نشریه مکانیزاسیون کشاورزی/ دوره ۸ شماره ۱/ سال ۱۴۰۲/ صفحه‌های ۴۳-۵۲

DOI: https://dx.doi.org/10.22034/jam.2023.54685.1213

بررسی خواص گسیختگی پوست گردو در بارگذاری فشاری تک محوری در حالت محصور شده در صفحه عرضی

علی ماشاءالله کرمانی[1*]، الهه محمدی عبده‌وند[1]، علی رجبی‌پور[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۱۲/۲۲

۱- گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

۲- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

* مسئول مکاتبه: E-mail: amkermani@ut.ac.ir

چکیده

یکی از مهم‌ترین مراحل فرآوری گردو، شکستن پوست سخت و مغز کردن آن می‌باشد. در این تحقیق به منظور کاهش صدمه مکانیکی و بهبود کیفیت استخراج مغز گردو در هنگام شکستن گردو، خواص گسیختگی پوست گردو در بارگذاری فشاری تک محوری جدید با ایجاد محدودیت تغییر شکل جانبی تحت عنوان محصور شده مورد ارزیابی قرار گرفت. خواص گسیختگی پوست گردوی پوست سخت در اثر متغیرهای حالت بارگذاری، جهت بارگذاری و اندازه گردو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر حالت بارگذاری آزاد و محصور گردو بر نیروی شکست و انرژی شکست به ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد معنی‌دار بود. نیروی شکست گردوی پوست سخت برای حالت‌های بارگذاری آزاد و محصور به ترتیب ۲۷۳/۹۶ و ۴۴۱/۴۷ نیوتن بود. نیروی شکست در راستای محور طولی (۳۹۲/۵۶ نیوتن) به طور معنی‌داری از راستای بارگذاری ضخامت (شیار روی پوست) (۳۴۷/۸۵ نیوتن) و پهنا (۳۳۲/۶۵ نیوتن) بزرگ‌تر بود. مشاهدات نشان داد که به طور کلی در حالت بارگذاری گردو محصور شده گسترش گسیختگی و شکستگی روی پوست بیش‌تر از حالت بارگذاری آزاد بود، که این موضوع می‌تواند به عنوان ایده‌ای برای ساخت دستگاه گردوشکن مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: خواص گسیختگی، بارگذاری فشاری، محصور شده، شکستن گردو

How to cite:

Kermani A. M., Mohamadi Abdevand E., and Rajabipour A. 2023. Investigating the Fracture Properties of Walnut Shell under Uniaxial Compressive Loading in the Situation of being enclosed in a Transverse Plane. *Journal of Agricultural Mechanization* 8 (1): 43−52.

Investigating the Fracture Properties of Walnut Shell under Uniaxial Compressive Loading in the Situation of being enclosed in a Transverse Plane

Ali Mashaallah Kermani [1*], Elaheh Mohamadi Abdevand [1], Ali Rajabipour [2]

Received: January 19, 2023 Accepted: March 13, 2023

1- Department of Agrotechnology, College of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Iran

2- Department of Agricultural Machinery, College of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

*Corresponding author: amkermani@ut.ac.ir

Abstract

One of the most important stages of walnut processing is cracking the hard skin and shelling it. In this research, to reduce the mechanical damage and improve the extraction quality of walnut kernels during shelling, the fracture properties of the walnut shell were evaluated in a new uniaxial compressive loading test by creating a lateral deformation limitation called the enclosed. The fracture properties of walnut shell for the genotype of hard shell walnut were investigated due to the variables of loading mode, loading direction, and size of a walnut. The results showed that the effect of the state of walnut loading (free and enclosed) on the fracture force and fracture energy was significant at 1% and 5% probability levels, respectively. The breaking force of the hard shell walnut was 273.96 and 441.47 N for free and enclosed loading states, respectively. The breaking force along the longitudinal axis (392.56 N) was significantly more than in other loading directions, such as thickness or suture on the skin (347.85 N) and width (332.65 N). In general, observations showed that in the case of enclosed walnut loading, the rupture development on the shell surface was more than that of freeloading, which can be used as an idea for making a high-performance nutcracker machine.

