



ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (کرج)

۲۴ و ۲۵ شهریور ۱۳۸۹



بررسی رفتار ویسکوالاستیک گیلان تحت کرنش ثابت

علی مقیمی^۱، محمدحسین سعیدی راد^۲

۱ و ۲ - به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد و عضو هیات علمی

مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

Ali.Moghimi@stu-mail.um.ac.ir

چکیده:

در این تحقیق رفتار ویسکوالاستیک برخی از واریته‌های تجاری گیلان مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور آزمایش واهلش بر روی واریته‌های مختلف گیلان شامل واریته‌های سیاه مشهد، ابرده، ویکتوریا، دوم رس و تک دانه انجام شد. از دو مدل رئولوژیکی پلج و ماکسول عمومی برای تفسیر رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌ها در حالی که تحت کرنش ثابت قرار گرفته بودند، استفاده شد. نتایج نشان داد هر دو مدل دارای ضریب همبستگی بالا ($R^2=0/99$) بوده ولی مدل ماکسول عمومی خطای پیشگویی (RMSEP) کمتری نسبت به مدل پلج داشت. بر اساس آنالیز داده‌های بدست آمده به کمک مدلها مشخص گردید که واریته تک دانه بیشترین سفتی را داشته و بیشتر از دیگر واریته‌ها خاصیت چسبسان (Viscoelastic) از خود نشان می‌دهد. این در حالی بود که واریته ویکتوریا کمترین سفتی و کمترین خاصیت چسبسان را داشت.

واژه‌های کلیدی: رفتار ویسکوالاستیک، گیلان، مدل پلج، مدل ماکسول، واهلش تنش

برای نمایش رفتار رئولوژیکی مواد سه مشخصه اساسی کشسانی (جسم هوکی)، مومسانی (جسم سنت ونانت) و چسبندگی (مایع نیوتنی) بکار می رود. این سه خاصیت مواد ایده آل به عنوان استاندارد مقایسه خواص حقیقی به کار می روند. رفتار محصولات کشاورزی به عنوان مواد حقیقی نسبت به رفتار مواد ایده آل متفاوت است، مثلاً رابطه تنش- تغییر شکل در آنها بستگی به سرعت تغییر شکل دارد بنابراین باید در معادله تنش-تغییر شکل عامل زمان را هم وارد نمود. موادی که تغییر شکل آنها بستگی به زمان دارد مواد چسبسان (ویسکوالاستیک) نامیده می شوند (توکلی، ۱۳۸۲). بیشتر مواد کشاورزی مانند میوه ها هنگامی که در معرض نیرو قرار می گیرند از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان می دهند. پژوهشگران و محققین برای مطالعه رفتار ویسکوالاستیک مواد کشاورزی از علم رئولوژی استفاده می نمایند که علم تغییر شکل و جریان پذیری مواد تحت تاثیر نیروها در زمان های مختلف است. رئولوژی دارای مدل‌های مختلفی می باشد که برای طبقه بندی و پیش گویی رفتار مواد تحت شرایط مختلف تنش و کرنش استفاده می شود. این مدل‌ها شامل ترکیبات مختلفی از جسم جامد هوکی (فنر) و جسم مایع نیوتنی (کمک فنر) می باشند که رفتار پیچیده مواد کشاورزی مختلف را نشان می دهند (Rao et al., 2005).

یکی از آزمایشات تعریف شده برای بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک مواد کشاورزی، آزمایش واهلش تنش^۱ می باشد. در این آزمایش نمونه تحت کرنش ثابت قرار می گیرد و تنش مورد نیاز برای اعمال این کرنش و ثابت نگه داشتن آن بر حسب تابعی از زمان اندازه گیری می شود. داده های آزمایش واهلش بسیار مهم می باشد زیرا اطلاعات بسیار مهم و ارزشمندی در اختیار پژوهشگران قرار می دهد مانند سفتی میوه (Blahovec, 1996)، مورد پسند بودن مواد غذایی، پردازش و حمل و نقل مواد غذایی (Bourne, 2002)، رسیدگی میوه ها (Hassan et al., 2005) و پیش بینی تغییرات در میوه ها هنگام برداشت و حمل و نقل (Rao et al., 2005).

