

## مدل سازی خواص رئولوژی پیاز و سیب زمینی با استفاده از آزمون خزش

علی قاسمی<sup>1</sup>، عباس همت<sup>2</sup>، ابوالفضل گودرزی<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، کد پستی 83111-84156

2- استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، کد پستی 83111-84156

[alighasemi10@Gmail.com](mailto:alighasemi10@Gmail.com); [ahemmat@cc.iut.ac.ir](mailto:ahemmat@cc.iut.ac.ir)

### چکیده

محصولات کشاورزی به علت داشتن ساختار سلولی و رطوبت زیاد، رفتاری شبیه مواد ویسکوالاستیک از خود نشان می دهند، بنابراین رفتار آنها وابسته به زمان است. تعیین خواص رئولوژی جهت طراحی خطوط فرآوری، تعیین شرایط بهینه انبارداری و ارتفاع مجاز انبارداری جهت کاهش ضایعات ضروری است. در این مطالعه، آزمون خزش روی سیب زمینی رقم آگریا (*Tubuls Agria*) و پیاز رقم زرد (*Yellow Onion*) به ترتیب تحت بار ثابت 78/5 N و 62/2 N در مدت مشخص و دمای 20°C در پنج تکرار انجام شد. نمودار تغییر شکل با زمان مراحل بارگذاری و باربرداری رسم گردید. مدل بورگر جهت مدل سازی استفاده و ضریب الاستیسته آنی، ضریب الاستیسته و ویسکوزیته قسمت الاستیک تاخیری، ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی و زمان تاخیر تعیین شدند. خطای استاندارد حاصل از نتایج مدل سازی برای سیب زمینی و پیاز به ترتیب 0/8 و 1/02 بودند. ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی بجز بیشتر بود، بنابراین پس از باربرداری تغییر شکل ماندگار کمتری در آن باقی می ماند. ضریب الاستیسته و ویسکوزیته قسمت الاستیک تاخیری پیاز نسبت به سیب زمینی کمتر بود، بعلاوه ساختار لایه ای که پیاز دارد زمان بیشتری طول کشید تا به مرحله ویسکوز وارد شود و زمان (زمان تاخیر) بیشتری نیز برای آزادسازی قسمتی از تنش وارده به آن نیاز بود. ضرایب موجود به بخش الاستیک تاخیری سیب زمینی بیشتر از پیاز و ویسکوزیته آن کمتر است، پس مدت بیشتری می توان آن را در انبار بدون تغییر شکل ماندگار زیاد نگهداری کرد.

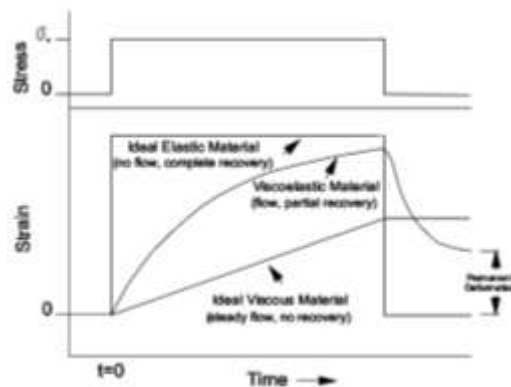
واژه های کلیدی: الاستیک تاخیری، انبارداری، زمان تاخیر، مدل بورگر، ویسکوالاستیک

