the technical storage. A mathematical model showed as well the creep behavior of stored potatoes. Regression equations showed good results ($R^2 = 0.85-0.73$) for the effect of storage time and temperature on creep parameters. The results of these equations showed that the Instantaneous modulus of elasticity parameter had the most effect on the creep parameters. According to these results, it can be said that in technical storage due to low temperature and controlled moisture than non-technical storage, there are better conditions for tuber durability than non-technical warehouse. The length of storage period of 'Agrida' genotype is higher due to lower loss of moisture content and starch content and no sprouting compared to 'Clone' genotype. However, the tissue of the 'Clone' genotype is softened in comparison to the fresh sample less than two months in non-technical storage and less than three months in the technical storage due to the loss of moisture and the reduction of starch content that directly affected on tissue.

Keywords: Burger Model, Creep test, Potato, Storage