آقای حسن و همکاران (۲۰۰۵) رفتار ویسکوالاستیک هشت واریته مختلف خرما در دو مرحله رسیدگی رطب و خلال مورد مطالعه قرار دادند. آنها از سه مدل پلج^۲، ماکسول عمومی^۳ و نوسینوویچ^۴ استفاده کردند. نتایج نشان داد هر سه مدل در ارزیابی رفتار واهلش خرما دارای اعتبار می باشند. به هر حال ماکسول عمومی در پیشگویی داده های آزمایش بهترین مدل بود.

با توجه به این مسئله که گیلان به عنوان یکی از مهمترین میوه های تجاری دارای بیش از ۲۵ واریته در مشهد بوده (گنجی و همکاران، ۲۰۰۹) و ایران با ۲۲۵۰۰۰ تن سومین تولید کننده گیلان جهان می باشد (آمار فائو، ۲۰۰۷)،

-
1. Stress Relaxation
 2. Peleg
 3. Generalized Maxwell
 4. Nussinovitch

اولین هدف از انجام این پژوهش بررسی و مقایسه خصوصیات ویسکوالاستیک پنج واریته گیلاس (سیاه مشهد، ابرده، ویکتوریا، دوم رس و تک دانه) بر اساس داده های آزمون واهلش تنش بود. در مرحله بعدی به کمک مدل های پلج و ماکسول عمومی داده های آزمون واهلش پیشگویی و توانایی واریته های گیلاس در مستهلک کردن تنش اعمالی در طول زمان و سفتی آنها با یکدیگر مقایسه شد.

مواد و روشها:

آماده سازی نمونه ها:

۵ واریته تجاری گیلاس شامل سیاه مشهد، دوم رس، ابرده، ویکتوریا و تک دانه برای انجام آزمایشات در نظر گرفته شدند. تمام نمونه ها در شرایط محیطی یکسان کاشته شده و مدیریت باغبانی برای آنها به یک صورت انجام شده بود. میوه ها با دست برداشت شده و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد با رطوبت نسبی ۶۰ درصد انبار شدند.

آزمایش واهلش:

آزمایشات واهلش با کمک دستگاه بافت سنجی^۱ (CNS Farnell, Model: QTS 25) مجهز به پروب سیاندی با قطر ۱۰۰ میلیمتر انجام شد. میوه ها تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند در حالی که سرعت پروب ۵۰ mm/min و نمونه ها به صورت افقی قرار داده شده بودند.

پروپ به مدت ۶۰ ثانیه (Blahovec, 1996) بر روی میوه ها در حالی که آنها را به میزان ۸٪ قطرشان فشرده می کرد قرار می گرفت. داده ها توسط نرم افزار TexturePro v2.0 به کامپیوتر منتقل شدند. لازم به ذکر است آزمایشات برای ۲۰ نمونه گیلاس از هر واریته صورت گرفت.

آنالیز داده های واهلش :

مدلهای رایج برای تفسیر رفتار واهلش تنش مدل ماکسول عمومی و پلج می باشند. در این تحقیق از هر دو مدل استفاده شد و دقت و خطای آنها در پیشگویی داده های آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بدست آوردن ضرایب این مدل ها از نرم افزار SlideWrite 2.0 استفاده شد.