Keywords: Fracture properties, Compressive loading, Enclosed, Walnut cracking

۱- مقدمه

گردو دارای ارزش غذایی زیاد از جمله فسفر قابل جذب است که این امر موجبات بازار پسندی در اروپا و آمریکا را فراهم آورده و صادر نمودن آن درآمدهای ارزی را ارتقا خواهد داد. گردو در ایران دارای سطح زیر کشت بیش از ۱۵۰ هزار هکتار می‌باشد (Anonymous., 2021). میزان تولید گردو در ایران نیز حدود ۳۸۷ هزار تن است که ایران را بعد از چین و ایالات متحده آمریکا در رتبه سوم جهان قرار می‌دهد (Anonymous, 2022). بر اساس آمار سال ۲۰۲۱، با وجود سهم ۱۰/۷۳ درصدی در تولید، سهم ایران در صادرات این محصول تنها ۰/۱۳ درصد و در رتبه ۲۶ جهان است (Anonymous, 2023). با عنایت به سند چشم انداز ۲۰ ساله که در آن توجه ویژه‌ای به صادرات غیر نفتی از جمله محصولات کشاورزی شده است، لذا انجام مطالعه و تحقیقات در این زمینه حائز اهمیت است. با عنایت به تولید بسیار زیاد گردو در کشور وضعیت صادرات این محصول چشم‌گیر نیست که دلیل عمده این امر مکانیزه نبودن مراحل فرآوری پس از برداشت گردو است. توسعه عملیات فرآوری پس از برداشت مکانیزه گردو باعث ایجاد اشتغال و جذب سرمایه می‌گردد. یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل پس از برداشت گردو، شکستن پوسته سخت آن برای بدست آوردن مغز گردو است که لازمه‌ی آن طراحی و ساخت دستگاه گردوشکن با کارایی مناسب می‌باشد (Makarichian, 2014).

برای شکستن پوست سخت گردو انواع مختلفی از دستگاه‌های گردوشکن تولید و به بازار ارائه شده است، اما با این وجود ساخت گردوشکن‌های مختلف نیاز بازار برآورده نشده و نتوانسته است رضایت باغداران را کسب کند. شکستن پوست سخت گردو در ایران هنوز هم به صورت دستی با صرف هزینه کارگری بسیار بالا و صرف وقت زیادی انجام می‌گیرد. با مکانیزه کردن عملیات شکست پوست سخت می‌توان در مدت زمان کم‌تر و با هزینه‌های بسیار به صرفه‌تر مغز گردوی سالم‌تر تولید کرد.

شناخت نحوه گسیختگی پوست گردو و تعیین خواص گسیختگی مربوط به آن در طراحی و ساخت دستگاه گردوشکن بسیار مهم است. همچنین به علت تنوع بالای ژنوتیپ‌های گردو، آزمایش روی انواع ژنوتیپ‌های گردو موجود در ایران باید انجام پذیرد که این امر خود مشکلات زیادی را به همراه دارد. در این زمینه در تحقیقی اثر

سرعت و راستای بارگذاری روی خواص مکانیکی سه ژنوتیپ گردوی ایرانی مورد مطالعه، قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر ژنوتیپ و راستای بارگذاری برای کلیه شاخص‌ها معنی دار بود. هم‌چنین اثر سرعت بارگذاری به جز نیرو، روی بقیه شاخص‌ها معنی‌دار بدست آمد. با افزایش سرعت، نیروی مورد نیاز افزایش و انرژی و چقرمگی کاهش یافت (Sattari Najaf Abadi, 2012).

در تحقیقی خواص مکانیکی پوست گردوهای منطقه اورمیه در رطوبت یکسان گردو در اثر سه عامل، قطر متوسط هندسی گردو در سه سطح ۲۹ ، ۳۲ و ۳۵ میلی‌متر، سرعت بارگذاری در سه سطح ۵۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، و جهت بارگذاری در سه سطح در راستای محورهای X، Y و Z با چهار تکرار انجام گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار نیرو، انرژی و قدرت مورد نیاز برای گسیختگی گردو در جهت طولی و عرضی نیاز است؛ در حالی که شکستن گردو در راستای بارگذاری روی درز به نیرو، انرژی و قدرت کم‌تری نیاز دارد. افزایش سرعت بارگذاری در گردوهای با اندازه‌های متفاوت باعث افزایش خطی کرنش شد. در حالی که جهت بارگذاری تأثیری در مقدار کرنش گردو تا لحظه‌ی شکست نداشت (Sharifian & Haddad Derafshi, 2008).

