

## مطالعه تغییر در خواص رئولوژی بافت سیب‌زمینی در طول انبارداری با استفاده از آزمون خزش

علی قاسمی<sup>۱</sup> - ابوالفضل گودرزی<sup>۲</sup> - عباس همت<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۹/۶

تاریخ پذیرش: ۹۲/۹/۱۱

### چکیده

در این پژوهش تغییر در خواص ویسکوالاستیک سیب‌زمینی (رقم آگرایا) طی چهار ماه در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  با استفاده از آزمون خزش بررسی و مدل‌سازی شد. نمونه‌های مورد استفاده به صورت استوانه‌های با قطر ۱۵ mm و طول ۳۵ mm به مدت ۳۰ min تحت تنش ثابت ۱۱۰ kPa قرار گرفتند و پس از آن باربرداری انجام شد و میزان کرنش آن‌ها با زمان اندازه‌گیری و ثبت شد. نمودار تغییر شکل با زمان مراحل بارگذاری و باربرداری رسم گردید. از مدل چهار عنصری بورگر به منظور مدل‌سازی رفتار خزش نمونه‌ها استفاده گردید و ضریب الاستیسیته آنی، ضریب الاستیسیته ویسکوزیته قسمت الاستیک تأخیری، ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی و زمان تأخیر تعیین شدند. از این پارامترها می‌توان برای مطالعه تأثیر شرایط انبارداری بر کیفیت سیب‌زمینی استفاده نمود. طبق نتایج حاصله، مدل چهار عنصری بورگر به خوبی توانست رفتار خزشی نمونه‌ها را توصیف کند. ضرایب الاستیک آنی، ویسکوزیته و ضریب الاستیسیته مربوط به الاستیک تأخیری زمان تأخیر و ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی سیب‌زمینی با افزایش زمان انبارداری به طور معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) کاهش یافتند. ویسکوزیته جریان نیوتونی بیشترین حساسیت را نسبت به زمان انبارداری سیب‌زمینی داشت.

**واژه‌های کلیدی:** آزمون خزش، خواص ویسکوالاستیک، زمان تأخیر، سیب‌زمینی، مدل بورگر

### مقدمه

محصولات کشاورزی به علت داشتن ساختار سلولی و رطوبت زیاد، هنگامی که تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، رفتار مستقل از زمان (الاستیک) و وابسته به زمان (ویسکوز) را توأم از خود نشان می‌دهند. در میوه‌ها و سبزیجات، ساختار غشاء سلولزی و فشار تورژانس درون سلولی بیانگر رفتار الاستیک و نیمه تراوا بودن غشاء سیتوپلاسمی بیانگر رفتار ویسکوز و توأم با جنس لایه میان سلولی باعث ظهور رفتار وابسته به زمان می‌شود. بنابراین، رفتار آن‌ها وابسته به نرخ بارگذاری است و رفتاری شبیه به مواد ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند. با بررسی خواص رئولوژی می‌توان به ویژگی‌های درونی و بافت<sup>۴</sup> مواد ویسکوالاستیک پی‌برد (Mohsenin, 1986). به منظور استفاده از منحنی مشخصه مواد ویسکوالاستیک و بیان میزان کیفیت یک محصول به صورت کمی، مدل‌سازی رفتار آن ضروری است. این مدل‌ها، رفتار جسم تحت بار را به صورت روابط ریاضی بیان می‌کنند، این روابط قادر به بیان ساختار داخلی جسم نیستند، اما توسط آن‌ها می‌توان خواص ویسکوالاستیک محصولات کشاورزی و مواد غذایی را تعیین کرد (Diehl and Hamann, 1979).

به منظور بررسی اثر شرایط و زمان انبارداری بر کیفیت بافت سیب‌زمینی، محققین برخی از خواص مکانیکی آن از قبیل استحکام یا سختی (Scanlon et al., 1996)، مدول برشی (Laza et al., 2001)

انبارداری سیب‌زمینی به صورت فله‌ای برای تأمین مصارف خانگی و صنعتی ضروری است. در طی انبارداری محصولات کشاورزی، فرآیندهای بیولوژیکی مانند تنفس کردن و از دست دادن رطوبت سبب تغییر خواص رئولوژی آن‌ها می‌شود (Burton, 1989). بر همین اساس، برای تعیین شرایط بهینه انبارداری در راستای کاهش ضایعات و افزایش کیفیت نهایی محصولات و نیز طراحی تجهیزات فرآوری، انتقال و درجه‌بندی تعیین خواص رئولوژی آن‌ها ضروری است. در روش انبارداری سیب‌زمینی به شیوه فله‌ای محصول به مدت چندین ماه تحت بار ثابتی که ناشی از وزن سیب‌زمینی‌های لایه‌های بالایی است قرار می‌گیرد، بنابراین از آزمون خزش می‌توان برای شبیه‌سازی این شیوه انبارداری استفاده کرد. در آزمون خزش تنش ثابتی به نمونه اعمال شده و کرنش به‌عنوان تابعی از زمان بررسی می‌شود و با رسم نمودار کرنش بر حسب زمان خواص ویسکوالاستیک مواد تعیین می‌شود (Alvarez et al., 2000).

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان  
\* - نویسنده مسئول: (Email: ahemmat@cc.iut.ac.ir)

بیشترین مقدار برگشت‌پذیری با اعمال تنش ۱۰۰ تا ۵۰۰ Pa ثابت بود هرچند با افزایش تنش سرعت برگشت‌پذیری افزایش پیدا کرد (Bockstaele et al., 2011).