مدل ماکسول عمومی

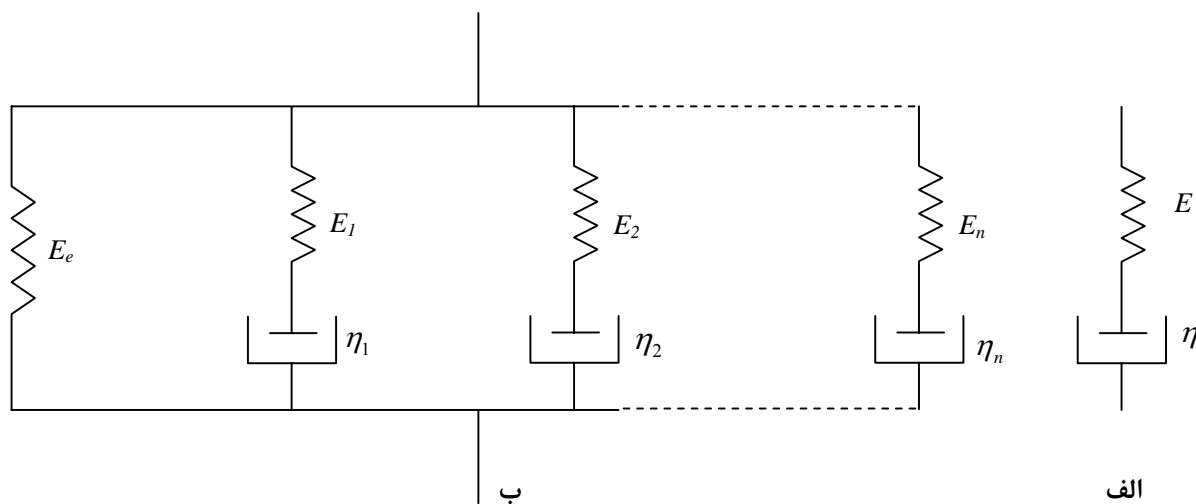
مدلی که اغلب برای نشان دادن رفتار واهلش تنش مواد کشاورزی استفاده می شود مدل ماکسول است که شامل تعداد محدودی از المان های ماکسول (فنر هوکی و کمک فنر نیوتنی که به صورت سری متصل شده اند) می باشد (شکل الف). این المان ها به صورت موازی به یکدیگر متصل شده و از آنجاییکه مقداری از تنش اعمالی حتی بعد از

1 . Texture Analyser

گذشت زمان طولانی در محصولات کشاورزی باقی می ماند، فیزی به صورت موازی به دستگاه ماکسول اضافه می شود (شکل ۱ب). این دستگاه اصلاح شده را مدل ماکسول عمومی می نامند (Mohsenin, 1970). اگر این دستگاه ماکسول عمومی تحت یک کرنش ثابت قرار گیرد، تنش نهایی دستگاه برابر است با مجموع تنش های هر یک از اِلمان های ماکسول که هر یک زمان های واهلش متفاوتی دارند (Steff, 1996). بر این اساس معادله ریاضی این مدل به صورت زیر می باشد:

$$\sigma(t) = \sigma_e + \sum_{i=1}^n c_i \exp(-t / \tau_i) \quad (1)$$

که در آن مقدار تنش در زمان t ، σ_e تنش باقیمانده و C_i و τ_i ثابت های اِلمان i ام می باشند.



شکل ۱- الف) اِلمان های ماکسول فنر هوکی و کمک فنر نیوتنی، ب) دستگاه ماکسول عمومی

مدل پلج

آقای پلج برای نشان دادن رفتار واهلش تنش مواد کشاورزی، مدل خطی و نرمالیزه ای به صورت زیر ارائه نمود (Peleg, 1979):

$$\frac{\sigma(0).t}{\sigma(0) - \sigma(t)} = K_1 + K_2.t \quad (2)$$

که در این رابطه $\sigma(0)$ مقدار تنش در زمان صفر (تنش اولیه)، $\sigma(t)$ تنش در زمان t ، K_1 و K_2 ثابت های فرمول می باشند. معکوس K_1 نشان دهنده سرعت اولیه مستهلک کردن تنش و معکوس K_2 بیانگر سطح مجانب فرضی تنش نرمالیزه شده $(\frac{\sigma(0)-\sigma(t)}{\sigma(0)})$ می باشد.

برای ارزیابی عملکرد این مدلها میزان خطای پیشگویی از فرمول زیر محاسبه گردید:

