



تعیین خواص ویسکوالاستیک کدو با آزمون های مکانیکی

آناهیتا زمانی

کارشناسی ارشد مهندسی شیمی- مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، استان اصفهان، ایران

Anahitazamani25@yahoo.com

ارسال: مهر ماه ۱۴۰۲ پذیرش: آذر ماه ۱۴۰۲

چکیده

اغلب محصولات کشاورزی از نظر مقاومت به نیروهای فشاری دینامیکی و ارتعاشی رفتار متفاوتی از خود نشان می دهند. به منظور استخراج خواص مکانیکی کدو شامل مدول الاستیسیته، ضریب اصطکاک، آزمون های فشار، برش، نفوذ، رهایش تنش و خزش توسط دستگاه جامع کشش فشار واقع در آزمایشگاه خواص بیوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا در سه سایز و سه موقعیت نمونه گیری، انجام شد. نتایج نشان داد که آزمون خزش اطلاعات بیشتری نسبت به آزمون رهایی تنش برای مافراهم آورد. توسط آزمون فشار خصوصیات مواد ویسکوالاستیک، از جمله مدول الاستیسیته تعیین شد. منحنی های اثر زمان بر تنش، آزمون رهایش تنش نشان داد که با اعمال نیروی ناگهانی و ثابت نگهداشتن آن تغییر شکل ناگهانی باشیب بسیار تند ایجاد شد و بعد از مدتی این تغییر شکل روندی ثابت (شیب بسیار کم) ولی نزولی رطبی حاصل از آنالیز واریانس داده های بدست آمده از آزمون برش نشان داد که اختلاف معناداری بین نوع کدوها از لحاظ اندازه و بین اثر متقابل کدوها و سرعت وجود داشت، بطوریکه کدوهای بزرگ با کدوهای کوچک و متوسط اختلاف داشت و بیشترین اعمال اثر بر روی کدوهای بزرگ بود.

واژگان کلیدی: مدول الاستیسیته، ویسکوالاستیک، آزمون برش، آزمون خزش.

۱- مقدمه

تعیین کیفیت، خواص مکانیکی و مواد غذایی محصولات کشاورزی، همواره مورد توجه کارشناسان کشاورزی و صنایع غذایی بوده است. محصولات کشاورزی به علت داشتن ساختار سلولی و رطوبت زیاد، هنگامی که تحت بار گذاری قرار گیرند، رفتار مستقل از زمان (الاستیک) و وابسته به زمان (ویسکوز) را دارا می باشند و رفتاری شبیه مواد ویسکوالاستیک از خود نشان می دهند. بنابراین کدو دارای رفتار ویسکوالاستیک وابسته به زمان است. نتایج این تحقیق در فرآوری، حمل و نقل، بسته بندی و انبارداری محصول کدو به کار برده می شود [۱]. در این تحقیق که برای تعیین خواص ویسکوالاستیک کدو با آزمون خزش انجام شد یکسری از آزمون ها از جمله: آزمون فشار- آزمون برش- آزمون نفوذ- آزمون رهایش تنش- آزمون خزش و همچنین از معادلات رئولوژیکی استفاده شده است.

۲- آزمون های ارزیابی خواص ویسکوالاستیک

۲-۱- آزمون رهاش تنش یا مدل ماکسول

در این آزمون نمونه یک تحت تغییر شکل سریع و معین قرار گرفت. سپس مقادیر تنش به عنوان تابعی از زمان در یک تغییر شکل ثابت اندازه گیری شد. در طی این آزمون مقدار تنش مواد ویسکوالاستیک با زمان کاهش یافت و به سمت صفر میل کرد (زمان استراحت^۱). از مدل ماکسول برای توصیف رفتار های رهاشی تنش استفاده شد [۲].

۲-۲- آزمون خزش^۳ یا مدل کلونین

در این آزمون به طور ناگهانی بار تنش به جسم اعمال شد و به صورت ثابت نگه داشته شد. سپس تغییر شکل یا کرنش به عنوان تابعی از زمان اندازه گیری شد. در این مدل تغییر شکل با زمان افزایش یافت. زمانی که در آن مقدار کرنش به ۶۳/۸٪ مقدار کرنش کل برسد زمان خزش یا تأخیر^۴ می نامند. آزمون تست خزش اطلاعات بیشتری نسبت به تست رهاش تنش برای ما فراهم آورد. یکی از فواید عالی تست خزش نسبت به رهاشی تنش تجزیه و تحلیل آسان داده ها توسط مدل برگرز بود. در این مدل تعداد زیادی از خصوصیات مواد ویسکوالاستیک، از جمله مدول الاستیک لحظه ای، مدول الاستیک تأخیری، زمان تأخیر و ویسکوزیته مواد را تعیین کرد [۳].

۲-۳- آزمون خزش

پدیده خزش در زمان انجام تعدادی از فرآیندها (نشست توده ای علوفه تازه ودانه ها، تغییر شکل میوه ها در اثر بار ساکن آنها...) صورت می گیرد. بنابراین برای کم کردن این پدیده باید خواص لزجت و کشسانی مواد مشخص شود. در آزمایش های مربوط به خزش، نمونه تحت نیروی ثابت قرار می گیرد و کرنش مورد نیاز با توجه به ثابت نگه داشتن نیرو نسبت به زمان اندازه گیری می گردد. این آزمون را اصطلاحاً آزمون خزش می نامند و از مدل کلونین و یا برگرز برای نمایش آن استفاده می کنند. یکی از مهم ترین پارامتر های مهم ویسکوالاستیک که می تواند از آزمون خزش مشخص شود، زمان تأخیر است. مقدار خزش وابسته به زمان از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - \varepsilon_d \left(1 - e^{-t/T_{ret}}\right) \quad (1)$$

که در آن ε_0 مقدار کرنش اولیه، $\varepsilon_d = \varepsilon_e - \varepsilon_0$ مقدار کرنش نهایی، T_{ret} زمان خزش یا تأخیر (ثانیه) و t زمان آزمایش (ثانیه) می باشد. وقتی $t = T_r$ شود، مقدار $1 - e^{-t/T_{ret}}$ مساوی با $(1 - 1/e)$ و $\varepsilon_e - \varepsilon_0$ تغییر شکل عقب افتاده نامیده می شود. بدین ترتیب سرعت تغییر شکل خزش را نشان می دهد. مارتسی^۵ و همکاران در سال (۲۰۰۶)، رفتار خزشی رشته های ژلاتینی را در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد مورد ارزیابی قرار داد. مطالعه خزش در این تحقیق منجر به پیدا شدن رابطه بین رفتار خزشی و ساختار اتصالات عرضی غشاء ژلاتینی شد، که گویای این است که بیشترین اتصالات عرضی در مواد باعث کمترین خزش در آنها خواهد شد [۴].