### مقدمه

محصولات کشاورزی به علت داشتن ساختار سلولی و رطوبت زیاد، هنگامی که تحت بارگذاری قرار می گیرند، رفتار مستقل از زمان (الاستیک) و وابسته به زمان (ویسکوز) را دارا می باشند. در میوه ها و سبزیجات، ساختار غشاء سلولزی و فشار تورژسانس درون سلولی بیانگر رفتار الاستیک، و نیمه تراوا بودن غشاء سیتوپلاسمی بیانگر رفتار ویسکوز و توام با جنس لایه میان سلولی باعث ظهور رفتار وابسته به زمان می شود. بنابراین، رفتار آنها وابسته به نرخ بارگذاری است و رفتاری شبیه به مواد ویسکوالاستیک از خود نشان می دهند. علم رئولوژی، علم مطالعه تغییر شکل و جریان پذیری در مواد است. با بررسی خواص رئولوژی می توان به ویژگی های درونی و بافت مواد ویسکوالاستیک پی برد [Laza et al., 2001]. جهت طراحی تجهیزات فرآوری، انتقال و درجه بندی و تعیین شرایط بهینه انبارداری در راستای کاهش ضایعات و افزایش کیفیت نهایی محصولات تعیین خواص مکانیکی و رئولوژی آنها ضروری است [Pitt and Chen, 1983]. جهت استفاده از منحنی مشخصه مواد ویسکوالاستیک و بیان میزان کیفیت یک محصول بصورت کمی مدل سازی رفتار آن ضروری است [Hamann, 1992]. مدل های رئولوژی مختلفی برای پیش بینی رفتار مواد ویسکوالاستیک تحت شرایط مختلف تنش و کرنش، از جمله مدل ماکسول،

مدل کلونین و مدل بورگر ارائه شده اند [Steffe, 1996]. این مدل ها شامل ترکیبات مختلفی از جسم جامد هوکی (فنر) و سیال نیوتنی (دمپر) می باشند که رفتار پیچیده مواد ویسکوالاستیک را نشان می دهند [Rao et al., 2005].

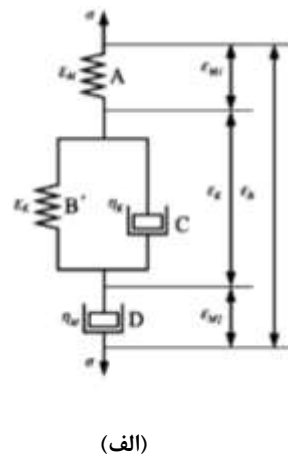
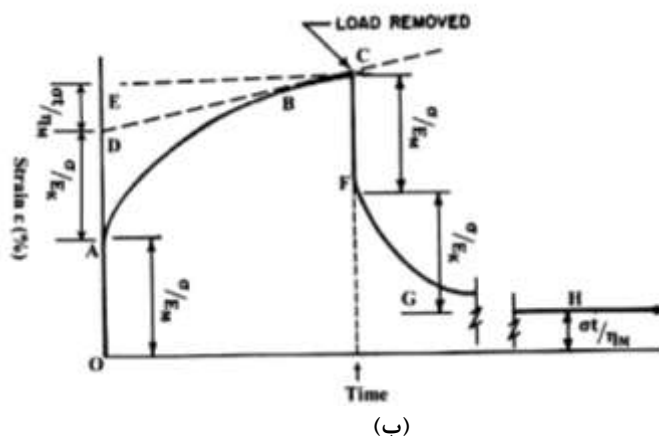
دولز (2006) و هراندز (2004) با بررسی خواص وابسته به زمان برخی از مواد ویسکوالاستیک ، مدول الاستیسته و ویسکوزیته این مواد را تعیین کردند . رایسزارد و همکاران (2012) خواص رئولوژی مواد غذایی شامل مدول الاستیسته، شاخص تغییر شکل پذیری، ویسکوزیته و شاخص جریان را با استفاده از تست خزش و آسایش تنش بدست آورده و مدل سازی کردند. سلیمان و همکاران (2007) تغییرات خواص رئولوژی سیب زمینی در مدت ذخیره سازی تحت شرایط ثابت و متغیر را مدل سازی کردند. آنها با استفاده از آزمون های خزش و فشار محوری ، پارامترهای الاستیسته و ویسکوزیته سیب زمینی را تعیین کردند. بررسی آنها نشان داد، مدل چهار عنصری بورگر توانست با دقت خوبی منحنی خزش را شبیه سازی کند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با افزایش زمان انبارداری مدول الاستیسته، خواص الاستیک و ویسکوز سیب زمینی در هر دو شرایط ثابت و متغیر کاهش معنی داری داشت. منحنی خزش و باربرداری مواد ایده آل در شکل 1 نشان داده شده است. با اعمال تنش ثابت در اجسام الاستیک ایده آل، کرنش بصورت آنی افزایش پیدا می کند، بعلت نبود جریان در این مواد با گذشت زمان کرنش ثابت می ماند، پس از حذف تنش جسم الاستیک ایده آل بلافاصله به شکل اولیه خود باز می گردد. در اجسام ویسکوز ایده آل، کرنش با نرخ ثابتی زیاد شده و پس از باربرداری کرنش ثابتی در جسم باقی می ماند. در ماده ویسکوالاستیک کرنش با نرخ متغیری افزایش یافته و پس از باربرداری بخشی از انرژی ذخیره شده درون جسم آزاد شده و مقداری تغییر شکل پایدار درون آن باقی می ماند [Steffe, 1996].