سالانه ۳/۳ میلیون تن سیب‌زمینی در ایران تولید می‌شود، از این مقدار حدود ۲ میلیون تن سیب‌زمینی در انبار نگهداری می‌شود که به دلیل شرایط غیراستاندارد انبارها حداقل در حدود ۶۰۰ هزار تن از محصول انبارشده از بین می‌رود (Hashemeyan, 2013). بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی اثر زمان انبارداری بر خواص رئولوژی یک نوع سیب‌زمینی غالب در منطقه مرکزی ایران با استفاده از آزمون خزش و مدل‌سازی آن با استفاده از مدل بورگر و تعیین ضریب مدل به منظور دستیابی به معیارهای کمی برای مطالعه تأثیر شرایط انبارداری فله‌ای بر کیفیت سیب‌زمینی بود.

## مواد و روش‌ها

### تهیه نمونه‌ها

این پژوهش روی سیب‌زمینی رقم آگریا<sup>۲</sup> انجام گرفت. نمونه‌ها در پاییز ۱۳۸۹ از مزرعه‌ای در شهرستان فریدن اصفهان برداشت و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند. قبل از ذخیره‌سازی، نمونه‌ها تمیز شده تا خاک و مواد خارجی چسبیده بر روی سطح آن‌ها پاک شوند، سپس نمونه‌ها درون پلاستیک‌های زیپ‌کیب قرار گرفته و در یخچال در دمای ۴°C ذخیره و نگهداری شدند. قبل از انجام هر دوره از آزمایش‌ها، به منظور تعیین رطوبت نمونه‌ها، تعداد ۵ نمونه به وزن ۳۰ گرم از محصول تهیه و پس از خرد کردن به مدت ۷۲ h در آون در دمای ۷۰°C قرار داده شدند (AOAC, 1990). جدول ۱ میانگین محتوی رطوبتی نمونه‌های تازه و ذخیره شده را بر پایه تر نشان می‌دهد.

### جدول ۱ - محتوی رطوبتی نمونه‌ها طی زمان نگهداری

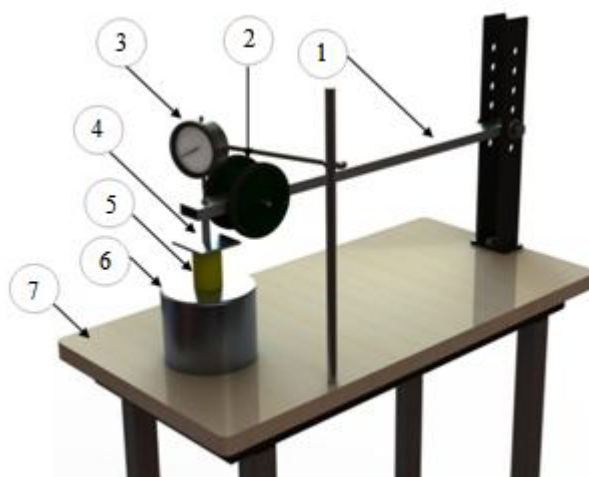
**Table 1-** Moisture content of the samples during storage

72.24	ماه دوم Second month
68.42	ماه سوم Third month
65.92	ماه چهارم Fourth month

و مقاومت پیچشی (Thybo and Martens, 1999) را مطالعه کردند. همچنین در مطالعه‌ای، خصوصیات فیزیکی سیب‌زمینی از قبیل کرویت، گردی، قطر هندسی، حجم، قطر مؤثر و چگالی در طی انبارداری به مدت ۲۲ هفته و هر ۱۵ روز یک بار اندازه‌گیری گردید و مشخص شد، قطر اصلی، خصوصیات شکلی، جرم و مساحت سطح سیب‌زمینی با گذشت زمان انبارداری به‌طور معنی‌داری تغییر می‌کند (Golmohammadi and Afkari-sayyah, 2013). اطلاعات بسیار کمی در مورد الگوی تغییرات خواص رئولوژی سیب زمینی طی زمان نگهداری موجود است. محققان با اندازه‌گیری خواص رئولوژی سیب‌زمینی‌های ذخیره‌شده، خواص حسی آن را پیش‌بینی کردند و نشان دادند، ممکن است رابطه‌ای بین ضرایب مدل رئولوژی با خواص کیفی آن در طی ذخیره‌سازی باشد (Thybo and Van den Berg, 2002). همچنین طی تحقیقی تغییر در خواص رئولوژی و مکانیکی گلایی طی مدت انبارداری به مدت ۴ هفته با استفاده از آزمون خزش بررسی شد. نتایج نشان داد، تغییر در خواص رئولوژی را می‌توان به‌عنوان تابعی از زمان انبارداری توصیف کرد همچنین مشخص شد استفاده از تغییر در خواص رئولوژی طی دوره انبارداری نسبت به اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی برای تخمین کیفیت محصول انبارشده بهتر بود (Amer Eissa and Alghannam, 2012).

طی تحقیقی خواص رئولوژی مواد غذایی شامل مدول الاستیسیته، شاخص تغییر شکل‌پذیری، ویسکوزیته و شاخص جریان، با استفاده از آزمون خزش و آسایش تنش تعیین و مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد، مدل ریاضی پیشنهاد شده شامل یک عضو الاستیک (فنی)، یک عضو ویسکوز (دمپر) و یک عضو پلاستیک به‌خوبی توانست خواص رئولوژی مواد مورد مطالعه را تعیین کند (Myhan et al., 2012). در تحقیقی دیگر، تغییرات خواص رئولوژی سیب‌زمینی در مدت ذخیره‌سازی تحت شرایط ثابت و متغیر مدل‌سازی شد و با استفاده از آزمون خزش و آزمون فشار محوری پارامترهای الاستیسیته و ویسکوزیته سیب‌زمینی تعیین شدند. نتایج نشان داد، مدل چهار عنصری بورگر توانست با دقت خوبی منحنی خزش را شبیه‌سازی کند، همچنین با افزایش زمان انبارداری مدول الاستیسیته، خواص الاستیک و ویسکوز سیب‌زمینی به‌جز ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی در هر دو شرایط ثابت و متغیر کاهش معنی‌داری داشت (Solomona and Jindal, 2007).