۳- مواد و روش ها

۳-۱- آماده سازی نمونه ها

کدوی خورشتی تازه در سه اندازه مختلف قطری و بدون هیچ گونه آسیب و صدمه مکانیکی ظاهری تهیه شد. قبل از شروع آزمایش، ابعاد قطری هر کدو از سه ناحیه مختلف نمونه ها به منظور محاسبه قطر متوسط با کولیس اندازه گیری شد.

¹ Stress Relaxation Test

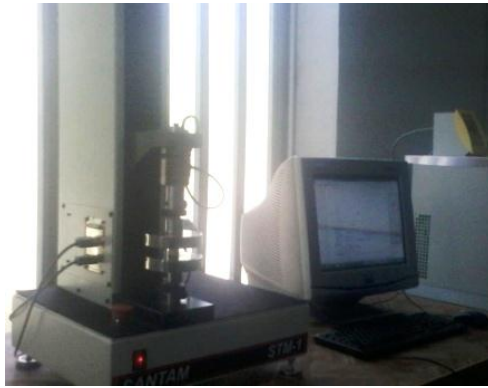
² Relaxation Time

³ Creep Test

⁴ Retardation Time

⁵ Martucci

به منظور بررسی خواص مکانیکی کدو و انجام آزمون‌های: خزش، آسایش تنش، فشار، برش و نفوذ و جهت تعیین رفتار ویسکو الاستیک کدو از دستگاه اینسترون (سنتام) واقع در آزمایشگاه خواص بیوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا استفاده شد. ظرفیت لودسل متصل دستگاه ۱۰۰ کیلوگرم بود (شکل ۱).



شکل ۱- دستگاه اینسترون با پروب فشاری

۳-۲- دسته بندی نمونه ها

دسته بندی کدوها بر حسب قطر و اندازه صورت گرفت. ابتدا تمامی کدو ها از لحاظ ظاهر مناسب دسته بندی و در یک ظرف چیده شد (دسته اول شامل کدو های بزرگ، دسته دوم شامل کدو های متوسط، دسته سوم شامل کدو های کوچک). سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم توزین و حجم تک تک نمونه ها توسط آب و بشر اندازه گیری شد و برای انجام مراحل بعدی در نظر گرفته شد.

۳-۳- آزمون فشار

اصولاً دو نوع آزمون های فشاری وجود دارد:

۱- آزمون فشاری تک محور

۲- آزمون فشاری توده ای یا حجمی

در این پژوهش از آزمون فشار تک محور استفاده گردید.

۳-۳-۱- شرایط آزمون

برای انجام این آزمون از دستگاه اینسترون (سنتام) با ظرفیت لودسل متصل دستگاه ۱۰۰ کیلوگرم بود، با دو صفحه موازی که سرعت صفحه متحرک آن ۱۵ میلی متر بر دقیقه بود، تا فروپاشی کامل نمونه استفاده شد. جهت انجام تست فشاری، نمونه های استوانه ای از سه ناحیه مختلف هر کدو (سر، وسط و ته) با یک نمونه گیر استیل به قطر داخلی ۱۷ میلی متر و طول ۲۵ میلی متر تهیه شد و بین دو فک دستگاه قرار گرفت (شکل ۲). همچنین طول و قطر نمونه های قالب زده شده توسط کولیس تنظیم شد. این آزمون بر روی هر نمونه در سه تکرار انجام شد.



شکل ۲- آزمون فشار

۳-۴-۴-آزمون برش

در آزمون برش، از یک تیغه برای برش نمونه، تحت شرایط معین استفاده شد و حداکثر نیروی لازم یا کار ضروری برای انجام آزمون برش به عنوان شاخص سفتی، تافنس یا فیبری بودن بافت نمونه در نظر گرفته شد.

۳-۴-۱-شرایط آزمون

برای انجام این آزمون از دستگاه اینسترون با یک تیغه ۷ شکل استفاده شد. این آزمون در سه سرعت متفاوت ۳۰ میلی متر بر دقیقه، ۵۰ میلی متر بر دقیقه و ۸۰ میلی متر بر دقیقه بر روی سه ناحیه مختلف هر نمونه کدو در سه تکرار انجام شد. نمودارها تا نقطه گسیختگی نمونه ترسیم و تحلیل شد.

۳-۵-۳-آزمون نفوذ

در آزمون نفوذسنجی یا سوراخ کردن، پروب دستگاه به درون نمونه نفوذ کرد و نیروی لازم برای حصول به عمق نفوذ معین تحت شرایط خاص آزمون اندازه گیری شد و به عنوان شاخص سختی بافت ماده غذایی معرفی شد. در آزمون های نفوذ و سوراخ کردن هر دو نیروی فشاری و برشی دخالت دارند.

۳-۵-۱-شرایط آزمون

برای انجام این آزمون از دستگاه اینسترون (سنتام) با ظرفیت لودسل متصل دستگاه ۱۰۰ کیلوگرم و با دو نمونه پروب مخروطی با قطر ۴ میلی متر و پروب نیم گرد با قطر ۶ میلی متر استفاده شد. این آزمون در سه سرعت متفاوت ۵ میلی متر بر دقیقه، ۲۵ میلی متر بر دقیقه و ۴۵ میلی متر بر دقیقه بر روی سه ناحیه متفاوت از هر نمونه کدو در سه تکرار انجام شد. نمودار های نیرو بر حسب مسافت نفوذ یافته توسط پروب، رسم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل ۳).