در تحقیقی کیفیت (خردشدگی) مغز حاصل از شکستن گردو تحت بار ضربه‌ای توسط دستگاه آزمون ضربه مورد مطالعه قرار گرفت و اثر عامل‌های ژنوتیپ، رطوبت، قطر متوسط هندسی، راستای اعمال نیرو هر کدام در سه سطح، و ارتفاع سقوط وزنه در پنج سطح روی کیفیت مغز حاصل از شکستن گردو بررسی شد (Mohammadi et al., 2014). نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که افزایش محتوای رطوبتی، درصد مغزهای شکسته را کاهش و درصد مغزهای سالم و درجه کیفیت مغزهای شکسته را افزایش داد. با افزایش ارتفاع سقوط وزنه، درصد مغزهای شکسته افزایش یافت.

در تحقیقی از روش سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی و بررسی اثر متغیرهای پیش تیمار امواج فراصوت شامل دمای حمام و مدت زمان فراصوت به ترتیب در سطوح ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درجه سلسیوس و ۵، ۱۵ و ۲۵ دقیقه، همچنین سرعت‌های بارگذاری ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ میلی‌متر در ثانیه و سه جهت بارگذاری روی کیفیت مغز شدگی گردو استفاده شد. نتایج نشان داد اعمال فراصوت در همه‌ی حالات، کیفیت مغزشدگی را افزایش و نیروی شکست را کاهش داد. همچنین مشاهده شد با افزایش سرعت بارگذاری و مدت زمان اعمال فراصوت درصد مغزهای سالم و درجه کیفیت مغزهای شکسته افزایش یافت. بالاترین کیفیت مغزشدگی و کم‌ترین نیروی شکست گردو در سرعت بارگذاری ۱/۵ mm/s، زمان اعمال فراصوت ۲۵ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سلسیوس حمام فراصوت و در جهت بارگذاری طولی به‌دست آمد (Biabani Agdam et al., 2021).

خواص مکانیکی فشاری مرتبط با شکستن گردوی رقم کشور ترکیه شامل نیرو، انرژی و تغییر شکل ویژه قبل از گسیختگی اولیه و کیفیت استخراج مغز به صورت تابعی از ضخامت پوسته و قطر متوسط هندسی در جهت‌های بارگذاری فشاری مختلف طول، عرض و ضخامت بررسی شد. نتایج نشان داد که ضخامت پوست و قطر هندسی متوسط نیروی لازم برای مقاومت بیشینه، انرژی لازم برای تغییر شکل پوست تا رسیدن به نقطه شکست و کیفیت گردوی استخراج شده بر اثر شکستن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش ضخامت پوست گردو، نیرو و انرژی مورد نیاز برای شکستن پوست به صورت خطی افزایش می‌یابد (Koyuncu et al., 2018).

رفتار مکانیکی گردو و کیفیت استخراج مغز گردو در اثر اشکال هندسی مختلف قطعه اعمال کننده بار در تماس با گردو را بررسی کردند. نتایج خواص مکانیکی بدست آمده برای استفاده از شبیه‌سازی به روش اجزای محدود فرآیند شکستن را برای پیش‌بینی شکستن و آسیب مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت (Zhang et al., 2018).

بررسی منابع نشان می دهد که در تمام تحقیقات قبلی بررسی گسیختگی پوست گردو تحت بارگذاری فشار تک محور روی نمونه گردوی آزاد بوده است. با جلوگیری از تغییر در شکل جانبی نمونه در این نوع بارگذاری خواص گسیختگی و نحوه شکست پوست گردو متفاوت خواهد بود. در این تحقیق به منظور کاهش صدمه مکانیکی و بهبود کیفیت استخراج مغز گردو در هنگام شکستن، خواص مکانیکی گردو در بارگذاری فشاری تک محوری با ایجاد محدودیت تغییر شکل عرضی عمود بر راستای اعمال نیروی تحت عنوان محصور شده مورد ارزیابی قرار گرفت. از این رو هدف کلی از انجام این تحقیق بررسی ویژگی‌های گسیختگی پوست گردو در یک حالت بارگذاری فشاری جدید و نوین بود. برای این کار خواص مکانیکی گردو در بارگذاری فشاری محصور شده در صفحه افقی عمود بر راستای بارگذاری گردوی پوست سخت در سه جهت مورد بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه گردو مورد استفاده (انتخاب نمونه گردو)