شکل 1- منحنی خزش و باربرداری اجسام الاستیک ایده آل، ویسکوز ایده آل و ویسکوالاستیک (استف 1996).

مدل چهار عنصری بورگر، برای بررسی رفتار خزش مواد ویسکوالاستیک بصورت گسترده استفاده می شود و همانند شکل 2 (الف) شامل ترکیبی سری از مدل ماکسول و کلونین است. در مدل بورگر کرنش کل  $\epsilon_B$ ، در زمان  $t$  برابر مجموع کرنش سه بخش دیگر است.  $\epsilon_{M1}$  کرنش مربوط به بخش الاستیک آنی،  $\epsilon_K$  کرنش مربوط به بخش الاستیک تاخیری و  $\epsilon_{M2}$  کرنش مربوط به بخش جریان نیوتونی است [Yang et al., 2006].

شکل 2-ب منحنی نمایشی بارگذاری و باربرداری یک جسم ویسکوالاستیک تحت تنش ثابت را نشان می دهد. منحنی خزش را می توان به سه بخش اصلی الاستیک آنی، الاستیک تاخیری و جریان نیوتونی تقسیم کرد [Yong-Liang et al., 2008].



شکل 2- (الف) مدل چهار عنصری بورگر و (ب) منحنی بارگذاری و باربرداری یک جسم ویسکوالاستیک تحت تنش ثابت

کرش در زمان های مختلف توسط مدل بورگر از رابطه 1 بدست می آید.

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_M} + \frac{1}{E_K} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{ret}}} \right) + \frac{t}{\eta_M} \right] \quad (1)$$

در رابطه 1،  $\sigma_0$  تنش ثابت اعمال شده،  $E_M$  ضریب الاستیسته آنی،  $E_K$  و  $\eta_K$  به ترتیب ضریب الاستیسته و ویسکوزیته قسمت الاستیک تاخیری و  $\eta_M$  ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی است.  $T_{ret}$  زمان تاخیر<sup>1</sup> است و از رابطه 2 تعیین می شود. زمان تاخیر، زمان مورد نیاز برای آنکه 63 درصد از دیاد طول نهایی در جسم ظاهر شود است و سرعت آزاد شدن تنش را نشان می دهد.

$$T_{ret} = \frac{\eta_K}{E_K} \quad (2)$$

هدف از این مطالعه بررسی و مدل سازی خواص رئولوژی سیب زمینی و پیاز زرد با استفاده از آزمون خزش و مدل سازی با استفاده از مدل بورگر به منظور تعیین ضریب الاستیسته آنی، ضریب الاستیسته و ویسکوزیته قسمت الاستیک تاخیری، ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی، زمان تاخیر و مقایسه شرایط انبارداری فله ای این دو محصول می باشد.