شکل ۳-آزمون نفوذ

۳-۶-۳-آزمون رهائش تنش

در صورتی که مواد غذایی با میزان کرنش ثابتی دچار تغییر شکل شود و مقدار کرنش ثابت باقی بماند، تنشی که برای حفظ این میزان کرنش لازم است، با گذشت زمان کاهش می یابد. به این پدیده، رهائش تنش گویند. این آزمون به طور گسترده ای برای بررسی خواص ویسکو الاستیک مواد غذایی به کار می رود. در این آزمون، مادامیکه محصول مورد نظر در معرض کرنش ثابتی قرار داشت، میزان تنش به عنوان تابعی از زمان اندازه گیری شد. در این آزمون، نمونه تحت یک تغییر شکل سریع و معین قرار گرفت، سپس مقادیر تنش به عنوان تابعی از زمان در یک تغییر شکل ثابت اندازه گیری شد.

۳-۶-۱-شرایط آزمون

برای انجام این آزمون با استفاده از دستگاه اینسترون با دو صفحه موازی که سرعت صفحه متحرک آن ۱۰ میلی متر بر دقیقه بود و در مدت زمان ۱۵ دقیقه استفاده شد. این آزمون در سه تکرار بر روی هر نمونه از کدو ها انجام شد. در نهایت نمودار نیرو بر حسب زمان - تنش بر حسب زمان، رسم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۳-۷-آزمون خزش

در این آزمون به طور ناگهانی بار یا تنش بر جسم اعمال شده به صورت ثابت نگه داشته شد، سپس تغییر شکل یا کرنش به عنوان تابعی از زمان اندازه گیری شد. در این حالت مشاهده شد که تغییر شکل با زمان افزایش پیدا کرد. این آزمون را اصطلاحاً آزمون خزش می نامند در آزمون خزش زمانیکه تنش وارد شده متوقف گردد، امکان مقداری بازیافت و برگشت به حالت اولیه وجود دارد. آزمون خزش را می توان به صورت کشش تک محوری و یا فشردن تک محوری انجام داد و از مدل کلوین برای نمایش آن استفاده کرد. از ترکیب مدل کلوین و ماکسول به صورت متوالی نیز مدل برگرز به دست می آید. که در برخی موارد برای نمایش آزمون خزش کاربرد دارد.

۳-۷-۱- شرایط آزمون

برای انجام این آزمون از دستگاه اینسترون (سنتام) با ظرفیت لودسل متصل دستگاه ۱۰۰ کیلوگرم بود، با دو صفحه موازی که سرعت صفحه متحرک آن ۱۰ میلی متر بر دقیقه و مدت زمان ۲۵ دقیقه در نظر گرفته شد. در این آزمون نمونه های استوانه ای از سه ناحیه مختلف هر کدو (سر، وسط و ته) با نمونه گیر استیل به قطر داخلی ۱۷ میلی متر و طول ۲۵ میلی متر تهیه و بین دو فک دستگاه قرار گرفت. نمودار های تغییر شکل بر حسب زمان در یک تنش ثابت و کرنش بر حسب زمان رسم شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۳-۸- معادلات رئولوژیکی

برای بیان رفتار مواد ویسکوالاستیک، می توان فنرها و دشیپات ها را به شکل های متفاوتی به همدیگر متصل نمود. متداولترین مدل ها عبارتند از مدل ماکسول و مدل کلوین. در مدل ماکسول، فنر و دشیپات به صورت سری به همدیگر متصل هستند در حالی که در مدل کلوین این اجزاء به شکل موازی به یکدیگر متصل می باشند. از موازی چیدن چندین مدل ماکسول، مدل ماکسول تعمیم یافته و از متوالی قرار دادن چندین مدل کلوین، مدل کلوین تعمیم یافته به دست می آید. از ترکیب مدل کلوین و ماکسول به صورت متوالی نیز مدل برگرز به دست می آید. برای بدست آوردن معادلات رئولوژیکی برای مدل های برگرز، کلوین و ماکسول، قانون نیوتنی ویسکوزیته را برای ضربه گیر و قانون هوکی را برای فنر فرض می کنیم [۵-۶]. با توجه به معادلات: σ : تنش، ϵ : کرنش، t : زمان، E : سفتی یا مدول فنر در حالت جسم الاستیک ایده آل، E_e : مدول ثابت یا مدول در زمان صفر، E_v : مدول های معادل یا مدول های بعد از زمان بی نهایت، $E_d = E_0 - E_e$: مدول کاهشی، η : ثابت ویسکوزیته مایع در ضربه گیر، \square و S : اندیس ها به ترتیب برای المان فنر و ویسکوز است. معادلات مربوط به فنر (S) در دستگاه کلوین عبارتند از [۷]:

$$E = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s} = \frac{\sigma_s^0}{\epsilon_s^0} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\sigma_v}{\epsilon_v^0} \text{ گیر: ضربه}$$

تنش کل در مدل کلوین بین فنر و ضربه گیر (کمک فنر) تقسیم می شود به طوری که:

$$+\sigma_v \sigma = \sigma_s \quad (3)$$

تغییر شکل دو عنصر فوق با هم برابرند، پس $\epsilon_s = \epsilon_v = \epsilon$ ، در معادله فوق به جای تنش بر حسب تغییر شکل مقدار قرار می دهیم:

$$\sigma = E\epsilon_s + \epsilon\eta_v^0 \quad (4)$$

اگر در این معادله نسبت $\frac{\eta}{E} T_{ret} =$ زمان تأخیر^۱ بنامیم، معادله بالا به صورت زیر ارائه می شود.