برای انجام آزمایش‌ها از گردوی ژنوتیپ پوست سخت محصول منطقه سامان، شهرکرد با خصوصیات ظاهری یکسان به تعداد ۱۵۰ عدد تهیه شد. رطوبت اولیه گردو با قرار دادن نمونه به وزن ۱۰ گرم گردو به مدت ۲۴ ساعت در آون آزمایشگاهی با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس تعیین شد. رطوبت اولیه گردو به میزان ۸٪ بر پایه تر تعیین گردید. گردوها به صورت چشمی در دو دسته اندازه بزرگ و متوسط جداسازی شدند. برخی خواص فیزیکی شامل ابعاد اصلی طول (L)، عرض (W) و ضخامت (T) بر مبنای نمایش تصویری مطابق شکل ۱ توسط کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه گردید. قطر متوسط هندسی و کرویت هر دسته از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (Mohsenin, 1986).

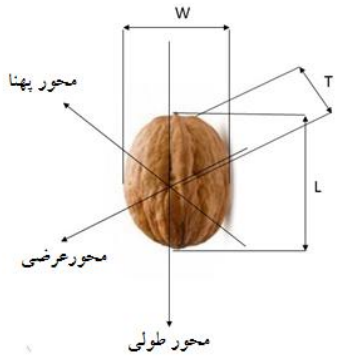
$$D_g = (LWT)^{1/3} \quad (۱)$$

$$\varphi = \frac{(LWT)^{1/3}}{L} \times 100 \quad (۲)$$

که در آن: Dg قطر متوسط هندسی و L، W و T به ترتیب ابعاد اصلی طول، عرض و ضخامت (ارتفاع) گردو بر حسب میلی‌متر، و φ ضریب کرویت (بدون بُعد) هستند.

۲-۲- آزمون‌های بارگذاری فشاری

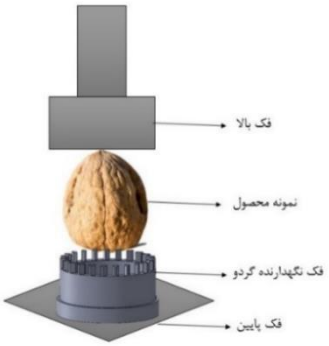
برای انجام آزمون فشاری از دستگاه آزمون کشش/ فشار سنتام STM-5 ساخت شرکت طراحی مهندسی سنتام استفاده شد. دستگاه دارای لودسل دقیق کلاس ۰/۵ به ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم ساخت کشور کره بود. برای حفظ تعادل و عدم لغزندگی گردوها از فک‌های نگهدارنده‌ی ساخته شده استفاده شد (شکل ۲). این فک‌ها بر روی فک پایینی دستگاه سنتام قرار می‌گیرد و برای گردو به عنوان تکیه‌گاه عمل کرده و باعث شد گردو در حالت کاملاً محوری و بدون لغزش در حین آزمون بارگذاری قرار گیرد.



شکل ۱- ابعاد اصلی گردو و راستای محورهای بارگذاری.
Figure 1. Main dimensions and loading directions.

در این تحقیق دو حالت بارگذاری فشاری نمونه آزاد و نمونه محصور شده روی نمونه های گردو مورد بررسی قرار گرفت. در آزمون‌های در حالت بارگذاری نمونه گردو محصور، وسیله‌ای برای محدود کردن تغییرشکل گردو در صفحه عمود بر راستای بارگذاری ساخته شد. این وسیله پیرامون گردوی تحت بارگذاری را مانند کمربندی در بر می‌گیرد و از تغییر شکل آن جلوگیری می‌کند. برای این منظور از گردوشکن‌های انبری موجود در بازار (شکل ۳) استفاده شد. با استفاده از دستگاه وایرکات گردوشکن انبری به سه قسمت برش داده شد و به کمک پیچ و مهره تثبیت کننده نمونه محصور برای اندازه‌های مختلف گردو ساخته شد. آزمون‌های فشاری با سرعت بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. حین بارگذاری با استفاده از نرم افزار دستگاه نمودار نیرو- تغییر شکل تا لحظه شکست برای هر آزمایش ترسیم و ثبت می‌گردید (شکل ۴). بارگذاری تا زمانی صورت می‌گرفت که صدای شکست پوست چوبی شنیده شود که در این لحظه در منحنی نیرو- تغییر شکل، نیرو به شدت کاهش می‌یافت. خواص گسیختگی شامل نیروی شکست، تغییر شکل تا نقطه شکست و انرژی شکست تعیین گردید. نخستین نقطه شکست به عنوان نیرو شکست ثبت گردید. نمونه‌ای از منحنی نیرو- تغییر شکل در شکل ۴ آمده است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد در حالت بارگذاری آزاد یک نقطه شکست کاملاً مشخص قابل تشخیص است در حالی که برای حالت بارگذاری محصور چندین نقطه شکست مشاهده می‌گردید. در حالت گردوی محصور شده در بخش زیادی از سطح پوست شکستگی گسترش می‌یابد. این حالت قبل از صدمه به مغز و منجر به جداسازی بهتر از پوست می‌گردد.