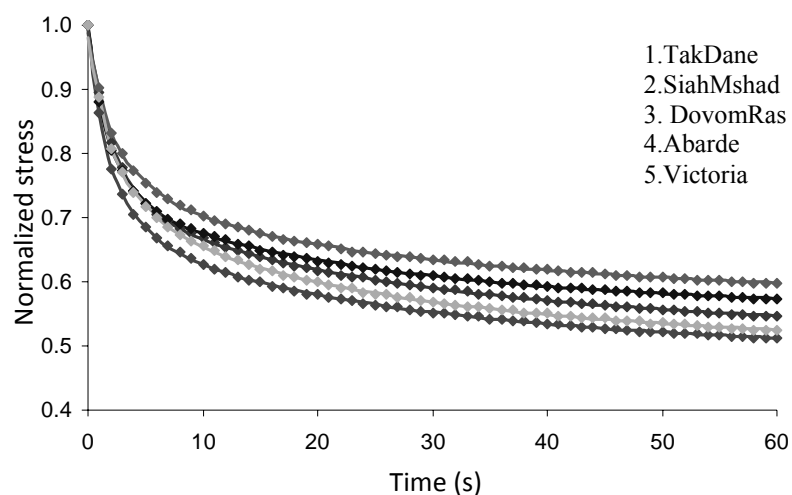
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\sigma}_i - \sigma_i)^2}{n}} \quad (3)$$

که در این رابطه n تعداد نمونه ها، $\hat{\sigma}_i$ مقدار تنش پیشگویی شده توسط مدل و σ_i مقدار تنش اندازه گیری شده به کمک آزمایش برای نمونه i ام می باشند. پایین بودن میزان RMSEP و بالا بودن ضریب همبستگی بر دقت بالای مدل در پیشگویی دلالت می کند.

نتایج و بحث :

از ۲۰ نمونه گیلایس آزمایش شده برای هر واریته میانگین گیری انجام شد و سپس از مدل های پلج و ماکسول برای بررسی و مقایسه رفتار واهلش تنش واریته های مختلف استفاده گردید. پس از میانگین گیری مشخص شد برای اعمال تغییر شکل مورد نظر (۸ درصد)، هر واریته گیلایس به تنش اولیه متفاوتی نیاز دارد. در نتیجه هر واریته ای که تنش اولیه بیشتری داشته، نهایتاً تنش باقیمانده بیشتری نسبت به دیگر واریته ها خواهد داشت. بنابراین تنش باقیمانده (σ_e) داده های خام شاخص خوبی برای بررسی میزان توانایی گیلایس در مستهلک کردن تنش اعمالی نیست. از اینرو داده های خام برحسب تنش اولیه نرمالیزه شدند $(\sigma(t)/\sigma(0))$ ، تا اثر معنی دار میزان تفاوت تنش اولیه خنثی شود (Bellido & Hatcher, 2009a). مدل ماکسول به داده های نرمالیزه برازش شد (شکل ۲). اگرچه تنش اولیه مورد

نیاز و همچنین سرعت واهلش اولیه در گیلایس های مختلف متفاوت بود، تمام واریته ها از الگوی یکسان شبیه دیگر مواد غذایی مانند ماکارونی (Bellido & Hatcher, 2009b)، سیب زمینی (Canet et al., 2005)، ژل، گوشت، پنیر و نان (Del Nobile et al., 2007)، سیب (Silva Paes et al., 2008) و هلو (Wang, 2003) پیروی می کردند.



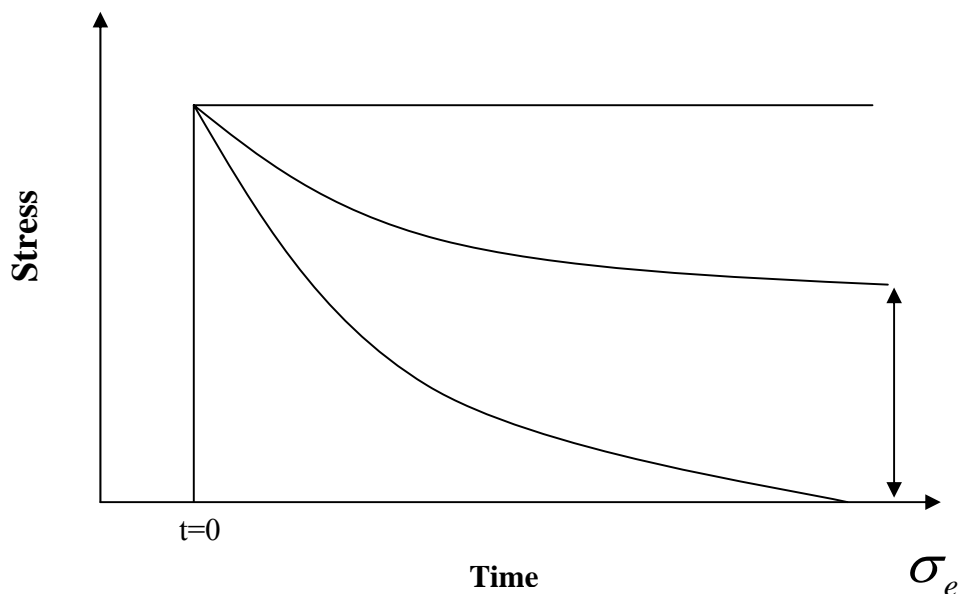
شکل ۲- منحنی های واهلش تنش نرمالیزه شده برای واریته های مختلف گیلان (نقطه ها داده های بدست آمده از آزمایش و خط ها نشان دهنده پیشگویی های مدل ماکسول عمومی می باشند).