$$\frac{\sigma}{E^0} = \epsilon + T_{ret} \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) \quad (5)$$

فرض کنیم ماده تحت تأثیر بار ناگهانی ثابت با تنش σ_0 قرار گیرد. با مشتق گیری از معادله بالا و با فرض $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ ، معادله زیر حاصل می شود:

¹ Retardation Time

$$\varepsilon T_{ret} = 0 + \ddot{\varepsilon} \quad (6)$$

بعدازحل معادله:

$$\varepsilon^0(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \left(\varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{E} \right) e^{\left(\frac{-t}{T_{ret}} \right)} \quad (7)$$

σ_0 و ε_0 تنش ثابت و کرنش در $t = 0$ می باشند. کرنش ابتدایی صفر است $\varepsilon_0 = 0$ در معادله جایگذاری می شود.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{T_{ret}} \right)} \right) \quad (8)$$

از آنجائیکه در مدل ماکسول اجزاء به صورت سری در کنار هم قرار دارند، کرنش برشی کل را می توان به شکل مجموع کرنش در فتر و دشیپات بیان نمود:

$$\gamma \gamma_{dashpot} + \gamma_{spring} = \quad (9)$$

بامشتق گیری از معادله بالا نسبت به زمان و با استفاده از معادلات $\tau = G\gamma$ و $\tau = \mu\gamma^0$ معادله ذیل به دست می آید:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \gamma^0 = \frac{\tau}{\mu} + \frac{1}{G} \left(\frac{d\tau}{td} \right) \quad (10)$$

معادله مذکور را می توان به شکل معادله زیر نوشت:

$$\mu\gamma^0 = \tau + \lambda \left(\frac{d\tau_{rel}}{td} \right) \quad (11)$$

که λ_{rel} زمان رهایش بوده و بنا به تعریف عبارت است از:

$$\frac{\mu}{G} = \lambda_{rel}^0 \quad (12)$$

در صورتی که مقدار کرنش γ ثابت باشد، سرعت برش (γ^0) برابر صفر شده و بعد از انتگرال گیری از معادله $\mu\gamma^0 = \tau + \lambda \left(\frac{d\tau_{rel}}{td} \right)$

نسبت به زمان، مدل ماکسول را می توان برای مقدار ثابت $\left(\frac{G}{\mu} \right)$ به صورت ذیل بیان نمود:

$$\exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}} \right) \tau = \tau_0 \quad (13)$$

معادله $\exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}} \right) \tau = \tau_0$ بیانگر رهایش تدریجی تنش (از τ_0 تا صفر) بعد از اعمال یک کرنش ناگهانی می باشد. این رابطه کمک می کند تا زمان رهایش (λ_{rel}) تعیین شود یعنی زمانی که طول می کشد تا میزان تنش به $\frac{1}{e}$ (۳۶/۸ درصد) مقدار اولیه آن برسد. مدل ماکسول برای بسیاری از مواد ویسکو الاستیک مناسب نیست چرا که در این مدل تنش تعادلی (τ_e) وجود ندارد. برای اصلاح این مدل می توان یک فتر رابه طور موازی به آن متصل نمود. معادله رهایش تنش در مورد این مدل سه جزئی حاصله به شکل زیر خواهد بود:

$$\tau(t) = (\tau_0 - \tau_e) \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}} \right) + \tau_e \quad (14)$$

به طوری که: $\tau_e = \gamma_0 G_0$

زمان رهایش در بخش استاندارد ماکسول در مدل حاصله نیز به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\frac{\mu_1}{G_1} = \lambda_{rel} \quad (15)$$

می توان برحسب نیاز و باتوجه به داده های آزمایشی مربوط به رهایش تنش، تعداد اجزاء ماکسول در مدل را افزایش داد. کرنش در مدل چهار جزئی از سه قسمت A، B و C تشکیل شده است که تحت تنش ثابت می باشند.

$$\varepsilon = \varepsilon_C + \varepsilon_B + \varepsilon_A$$

$$\sigma = \sigma_C = \sigma_A = \sigma_B$$

که با جایگذاری تنش ها باقانون هوکی و قانون سیال نیوتنی از معادله بالا به ترتیب:

$$\sigma_A = \varepsilon_A \times E_0$$

مطابق باتغییر شکل لحظه ای

$$\sigma_B = rE \times \varepsilon_B + \eta(\varepsilon_B^0)$$

مطابق باتغییر شکل الاستیک

$$\sigma_C = \varepsilon_C^0 \times \eta_V$$

مطابق با جریان سیال

این سه معادله باهم ترکیب شده و معادله رابه وجود می آورند که بیانگر رابطه بین تنش و کرنش می باشد [۳۷].

$$\frac{\varepsilon^{00}}{T_{ret}} = E^{00} = \frac{1}{E_0} \quad (۱۶)$$

$$\left\{ \sigma \times \left(\frac{E_0}{\eta_V T_{ret}} \right) + \sigma^0 \times \left(\frac{1}{T_{ret}} + \frac{E_0}{\eta} + \frac{E_0}{T_{ret} E_r} \right) + \sigma^{00} \right\} \quad (۱۷)$$

این معادله به طور عمومی رفتار مواد ویسکو الاستیک خطی را توضیح می دهد. همچنین برای موادی که از خود رفتار الاستیسیته، الاستیسیته تأخیری و سیالی نشان می دهند معتبر است. به طور مثال اگر ما تنش یا باری را اعمال کنیم و آن را ثابت نگه داریم، در شرایط ابتدایی $t = 0$ و تنش ثابت معادله $\left\{ \sigma \times \left(\frac{E_0}{\eta_V T_{ret}} \right) + \sigma^0 \times \left(\frac{1}{T_{ret}} + \frac{E_0}{\eta} + \frac{E_0}{T_{ret} E_r} \right) + \sigma^{00} \right\}$ به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\varepsilon^{00} + \frac{\varepsilon^0}{T_{ret}} = \frac{\sigma_0}{\eta_V \times T_{ret}} \quad (۱۸)$$

که باحل کردن معادله بالا داریم:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta_V} + \frac{\sigma_0}{E_r} \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{T_{ret}} \right)} \right) + \frac{\sigma_0}{E_0} \quad (۱۹)$$

تابع $J(t) = \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{E} \right)$ را به عنوان نرمش خزشی معرفی می کنیم:

$$J(t) = \frac{t}{\eta_0} + J_1 \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{T_{ret}} \right)} \right) + J_0 \quad (۲۰)$$

$\frac{1}{E_0} = J_0$ نرمش خزشی ابتدائی، $\frac{1}{E_r} = J_1$ نرمش خزشی تأخیری نامیده می شود [۷].