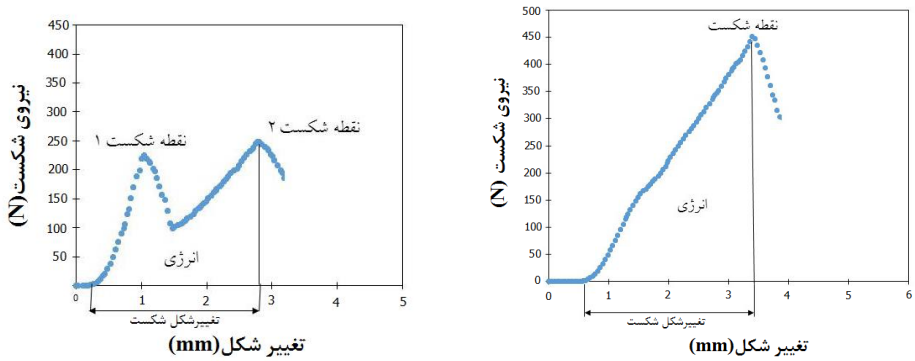
در حالت بارگذاری آزاد عمدتاً یک یا دو شکستگی در پوست ایجاد می‌گردید که مغز در بخش‌های زیادی درون پوست باقی می‌ماند (شکل ۵).



شکل ۲- آزمون بارگذاری فشاری گردو توسط دستگاه آزمون مواد و فک نگهدارنده گردو.
Figure 2. Uniaxial compression loading test by universal testing machine.

شکل ۳- وسیله محدود کننده تغییر شکل عرضی گردو و بارگذاری نمونه محصور شده.

Figure 3. Tool for enclosing the sample under compression loading.



(Constrained/enclosed walnut) **(Free walnut)**

شکل ۴- نمودار نیرو ـ تغییر شکل بدست آمده در دو حالت بارگذاری آزمون فشاری گردو.

Figure 4. Force- deformation curve in two loading mode: free and constrained.

X-axis Y-axis Z-axis X-axis Y-axis Z-axis

(Constrained/enclosed walnut) (Free walnut)

شکل ۵- نمونه شکستگی‌های روی پوست گردو برای دو حالت بارگذاری در راستاهای مختلف.

Figure 5. Examples of cracks on the walnut shell for two loading modes in different loading directions.

با استفاده از نمودارهای نیرو- تغییر شکل گردوهای تحت بارگذاری برای محاسبه میزان انرژی مصرفی برای شکست هر گردو از روش محاسبه سطح زیر منحنی استفاده شد. برای محاسبه انرژی شکست از تقسیم سطح زیر نمودار نیرو- تغییرشکل تا لحظه‌ی گسیختگی به بازه‌های بسیار کوچک و محاسبه مساحت المان‌های ذوزنقه‌ای استفاده شد که در نهایت با جمع کردن کلیه مقادیر مساحت‌ها، انرژی گسیختگی تعیین گردید.

