



بررسی غیرمخرب محصولات کشاورزی غده‌ای طی دوره انبارمانی با آزمون‌های صوتی و فشاری

رسول کریمی¹، محمد ابونجمی^{2*}، سیدرضا حسن بیگی³

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

2- دانشیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

3- استاد گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

تهران، کد پستی 3391653755، abonajmi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

استفاده از روش‌های سنتی برای تفکیک و جداسازی محصولات سالم از معیوب، وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و نیاز به آزمون تشخیصی غیرمخرب در کمترین زمان و هزینه با دقت بالا می‌باشد. تحقیق حاضر در همین راستا و باهدف تشخیص کیفیت درونی محصول کشاورزی غده‌ای (سیب‌زمینی واریته بانبا) با آزمون غیرمخرب صوتی در طی دوره انبارمانی با رطوبت 78% به مدت 44 روز صورت گرفت. به‌منظور تشخیص کیفیت درونی محصول در طی دوره انبارمانی از دو آزمون صوتی و آزمون فشار تک‌محوری (به‌عنوان آزمون شاهد) استفاده گردید. اثر دو متغیر مستقل زمان نگهداری و جرم نمونه بر نیروی حد تسلیم (به‌دست‌آمده از آزمون فشاری) و شاخص سفتی به‌دست آمده از آزمون صوتی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد زمان نگهداری و جرم نمونه‌های مورد آزمایش بر پارامترهای کیفی در سطح احتمال 1% معنی‌دار بوده و همچنین میزان همبستگی بین پارامتر شاخص سفتی و نیروی حد تسلیم برابر با 66% و همبستگی بین شاخص سفتی و مدول الاستیسیته برابر با 63% می‌باشد. نتایج کلی پژوهش بیانگر این است که آزمون صوتی قدرت تشخیص کیفیت درونی سیب‌زمینی در طی دوره نگهداری 44 روز را دارا می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 اسفند 1397
پذیرش: 28 اردیبهشت 1398
ارائه در سایت: آذر 1398

کلیدواژگان:

آزمون غیر مخرب
شاخص سفتی
سیب‌زمینی
دوره انبارمانی
آزمون صوتی

Nondestructive investigating firmness of tuber agricultural products during storage using sound and compression tests

Rasul karimi, Mohammad Aboonajmi*, Seyed Reza Hassan Beygi

Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 3391653755 Tehran, Iran, abonajmi@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 29 February 2019
Accepted 18 May 2019
Available November 2019

Keywords:

Nondestructive
Firmness index
Potato
Shelf life
Sound test

Abstract

Application of traditional methods for the separation and sorting of healthy products from defective is a tedious and laborious, which needs fast and low cost non-destructive diagnostic system to overcome this problem. The present study was conducted with the aim of determining the internal quality of the tuber agricultural product (potato, Banba variety) with nondestructive sound test during the storage duration of 44 days with 78% moisture content. In order to determine the internal quality of the product during shelf life storage, sound and pressure test (as a control) were used. The results showed that the acoustic test has the ability to determine the quality of potato during the storage period. Also the effect of two independent variables of storage time and sample mass was compared on the bio-yield force (pressure test) and the firmness index using acoustic test. The results of this research revealed that the storage duration and mass of samples were significant at 1% probability level on quality parameters. In this study, the correlation coefficient between the firmness index and bio-yield force and the modulus of elasticity was 66% and 63%, respectively. The overall results of this research revealed sound test is capable for diagnostic internal quality of potato during 44 days of storage.

1- مقدمه

سطح وسیعی (حدود 90 میلیون هکتار) از اراضی کشاورزی را در برمی‌گیرند [1]. شناسایی کیفیت درونی این محصولات برای مصرف‌کنندگان و فروشندگان بسیار حائز اهمیت است.

1-1- اهمیت مطالعه بر روی محصول سیب‌زمینی

سیب‌زمینی بخش مهمی از غذایی روزمره مردم در سراسر جهان

در سالیان اخیر مطالعات زیادی در راستای استفاده از آزمون‌های غیرمخرب برای تشخیص کیفیت محصولات در بخش علوم کشاورزی و صنایع غذایی صورت گرفته است. امروزه محصولات غده‌ای مانند سیب‌زمینی، چغندر قند و ... اهمیت زیادی داشته و

Please cite this article using:

R. karimi, M. Aboonajmi, S. R. Hassan Beygi, Nondestructive investigating firmness of tuber agricultural products during storage using sound and compression tests, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 7, pp. 52-60, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.sid.ir

عامل مؤثر در کیفیت سیب‌زمینی انبارمانی می‌باشد. انبارداری سیب‌زمینی برای تأمین مصارف خوراکی و صنعتی ضروری است ولی طی نگهداری در انبار، فرآیندهای بیولوژیکی مانند تنفس و از دست دادن رطوبت باعث تغییر در خواص رئولوژیکی محصول خواهد شد. غده‌ها در طی مدت نگهداری تا حدی دچار کاهش وزن خواهند شد. در بین ارقام سیب‌زمینی آگریا مقاوم‌ترین رقم برای نگهداری طولانی مدت است و سانتا و مارفونا از نظر انبارمانی بحرانی‌ترین وضعیت را دارا می‌باشند [6]. مدت دوره انبارمانی سیب‌زمینی تا حدود زیادی به دمای محل نگهداری، کیفیت محصول و وارپته بستگی دارد [7].

سفتی¹ یکی از خصوصیات داخلی میوه است که در طی انبارمانی تغییر می‌کند [8، 9]. با تحلیل سیگنال‌های به دست آمده از روش غیرمخرب آکوستیک می‌توان ویژگی‌های مهم کیفیت محصولات کشاورزی و غذایی مانند تردی، سفتی، مدول الاستیسیته، فعالیت آب و دیگر مشخصات فیزیکی را ارزیابی نمود. با استفاده از این روش ریسک خرید محصولات بی کیفیت برای تولیدکنندگان و فروشندگان به طور قابل توجهی کاهش یافته و درآمد تولیدکنندگان محصولات با کیفیت افزایش خواهد یافت [10]. در تحقیقی مشخص شد که در دسترس بودن و ارزان بودن روش صوتی می‌تواند یکی از مزایای عمده در صنعت غذا و صنایع غذایی باشد. کاربرد و دقت روش‌های صوتی همراه با افزایش سرعت پردازش داده‌ها و تصمیم‌گیری برخط می‌تواند در توسعه سامانه‌های ارزیابی کیفی توسعه مؤثر باشد [11].