در تحقیقی، از آزمون خزش برای ارزیابی خواص ویسکوالاستیک خمیر گندم استفاده و از مدل بورگر برای مدل‌سازی رفتار منحنی خزش خمیر گندم استفاده شد. در این تحقیق مشاهده کردند که وادادگی خزشی<sup>۱</sup> بیشینه با افزایش تنش برشی افزایش پیدا کرد.



شکل ۱ - دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمون خزش؛ (۱) بازو، (۲) وزنه، (۳) جابه‌جایی‌سنج، (۴) صفحه صلب بارگذاری، (۵) نمونه مورد آزمایش، (۶) صفحه صاف و صلب، (۷) شاسی

Fig.1. Apparatus used for creep test; (1) Arm, (2) Load, (3) Displacement gage, (4) Loading rigid plate, (5) Sample, (6) Rigid plate, (7) Chassis

## روند انجام آزمایش‌ها

برای تعیین خواص رئولوژی سیب‌زمینی توسط آزمون خزش، دستگاهی که در شکل ۱ دیده می‌شود، ساخته و استفاده شد. این دستگاه شامل یک جابه‌جایی‌سنج عقربه‌ای با دقت  $0.01\text{ mm}$  است. نمونه‌ی مورد استفاده روی یک سطح صلب و کاملاً صاف قرار می‌گیرد و توسط بازویی که وزنه‌هایی با وزن مشخص روی آن نصب می‌شود توسط یک صفحه تخت (شعاع انحنا بی‌نهایت) تحت تنش ثابت قرار می‌گیرد و تغییر طول نمونه با زمان توسط جابه‌جایی‌سنج عقربه‌ای ثبت می‌گردد. آزمون روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر  $15\text{ mm}$  و طول  $30\text{ mm}$  و در دمای  $20^\circ\text{C}$  روی نمونه‌های تازه و انبارشده انجام شد (Solomona and Jindal, 2007).

تمامی آزمایش‌ها در پنج تکرار و در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با متغیر مستقل زمان انبارداری و متغیرهای وابسته شامل ضریب الاستیسیته آنی، ضریب الاستیسیته و ویسکوزیته قسمت الاستیک تأخیری، ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی و زمان تأخیر صورت گرفت. در صورت معنی‌دار بودن اثر زمان، میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال  $5\%$  با هم مقایسه شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و رسم نمودارها به‌وسیله نرم افزار Excel انجام شد.

برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای از یک نمونه‌گیر استوانه‌ای سیب استفاده شد و برای برش نمونه‌ها به طول مورد نظر از یک پایه تفلونی که دارای دیواره‌ای به قطر  $20\text{ mm}$  و سوراخی به قطر  $15\text{ mm}$  و ارتفاع  $30\text{ mm}$  بود استفاده شد با قرار دادن هر یک از نمونه‌های استوانه‌ای تهیه‌شده درون پایه تفلونی و با کمک یک تیغ جراحی تیز

نمونه از هر دو طرف به صورت صاف برش داده شدند (Bjema, 1998). نمونه‌ها به مدت  $30\text{ min}$  تحت تنش ثابت  $110\text{ kPa}$  قرار گرفتند و سپس باربرداری صورت گرفت. داده‌برداری به ازای هر  $0.01\text{ mm}$  جابه‌جایی نمونه با زمان مشاهده و ثبت می‌شد. برای تعیین مقدار تنش وارده ابتدا با استفاده از آزمون فشاری نیروی نقطه تسلیم زیستی<sup>۱</sup> تعیین شد که برابر با  $32/7\text{ N}$  بود؛ بنابراین به‌منظور اطمینان از اینکه نیروی اعمالی به دیواره سلولی محصول آسیبی وارد نکند، مقدار  $60\%$  نیروی نقطه تسلیم یعنی  $20\text{ N}$  در آزمون خزش به نمونه اعمال شد (Solomona and Jindal, 2007). در نهایت با توجه به مقدار بار وارده، تغییر شکل نمونه‌ها و سطوح تماس نمونه‌ها، با استفاده از روابط (۱) و (۲) تنش وارده و کرنش نمونه‌ها در طول آزمون تعیین شدند.

$$(1) \quad \epsilon$$

$$(2) \quad \sigma$$

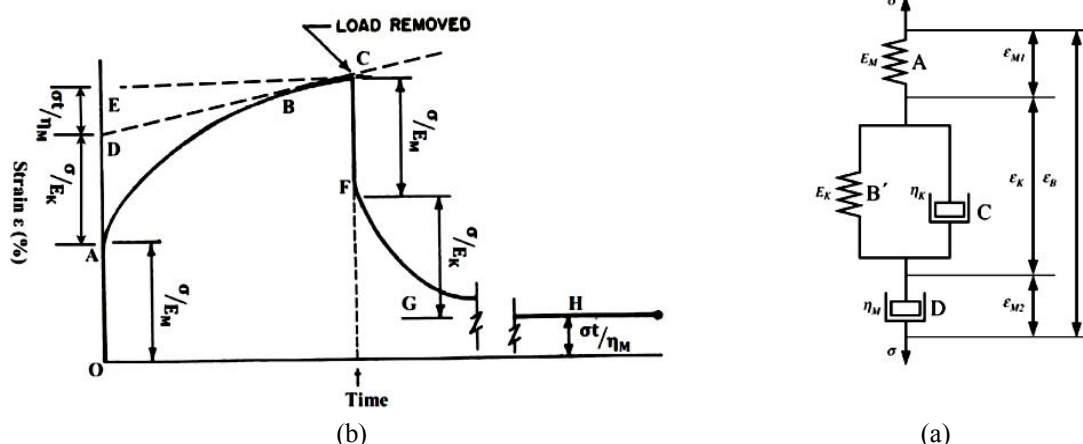
$L_0$ : طول اولیه نمونه

$\Delta L$ : تغییر طول نمونه در زمان مورد نظر  $t$  است که توسط

جابه‌جایی‌سنج دستگاه اندازه‌گیری می‌شود.