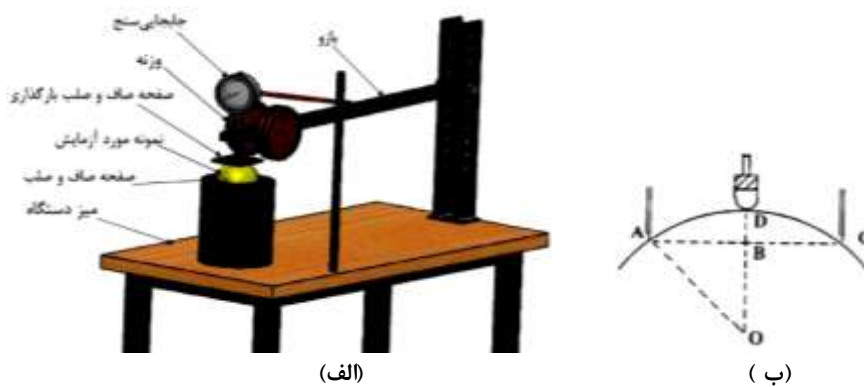
### مواد و روش ها

این پژوهش بر روی سیب زمینی رقم آگریا<sup>2</sup> و پیاز رقم<sup>3</sup> زرد انجام گرفت. نمونه ها در پاییز 1389 از مزرعه ای در فریدن اصفهان مستقیماً برداشت و بلا فاصله به آزمایشگاه منتقل شدند. برای تعیین خواص مکانیکی توسط آزمون خزش دستگاهی که در شکل 3-الف دیده می شود، ساخته و استفاده شد. این دستگاه شامل یک جابجایی سنج عقربه ای با دقت 0/01 mm است. نمونه ی مورد آزمایش روی یک سطح صلب و کاملاً صاف قرار می گیرد و توسط بازویی که وزنه های با وزن مشخص روی آن نصب می شود توسط یک صفحه تخت (شعاع انحنای نهایت) تحت تنش ثابت قرار می گیرد و جابجایی با زمان توسط جابجایی سنج عقربه ای ثبت می گردد.

1 Retardation time  
2 Tubuls Agria  
3 Yellow Onion

آزمایش‌ها در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و پنج تکرار انجام شدند. جهت تعیین رطوبت، نمونه‌ها خرد و به مدت 72 ساعت در آونی در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  قرار داده شدند. میانگین رطوبت بر پایه تر برای سیب زمینی و پیاز به ترتیب برابر با 83 و 74 درصد بود. شعاع انحناء نمونه‌ها توسط دستگاه شعاع سنج شکل 3-ب و از رابطه 3 تعیین گردید. سپس نمونه‌ها در راستای قطر بزرگ از وسط به دو قسمت تقسیم شده و در پایدارترین حالت به نحوی روی فک ثابت دستگاه قرار گرفتند که قطر بزرگ عمود بر جهت بارگذاری بود. در مرحله بارگذاری بار ثابتی برابر با  $62/2\text{N}$  و  $78/5\text{N}$  به ترتیب روی سیب‌زمینی و پیاز توسط بازو دستگاه اعمال شد. نمونه‌ها مدت 90 دقیقه تحت بار ثابت قرار گرفتند و پس از آن باربرداری انجام شد.

$$R = \frac{(AC)^2}{8(BD)} + \frac{BD}{2} \quad (3)$$



شکل 3- (الف) دستگاه مورد استفاده برای انجام تست خزش و (ب) دستگاه شعاع‌سنج.

با توجه به رهودار تغییر شکل با زمان، مقدار بار وارده و مقدار تغییر شکل قسم‌ت‌های OA، AD و DE (شکل 2-ب) ضرایب الاستیسته‌آنی و الاستیسته تاخیری و ویسکوزیته بخش الاستیک تاخیری تعیین شدند. برای تعیین زمان تاخیر رابطه 1 را می‌توان بصورت رابطه 4 بیان کرد.

$$\left(1 - \frac{A}{B}\right) = e^{-\frac{t}{T_{ret}}} \quad (4)$$

در رابطه 4، A متغیری وابسته به زمان و B عدد ثابتی هستند و بترتیب از روابط 5 تعیین می‌شوند.

$$\begin{cases} A = \varepsilon(t) - \frac{\sigma}{E_M} - \frac{\sigma t}{\eta_M} \\ B = \frac{\sigma}{E_K} \end{cases} \quad (5)$$

اگر از طرفین رابطه 4، Ln بگیریم، یک رابطه خطی بصورت  $y = at$  بدست می‌آید. که مقادیر y و a بترتیب از روابط 6 تعیین می‌شوند.

$$\begin{cases} y = \ln\left(1 - \frac{A}{B}\right) \\ a = -\frac{1}{T_{ret}} \end{cases} \quad (6)$$

با انتخاب چند زمان مختلف و تعیین مقادیر A و B نمودار y بر حسب زمان رسم شد و از روی شیب خط بدست آمده که برابر با مقدار a است زمان تاخیر محاسبه شد. با داشتن زمان تاخیر و ضریب الاستیسته تاخیری از رابطه 2 ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی تعیین شدند.