در مطالعه‌ای که بر روی کاربرد صوت در تعیین کیفیت محصولات غذایی و کشاورزی صورت گرفت، توانمندی آزمون صوتی در تشخیص بافت و کیفیت داخلی به صورت غیرمخرب ذکر شده است [11]. در همین راستا در مطالعه‌ای، هم‌زمان با آزمون نفوذ، از انتشار امواج صوتی برای مشاهده تغییرات کیفیت بافت سیب استفاده شد. در این بررسی تغییرات سفتی در طی زمان انبارمانی سیب‌ها تعیین شد. در این بررسی معلوم گردید، پارامترهای صوتی و از جمله انرژی صوتی نسبت به تغییرات فیزیولوژیکی سیب‌ها در طی زمان انبارمانی، نسبت به پارامترهای مکانیکی تعیین کیفیت سیب، حساس‌ترند [12]. در تحقیق دیگری از روش ضربه‌ی صوتی برای تعیین رسیدگی میوه سیب رقم گلدن دلشس در طی فصل رشد و در طی هشت ماه انبارمانی در سردخانه استفاده شد. نتایج تحقیق کاهش مدول الاستیسیته و سفتی را در طی مدت انبارمانی نشان داد [13].

را تشکیل داده و بهره‌وری و انطباق‌پذیری غذا را برای بسیاری از مردم به ارمغان آورده است [2]. رنگ، اندازه و شکل غده سیب‌زمینی از معیارهای مهم ظاهری جهت انتخاب برای خرید سیب‌زمینی توسط مصرف‌کنندگان می‌باشند، همچنین رطوبت و میزان استحکام بافت محصول از ویژگی‌های کیفی درونی مهم برای بازارپسندی و عمر مفید سیب‌زمینی می‌باشد. در غده سیب‌زمینی حدود 75 درصد از کل ماده خشک را کربوهیدرات تشکیل داده که بخش عمده این کربوهیدرات‌ها از نشاسته تشکیل شده است [3].

2-2- آزمون فشاری

برای کاهش میزان صدمات وارده به بافت محصولات کشاورزی و غذایی، مطالعه و تحلیل رفتار ماده تحت بارگذاری لازم می‌باشد. برداشت، جابجایی، درجه‌بندی، حمل‌ونقل، بسته‌بندی و انبارداری از جمله فرآیندهای مکانیکی مؤثر بر کیفیت نهایی محصول می‌باشند. تغییر شکل ناشی از بارگذاری فشاری بر روی محصولات کشاورزی را به کمک علم رئولوژی و بر اساس رفتار ویسکوالاستیک می‌توان بررسی نمود. پارامترهای زیادی از منحنی نیرو - تغییر شکل به دست می‌آید که برای بررسی کیفی خصوصیات بافت محصولات کشاورزی و مواد غذایی مفیدند [4]. از منحنی نیرو-تغییر شکل می‌توان بیشینه تغییر شکل، نقطه تسلیم بیولوژیکی، نقطه گسیختگی، انرژی گسیختگی، چقرمگی و ضریب کشسانی ظاهری را به دست آورد [5] (شکل 1).

3-1- مروری بر منابع

رطوبت محصول یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های محصولات بیولوژیک است که علاوه بر خواص فیزیکی، بر رفتار مکانیکی آن‌ها اثر می‌گذارد که می‌توان به قابلیت انبار کردن محصولات اشاره نمود. عوامل دیگری مثل رقم، میزان رسیدگی، ابعاد هندسی محصول و جهت بارگذاری بر خواص مکانیکی محصول مؤثرند [4].

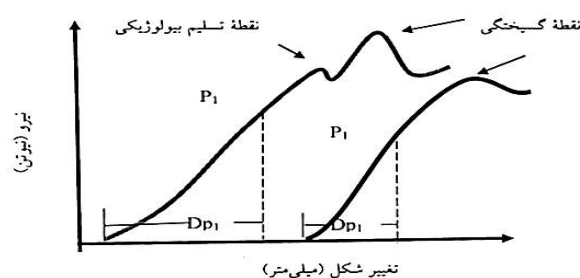


Figure 1 Details of the diagram force - deformation

شکل 1 نقاط مورد نیاز از نمودار نیرو - تغییر شکل [7]

¹ Stiffness

استفاده از روش غیرمخرب آزمون صوتی و مقایسه با روش مخرب آزمون فشاری¹ می‌باشد. در این مطالعه همبستگی ویژگی‌های مستخرج از آزمون‌های صوتی و فشاری نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

2- مواد و روش‌ها

آزمون‌های صوتی و فشار تک‌محوره بر روی 90 غده سیب زمینی وارپته بانبا در شرایط دمایی بین 4 تا 8 درجه سلسیوس و متوسط رطوبت 78% در شرایط نگهداری یخچال انجام پذیرفت. نمونه‌های سیب‌زمینی در سه سطح جرم ($m < 100$ ، $100 < m < 170$ و $170 < m < 250$ در واحد گرم) دسته‌بندی شده و آزمون در سه نوبت و به فاصله 22 روز انجام گرفت. نمونه‌ها 24 ساعت قبل از انجام آزمون‌های صوتی و فشاری از یخچال خارج شده و برای به تعادل رسیدن با دمای محیط آزمون در دمای محیط قرار گرفتند. به‌منظور آنالیز داده‌ها از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه 9.3 استفاده گردید.