جدول ۱- ضرایب و نتایج بدست آمده برای مدل ماکسول عمومی

RMSE	R ²	τ_3 (s)	τ_2 (s)	τ_1 (s)	C ₃	C ₂	C ₁	σ_e	واریته
0.003	0.99	2.54	24.97	0.22	0.16	0.16	0.10	0.57	سیاه مشهد
0.008	0.99	3.56	26.61	0.45	0.17	0.19	0.10	0.52	ابرده
0.005	0.99	2.93	26.57	0.28	0.18	0.17	0.13	0.51	ویکتوریا
0.003	0.99	2.65	27.04	0.29	0.18	0.19	0.09	0.54	دوم رس
0.003	0.99	3.66	28.40	0.42	0.15	0.15	0.10	0.59	تک دانه

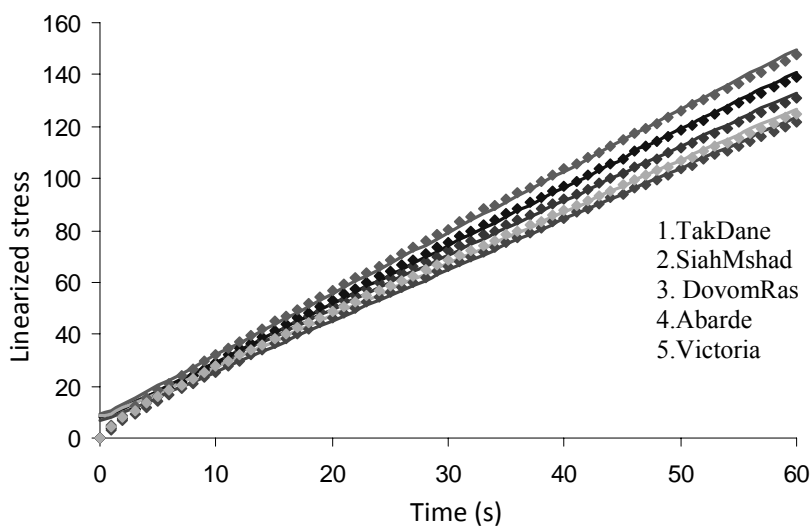
جدول ۱ نتایج بدست آمده برای مدل ماکسول عمومی با استفاده از رگرسیون غیرخطی را نشان می دهد. همانطور که قابل مشاهده می باشد مدل ماکسول عمومی به خوبی توانسته است رفتار واهلش واریته های مختلف گیلان را پیشگویی کند. ضریب همبستگی (R²) مدل ماکسول برای تمام واریته های گیلان ۰/۹۹ و میزان خطای پیشگویی بین ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۸ بود.

