

## تأثیر سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی و ضریب کشسانی ظاهری سیب‌زمینی

### چکیده

یکی از راه‌های جلوگیری از بروز صدمات مکانیکی شناخت ویژگی‌های مقاومتی محصول تحت شرایط مختلف است. انجام آزمون‌های مکانیکی مانند آزمون فشاری یکی از راه‌های بررسی خواص مکانیکی است. تحقیق حاضر به منظور تعیین خواص مکانیکی سیب‌زمینی شامل نیروهای تسلیم بیولوژیکی و شکست دانه، ضریب کشسانی ظاهری و چقرمگی در سرعت‌های بارگذاری ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیک توسط دستگاه آزمون مواد قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که سرعت بارگذاری تأثیر معنی‌داری بر روی میانگین نیروی تسلیم بیولوژیکی و شکست و ضریب کشسانی ظاهری در نمونه‌های تحت آزمایش دارد. به طوری که کمترین مقادیر نیروی تسلیم بیولوژیکی و شکست در سرعت‌های بالای بارگذاری اتفاق می‌افتد. با افزایش سرعت بارگذاری، مقادیر میانگین ضریب کشسانی ظاهری کاهش یافت که این نشانگر افزایش خاصیت الاستیسیته محصول در سرعت‌های کمتر است. با توجه به نتایج، لذا بهتر است عملیات برداشت و پس از برداشت سیب‌زمینی در سرعت‌های بارگذاری کمتر انجام شود تا از میزان ضایعات آن کاهش یابد.

### کلمات کلیدی:

نیروهای تسلیم بیولوژیکی، نیروی شکست، چقرمگی، بارگذاری شبه استاتیک.

\*نویسنده مسئول

## تأثیر سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی و ضریب کشسانی ظاهری سیب‌زمینی

### مقدمه

سیب‌زمینی با نام علمی (*Solanum tuberosum*)، گیاهی از خانواده سیب‌زمینیان و با تولید سالانه بیش از ۳۰۰ میلیون تن در دنیا پس از گندم، ذرت و برنج از مهم‌ترین محصولات کشاورزی به شمار می‌رود. یکی از راه‌های اصولی برای جلوگیری از بروز صدمات مکانیکی، شناخت ویژگی‌های مقاومتی محصول تحت شرایط مختلف است. برای حصول به این اطلاعات، انجام آزمون‌های مکانیکی مانند آزمون فشاری مفید خواهد بود [1]. خواص مکانیکی به خواص مربوط به رفتار یک ماده تحت تأثیر بار یا نیرو اطلاق می‌شود. با این تعریف، خواصی از قبیل رفتار تنش و کرنش یک ماده تحت بار استاتیکی یا دینامیکی و ویژگی‌های جریان ماده در آب یا هوا به عنوان خواص مکانیکی طبقه‌بندی می‌شوند. 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 (ویسکوالاستیک) را توأمآ از خود نشان می‌دهند. در میوه‌ها و سبزی‌ها، ساختار غشاء سلولزی و فشار تورژسانس درون سلولی بیانگر رفتار الاستیک و نیمه‌تراوا بودن غشاء سیتوپلاسمی بیانگر رفتار ویسکوز و توأم با جنس لایه میان سلولی باعث ظهور رفتار وابسته به زمان می‌شود [2]. ضریب کشسانی شیب نمودار تنش-کرنش در محدوده‌ی الاستیک است [3]. خزایی (۲۰۰۸) اثر سرعت ضربه و محتوای رطوبتی را بر آسیب‌های مکانیکی دانه‌های لوبیا سفید تحت بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار داد. وی نشان داد سرعت ضربه و محتوای رطوبتی به میزان قابل توجهی بر آسیب‌های فیزیکی لوبیا مؤثر است. همچنین با افزایش سرعت ضربه از ۵ به ۱۲ متر بر ثانیه، آسیب مکانیکی از ۳/۲۵ به ۳۷ درصد افزایش یافت و با افزایش محتوای رطوبتی از ۵ به ۱۵ درصد، میانگین دانه‌های آسیب‌دیده کاهش پیدا کرد [4]. در تحقیقی دیگری برای تعیین ضریب کشسانی دو رقم لوبیا قرمز گلی و اختر نشان داد در هر دو گونه ضریب کشسانی با افزایش سرعت و کاهش رطوبت، افزایش یافت [5]. در یک بررسی دیگر برای تعیین ضریب کشسانی در دوره رسیدن انگور سفید بی‌دانه، آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی توأم با عکس برداری دیجیتالی انجام گرفت. نتایج نشان داد ضریب کشسانی در طول دوره رسیدن میوه کاهش یافت [6]. به منظور بررسی اثر شرایط و زمان انبارداری بر کیفیت بافت سیب‌زمینی، محققین برخی از خواص مکانیکی آن از قبیل استحکام یا سفتی [7] مدول برشی [8] را مطالعه کردند و مشخص شد که رطوبت و جهت بارگذاری اثر تأثیرگذاری روی خواص مکانیکی نمونه‌ها دارد.