2-1- آزمون صوتی

برای به دست آوردن سیگنال صدای قابل‌پردازش از هرکدام از سیب‌زمینی‌های مورد آزمایش، سامانه‌ی متشکل از کامپیوتر دستی، دستگاه صداسنج مدل HT 157 با کلاس دقت یک ساخت کشور ایتالیا، نرم‌افزار کول‌ادیت² برای ضبط و پردازش اولیه بر روی سیگنال‌ها و نرم‌افزار متلب نسخه b2017 جهت پردازش نهایی سیگنال‌های صدا استفاده گردید. به منظور اجرای آزمون و ایجاد شرایط آزمون غیرمخرب یکسان، نمونه‌ها از ارتفاع 40 سانتی‌متری بر روی سطح برخورد از جنس فولاد رها گردیدند. صدای حاصل از برخورد نمونه با سطح توسط صداسنج اندازه‌گیری شد. آزمون صوتی ذکر شده در این بررسی با توجه به مدت کوتاه تشخیص و پردازش صوتی هر غده در حدود کسری از ثانیه (با توجه به قدرت پردازشگر سیستم کامپیوتری مورد استفاده در سامانه صوتی) طول خواهد کشید که این مزیت عمده برای استفاده از این روش تشخیصی در مقایسه با سایر روش‌های درجه بندی و تفکیک کیفی محصول می‌باشد.

2-2- پردازش سیگنال

سرعت نمونه‌برداری³ برای ضبط سیگنال‌های صدا 48 کیلوهرتز

غده سیب‌زمینی استفاده نمود. او از یک سیستم مرتب‌سازی آکوستیک برای تشخیص قلب توخالی در غده سیب زمینی (رقم Spunta) استفاده نمود. سامانه فوق شامل میکروفون، سخت افزار پردازش سیگنال دیجیتال و تجهیزات حمل مواد بود. این مطالعه نشان داد که امکان تشخیص غده معیوب سیب زمینی با حفره درونی از غده‌های سالم وجود داشته و تحلیل پاسخ صوتی معیار مهمی در تشخیص غده‌های توخالی می‌باشد [14].

گل‌محمدی به مطالعه خواص مکانیکی بافت سیب‌زمینی در طی ذخیره‌سازی اقدام نمود. نتایج این بررسی نشان داد که، اثر زمان ذخیره‌سازی و رقم و اثر متقابل زمان \times رقم بر پارامترهای مکانیکی از جمله، حداکثر تنش شکستگی، سفتی و انرژی گسیختگی از نظر آماری در سطح 1% معنی‌دار می‌باشد [15]. در تحقیقی خواص فیزیکی و مکانیکی غده‌های سیب‌زمینی در حین ذخیره‌سازی در سردخانه مطالعه شد. آزمایش‌ها بر روی دو رقم (Primura و Vivaldi، Solanum tuberosum L. CVS) طی دو سال برداشت انجام شد. غده‌ها به مدت 240 روز در شرایط نگهداری کنترل‌شده (دمای 4/5 درجه سلسیوس و رطوبت 80%) نگهداری شدند. آزمون فشرده‌سازی شبه استاتیکی بر روی غده‌ها برای تعیین خواص مکانیکی در شکست و نمونه‌های استوانه‌ای برای ارزیابی مدول یانگ و نسبت پواسون انجام شد است. دو رقم مورد مطالعه در این تحقیق خواص مکانیکی مختلفی را ارائه داده‌اند، اما برای هر دو رقم، مدول یانگ با افزایش تعداد روزهای ذخیره‌سازی کاهش یافته است [16]. در مدت انبارمانی، به دلیل تبخیر رطوبت از طریق منافذ پوست در سیب‌زمینی افت محتوای رطوبت رخ می‌دهد. این تبادل رطوبت باعث ایجاد تغییر در فشار بین سلول سیب‌زمینی می‌شود که در شکل 2 این عوامل نشان داده شده‌اند [17].

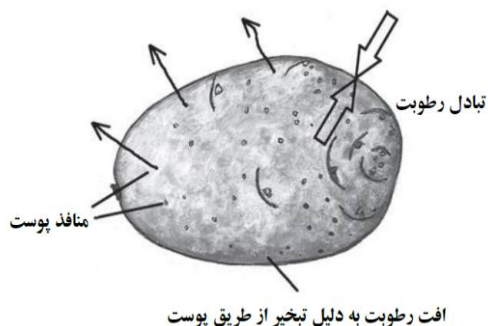


Figure 2. Moisture exchange between potato tubers and surrounding air
شکل 2 تبادل رطوبت بین غده سیب‌زمینی و هوای اطراف آن [17]

هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر مدت زمان انبارمانی بر روی خواص فیزیکی بافت غده سیب‌زمینی (وارپته بانبا) ()

¹ Punch test
² Cool Edit pro 2.0
³ Sampling rate

از این حوزه برای کار تشخیصی کیفیت استفاده نمود. شاخص سفتی معیاری از میزان سفتی یک محصول است که در ارتباط مستقیم با فرکانس غالب محصول و جرم نمونه است. شاخص سفتی نمونه‌های مورد آزمون با استفاده از رابطه (1) محاسبه گردید [18]:

$$FI = f^2 \times m^{2/3} \quad (1)$$

در رابطه (1)، FI شاخص سفتی، f فرکانس غالب (هرتز) و m جرم نمونه‌ها (کیلوگرم) می‌باشد.

2-3- آزمون فشاری

برای انجام آزمون فشاری از دستگاه آزمون فشار تک‌محوری ساخته‌شده توسط غایبی و همکاران [19] (آزمایشگاه مواد بیولوژیکی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران) با سرعت بارگذاری 25 میلی‌متر بر دقیقه و از لودسل 200 نیوتن استفاده گردید (شکل 4). برای تعیین مدل الاستیسیته، نمونه‌ها بین دو صفحه تخت به‌صورت کامل برای نمونه‌های با جرم کمتر از 100 گرم و نمونه‌های نصف شده برای نمونه‌های با جرم بیشتر از 100 گرم تحت بارگذاری قرار گرفتند.