$F$ : نیروی وارده

$A$ : سطح مقطع نمونه



شکل ۲- (a) مدل چهار عنصری بورگر، (b) منحنی بارگذاری و باربرداری یک جسم ویسکوالاستیک تحت تنش ثابت (آزمایش خزش)  
**Fig.2.** (a) Four-element Burger model, (b) Typical mechanical creep-recovery curve of a viscoelastic material (creep test)

### مدل‌سازی داده‌ها

در این مطالعه از مدل چهار عنصری بورگر، برای بررسی رفتار خزش مواد ویسکوالاستیک استفاده شد. شکل ۲ a نمایشی از مدل چهار عنصری بورگر را نشان می‌دهد که شامل ترکیبی سری از مدل ماکسول و کلومین است. شکل ۲ b منحنی نمایشی بارگذاری و باربرداری یک جسم ویسکوالاستیک در آزمایش خزش (تحت تنش ثابت) را نشان می‌دهد.

منحنی خزش را می‌توان به سه بخش اصلی الاستیک آنی، الاستیک تأخیری و جریان نیوتونی تقسیم کرد (Yong-Liang *et al.*, 2008). مطابق شکل ۲، در این مدل کرنش کل ( $\epsilon_B$ )، در زمان  $t$  برابر مجموع کرنش سه بخش الاستیک آنی ( $\epsilon_{M1}$ )، الاستیک تأخیری ( $\epsilon_K$ ) و جریان نیوتونی ( $\epsilon_{M2}$ ) است (Yang *et al.*, 2006). رابطه (۳)، معادله مشخصه مدل بورگر را نشان می‌دهد. با استفاده از این رابطه می‌توان کرنش در زمان‌های مختلف را به‌دست آورد (Mohsenin, 1986).

$$\epsilon(t) \quad (3)$$

$\sigma$ : تنش ثابت اعمال شده

$E_M$ : ضریب الاستیسیته آنی

$E_K$ : ضریب الاستیسیته قسمت الاستیک تأخیری

$\eta_K$ : ویسکوزیته قسمت الاستیک تأخیری

$\eta_M$ : ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی

$T_{ret}$ : زمان تأخیر<sup>۱</sup> است و از رابطه (۴) تعیین می‌شود.

زمان تأخیر، زمان مورد نیاز برای آن که ۶۳ درصد کرنش نهایی در جسم ظاهر شود است (Mohsenin, 1986).

$$T \quad (4)$$

### تعیین ضرایب مدل

برای تعیین ضرایب مدل و بررسی اثر زمان انبارداری (تیمارهای آزمایش) بر این ضرایب، با توجه به نمودار تغییر شکل با زمان، مقدار بار وارده و مقدار تغییر شکل قسمت‌های OA، AD و DE (شکل ۲ b) ضرایب الاستیسیته آنی و الاستیسیته تأخیری و ویسکوزیته بخش الاستیک تأخیری تعیین شدند. برای تعیین زمان تأخیر رابطه (۳) را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) بیان کرد.

$$(5) \quad (1)$$

در رابطه (۵)، A متغیری وابسته به زمان و B عدد ثابتی هستند و به‌ترتیب از روابط (۶) و (۷) تعیین می‌شوند.

$$A \quad (6)$$

$$B \quad (7)$$

اگر از طرفین رابطه (۵)، Ln گرفته شود، یک رابطه خطی به صورت  $y = at$  به‌دست می‌آید؛ که مقادیر  $y$  و  $a$  به‌ترتیب از روابط (۸) و (۹) تعیین می‌شوند.