یکی از پارامترهای مهم در مدل ماکسول σ_e می باشد که تنش باقیمانده بعد از زمان واهلش می باشد. براساس مدل ماکسول، تک دانه دارای بیشترین مقدار تنش باقیمانده ($\sigma_e = 0.59$) به عبارتی تنش غیرمستهلک می باشد. این درحالی است که کمترین این مقدار برای واریته ویکتوریا ($\sigma_e = 0.51$) بود. این رفتار ویسکوالاستیک متفاوت به علت سفتی و چسبندگی بافت نمونه ها می باشد. بر همین اساس و با توجه به شکل ۲ و مقایسه آن با شکل ۳ مشخص می گردد تمام واریته های گیلان مانند جامد ویسکوالاستیک رفتار می کنند. به عبارت دیگر تنشی در گیلان باقی مانده (σ_e) که مقدار آن بعد از گذشت زمان واهلش تقریباً ثابت می شود. مطابق شکل ۳ برای مواد الاستیک ایده آل، واهلش صورت نمی گیرد و میزان تنش در طول زمان ثابت می ماند. این در حالی است که مواد ویسکوز ایده آل فوراً واهلش نموده و تنش را مستهلک می نمایند. اما مواد ویسکوالاستیک تنش را به صورت تدریجی مستهلک نموده و نقطه پایانی آن به ساختار مولکولی ماده بستگی دارد. تنش در مواد جامد ویسکوالاستیک تا میزان σ_e مستهلک شده و پس از آن این مقدار تنش که همیشه بزرگتر از صفر می باشد در ماده باقی خواهد ماند. در مواد مایع ویسکوالاستیک تنش σ_e برابر صفر می شود یعنی جسم تنش اعمالی اولیه را کاملاً اما به صورت تدریجی مستهلک می نماید.



شکل ۳- منحنی های واهلش تنش مواد

شکل ۴ و جدول ۲ نتایج مدل پلج را نشان می دهند. ضریب همبستگی (R^2) برای تمام واریته ها ۰/۹۹ و خطای پیشگویی بین ۵۳/۱ و ۲/۰۲ است. با مقایسه بین دو مدل ماکسول و پلج مشخص می گردد که میزان خطای پیشگویی برای مدل ماکسول کمتر از مدل پلج می باشد. اما مدل پلج نیز مزیت های خودش را دارد. مدل پلج از فرم ساده ریاضی برخوردار است که با رگرسیون خطی ضرایب آن تعیین می گردند (Peleg and Pollak, 1982; Nussinovitch et al., 1989).



شکل ۴- منحنی های واهلش تنش خطی شده ($\frac{\sigma(0)t}{\sigma(0)-\sigma(t)}$) برای واریته های مختلف گیلان

(نقطه ها داده های بدست آمده از آزمایش و خط ها نشان دهنده پیشگویی های مدل پلج می باشند).

جدول ۲- ضرایب و نتایج بدست آمده برای مدل پلج

واریته	K_1	K_2	R^2	RMSE
سیاه مشهد	8.04	2.24	0.99	1.60
ابرده	8.48	1.99	0.99	2.02
ویکتوریا	6.90	1.96	0.99	1.53
دوم رس	8.78	2.09	0.99	1.71
تک دانه	9.47	2.36	0.99	1.82

در مدل پلج K_2 به عنوان شاخصی از درجه سفتی در نظر گرفته می شود. K_2 برای مواد مایع برابر یک می باشد و برای مواد جامد الاستیک ایده آل به بینهایت میل می کند. براین اساس، تک دانه واریته ای است که بیشترین درجه سفتی را دارد و ویکتوریا کمترین میزان سفتی را از خود نشان می دهد. به عبارت دیگر ترتیب درجه سفتی برای پنج واریته گilas به صورت زیر می باشد: تک دانه، سیاه مشهد، دوم رس، ابرده و ویکتوریا.

این ترتیب برای مدل ماکسول نیز همانند مدل پلج می باشد. می توان این نتیجه را استنتاج کرد که اگرچه دو مدل دارای فرم ریاضی متفاوت (نمایی و کسری) و از دو روش مختلف رگرسیون خطی و غیرخطی استفاده می شود، دارای تفسیرهای منطبق و یکسانی می باشند.

نتیجه گیری:

نتایج نشان داد که گilas مانند یک جامد ویسکوالاستیک رفتار می کند یعنی همیشه تنش اعمال شده در یک کرنش ثابت مستهلک می شود، ولی بعد از گذشت زمان واهلش تنشی در جسم باقی مانده که مقدار آن تقریباً ثابت می باشد. این تنش باقیمانده برای گilas همیشه از صفر بزرگ تر بود. در بین واریته های مورد مطالعه، تک دانه دارای سفتی بیشتر و خصوصیات جامد بیشتری نشان داد و به دنبال آن سیاه مشهد، دوم رس، ابرده و در نهایت ویکتوریا قرار می گرفتند. هر دو مدل پلج و ماکسول عمومی به خوبی توانستند رفتار ویسکوالاستیک گilas را پیشگویی و تفسیر نمایند. و نتایج بدست آمده از آنها با یکدیگر مطابقت داشت. اما مدل ماکسول عمومی دارای خطای کمتری نسبت به مدل پلج بود.