Figure 4 Biological material test device fabricated by Ghaebi et al [19]
شکل 4 دستگاه آزمون مواد بیولوژیکی ساخته‌شده توسط غایبی و همکاران [19]

و با رزولیشن 16 بیت در نظر گرفته شد. ابتدا سیگنال‌های صدا توسط نرم‌افزار کول‌ادیت با فرمت wav در حافظه کامپیوتر ذخیره‌سازی، سپس از هرکدام از سیگنال‌های ضبط‌شده در حوزه زمان، سیگنالی به طول زمانی 150 میلی‌ثانیه انتخاب شده در مجموع 7200 نقطه داده جهت پردازش به دست آمد. سیگنال‌ها در نرم‌افزار متلب فراخوانی شدند و با استفاده از کد نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب توسط تبدیل سریع فوریه (FFT) از حوزه زمان¹ به حوزه فرکانس² انتقال داده شدند (شکل 3).

در شکل 3 قسمت الف سیگنال صوتی یک نمونه سیب زمینی در دسته 170 تا 250 گرم با جرم 230 گرم در حوزه زمان نشان داده شده است. همان گونه که از شکل قابل مشاهده است اطلاعات چندانی از آن قابل استخراج نمی‌باشد.

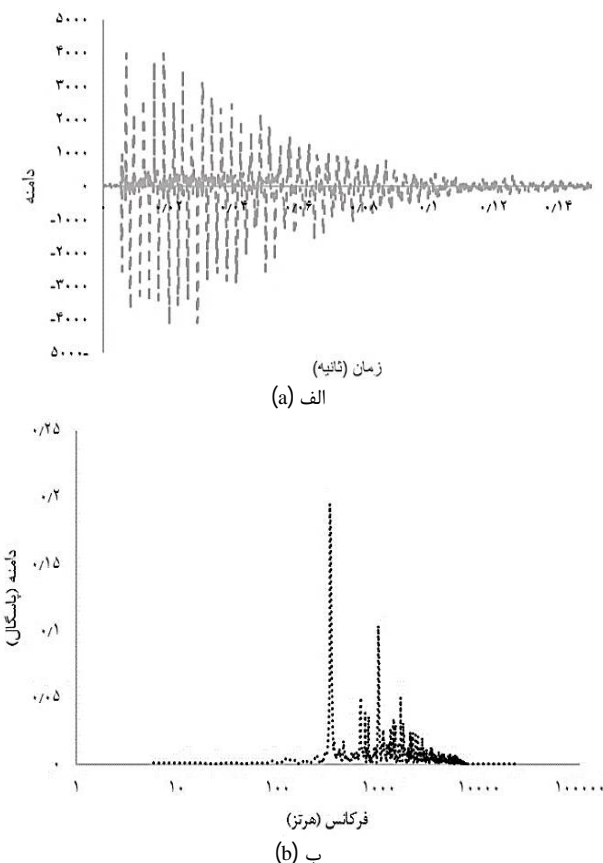


Figure 3 A sample of sound signal of potato impact with mass of 230 g, a: time domain, b: frequency domain

شکل 3 نمونه‌ای از سیگنال صدای برخورد سیب‌زمینی با جرم 230 گرم: (الف) حوزه زمان و (ب) حوزه فرکانس

اما در قسمت ب این شکل برای همان نمونه سیب‌زمینی تغییرات دامنه صوتی در فرکانس‌های مشخص قابل مشاهده است که این ویژگی حوزه فرکانس این امکان را ایجاد می‌کند تا

در این آزمون بر اساس استاندارد [ASAE S368.4] نیرو

¹ Time Domain

² Frequency domain

نمونه سیب زمینی‌های مورد آزمون هر چقدر جرم بیشتری داشته باشند دارای سطح مقطع بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های با جرم کمتر است و هرچقدر سطح مقطع تماس نمونه با صفحه فشاری بیشتر باشد نیروی بیشتری برای رسیدن به نقطه گسیختگی لازم دارد که این روند به‌وضوح با توجه به دسته‌بندی صورت گرفته بر روی سیب‌زمینی‌ها در شکل 7 قابل مشاهده است.

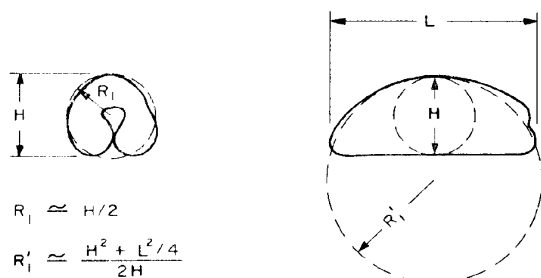


Figure 6 Calculation of R'_L , R_L minimum and maximum curvature in contact point

شکل 6 محاسبه R'_L و R_L شعاع‌های حداقل و حداکثر انحنای جسم در محل تماس

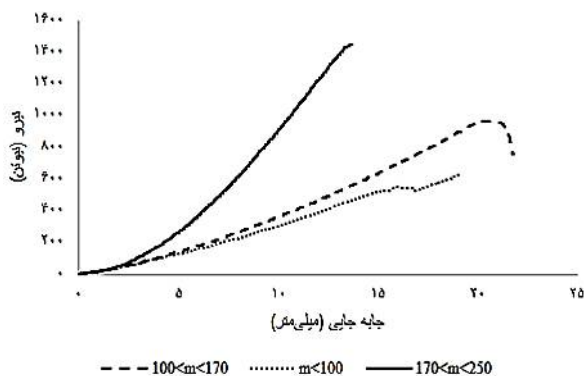


Figure 7 The trend of increasing the force required to reach the bio-yield point for the three samples with mass of under 100 g, between 100 to 170 g and between 170 to 250 g

شکل 7 روند افزایش نیروی لازم برای رسیدن به نقطه حد تسلیم¹ برای سه نمونه غده مورد آزمون در دسته بندی با جرم کمتر از 100، بین 100 تا 170 و 170 تا 250 گرم