$$y \quad (8)$$

$$a \quad (9)$$

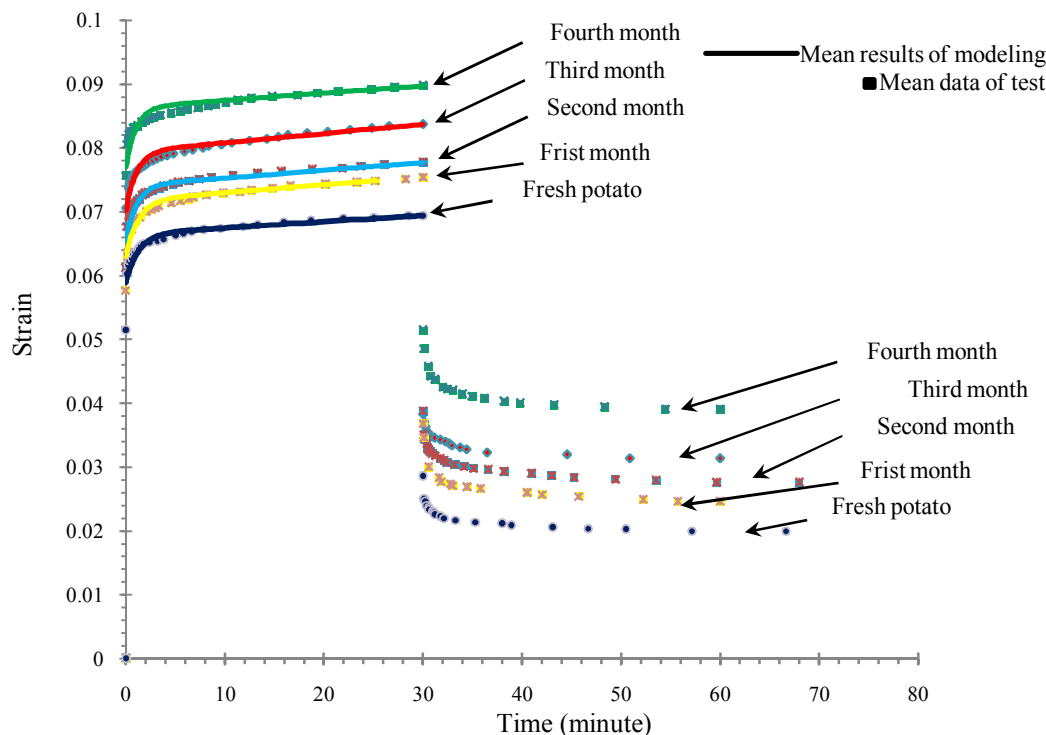
1- Retardation time

(Jindal, 2007)؛ اما با گذشت زمان انبارداری با کاهش مقدار رطوبت پس از بارگذاری، کرنش اولیه یا آنی در آن‌ها افزایش می‌یابد. زمان بیشتری طول می‌کشد تا دیواره‌های سلولی در آن نسبت به هم تغییر شکل دهند. به عبارت دیگر، در سیب‌زمینی تازه نسبت به سیب‌زمینی انبارشده از آنجایی که سلول‌ها دارای آب بیشتری هستند تراکم‌ناپذیری بیشتری دارند و در نتیجه پس از بارگذاری مقدار کرنش کمتری نسبت به سیب‌زمینی انبارشده دارند. همچنین در نتایج به‌دست آمده در یک تحقیق پژوهشی با استفاده از آزمون آسایش تنش روی خواص ویسکوالاستیک نخود مشاهده شد، با افزایش رطوبت محصول مقدار نیرو در بخش الاستیک کاهش یافت. به عبارت دیگر هنگامی که مقدار رطوبت دانه کاهش می‌یابد مقدار ویسکوزیته دانه نیز کاهش می‌یابد بنابراین، مقدار نیروی بیشتری نیاز است تا سطح جابه‌جایی معینی را حفظ کند (Khazaei and Mann, 2005). جدول ۲ نتایج آنالیز واریانس خواص رئولوژی سیب‌زمینی رقم آگرایا را نشان می‌دهد. پیداست که تأثیر زمان انبارداری بر میانگین تمامی پارامترهای مورد مطالعه در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بوده است.

با انتخاب چند زمان مختلف و تعیین مقادیر  $A$  و  $B$  نمودار  $\gamma$  برحسب زمان رسم شد و از روی شیب خط به‌دست آمده که برابر با مقدار  $a$  است زمان تأخیر محاسبه شد. با داشتن زمان تأخیر و ضریب الاستیسیته تأخیری از رابطه (۴) ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی تعیین شدند.

### نتایج و بحث

رفتار بارگذاری و باربرداری در آزمایش خزش سیب‌زمینی‌های تازه و انبارشده در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج شکل ۳ مشاهده می‌شود، رفتار خزشی نمونه‌ها تحت بار ثابت با گذشت زمان انبارداری متفاوت است، این رفتار متفاوت نمونه‌ها ناشی از تفاوت ساختاری آن‌ها است. همان‌طور که از نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود، طی دوره نگهداری به‌دلیل انجام فعالیت‌های بیولوژیکی مانند تنفس کردن محتوای رطوبتی محصول کاهش یافت (Burton, 1989). بنابراین، در سیب‌زمینی تازه چون سلول‌ها پر از آب هستند، تراکم‌پذیری کمتری دارند و در نتیجه، کرنش اولیه یا آنی در آن کم می‌باشد (Solomona and



شکل ۳- نمودار خزش و باربرداری سیب‌زمینی به مدت ۱، ۲، ۳ و ۴ ماه تحت تنش ثابت ۱۱۰ kPa  
**Fig.3.** Creep-recovery curves for 1, 2, 3 and 4 months of storage time under constant stress of 110 kPa

انبارداری به دلیل کاهش رطوبت طی مدت انبارداری، ضریب الاستیسیته آنی سیب‌زمینی به صورت معنی‌داری کاهش و با گذشت زمان انبارداری تغییر شکل اولیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود، پس از باربرداری، برگشت‌پذیری (مقدار کرنش) بخش الاستیک آنی با افزایش زمان انبارداری افزایش یافته است.

همچنین دیده می‌شود تأثیر زمان انبارداری بر میانگین ضریب الاستیسیته آنی، ویسکوزیته قسمت تأخیری و ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی در سطح احتمال ۱٪ نیز معنی‌دار بودند. جدول ۳ ضرایب به دست آمده از مدل بورگر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود، با گذشت زمان

**جدول ۲- نتایج آنالیز واریانس خواص رئولوژی سیب‌زمینی رقم آگریا**

**Table 2- Results of analysis of variance for rheological properties of Agria potato variety**

F	میانگین مربعات Mean of square	درجه آزادی df	منبع تغییر Source of variation	
144**	0.144	4	تیمار Treatment	ضریب الاستیسیته آنی Instantaneous elastic modulus
	0.001	20	خطا Error	
2.81*	2.837	4	تیمار Treatment	ضریب الاستیسیته تأخیری Retarded elastic modulus
	1.012	20	خطا Error	
11.96**	36.783	4	تیمار Treatment	ویسکوزیته قسمت تأخیری Viscosity of retarded part
	3.074	20	خطا Error	
7.05**	206328.831	4	تیمار Treatment	ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی Viscosity of Newtonian flow part
	29262.226	20	خطا Error	
3.3*	0.132	4	تیمار Treatment	زمان تأخیر Retardation time
	0.040	20	خطا Error	