### مواد و روش‌ها

قبل از شروع آزمایش‌ها سیب‌زمینی‌های دارای شکل غیرطبیعی و معایب فیزیکی حذف شده و نمونه‌های سالم و یکنواخت در اندازه یکنواخت انتخاب گردیدند رطوبت اولیه سیب‌زمینی به روش استاندارد وزنی اندازه‌گیری شد. بر این اساس قبل از انجام آزمایش‌ها، مقدار معینی از نمونه‌ها در سه نوبت در دمای ۱۰۵ °C و به مدت ۲۴ ساعت در آون نگه‌داشته شدند [9]. با داشتن وزن اولیه و وزن خشک نمونه‌ها، رطوبت اولیه سیب‌زمینی بر پایه تر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$M_0 = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (1)$$

در این معادله  $M_0$  میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک (اعشار)،  $M_1$  وزن اولیه نمونه قبل از قرار دادن در آون (گرم)،  $M_2$  وزن نمونه بعد از خشک شدن (گرم) در آون است. در نتیجه رطوبت اولیه ۰/۷۲ بر پایه تر به دست آمد.

تعداد ۸ عدد سبب زمینی با ابعاد و جرم و قطر تقریباً یکسان که در یک سطح رطوبتی بودند تهیه و ابعاد هر کدام با کمک کولیس اندازه‌گیری شد. در این تحقیق از دستگاه آزمون مواد (Hunsfield مدل k-SH50 ساخت کشور انگلستان) استفاده شد. نمونه‌ها در دو گروه ۴ تایی تحت بار فشاری و با سرعت‌های بارگذاری مختلف قرار گرفتند تا به نقطه گسیختگی برسند. برای هر دسته تعداد ۴ تکرار انجام شد. برای دسته اول سرعت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و برای دسته دوم ۹۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. با شروع بارگذاری مقادیر تغییر طول بر حسب نیروی فشاری وارده در هر لحظه توسط سیستم متصل به دستگاه آزمون مواد ثبت شد و پس از اتمام مقدار تغییر طول دستور داده شده به سیستم بارگذاری قطع شده و سیستم یک منحنی تغییر طول بر حسب مقدار نیروی وارده به صورت فایل اکسل رسم کرد. حال با داشتن مقدار متوسط نیروی لازم، جابجایی و چقرمگی مورد نیاز برای تسلیم بیولوژیکی، می‌توان ضریب کشسانی ظاهری را محاسبه کرد.

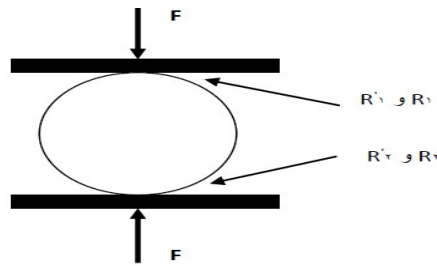


شکل ۱: بارگذاری سبب زمینی.

از آنجاکه سبب زمینی دارای شکل بی قاعده و سطوح محدب است امکان استفاده مستقیم از معادلات تنش تماسی و به کارگیری نمونه‌هایی با اشکال هندسی منظم برای محاسبه ضریب کشسانی ظاهری وجود ندارد. بنابراین با انجام آزمایش بارگذاری تک‌محوری بر نمونه‌ها مقدار ضریب کشسانی ظاهری دانه بر مبنای تئوری هر تیز و رابطه (۲) تعیین گردید [10].