از 90 غده سیب زمینی مورد بررسی در کل آزمون 30 غده با جرم کمتر از 100 گرم، 30 غده با جرم در محدوده 100 تا 170 گرم و 30 غده با جرم 170 تا 250 گرم استفاده شد. آزمون در سه مرحله و در هر مرحله 10 تکرار برای هر دسته استفاده گردید. در مدت انبارمانی سیب‌زمینی‌ها در اثر از دست دادن رطوبت در داخل محیط یخچال و در هنگام آماده‌سازی

به‌وسیله صفحه‌ای مسطح به‌صورت یکنواخت بر سطح نمونه‌ها کامل و بریده‌شده اعمال گردید (شکل‌های 5 و 6). برای محصولات بیولوژیک (محصولات کشاورزی و غذایی) رفتار مواد در اکثر موارد ویسکوالاستیک بوده و جهت سهولت و بررسی در محدوده تغییر شکل‌های کوچک از روابط الاستیک استفاده می‌شود [4, 9].

برای محاسبه مدول الاستیسیته نمونه‌ها برای نمونه‌های که به‌صورت کامل زیر دستگاه قرار داده شدند از رابطه (2) و برای نمونه‌های که به‌صورت نصفه در زیر دستگاه قرار داده شدند از رابطه (3) استفاده گردید.

$$E = \frac{0.338F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[K_U \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R'_U} \right)^{1/3} + K_L \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R'_L} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (2)$$

$$E = \frac{0.338K_U^{3/2}F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R'_U} \right)^{1/2} \quad (3)$$

در روابط فوق E مدول الاستیسیته (مگاپاسگال)، F نیرو (نیوتن) و D تغییر شکل (میلی‌متر)، μ نسبت پواسن (بی بعد)، K_L و K_U (تابعی از شعاع‌های انحنا در محل تماس هستند) مقادیر ثابتی هستند که از جدول موجود در استاندارد ASAE استخراج می‌شوند. R'_L و R_L شعاع‌های حداقل و حداکثر انحنای جسم در محل تماس با صفحه پایین، R'_U و R_U شعاع‌های حداقل و حداکثر انحنای جسم در محل تماس با صفحه بالا بر حسب میلی‌متر است که از روی ابعاد ظاهری نمونه محاسبه می‌شود.

3- نتایج و بحث

شکل ظاهری، ابعاد و جرم محصول هریک به‌نوبه خود در خواص فیزیکی محصولات غده‌ای اثر گذار است.

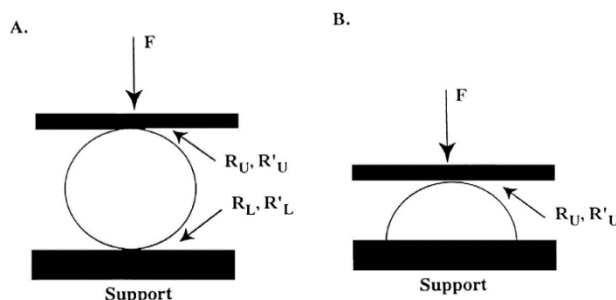


Figure 5 Loading geometries for determining apparent modulus of elasticity: A. Parallel plate in contact with a curved surface. B. Single plate in contact with a curved surface [5]

شکل 5 هندسه بارگذاری برای تعیین مدول الاستیسیته: A. صفحه موازی در تماس با یک سطح کروی. B. صفحه موازی در تماس با یک سطح نیم‌کره [5]

¹ Bio-yield Point

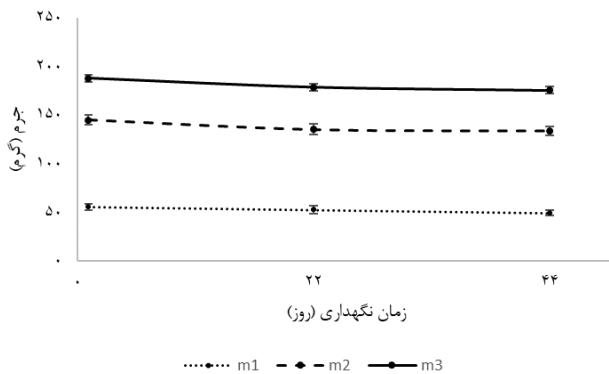


Figure 9 The average variations of mass of the tubers during the 44-day storage period (m1, m2, m3 is (m<100, 100< m<170 and 170<m<250))

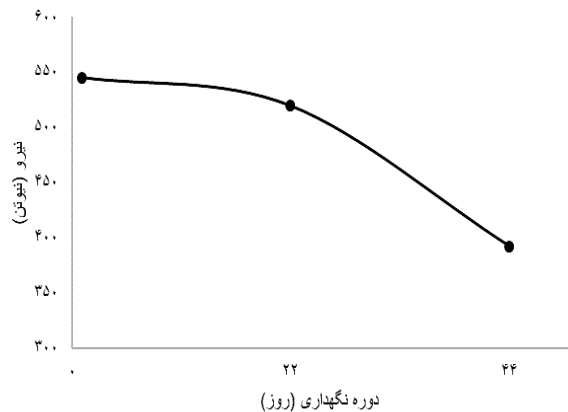
شکل 9 میانگین تغییرات جرم غده‌ها در طی دوره نگهداری 44 روزه (m1)، m2، m3 نشان‌دهنده (m>100, 100<m<170 و m>170 (250>m هستند).

شکل 10 روند کاهش مدول الاستیسیته در طی دوره نگهداری 44 روزه و برای سه دسته‌بندی جرمی را نشان می‌دهد، از این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش جرم نمونه‌ها مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد، همچنین با گذشت زمان در طی دوره انبارمانی مدول الاستیسیته تا زمانی که بافت سیب‌زمینی تازگی خود را از دست نداده روند کاهشی دارد.