\* و \*\* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد  
\*, \*\* Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively

**جدول ۳- ضرایب مدل بورگر حاصل از تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی رفتار خزشی**

**Table 3- Burger model coefficients obtained from the analysis and modeling of creep behavior**

ضرایب مدل Model coefficients					زمان نگهداری Storage time
T <sub>ret</sub> (min)	η <sub>M</sub> (MPa min)	η <sub>K</sub> (MPa min)	E <sub>K</sub> (MPa)	E <sub>M</sub> (MPa)	
1.43 <sup>a</sup>	1183.70 <sup>a</sup>	18.57 <sup>a</sup>	13.24 <sup>a</sup>	1.89 <sup>a</sup>	تازه Fresh
1.28 <sup>ab</sup>	1131.16 <sup>a</sup>	15.66 <sup>b</sup>	12.39 <sup>ab</sup>	1.78 <sup>b</sup>	ماه اول Frist month
1.17 <sup>ab</sup>	977.60 <sup>ab</sup>	13.86 <sup>bc</sup>	11.84 <sup>b</sup>	1.73 <sup>b</sup>	ماه دوم Second month
1.08 <sup>b</sup>	847.96 <sup>bc</sup>	12.59 <sup>c</sup>	11.61 <sup>b</sup>	1.62 <sup>c</sup>	ماه سوم Third month
1.02 <sup>b</sup>	679.59 <sup>c</sup>	11.77 <sup>c</sup>	11.58 <sup>b</sup>	1.43 <sup>d</sup>	ماه چهارم Fourth month

در هر ستون، میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند بر اساس آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نیستند.  
In each column, means that have common letters are not significantly different at 5% level of probability.

نمونه میزان تخریب دیواره سلولی با گذشت زمان افزایش می‌یابد (Yong-Liang *et al.*, 2008).

شکل ۴ روند کاهش ضرایب مدل بورگر را با گذشت زمان نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود ضرایب مدل با گذشت زمان انبارداری به‌صورت خطی کاهش معنی‌داری یافتند و ویسکوزیته مربوط جریان نیوتونی بیشترین حساسیت و تغییرات را با گذشت زمان داشت، بنابراین برای بررسی اثر زمان انبارداری و تغییر کیفیت محصول در طی زمان انبارداری استفاده از این پارامتر مناسب‌تر است. در بخش الاستیک تأخیری، مایعات درون سلولی متراکم شده و دیواره مایعات درون سلولی (واکوئل) که به‌صورت شبکه از مولکول‌های به هم پیوسته هستند به‌تدریج شروع به گسیختگی می‌کنند و نرخ تغییر شکل آن‌ها به‌صورت تابع نمایی با زمان کاهش می‌یابد. نرخ تغییر شکل وابسته به جنس دیواره سلولی و ویژگی‌های مایعات درون سلولی است (Yong-Liang *et al.*, 2008). ضرایب موجود به بخش الاستیک تأخیری ( $\bar{E}_k$  و  $\eta_k$ ) با گذشت زمان کاهش یافتند که کاهش آن در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. این کاهش معنی‌دار احتمالاً بیشتر به دلیل افت ساختار ژلاتینه محصول است که در خم‌شدن و فرو رفتن سلول‌ها در یکدیگر مؤثر است (Alvarez *et al.*, 2000; Jackman and Stanley, 1995; Scanlon *et al.*, 1996). بنابراین، سیب‌زمینی تازه به‌علت ویسکوزیته بیشتری که در بخش الاستیک تأخیری داشت زمان بیشتری نیاز داشت تا به مرحله ویسکوز وارد شود، همچنین زمان (زمان تأخیر) بیشتری برای آزادسازی قسمتی از تنش وارده به آن نیاز بود. طی تحقیقی رفتار خزشی سیب‌زمینی‌های پخته‌شده مطالعه شد و از مدل شش عنصری بورگر برای شبیه‌سازی آن استفاده گردید (Alvarez and Canet, 1988). نتایج نشان داد، بخش الاستیک تأخیری مدل برای شبیه‌سازی ساختار سلولوزی و ژلاتینه جسم مناسب است.