منابع:

توکلی هاشجین، ت. ۱۳۸۲. مکانیک محصولات کشاورزی (تالیف گ. سینکی). انتشارات دانشگاه زنجان.

- Blahovec, J. (1996). Stress relaxation in cherry fruit. *Biorheology*, 33, 451-462.
- Belido, G.G., & Hatcher, D.W. (2009a). Asian noodles: Revisiting Peleg's analysis for presenting stress relaxation data in soft solid foods. *Journal of Food Engineering*, 92, 29-36.
- Belido, G.G., & Hatcher, D.W. (2009b). Stress relaxation behaviour of yellow alkaline noodles: Effect of deformation history. *Journal of Food Engineering*, 93, 460-467.
- Bourne, M.C. (2002). *Food texture and viscosity: Concept and Measurement* (2nd ed.). Elsevier Science & Technology Books.
- Canet, W., Alvarez, M.D., Ferná'ndez, C. & Luna, P. (2005). Comparisons of methods for measuring yield stresses in potato puree: effect of temperature and freezing. *Journal of Food Engineering*, 68, 143-153.
- Del Nobile, M.A., Chillo, S., Mentana, A., & Baiano, A. (2007). Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods. *Journal of Food Engineering*, 78, 978-983.
- FAO, 2007. Statistical Database. www.fao.org
- Ganji Moghadam, E., Hosseini, P., & Mokhtarian, A. (2009). Blooming phenology and self-incompatibility of some commercial cherry (*Prunus avium* L.) cultivars in Iran. *Scientia Horticulturae*, 123, 29-33.
- Hassan, B.H., Alhamdan, A.M., & Elansari, A.M. (2005). Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. *Journal of Food Engineering*, 6, 439-445.
- Mohsenin, N.N. (1970). *Physical properties of plant and animal materials* (Vol. 1). Gordon and Breach Sci. Pub. New York.
- Nussinovitch, A., Peleg, M., & Normand, M. D. (1989). A modified Maxwell and a non exponential model for characterization of the stress relaxation of agar and alginate gels. *Journal of Food Science*, 54, 1013-1016.
- Peleg, M. (1979). Characterization of the stress relaxation curves foods. *Journal of Food Science*, 44, 277-281.
- Peleg, M., Pollak, & M. (1982). The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analysis of solid foods. *Journal of Texture Studies*, 13, 1-11.
- Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., & Datta, A.K. (2005). *Engineering properties of foods* (3rd ed.). Taylor & Francis Group. USA.

- Silva Paes, S., Stringari, G.B. & Laurindo, J.B. (2008). Effect of Vacuum Impregnation Temperature on the Mechanical Properties and Osmotic Dehydration Parameters of Apples. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 51, 799-806.
- Steffe, J.F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering* (2nd ed.) Freeman Press, East Lansing, USA.
- Wang, J. (2003). Anisotropic relaxation properties of pear. *Biosystems Engineering*, 85, 59-65.

Abstract

Viscoelastic behaviour of some commercial sweet cherry cultivars of Iran has been studied in current research. For this purpose, stress relaxation test was conducted on five cultivars of sweet cherry including Siah Mashhad, Abarde, Victoria, Dovom Ras and Tak Dane. Two common models (Generalized Maxwell model and Peleg model) were fitted to the experimental data. Both models could describe stress relaxation behaviour of cherries ($R^2=0.99$), but Generalized Maxwell model had lower root mean square error (RMSE) than Peleg model. Based on analysis of stress relaxation data using models constants, Tak Dane exhibited more solid properties, while Victoria showed less elastic behaviour than other cultivars.

Keywords: Stress relaxation, Sweet Cherry, Viscoelastic behaviour, Maxwell model, Peleg model