۴- نتایج، تجزیه و تحلیل آماری

برای مقایسه میانگین ها در قسمت خواص مکانیکی و فیزیکی از تست چند دامنه ای دانکن استفاده کردیم و داده ها به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به کمک نرم افزارهای آماری SAS و EXCEL ۲۰۱۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادیم. اکثر محصولات کشاورزی رفتار مشابه مواد ویسکو الاستیک از خود نشان می دهند [۷]، کدو نیز دارای چنین رفتاری است. این گونه مواد از دو بخش ویسکوز و الاستیک تشکیل شده اند. در این پژوهش کدو از نظر خواص مکانیکی، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت معادله ماکسول و معادله برگرز برای رهائش تنش و خزش بدست آمد.

۴-۱- تعیین مقادیر فیزیکی

قبل از انجام آزمون ها خواص فیزیکی نمونه از جمله طول و قطر و حجم و وزن اندازه گیری شد. برای این منظور با استفاده از کولیس، طول و قطر تک تک کدو ها اندازه گیری شد و حجم نمونه ها را با استفاده از آب و استوانه مدرج اندازه گیری شد، به این صورت که ابتدا استوانه تا نقطه مورد نظر از آب پر شد سپس تک تک کدو ها داخل استوانه گذاشته شد و اختلاف حجم اولیه و حجم آب و کدو بعنوان حجم نمونه یادداشت شد. وزن نمونه ها را با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ گرم توزین شد. در نهایت مقادیر میانگین ها داده ها محاسبه و ثبت گردید و در جدول پایین ذکر شد.

جدول ۱- مقایسات میانگین مشخصات فیزیکی کدو ها

وزن	حجم	قطر	طول	کدو
A 306/30	A 251/67	A 4/911	A 20/311	دسته اول
B 164/75	B 201/11	B 4/098	B 16/24	دسته دوم
C 59/95	C 137/56	C 2/544	C 9/66	دسته سوم

۲-۴- زاویه اصطکاک

برای اندازه گیری زاویه اصطکاک لغزشی هر نمونه در راستای طولی بر روی دستگاه قرار داده شد و زاویه بتدریج افزایش داده شد تا زمانی که نمونه شروع به لرزیدن نمود. این زاویه به عنوان زاویه اصطکاک لغزشی ثبت شد. این آزمایش بر روی سه سطح مختلف شیشه، ورق گالوانیزه و تخته سه لا برای سه نمونه از هر رقم و در ۲ تکرار انجام شد. نتایج این آزمون نشان داد که بسته به ماهیت درونی نمونه ها و سطح مورد استفاده زاویه اصطکاک متفاوت است بطوریکه بیشترین زاویه اصطکاک بر روی تخته سه لا بدست آمد و نمونه ها بر روی سطح ورق گالوانیزه سریع تر پایین آمد که نشان دهنده کمترین مقدار زاویه اصطکاک بود.

جدول ۲- تجزیه واریانس زاویه اصطکاک کدو

تخته ۳ لا	شیشه	ورق گالوانیز	درجه آزادی	کدو
0/33**	0/354*	0/0131*	۲	کدو
0/015	0/077	0/0031	۱۵	خطا

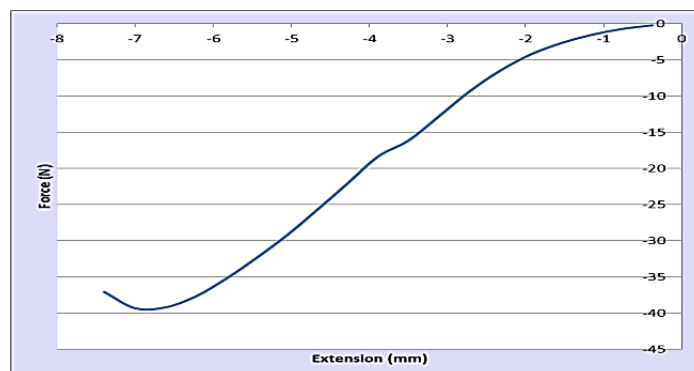
** نشان دهنده اختلاف معنی داری در سطح 0/01، * نشان دهنده اختلاف معنی داری در سطح 0/05

جدول ۳- مقایسات میانگین زاویه اصطکاک کدو

تخته ۳ لا	شیشه	ورق گالوانیز	کدو
0/678A	0/622A	0/174A	دسته اول
0/283B	0/204B	0/081A	دسته دوم
0/261B	0/197B	0/1169B	دسته سوم

۳-۴- آزمون فشار

نمودار نشان داد که با افزایش نیروی اعمالی به نمونه ها از طرف دو فک دستگاه نمونه ها دچار تغییر طول ناگهانی شد و در جهت عرض تک تک نمونه ها با افزایش مقدار روبرو شد، بعد از گذشت زمان نیروی اعمالی به بیشترین مقدار رسید و بیشترین تغییر در جهت عرض نمونه ها ایجاد شد که ناگهان افت پیدا کرد و نمونه ها دچار فرو پاشی کامل شدند. تجزیه و تحلیل داده های حاصل از آزمایش توسط نرم افزار SAS نشان داد که بیشترین اعمال نیرو و انرژی شکست استفاده شده بر روی نمونه دسته سوم بود و اختلاف معنا داری بین نمونه دسته دوم و سوم از لحاظ نیروی اعمالی وجود داشت در حالیکه بیشترین تغییر طول بر روی نمونه دسته دوم مشاهده شد و بیشترین تغییر عرض ایجاد شده نسبت به تغییر طول (نسبت پوآسون) مربوط به نمونه دسته دوم بود و هیچ گونه اختلاف معنا داری بین نمونه ها وجود نداشت.