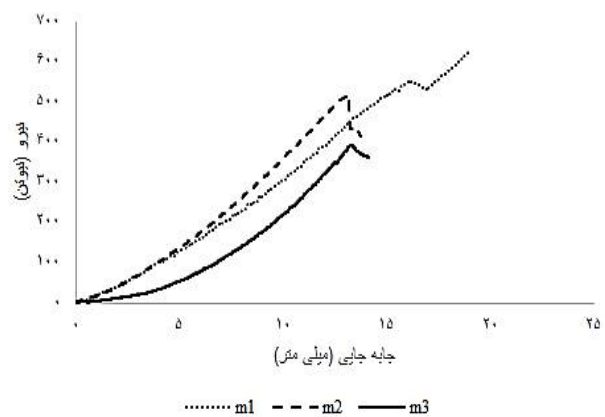
در جدول 1 نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای مستقل جرم نمونه و زمان نگهداری بر متغیرهای وابسته نیروی حد تسلیم (حاصل از آزمون فشار)، شاخص سفتی (حاصل از آزمون صوتی) و مدول الاستیسیته (حاصل از آزمون فشار) داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود اثرات ساده متغیرهای جرم نمونه و زمان نگهداری بر متغیرهای وابسته نیروی حد تسلیم، شاخص سفتی و مدول الاستیسیته در سطوح 1% و 5% معنی‌دار هستند. اثر متقابل جرم نمونه در زمان نگهداری فقط بر شاخص سفتی معنی‌دار (در سطح 1%) بود و بر نیروی حد تسلیم و مدول الاستیسیته معنی‌دار نیستند. برای اثرات معنی‌دار مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد. نتایج مقایسه میانگین‌های اثرات ساده جرم نمونه و زمان نگهداری بر متغیرهای وابسته نیروی حد تسلیم، شاخص سفتی و مدول الاستیسیته آن در جدول 3 ارائه شده است. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل جرم نمونه در زمان نگهداری بر متغیر وابسته نیروی حد تسلیم، شاخص سفتی و مدول الاستیسیته به ترتیب در شکل‌های 11 تا 13 نشان داده شده‌اند. بررسی جدول 3 حاکی از آن است که مقایسه میانگین‌ها در سه متغیر وابسته شاخص سفتی از آزمون صوتی و نیروی حد تسلیم، و مدول الاستیسیته از آزمون فشاری در متغیر مستقل دسته‌بندی وزنی در هر سه دسته وزنی کمتر از 100 گرم، از 100 تا 170 و 170 تا 250 گرم معنی‌دار بوده است؛

برای هم‌دما شدن با دمای محیط و همچنین طی فرایند تنفس، نمونه‌ها مقداری رطوبت داخل بافت از دست می‌دهند که این عوامل با گذشت مدت زمان نگهداری نسبت به روز اول باعث کاهش جرم و حجم نمونه‌ها می‌گردد. این پدیده عاملی برای کاهش مقدار نیروی لازم برای رسیدن به نقطه گسیختگی در سیب زمینی‌های نگهداری شده در روزهای 22 و 44 نسبت به روز اول می‌گردد. لازم به ذکر است تا زمانی که بافت یک محصول به‌صورت چوبی و نسبتاً سفت در نیامده این روند ادامه خواهد داشت (شکل 8).

در شکل 9 نمودار میانگین تغییرات وزنی در طی دوره نگهداری 44 روز نمایش داده شده است که با توجه به مطالب ذکرشده در بخش قبل عامل اصلی کاهش وزن نمونه‌ها، تنفس محصول به‌عنوان موجود زنده و تبادل رطوبت با محیط می‌باشد.



(الف)



(ب)

Figure 8 The trend of reducing the force required to reach the bio-yield point during storage time from diagram of force-storage period (part a) and force-displacement diagram for 3 samples with different mass in the range of 100 to 170 grams (part b).

شکل 8 روند کاهش نیروی لازم برای رسیدن به نقطه حد تسلیم در طی زمان نگهداری از نمودار تغییرات نیرو- دوره نگهداری (الف) و نمودار نیرو- جابه‌جایی برای 3 نمونه با جرم متفاوت در دسته 100 تا 170 گرم (ب)

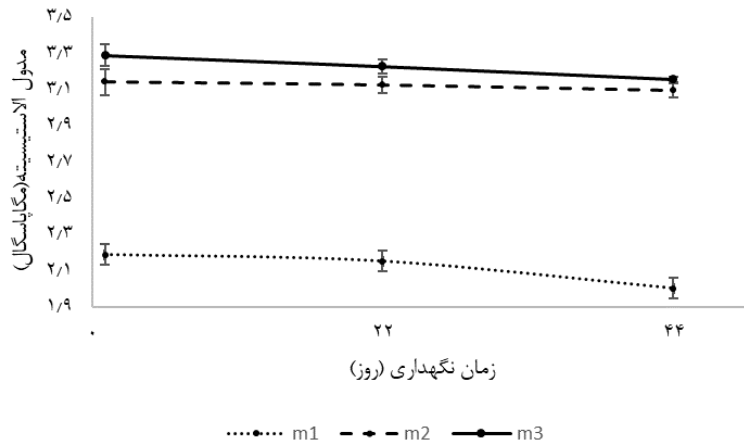


Figure 10 The trend of reducing the amount of modulus of elasticity during shelf life for the test samples

شکل 10 روند کاهش مقدار مدول الاستیسیته در طی دوره نگهداری برای نمونه‌های مورد آزمون

جدول 1 نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای مستقل جرم نمونه‌ها و زمان نگهداری بر متغیرهای وابسته نیروی حد تسلیم (حاصل از آزمون فشار)، و شاخص سفتی (حاصل از آزمون صوتی) و مدول الاستیسیته (حاصل از آزمون فشار)

Table 1 The results of analysis of variance (ANOVA) of independent parameters of samples mass and storage time on dependent parameters of the bio-yield force, firmness index and modulus of elasticity