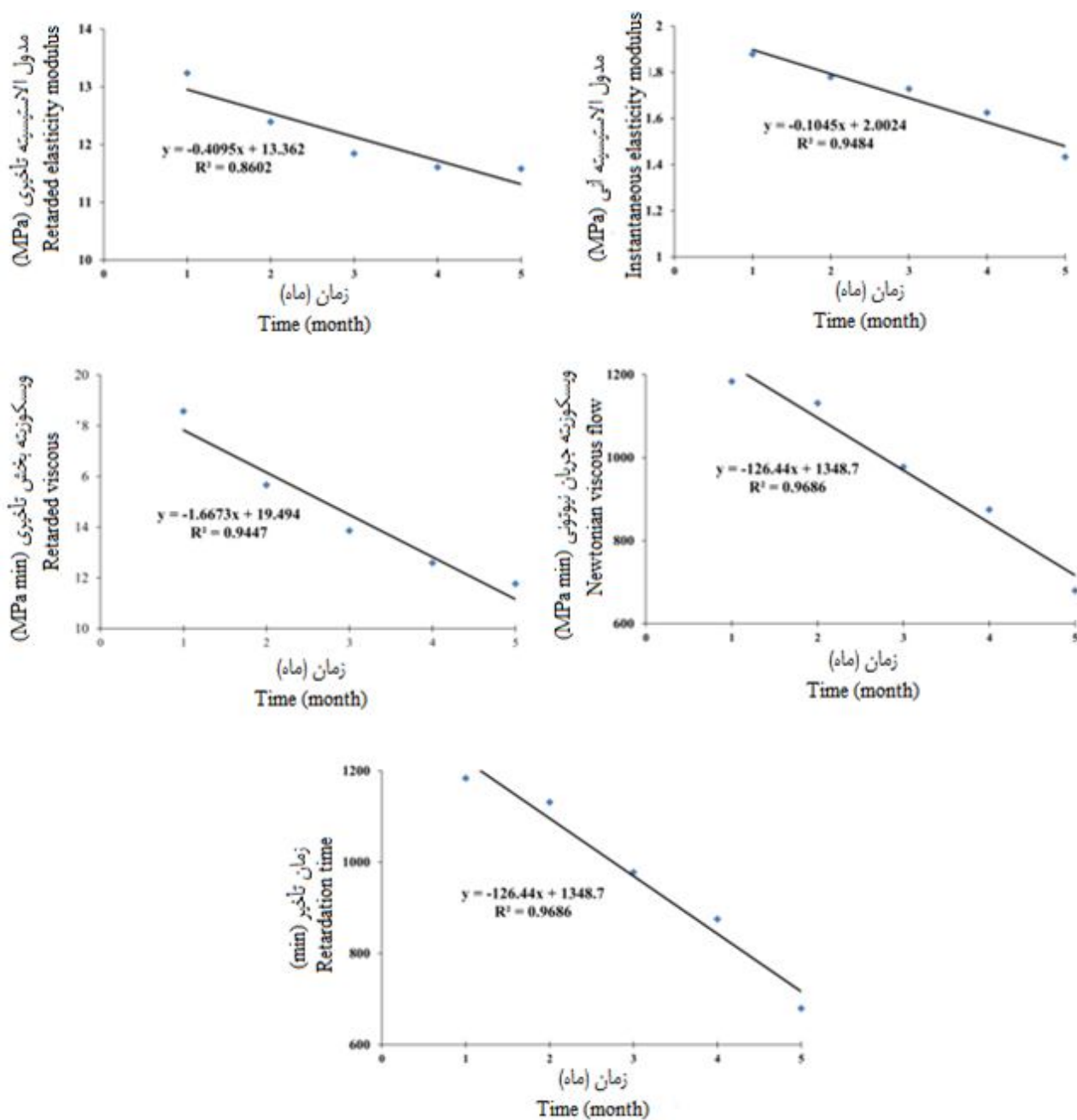
### نتیجه‌گیری

بارگذاری و باربرداری با آزمون خزش به‌خوبی توانست، شرایط سیب‌زمینی طی زمان انبارداری را شبیه‌سازی کند. مدل بورگر به‌خوبی رفتار خزشی سیب‌زمینی در طی انبارداری را پیش‌بینی کرد. با توجه به نتایج به‌دست آمده و روند کاهشی و معنی‌دار ضرایب ویسکوالاستیک سیب‌زمینی، با مطالعه روند تغییرات این ضرایب می‌توان برای بهینه کردن شرایط انبارداری مانند تعیین دمای مناسب انبار برای طراحی سیستم تهویه و ارتفاع بهینه انبار استفاده کرد، به‌نحوی که با گذشت زمان کمترین تخریب در بافت محصول ایجاد شده و ضایعات آن کاهش یابد.

همان‌طور که از نتایج جدول ۳ پیداست، مقدار ضریب الاستیک تأخیری ۷ برابر بزرگتر از ضریب الاستیسیته آنی است که نشان می‌دهد سیب‌زمینی در بخش الاستیک تأخیری الاستیسیته بزرگتری دارد به‌همین دلیل همان‌طور که از نتایج شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود مقدار کرنش سیب‌زمینی در بخش الاستیک تأخیری نسبت به بخش الاستیک آنی کمتر است. در صورتی که ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی ۶۶ برابر بزرگتر از ویسکوزیته مربوط به بخش الاستیک تأخیری بود، این بیانگر سیالیت کمتر در بخش الاستیک تأخیری است. میانگین ضرایب  $E_M$  و  $E_K$  برای سیب‌زمینی تازه به‌ترتیب برابر با ۱/۸۹ و ۱۳/۲۴ MPa به‌دست آمد. طی تحقیقی (Solomona and Jindal, 2007)، با استفاده از مدل چهار عنصری بورگر رفتار خزشی نمونه‌های استوانه‌ای سیب‌زمینی تازه مدل‌سازی شد و مقادیر  $E_M$  و  $E_K$  تحت بار ۲۰N به‌ترتیب برابر با ۲/۰۵ و ۲۷/۲۹ MPa به‌دست آمد که مقدار آن با وجود استفاده از بار متفاوت تقریباً نزدیک به مقدار به‌دست آمده در این مطالعه بودند.

تغییر در خواص مکانیکی سیب‌زمینی در طی انبارداری به‌علت کاهش فشار تورژانس و واکنش‌های بیوشیمیایی دیگری است که بر دیواره‌های سلولی و لایه میانی آن تأثیر می‌گذارد و ضریب الاستیسیته آنی بیشترین وابستگی را به فشار تورژانس دارد (Alvarez *et al.*, 2000; Brusewitz *et al.*, 1989; Scanlon *et al.*, 1996). ضریب الاستیسیته آنی ممکن است وابسته به فشار داخلی سلول‌ها باشد (Alvarez *et al.*, 1988). رفتار خزشی بافت گوجه‌فرنگی در تحقیقی مطالعه و بیان شد، کاهش معنی‌دار مدول الاستیسیته آنی وابسته به کاهش فشار تورژانس سلول‌ها است (Jackman and Stanley, 1995). با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود، تغییر شکل آنی نمونه‌ها که مستقل از زمان بارگذاری است با گذشت زمان هنگامی که تحت بار ثابت قرار گرفتند افزایش داشت. این افزایش در تغییر نمونه‌ها سبب ایجاد کاهش معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) در مقدار ضریب الاستیسیته آنی با گذشت زمان انبارداری شد.