شکل ۴- آزمون فشار

جدول ۴- تجزیه واریانس مشخصات مکانیکی کدو

درجه آزادی	میانگین مربعات				
	نیرو	تغییر طول	انرژی شکست	نسبت پوآسون	
کدو	۲	403/84*	0/887 ^{n.s}	3454/063 ^{n.s}	0/0039
خطا	۶	74/98*	3/6497	1827/145	0/004

^{n.s} عدم اختلاف معنی دار

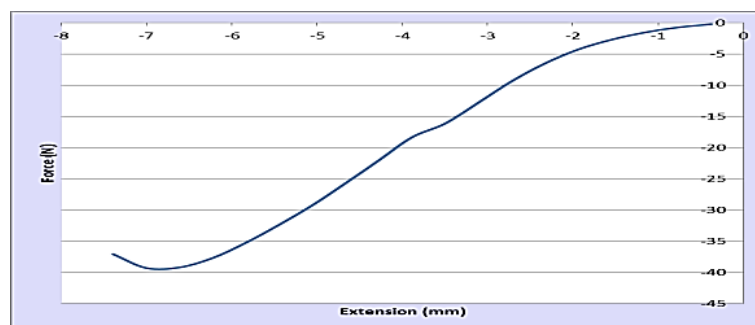
* نشان دهنده اختلاف معنی داری در سطح ۰/۰۵

جدول ۵- مشخصات مکانیکی کدو

کدو	نیرو	تغییر طول	انرژی شکست	نسبت پوآسون
دسته اول	34/330AB	6/48 A	111/85 A	0/3573 A
دسته دوم	27/56 B	7/525 A	106/19 A	0/4117 A
دسته سوم	50/167 A	6/744 A	167/62 A	0/3434 A

۴-۴- آزمون برش

آزمون برش به منظور تعیین مقاومت برشی برای محصولات کشاورزی از دستگاه اینسترون (سنتام) با ظرفیت لودسل ۱۰۰ کیلوگرم انجام شد. این آزمون بر روی ۳ ناحیه مختلف از هر نمونه انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین نیرو اعمالی از طرف دو فک دستگاه بر روی نمونه های دسته اول بود که نشان دهنده بیشترین مقاومت از جانب نمونه های دسته اول در برابر نیروی برشی بود بطوریکه نمونه های دسته اول از لحاظ نیروی اعمالی اختلاف معناداری با نمونه های دسته دوم و سوم داشتند. نمودار دچار یک افت ناگهانی شد که بعلاوه تغییر طول و بیشترین نیرو اعمالی (Peak) از جانب دستگاه بر روی نمونه ها بود.



شکل ۵- آزمون برش

جدول ۶- تجزیه واریانس داده های آزمون برش

درجه آزادی	میانگین مربعات	
کدو (A)	۲	84/74**
سرعت (B)	۲	15/07*
کدو*سرعت (A*B)	۴	23/77*
خطا	۱۸	5/32

** نشان دهنده اختلاف معنی داری در سطح 0/01، * نشان دهنده اختلاف معنی داری در سطح 0/05

جدول ۷- مقایسات میانگین داده های آزمون برش

کدو	نیرو
دسته اول	17/57 A
دسته دوم	13/37 B
دسته سوم	11/60 B

۴-۵- آزمون نفوذ

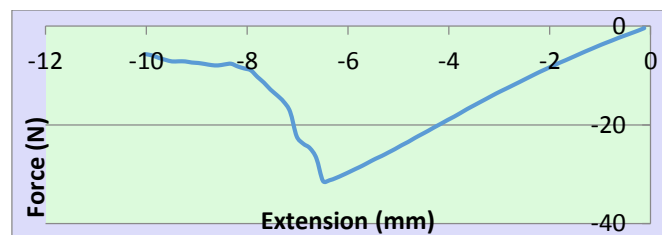
در آزمون نفوذ با استفاده از دستگاه اینسترون و دو نمونه پروب نیم گرد و نوک مخروطی نمونه ها را مورد ارزیابی قرار داده شد. در ابتدا نمونه ها زیر پروب نیم گرد قرار گرفت. این آزمون در سه ناحیه مختلف از هر نمونه و در ۳ سرعت متفاوت ۵ میلی متر بر دقیقه، ۲۵ میلی متر بر دقیقه، ۴۵ میلی متر بر دقیقه انجام شد بطوریکه پروب نیم گرد به درون نمونه نفوذ کرد و نیروی لازم برای حصول به عمق نفوذ اندازه گیری شد.

جدول ۸- تجزیه واریانس داده های آزمون نفوذ

انرژی شکست	تغییر طول	نیرو	درجه آزادی
49027/452**	2/0247 ^{n.s}	3642/77**	۱
446/411	1/826	21/2843	۲
3240/334	2/155	17/574	۲
410/835	0/8080	3/033	۲
683/295	0/490	3/5034	۲
514/162	1/6717	8/641	۴
258/479	0/552	2/438	۴
672/073	2/087	10/948	۳۶

جدول ۹- مقایسات میانگین داده های آزمون نفوذ

انرژی شکست	تغییر طول	نیرو	کده اول
98/820 A	7/3193 A	28/191 A	دسته اول
88/955 A	7/3193 A	26/407 A	دسته دوم
92/696 A	6/771 A	28/376 A	دسته سوم