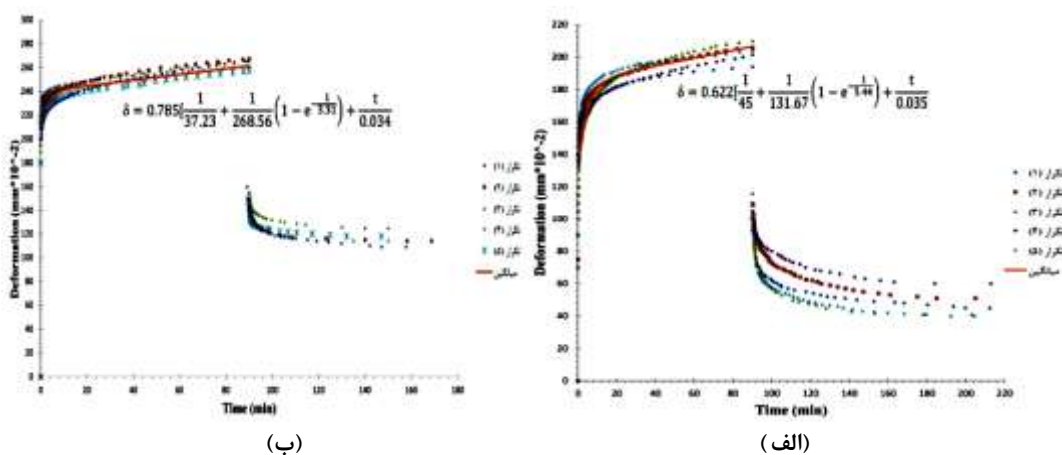
## نتایج و بحث

شکل 4 نمودارهای بدست آمده از آزمون خزش و باربرداری سیب زمینی و پیاز را در 5 تکرار و منحنی میانگین و معادله بدست آمده از مدل سازی آن را نشان می دهد. با توجه به نمودارهای رسم شده و با استفاده از مدل بورگر ضریب الاستیسته آنی، ضریب الاس تیس ته و ویسکوزیته قسمت الاستیک تاخیری، ویسکوزیته مربوط به جریان نیوتونی و زمان تاخیر تعیین شدند. جدول 1 ضرایب بدست آمده از مدل بورگر سیب زمینی و پیاز را نشان می دهد.

جدول 1- ضرایب مدل بورگر حاصل از تجزیه و تحلیل و مدل سازی رفتار خزشی

سیب زمینی					پیاز					تکرار
$t_{ret}$ (s)	$\frac{\eta_K}{mm^2}$ ( $\frac{KN \cdot min}{mm^2}$ )	$\frac{\eta_M}{mm^2}$ ( $\frac{KN \cdot min}{mm^2}$ )	$E_K$ (MPa)	$E_M$ (MPa)	$t_{ret}$ (s)	$\frac{\eta_K}{mm^2}$ ( $\frac{KN \cdot min}{mm^2}$ )	$\frac{\eta_M}{mm^2}$ ( $\frac{KN \cdot min}{mm^2}$ )	$E_K$ (MPa)	$E_M$ (MPa)	
247/11	0/85	28/26	206/58	38/86	270/88	0/58	43/06	129/58	46/76	1
238/9	0/87	32/86	218/05	37/38	320/51	0/72	31/1	135/22	43/8	2
166/02	0/68	36/23	245/31	36/51	488/6	0/87	32/93	107/24	46/07	3
171/33	1/12	44/15	392/5	34/88	302/57	0/7	30/76	138/22	46/07	4
155/96	0/73	32/86	280/36	37/74	249/58	0/62	37/32	148/09	42/31	5
198/86	0/85	34/78	268/56	37/27	326/43	0/7	35/03	131/67	45	میانگین