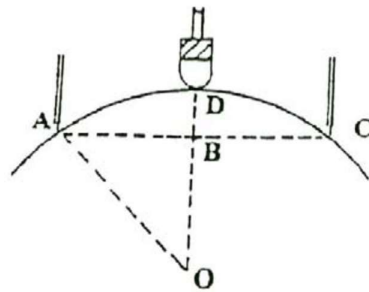
$$E = \frac{0.338K^{3/2}F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[ \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} \right)^{1/3} + \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (2)$$

رابطه فوق، E ضریب کشسانی بر حسب مگا پاسکال، F نیروی وارده بر حسب نیوتن،  $\mu$  نسبت پواسون و D تغییر شکل بر حسب میلی‌متر است. مقادیر ثابت  $K_1$  و  $K_2$  تابعی از شعاع‌های انحنا در محل تماس هستند که از جداول موجود در استاندارد [10] استخراج می‌شود.  $R_1$  و  $R_1'$  شعاع کمینه و بیشینه انحنا جسم در محل تماس با صفحه پایین و  $R_2$  و  $R_2'$  شعاع کمینه و بیشینه انحنا جسم در محل تماس با صفحه بالابر حسب میلی‌متر است (شکل ۲).



شکل ۲: شعاع مینیمم و ماکزیمم انحناء جسم در محل تماس.

شعاع انحنای ناحیه‌ای از سیب‌زمینی که قرار بود تحت آزمون شبه استاتیکی قرار بگیرد با استفاده از دستگاه شعاع سنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و با استفاده از رابطه (۳) اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

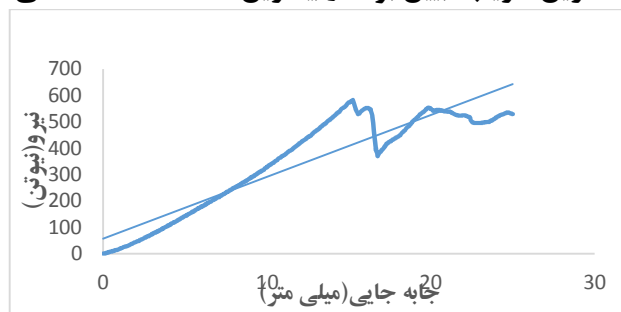


شکل ۳: اندازه‌گیری شعاع انحناء.

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

#### نتایج و بحث

شکل (۴) نشان‌دهنده منحنی نیرو - جابه‌جایی است که در سرعت ۹۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نیروهای تسلیم و شکست برای هر سیب‌زمینی به منظور ارزیابی میزان صدمات وارده به آن‌ها محاسبه شد. در منحنی نیرو-تغییر شکل به دست آمده در قسمت نتایج و بحث، در سرعت بارگذاری ۹۰ میلی‌متر بر دقیقه و در تکرار اول آن،  $R^2 = 0.851$  می‌باشد که دارای بهترین ضریب تبیین و در سرعت بارگذاری ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و در تکرار سوم آن، مقدار  $R^2 = 0.6675$  که دارای کمترین ضریب تبیین بوده و بیشترین فاصله از حالت خطی را دارا است.



شکل ۴: نمودار نیرو- جابه‌جایی در سرعت‌های بارگذاری ۹۰ میلی‌متر بر دقیقه.

جدول (۱) و (۲) مقادیر نقطه شکست را برای ۲ سرعت بارگذاری مختلف و هر کدام در ۴ تکرار نشان می‌دهد (مقادیر بر حسب نیوتن می‌باشند). همان طوری که مشخص است با افزایش سرعت بارگذاری نیروی لازم برای گسیختگی یا نیروی تسلیم بیولوژیکی محصول کاهش یافت. علت کاهش نیروی لازم برای گسیختگی در برابر افزایش سرعت بارگذاری قانون پایداری انرژی است. با افزایش سرعت فک، انرژی جنبشی افزایش یافته و در مقابل آنجا که عامل گسیختگی حاصل ضرب نیرو در سرعت است با افزایش سرعت، نیروی برشی کاهش می‌یابد. اسد زاده (۲۰۱۱) نیز به طور مشابه، کاهش نیروی برشی را ناشی از افزایش سرعت فک گزارش کردند. جدول (۱) مقادیر نقطه تسلیم (N) در سرعت‌های بارگذاری.