میزان تغییر شکل ماندگار در نمونه پس از باربرداری احتمالاً به میزان تخریب ساختار محصول و جریان ویسکوز نیوتونی وابسته است. در این ناحیه، برخی از پیوندها به‌طور دائم گسیخته شده و تغییر شکل در این قسمت به‌علت جریان ویسکوز مایعات درون سلولی و تغییر شکل نسبی مولکول‌های لایه میانی و غشاء سیتوپلاسمی نسبت به یکدیگر است که با نرخ ثابتی جاری می‌شوند (Alvarez *et al.*, 1988). ویسکوزیته مربوط به قسمت جریان نیوتونی نمونه‌ها با گذشت زمان کاهش یافت. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، پس از باربرداری با گذشت زمان تغییر شکل ماندگار بیشتری در نمونه‌ها باقی ماند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت بر اثر اعمال بار به



شکل ۴- ضرایب مدل بورگر به‌عنوان تابعی زمان برای سیب‌زمینی‌های انبارشده

Fig.4. The Burger model coefficients as a function of time for stored potatoes

تغییرات آن برای بررسی اثر زمان انبارداری برای کاهش میزان ضایعات مناسب‌تر است.

نتایج این تحقیق نشان داد، ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی حساسیت بیشتری به گذشت زمان انبارداری دارد؛ بنابراین، مطالعه

## منابع

1. Alvarez, M. D., and W. Canet. 1988. Rheological characterization of fresh and cooked potato tissues (cv. monalisa). Zlebensm Unters Forsch 207: 55-66.



2. Alvarez, M. D., W. Canet, F. Cuesta, and M. Lamua. 1988. Viscoelastic characterization of solid foods from creep compliance data: Application to potato tissue. *Z Lebensm Unters Forsch* 207: 356-362.
3. Alvarez, M. D., D. E. Saunders, and J. F. Vincent. 2000. Effect of turgor pressure on the cutting energy of stored potatoes. *European Food Research Technology* 210: 331-339.
4. AOAC. 1990. Official methods of analysis association of analytical chemists. Washington D.C. USA. P: 777.
5. Amer Eissa, A. H., and A. R. O. Alghannam. 2012. Mathematical modeling changes in rheological and mechanical properties of pears during storage under variable conditions. *International Conference of Agricultural Engineering CIGR-Ag. Eng. Valencia Spania*.
6. Bjema, R. W., G. M. Hyde, and K. Peterson. 1998. Instrumentation design for dynamic axial compression of cylindrical tissue samples. *Transactions of the ASAE* 41(3): 747-754.
7. Bockstaele, F. V., I. D. Leyn, M. Eeckhout, and K. Dewettinck. 2011. Non-linear creep-recovery measurements as a tool for evaluating the viscoelastic properties of wheat flour dough. *Journal of Food Engineering* 107 (1): 50-59.
8. Brusewitz, G. H., R. E. Pitt, and Q. Gao. 1989. Effects of time and static preloading on the rheology of potato tissue. *Journal of Texture Studies* 20: 267-284.
9. Burton, W. G. 1989. *The potato*, 3rd ed. Longman Scientific and Technical. Harlow, UK.
10. Diehl, K. C., and D. D. Hamann. 1979. Relation between sensory profile parameters and fundamental mechanical parameters for raw potato, melons and apples. *Journal of Texture Studies* 10: 401-420.
11. Golmohammadi, A., and A. H. Afkari- Sayyah. 2013. Long-term storage effects on the physical properties of the potato. *International Journal of Food Properties* 16: 104-113.
12. Hashemeyan, H. 2013. *More About Potatoes*. Tehran Nashre Elme (In Farsi).
13. Jackman, R. L., and D. W. Stanley. 1995. Creep behavior of tomato pericarp tissue as influenced by ambient temperature ripening and chilled storage. *Journal of Texture Studies* 26: 527-572.
14. Khazaei, J., and D. D. Mann. 2005. Effects of moisture content and number of loadings on force relaxation behaviour of chickpea kernels. *International Agrophysics* 19 (4): 305-313.
15. Laza, M., M. G. Scanlon, and G. Mazza. 2001. The effect of tuber pre-heating, temperature and storage time on the mechanical properties of potatoes. *Food Research International* 34: 659-667.
16. Mohsenin, N. N. 1986. *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Science.
17. Myhan, R., I. Białobrzewski, and M. Markowski. 2012. An approach to modeling the rheological properties of food materials. *Journal of Food Engineering* 111: 351-359.
18. Scanlon, M. G., C. H. Pang, and C. G. Billaderis. 1996. The effect of osmotic adjustment on the mechanical properties of potato parenchyma. *Food Research International* 29: 481-488.
19. Solomona, W. K., and V. K. Jindal. 2007. Modeling changes in rheological properties of potatoes during storage under constant and variable conditions. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 40: 170-178.
20. Thybo, A. K., and M. Martens. 1999. Instrumental and sensory characterization of cooked potato texture. *Journal of Texture Studies* 30: 259-278.
21. Thybo, A. K., and F. Van den Berg. 2002. Full uniaxial compression curves for predicting sensory texture quality of cooked potatoes. *Journal of Texture Studies* 33: 119-134.
22. Yang, J. L., Z. Zhang, A. K. Schlarb, and K. Friedrich. 2006. On the characterization of tensile creep resistance of polyamide 66 composites. Part II: Modeling and prediction of long-term performance. *Polymer* 47: 6745-6758.
23. Yong-Liang, X., S. B. Xiong, L. i. Yun-Bo, and S. M. Zhao. 2008. Study on creep properties of indica rice gel. *Journal of Food Engineering* 86: 10-16.