رفتار متفاوت ناشی از تفاوت ساختاری و حجم هوای درون نمونه ها است. در سیب زمینی چون سلول ها پر از آب هستند و مقدار هوای درون آن کم است، بلافاصله پس از بارگذاری، ناگهان مقدار تنش در آن افزایش یافته و باعث می شود دیواره سلولی تحت کشش قرار گیرد. اما، پیاز به دلیل دار بودن ساختار لایه ای و مقدار رطوبت کمتر پس از بارگذاری زمان بیشتری طول می کشد تا دیواره های سلولی در آن نسبت به هم تغییر شکل دهند. بنابراین، از آنجا که ضریب الاستیسته آنی سیب زمینی از پیاز کمتر بود، در ابتدای مرحله بارگذاری تغییر شکل اولیه (الاستیک) سیب زمینی نسبت به پیاز بیشتر است. همچنین، با توجه به نمودارهای رسم شده در شکل 4 نیز مشاهده می شود، پس از باربرداری برگشت پذیری بخش الاستیک تاخیری سیب زمینی نسبت به پیاز بیشتر بود.



شکل 4- (الف) نمودار خزش و باربرداری پیاز و (ب) نمودار خزش و باربرداری سیب زمینی

میزان تغییر شکل ماندگار در نمونه پس از باربرداری به میزان تخریب ساختار ماده و ویسکوزیته جریان نیوتونی وابسته است. ویسکوزیته مربوط به قسمت جریان نیوتونی سیب زمینی نسبت به پیاز کمتر بود. بنابراین، همانطور

که در شکل 4 مشاهده می شود، پس از باربرداری تغییر شکل ماندگار بیشتری در سیب زمینی نسبت به پیاز باقی ماند. می توان نتیجه گرفت بر اثر اعمال بار به نمونه میزان تخریب دیواره سلولی پیاز از سیب زمینی نسبتاً بیشتر است.

در بخش الاستیک تاخیری مایعات درون سلولی متراکم شده و دیواره مایعات درون سلولی بتدریج شروع به گسیختگی می کنند. ضرایب موجود به بخش الاستیک تاخیری سیب زمینی بیشتر از پیاز و ویسکوزیته آن کمتر بود؛ بنابراین، پیاز بعلت ساختار لایه ای که دارد زمان بیشتری نیاز دارد تا به مرحله ویسکوز وارد شود و زمان (زمان تاخیر) بیشتری نیز برای آزادسازی قسمتی از تنش وارده به آن نیاز داشت، با توجه به تخریب کمتر ساختار سیب - زمینی می توان آن را مدت بیشتری در انبار نگهداری کرد.

## منابع

- 1- Dolz, M., Hernandez, M.J. and Delegido, J., (2006). Oscillatory measurements for salad dressings stabilized with modified starch, xanthan gum and locust bean gum. *J. of Applied Polymer Sci.*, 102: 897–903.
- 2- Hamann, D.D., 1992. Visco-elastic properties of surimi seafood products. In: *Visco-elastic properties of Food*. M.A. Rao, and J.F. Steffe (Eds.), Elsevier Scie. Pub. LTD, Barking Essex, England, (pp. 157–171).
- 3- Hernandez, M.J., Tarrega, A., Dolz, M., Costell, E. and Alfaro, M.C., (2004). A.C. Diogo, N.B. Alvarenga, J. Canada, S. Ferro Palma, & J. Dias (Eds.). *Progress in rheology of biological and synthetic polymer systems*. G. E. R. Sevilla, 349–354.
- 4- Laza, M., Scanlon, M.G. and Mazza, G., (2001). The effect of tuber preheating temperature and storage time on the mechanical properties of potatoes. *Food Research International*, 34(1): 659–667.
- 5- Myhan, R., Białobrzewski, I. and Markowski, M., (2012). An approach to modeling the rheological properties of food materials. *J. Food Eng.*, 111: 351–359.
- 6- 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.
- 7- Rao, M.A., Rizvi, S.S.H. and Datta, A.K., (2005). *Engineering properties of foods* (3rd ed.). Taylor & Francis Group. USA.
- 8- Steffe, J.F., (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2nd ed., Freeman Press, East Lansing (Chapter 5).
- 9- Solomona, 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.
- 10- 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: 6745–6758
- 11- Yong-Liang, Xu, Shan-Bai Xiong, Yun-Bo Li, and Si-Ming Zhao, (2008), Study on creep properties of indica rice gel, *J. Food Eng.* 86:10–16.