سرعت بارگذاری (mm/min)		نمونه (تکرار)
۹۰	۳۰	
۳۱۷/۲۵	۵۲۹/۵	نمونه ۱
۳۳۸/۴	۵۰۹/۲۵	نمونه ۲
۳۴۴/۲۵	۳۴۵	نمونه ۳
۴۱۷/۵	۵۹۱/۷۵	نمونه ۴
۳۵۴/۳۵	۴۹۳/۹۳۷	میانگین

جدول (۲) مقادیر نقطه شکست (N) در سرعت‌های بارگذاری.

سرعت بارگذاری (mm/min)		نمونه (تکرار)
۹۰	۳۰	
۵۸۸/۷۵	۵۸۲/۷۵	نمونه ۱
۷۴۹/۶	۷۱۰/۲۵	نمونه ۲
۶۰۶	۵۸۸	نمونه ۳
۶۳۷/۵	۶۳۵	نمونه ۴
۶۰۵/۷۱۲	۶۲۵	میانگین

جدول (۳) مقادیر چقرمگی را نشان می‌دهد. چقرمگی، سفت بودن مواد در واحد حجم را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، چقرمگی کار مورد نیاز در واحد حجم برای تخریب مواد می‌باشد که از طریق نسبت انرژی (سطح زیر نمودار) به حجم نمونه به دست می‌آید. با توجه به نتایج آزمایش سرعت بارگذاری بر مقدار چقرمگی اثرگذار هست. به طوری که با افزایش سرعت بارگذاری، چقرمگی در تعداد زیادی از نمونه‌ها افزایش یافت. ذکی دیزجی و مینایی (۱۳۸۶) برای نخود، به نتایج مشابه دست یافتند.

جدول ۳: مقادیر چقرمگی ( $\text{mJ/mm}^3$ ) در سرعت‌های بارگذاری.

سرعت بارگذاری (mm/min)		نمونه (تکرار)
۹۰	۳۰	
۰/۲۹	۰/۲۵	نمونه ۱
۰/۲۶	۰/۲۷	نمونه ۲

۰/۳۱	۰/۲۶	نمونه ۳
۰/۳۲	۰/۲۷	نمونه ۴
۰/۲۴	۰/۲۳	میانگین

جدول (۴) مقادیر ضریب کشسانی ظاهری را برای دو سطح سرعت و چهار نمونه (تکرار) نشان می‌دهد. با افزایش سرعت بارگذاری، مقادیر میانگین ضریب کشسانی ظاهری کاهش یافت و این نشانگر افزایش خاصیت الاستیسیته محصول در سرعت‌های کمتر است. در حالی که در بررسی جز به جز نمونه‌های سیب‌زمینی، تغییرات مدول الاستیسیته به صورت یکنواخت قابل بررسی نبود. به طوری که با افزایش سرعت بارگذاری در بعضی از نمونه‌ها، ضریب کشسانی ظاهری افزایش و در بعضی دیگر این مقدار به طور محسوس کاهش یافت. با توجه به نتایج، لذا بهتر است عملیات برداشت و پس از برداشت سیب‌زمینی در سرعت‌های بارگذاری کمتر انجام شود تا از میزان ضایعات آن تا حد امکان جلوگیری گردد.

جدول (۴) مقادیر ضریب کشسانی ظاهری (pa) در سرعت‌های بارگذاری.

سرعت بارگذاری (mm/min)		نمونه (تکرار)
۹۰	۳۰	
۱۴۶۳۹۴/۷	۲۳۲۷۴۳/۱	نمونه ۱
۱۴۰۷۰۷	۲۱۹۹۱۱/۶	نمونه ۲
۱۵۱۱۸۳	۹۹۶۳۳/۲۴	نمونه ۳
۱۸۳۵۶۷/۱	۷۲۹۷۷/۸۹	نمونه ۴
۱۵۵۴۶۲/۹	۱۵۶۳۱۶/۵	میانگین

#### نتیجه‌گیری

- با بررسی خواص مکانیکی معلوم شد که سرعت بارگذاری تأثیر معنی‌داری بر روی میانگین نیروی موردنیاز برای تسلیم بیولوژیکی و شکست در نمونه‌های تحت آزمایش دارد. به طوری که کمترین مقادیر نیروی تسلیم بیولوژیکی و شکست در سرعت‌های بالای بارگذاری اتفاق می‌افتد.
- با کاهش سرعت بارگذاری، مقدار میانگین ضریب کشسانی ظاهری افزایش یافت که می‌تواند به دلیل افزایش نیروی لازم برای گسیختگی نمونه باشد. در این صورت ناحیه مربوط به تغییر شکل الاستیک گسترش می‌یابد.