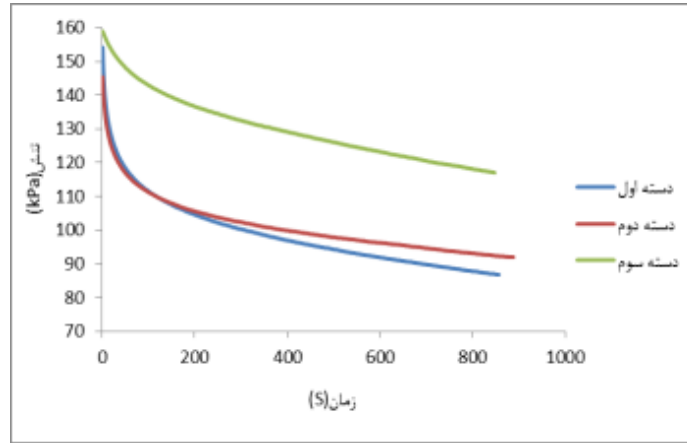


شکل ۶- آزمون نفوذ

۴-۶- آزمون رهايش تنش

آزمون رهايش تنش با استفاده از دستگاه اینسترون و با استفاده از پروب فشاری در ۳ تکرار بر روی نمونه های کدو انجام شد. برای انجام این آزمون نمونه ها را توسط نمونه گیر استیل به صورت قالب استوانه ای در آمد و طول و قطر تک تک نمونه ها را توسط کولیس اندازه گیری شد، سپس تغییر طول و نیرو را صفر کرده سرعت دستگاه را روی میلی متر بر دقیقه ۱۰ و زمان دقیقه ۱۵ تنظیم کرد و نمونه ها را بین ۲ فک دستگاه (پروب مسطح) قرار داد، دکمه شروع زده شد به محض اینکه تغییر طول به ۵ رسید و قبل از

اینکه نیرو صفر شد یادداشت گردید زمانیکه دستگاه دقیقه ۱۵ را نشان داد دستگاه به طور خودکار ایست کرد و نمودارها توسط دستگاه ترسیم شد.



شکل ۷- نمودار تنش- زمان

معادله عمومی ماکسول:

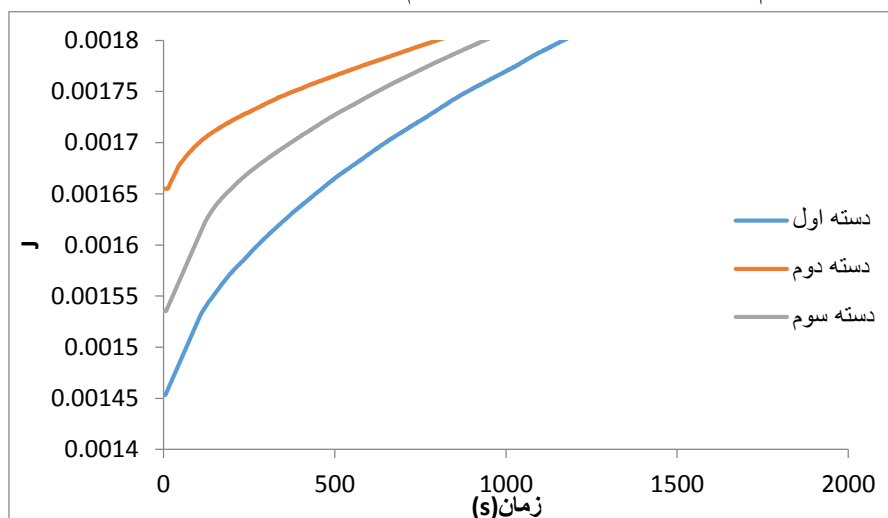
$$\tau(t) = \tau_e + (\tau_0 - \tau_e) \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}}\right) \quad (21)$$

جدول ۱۰- نتایج حاصل از معادله ماکسول

	τ_e	$\tau_0 - \tau_e$	λ_{rel}	Force
دسته اول	118	38/57	283/37	۳۱/۳۳±۳/۶۷
دسته دوم	75/67	35/43	269/99	41/67±5/55
دسته سوم	101	30/89	283/45	38/00±7/64

۷-۴-آزمون خزش

آزمون خزش روی نمونه های کدو در ۳ تکرار با دستگاه اینسترون، انجام شد. طول و قطر نمونه های قالب زده توسط نمونه گیر استیل با استفاده از کولیس اندازه گیری شد این کار برای تک تک نمونه ها انجام شد. نمونه ها به صورت مجزا ما بین دو فک مسطح دستگاه قرار داده شد. زمانی که نیروی اعمالی از طرف سیلندر به کدو به ۲۰- نیوتن رسید، میزان تغییر مکان اولیه را یادداشت شد، سپس دکمه شروع را زده و داده برداری آغاز شد. مدت زمان داده برداری ۲۵ دقیقه و با سرعت ۱۰ میلی متر بر دقیقه بود که بعد از اتمام آزمایشات نمودارها ترسیم و مدل سازی توسط مدل برگرز انجام شد.



شکل ۸- نمودار ε، برحسب زمان

معادله عمومی خزش:

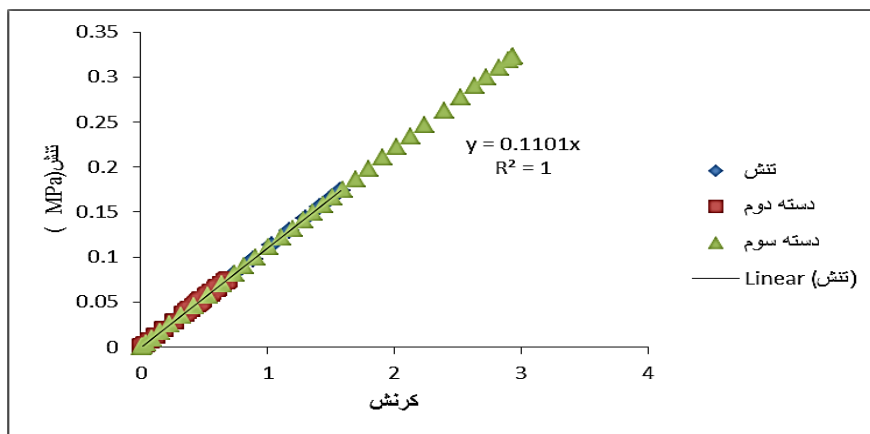
$$J(t) = J_0 + J_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{ret}}\right) \right) + \frac{t}{\mu_0} \quad (22)$$