مدول الاستیسیته	شاخص سفتی	نیروی حد تسلیم	درجه آزادی	منبع تغییرات
3/41525**	442671688**	4243057**	2	جرم نمونه
0/021793*	727985032**	25465/44*	2	زمان نگهداری
0/008525 ^{n.s}	33412792**	1425/778 ^{n.s}	4	جرم نمونه × زمان نگهداری
2/7	4/28	5/86		ضرب تغییرات

** در سطح 0/01 معنی‌دار، * در سطح 0/05 معنی‌دار و ^{n.s} غیر معنی‌دار است.

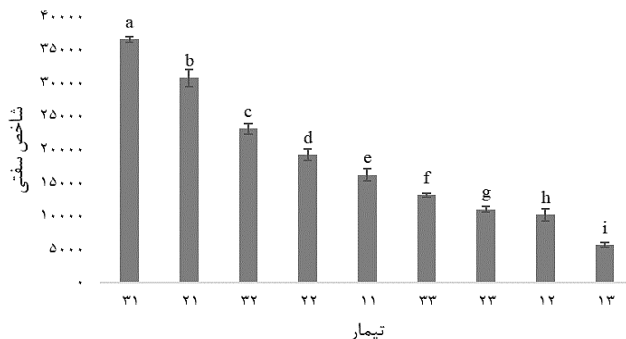


Figure 12 Mean comparison chart of the interaction between sample mass and storage time on the Firmness index

شکل 12 نمودار مقایسه میانگین‌ها اثر متقابل جرم نمونه و زمان نگهداری بر شاخص سفتی

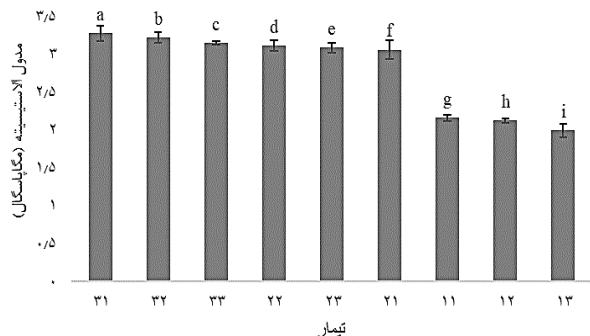


Figure 13 Mean Comparison chart of the interaction between the sample mass and the storage time on the modulus of elasticity

شکل 13 نمودار مقایسه میانگین‌ها اثر متقابل جرم نمونه و زمان نگهداری بر مدول الاستیسیته

اما برای مقایسه میانگین‌های سه متغیر وابسته در متغیر مستقل زمان نگهداری نشان می‌دهد که برای متغیر وابسته نیروی حد تسلیم و مدول الاستیسیته معنی‌دار نبود اما در متغیر وابسته شاخص سفتی معنی‌دار می‌باشد.

جدول 2 کد تفسیر نمودار مقایسه میانگین‌ها

Table 2 Interpretation code Mean comparison

170<m<250	100<m<170	m<100	
13	12	11	روز 1
23	22	21	روز 22
33	32	31	روز 44

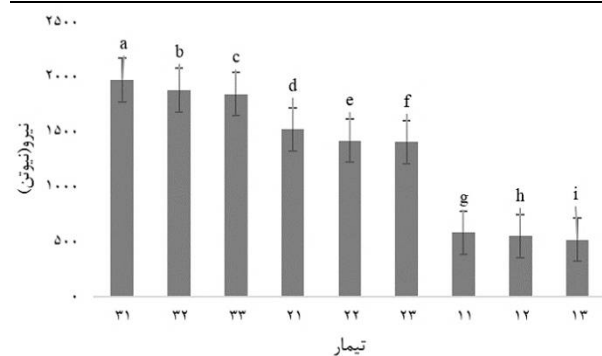


Figure 11 Mean comparison chart of the interaction between the sample mass and the storage time on the force at the bioyield point

شکل 11 نمودار مقایسه میانگین‌ها اثر متقابل جرم نمونه و زمان نگهداری بر نیروی در نقطه حد تسلیم بیولوژیکی

جدول 3 نتایج مقایسه میانگین‌های اثرات متغیرهای اندازه‌گیری شده تحت تأثیر جرم نمونه و مدت انبارمانی

Table 3 Mean comparison of measured variables under the influence weight classification and storage time

متغیر مستقل	سطح	نیروی حد تسلیم (N)	شاخص سفتی (Hz ² . m ^{2/3})	مدول الاستیسیته (MPa)
جرم (گرم)	کمتر از 100 گرم	549 ^c	10674/3 ^c	2/100 ^c
	از 100 تا 170 گرم	1448/67 ^b	20330/4 ^b	0/097 ^b
	از 170 تا 250 گرم	1897/33 ^a	24313/1 ^a	3/230 ^a
زمان نگهداری (روز)	روز اول	1357/78 ^a	27859/7 ^a	2/842 ^a
	روز بیست و دوم	1282/00 ^a	17514/4 ^b	2/830 ^a
	روز چهل و چهارم	1255/22 ^a	9943/7 ^c	2/751 ^a

اختلاف میانگین‌های با حروف مشترک در هر ستون از نظر آماری معنی‌دار نیستند.

به‌عنوان آزمون غیرمخرب برای تشخیص کیفیت درونی محصولات غده‌ای مانند سیب‌زمینی و محصولاتی با بافت مشابه استفاده گردد. از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد که باگذشت زمان از روز اول تا روز 44 انبارمانی در اثر از دست رفتن رطوبت از محصول دامنه فشار صوت که از محصول به دست می‌آید و توسط میکروفون ثبت می‌شود، روند کاهشی دارد همچنین با توجه به دسته‌بندی وزنی صورت گرفته هر چقدر جرم نمونه آزمون بزرگ‌تر باشد دامنه فشار متناظر با آن افزایش می‌یابد. محصولات دارای بافت آبدار و تازه در اثر برخورد با سطح از خود صدای زیر (فرکانس تشدید بالا) تولید کرده و در اثر گذشت زمان و با از دست دادن رطوبت و کیفیت ظاهری و داخلی، صدای حاصل از برخورد محصول به سطح، صدای بم (فرکانس تشدید پایین) خواهد شد. میزان همبستگی بین آزمون صوتی و آزمون فشاری تک‌محوری برای متغیرهای نیروی حد تسلیم و شاخص سفتی 66% و مابین شاخص سفتی و مدول الاستیسیته 63% به دست آمد.