- ۳- در منحنی نیرو-تغییر شکل به دست آمده در قسمت نتایج و بحث، در سرعت بارگذاری ۹۰ میلی‌متر بر دقیقه و در تکرار اول آن،  $R^2 = 0.851$  می‌باشد که دارای بهترین ضریب تبیین است و نزدیک‌ترین مقدار به حالت خطی را دارا است.
- ۴- در منحنی نیرو-تغییر شکل به دست آمده در قسمت نتایج و بحث، در سرعت بارگذاری ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و در تکرار سوم آن، مقدار  $R^2 = 0.6675$  که دارای کمترین ضریب تبیین بوده و بیشترین فاصله از حالت خطی را دارا است.

#### مراجع:

- [1] "Some of mechanical properties of black-eyed pea (Vigna sinensis L) Rasekh, M. □, " *mdrsjrns YR - 2014*, no. 44. pp. 35-46 K1-Black-eye pea K1-Mechanical properties K1-Toughness K1-Rupturing.
- [2] E. Tibäck, M. Langton, J. Oliveira, and L. Ahrné, "Mathematical modeling of the viscosity of tomato, broccoli and carrot purees under dynamic conditions," *J. Food Eng.*, vol. 124, pp. 35-42, 2014.
- [3] H. Tscheuschner, "NN Mohsenin: Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. 2. Aufl. 891 Seiten, zahlr. Abb. und Tab. Gordon and Breach Science Publishers, New York ua 1986. Preis: 140.—£." Wiley Online Library, 1987.
- [4] J. Khazaei, "Characteristics of mechanical strength and water absorption in almond and its kernel," *Cercet. Agron. Mold.*, vol. 133, no. 1, pp. 37-51, 2008.
- [5] M. KIANI DEH KIANI, H. Maghsoudi, and S. Minaei, "Determination of poisson's ratio and young's modulus of red bean grains," *J. Food Process Eng.*, vol. 34, no. 5, pp. 1573-1583, 2011.
- [6] A. Hassanpour, M. Esmaili, A. M. Motlagh, A. R. Didar, and M. Nasiri, "Determination of poisson's ratio and modulus of elasticity during maturation of white seedless grapes," *Iran. Food Sci. Technol. Res. J.*, vol. 6, no. 4, pp. 308-317, 2011.
- [7] M. G. Scanlon, C. H. Pang, and C. G. Biliaderis, "The effect of osmotic adjustment on the mechanical properties of potato parenchyma," *Food Res. Int.*, vol. 29, no. 5-6, pp. 481-488, 1996.
- [8] M. Laza, M. G. Scanlon, and G. Mazza, "The effect of tuber pre-heating temperature and storage time on the mechanical properties of potatoes," *Food Res. Int.*, vol. 34, no. 8, pp. 659-667, 2001.
- [9] G. C. Braga, S. M. Couto, T. Hara, and J. T. P. A. Neto, "Mechanical behaviour of macadamia nut under compression loading," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 72, no. 3, pp. 239-245, 1999.
- [10] A. Standard, "Compression test of food materials of convex shape," *ASAE S368*, vol. 3, pp. 554-556, 1998.

## Effect of Loading Speed on Mechanical Properties and Apparent Elastic Coefficient of Potato

### Abstract

A manner to avoid mechanical damage is to understand the strength characteristics of the product under different conditions. Mechanical properties may be checked by performing mechanical tests such as compression tests. This study aims to the potatoes' mechanical properties, such as biological yield and grain fracture forces, apparent elasticity, and toughness at loading speeds of 30 and 90mm/min. The material tester loads the sample quasi-statically. A material tester applied quasi-static loading to the samples. The loading speed has a considerable impact on the mean biological yield strength, apparent fracture, and samples tensile strength, according to this research results. The apparent elasticity coefficient's mean values dropped as the loading speed rose, indicating that the product's elasticity increased at lower speeds. These research results, recommend harvesting and post-harvest potatoes at slower loading speeds to decrease waste.

**Key words:** Biological yield forces, fracture forces, toughness, quasi-static loading.

\*Corresponding author

E-mail: [minaee@modares.ac.ir](mailto:minaee@modares.ac.ir)