جدول ۱۱- نتایج حاصل از معادله خزش

	J_0	J_1	T_{ret}	η_0	Extension
دسته اول	۰/۰۰۱۷۱۶	۰/۰۰۰۱۳	$10^7 * ۴/۱$	$10^7 * ۳/۸$	$۳/۷۸ \pm ۰/۵۷$
دسته دوم	۰/۰۰۱۵۶۹	۰/۰۰۰۰۴۴	$10^9 * ۳/۴$	$10^7 * ۱/۵$	$۳/۴۵ \pm ۰/۲۰$
دسته سوم	۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۰۰۰۱	$10^7 * ۶/۶$	$10^6 * ۸/۳$	$۳/۶۳ \pm ۰/۱۷$

۴-۸- مدول الاستیسیته

با استفاده از داده های بدست آمده از آزمون فشار (نیرو - تغییر مکان) نسبت تنش برحسب کرنش را بدست آمد و نمودار آن رسم شد که شیب خط نمودار بیانگر مدول الاستیسیته بود. نمودار ها نشان داد که با افزایش کرنش، میزان تنش افزایش پیدا کرد که نشان دهنده افزایش نیروی اعمال شده بود که با کاهش سطح مقطع و کاهش تغییرات طول رابطه مستقیم داشت و رابطه مستقیم بین کرنش و تنش وجود داشت و همچنین با افزایش سایز کدو، تعداد دانه های میانی زیاد شده که افزایش فضای خالی در بافت محصول را به دنبال دارد که کاهش مقاومت محصول یا مدول الاستیسیته را می توان نسبت داد.



شکل ۹- نمودار تنش-کرنش

۵- نتیجه گیری

آزمون رهایش تنش و خزش نشان داد که کدو همانند دیگر محصولات کشاورزی از ویژگی های ویسکو الاستیک برخوردار است. توسط آزمون فشار خصوصیات مواد ویسکو الاستیک، از جمله مدول الاستیسیته تعیین شد. در آزمون فشار نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان داد که اختلاف معناداری بین نیروی اعمالی به کدو های متوسط و کدو های کوچک وجود داشت. نتایج حاصل از آنالیز واریانس داده های بدست آمده از آزمون برش نشان داد که اختلاف معناداری بین نوع کدو ها از لحاظ اندازه و بین اثر متقابل کدو ها و سرعت وجود داشت. نمودار مدول الاستیسیته نشان داد که با افزایش کرنش، میزان تنش افزایش پیدا کرد. نتایج حاصل از آزمون زاویه اصطکاک نشان داد که بیشترین زاویه اصطکاک بدست آمده مربوط به سطح تخته سه لا بود به این معنا که نمونه های مورد آزمایش بر روی سطح ورق گالوانیز به سرعت لغزش پیدا کرد و کمترین زاویه اصطکاک بدست آمد.

۶- منابع

- غفرانی، ع. و کامگار، س. و نصیری، س. و زارع، د. تعیین خواص ویسکو الاستیک خرما (رقم مضافتی) در رطوبتهای مختلف محصول، هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشینهای کشاورزی دانشگاه شیراز، ۱۳۹۱، ص ۶
- نبی زاده، ف. و اسماعیلی، م.، خصوصیات رئولوژیکی مواد غذایی، پنجمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی، ص ۸، ۱۳۹۰

۳. عباسی، س. (۱۳۸۶). رئولوژی مواد غذایی. چاپ اول، انتشارات مرز دانش تهران، تهران

4. Martucci, J. F., Ruseckaite, R. A., & Vazquez, A. (2006). Creep of glutaraldehyde-crosslinked gelatin films. *Materials Science and Engineering: A*, 435, 681-686.

5. Pitt .R.E.and H.L.chen 1983.Time-dependent Aspects of The strength and Reology of vegetative Tissue.. *Transaction of The ASAE* .26(4):1275-7280

۶. توکلی هشتجین، ت. (۱۳۸۲). مکانیک محصولات کشاورزی. چاپ اول. تهران، خدمات فنی سالکان.

7. Mohsenin, N. N. (1996). *Physical properties of plant and animal tissues*. New York: Gordon and Beacon Publishers.

۸. فاطمی، ح. (۱۳۸۱). شیمی مواد غذایی، شرکت سهامی انتشار

Determining the Viscoelastic Properties of Pumpkin with Mechanical Tests

Anahita zamani

M.Sc. on Chemical Engineering-Food industry Engineering, Islamic Azad University,
Shahreza Branch, Isfahan Province, Iran

Anahitazamani25@yahoo.com

Abstract

Most agricultural products show different behavior in terms of resistance to pressure, dynamic and vibration forces. In order to extract the mechanical properties of pumpkin, including modulus of elasticity, Poisson's ratio, coefficient of friction, pressure, shear, penetration, stress release, and creep tests by the comprehensive stress tension device located in the biophysical properties laboratory of the Islamic Azad University, Shareza branch, in three sizes and three sample positions. Gri is done. The results showed that the creep test provided the most information for us compared to the stress release test. The properties of viscoelastic materials, including the elastic properties, were determined by the pressure test. The strain curves of the creep test showed that the sudden change in shape was very sharp with sudden and constant force actions, and after a period of constant change in shape (very small slope) and increased. The slope of this change depended on the dynamic nature. The change in shape was not sudden, but after a period of time, the change in shape was stable (low slope) and decreased. The results of the analysis of variance of the data obtained from the test showed that there was a significant difference between the types of pumpkins due to the mutual effect of pumpkins and speed, so that large pumpkins were more effective than small and medium pumpkins. It was on the grandstands.

Key words: modulus of elasticity, viscoelasticity, cutting test, creep test.