نتایج کلی پژوهش بیانگر این است که آزمون غیرمخرب صوتی توانایی تشخیص کیفیت درونی محصولات غده‌ای مانند سیب‌زمینی را در حداقل زمان دارا می‌باشد.

5- مراجع

- [1] Li, Y., Ruysschaert, G., Poesen, J., Zhang, Q. W., Bai, L. Y., Li, L., & Sun, L. FSoil losses due to potato and sugar beet harvesting in NE China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1003–1016. 2006.
- [2] Guenther, J. *The international potato industry*. Elsevier. 2001.
- [3] Camire, M. E.; Kubow, S.; and Donnelly, D. J.; *Potatoes and human health*. Crit. Rev. Food. Sci. Nut, 49(10), 823–840, 2009.
- [4] N.N. Mohsenin. *Physical properties of plant and*

در بررسی مقایسه میانگین‌ها برای سه پارامتر وابسته مذکور در مقابل اثر متقابل جرم نمونه‌ها در زمان نگهداری شکل‌های 11 تا 13 نشان می‌دهند، تیمار با کد 31 (جدول 2) دارای بهترین عملکرد نسبت به سایر تیمارها بوده است.

بررسی همبستگی بین آزمون صوتی و آزمون فشاری در جدول 4 نمایش داده شده است. این آزمون از طریق رویه همبستگی در نرم‌افزار SAS 9.3 انجام گرفته است.

نتایج همبستگی بین پارامترهای شاخص سفتی، نیروی حد تسلیم و مدول الاستیسیته در جدول 4 نشان می‌دهد که مقدار همبستگی بین پارامتر شاخص سفتی و نیروی حد تسلیم برابر با 66% و همبستگی بین شاخص سفتی و مدول الاستیسیته برابر با 63% همچنین همبستگی بین پارامتر نیروی حد تسلیم و مدول الاستیسیته 96% می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد همبستگی بین پارامترهای این آزمون در سطح 1% معنی‌دار شده است که نشان‌دهنده روند مستقیم در بین دو آزمون صوتی و آزمون فشاری می‌باشد.

جدول 4 ضرایب همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده

Table 4 Correlation coefficients between measured variables

نیروی حد تسلیم	شاخص سفتی	مدول الاستیسیته
نیروی حد تسلیم	0/66	0/96
شاخص سفتی	1	0/63
مدول الاستیسیته	0/63	0/96

4- نتیجه‌گیری

از نتایج بررسی اثر طول دوره انبارمانی و جرم نمونه‌های مورد آزمون به‌منظور تعیین کیفیت درونی محصول سیب‌زمینی در طول دوره 44 روز نگهداری در یخچال (4 تا 8 درجه سلسیوس و رطوبت 78%) و مقایسه آزمون صوتی با آزمون فشاری (آزمون پایه) نشان می‌دهد که آزمون صوتی می‌تواند روش مناسبی

- (in Persian)
- [12] Zdunek, A., & Ranachowski, Z. *Acoustic emission in puncture test of apples during shelf-life*. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 9(4), 30, 2006.
- [13] De Belie, N., Schotte, S., Coucke, P., & De Baerdemaeker, J. *Development of an automated monitoring device to quantify changes in firmness of apples during storage*. Postharvest Biology and Technology, 18(1), 1-8. 2000.
- [14] Elbatawi IE. *An acoustic impact method to detect hollow heart of potato tubers*. Biosystems Engineering, 30;100(2):206-13. 2008.
- [15] Golmohammadi, A. *Determination of mechanical properties of potato flesh during storage*. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 6(18), 1273, 2013.
- [16] Bentini, M., Caprara, C., & Martelli, R. *Physico-mechanical properties of potato tubers during cold storage*. Biosystems engineering, 104(1), 25-32. 2009.
- [17] Pringle, R., Bishop, C. and Clayton, R. "*Potatoes Postharvest*". CAB International, London, UK, 2009.
- [18] Cherng, A.-P., & Ouyang, F. *A firmness index for fruits of ellipsoidal shape*. Biosystems engineering, 86(1), 35-44, 2003.
- [19] Ghaebi, S.M., Hassan-Beygi, S.R., Kianmehr, M.H. *Biological material test device: Iranian Patent Number 54999*, 2008.
- animal materials*, Gordon and Breach, Science Publishers, New York, 1986.
- [5] ASAE S368.4 *Compression Test of Food Materials of Convex Shape*. American Society of Agricultural Engineers, 2008.
- [6] H. Afshari, S. Minaei, M. Almasi, and P. Abdolmalaki, "Investigating the Damage of Potato Under Dynamic Loading." *Quarterly Journal of Food Science and Technology*, Vol. 5, No. 2, Pages 69-79, 2008. (in Persian فارسی)
- [7] Beukema, H., & van der Zaag, D. E. *Introduction to potato production*: Pudoc Wageningen, 1990.
- [8] Gómez, A. H., Wang, J., & Pereira, A. G. *Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage*. Postharvest Biology and Technology, 35(2), 209-215, 2005.
- [9] Jahangiri, M., Hassan-Beygi, S.R., Aboonajmi, M. and Lotfi, M., *Effects of storage duration and conditions on mechanical properties of Viola cucumber fruit under compression loading*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 18(2), pp.323-332. 2016.
- [10] Aboonajmi, M., Jahangiri, M., & Hassan-Beygi, S. R. *A Review on Application of Acoustic Analysis in Quality Evaluation of Agro-food Products*. Journal of food processing and preservation, 39(6), 3175-3188. 2015.
- [11] Karimi, R., Aboonajmi, M. *Sound application in determining the quality of food and agriculture*. Journal of Sound and Vibration,; 7 (13): 39-55. 2018