۳-۲- طرح آماری و تحلیل داده‌ها

آزمون‌های فشار تک محوری جهت تعیین خواص گسیختگی پوست گردو به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با عوامل مؤثر یا متغیرهای مستقل شامل نوع یا حالت بارگذاری در دو سطح نمونه آزاد و نمونه محصور شده، در سه راستای بارگذاری در امتداد محورهای اصلی بر روی دو سطح اندازه گردو بزرگ و متوسط با ۵ تکرار برای هر تیمار انجام شد. بنابراین تعداد ۶۰ آزمون بارگذاری فشاری بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج با استفاده از نرم افزار آماری SAS تحلیل گردید. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص فیزیکی ژنوتیپ گردوی تحقیق

جدول ۱ برخی خواص فیزیکی شامل ابعاد اصلی گردو، قطر میانگین هندسی و کرویت ژنوتیپ پوست سخت در ابعاد درشت و متوسط را نشان می‌دهد. مقادیر میانگین طول، عرض و ارتفاع گردوی درشت به ترتیب ۴۰/۳۳، ۳۷/۲۴ و ۳۶/۴۸ میلی‌متر، و برای گردوی اندازه متوسط به ترتیب ۳۷/۴۸، ۳۱/۸۷ و ۳۳/۱۹ میلی‌متر بود. قطر متوسط هندسی برای اندازه درشت و متوسط به ترتیب ۳۷/۲۶ و ۳۴/۰۴ میلی‌متر بود.

جدول ۱- خواص فیزیکی ژنوتیپ گردوی مورد تحقیق

Table 2. Physical properties of the researched walnut genotype

اندازه گردو Walnut size	مشخصه فیزیکی Physical properties	بیشینه Maximum	کمینه Minimum	میانگین Average	انحراف معیار St. Dev.
درشت Large	طول (میلی‌متر) Length	42	42	40.33	1.93
	عرض (میلی‌متر) Width	42	35	37.24	1.90
	ارتفاع (میلی‌متر) Height	42	36	36.48	1.84
	قطر میانگین هندسی (میلی‌متر) Geometrical mean diameter	40.65	33.89	37.26	1.36
	کرویت (درصد) Sphericity	99.96	83.36	92.48	3.51
متوسط Medium	طول (میلی‌متر) Length	42	32	37.48	2.40
	عرض (میلی‌متر) Width	36	28	31.87	1.92
	ارتفاع (میلی‌متر) Height	38	29	33.19	1.99
	قطر میانگین هندسی (میلی‌متر) Geometrical mean diameter	38.23	30.80	34.07	1.50
	کرویت (درصد) Sphericity	100	80.02	91.11	4.64

۳-۲- تجزیه واریانس خواص گسیختگی

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس خواص گسیختگی گردوی پوست سخت در بارگذاری فشاری در اثر فاکتورهای نوع یا حالت بارگذاری، راستای اعمال بار و اندازه گردو را نشان می‌دهد. به منظور احراز نرمال بودن داده‌ها، تبدیل داده‌ها با تابع Ln انجام شد. داده‌ها نشان می‌دهد که برای پارامتر نیروی شکست اثر فاکتورهای حالت بارگذاری و اندازه گردو در سطح احتمال ۱٪ و راستای بارگذاری در سطح ۵٪ معنی‌دار است. اثر متقابل دوگانه حالت بارگذاری و اندازه گردو نیز در سطح ۱٪ معنی‌دار است. برای پارامتر تغییرشکل تا نقطه شکست اثر ساده اندازه گردو، اثر متقابل دوگانه حالت بارگذاری و اندازه گردو و همچنین اثر متقابل سه گانه عوامل در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار بود. اثر حالت بارگذاری و اثر متقابل دوگانه حالت بارگذاری و اندازه گردو بر پارامتر انرژی شکست به ترتیب در سطح ۵٪ و ۱٪ معنی‌دار بود.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس خواص مکانیکی گردو پوست سخت

Table 2. Analysis of variation of mechanical properties of the hard shell walnut

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات (MS)		
		نیروی شکست Fracture force	تغییر شکل در نقطه شکست Deformation at fracture point	انرژی شکست Fracture energy
حالت بارگذاری (A) Loading mode	1	2.824 **	0.022 ns	2.149 *
راستای بارگذاری (B) Loading direction	۲	0.433 *	.105 ns	0.044 ns
A×B	2	0.498 *	0.515 ns	0.377 ns
اندازه گردو (C) Walnut size	1	1.695 **	20.393 **	1.811 *
A×C	1	0.555 *	8.165 **	4.920 **
B×C	2	0.224 ns	0.237 ns	0.331 ns
A×B×C	2	0.112 ns	1.392 **	0.360 ns
خطا Error	48	0.129	0.215	0.516
ضریب تغییرات (C.V.)		6.23%	24.09%	12.08%

ادامه جدول ۲

** و *: به ترتیب وجود اختلاف معنا داری در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪، و ns : عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪

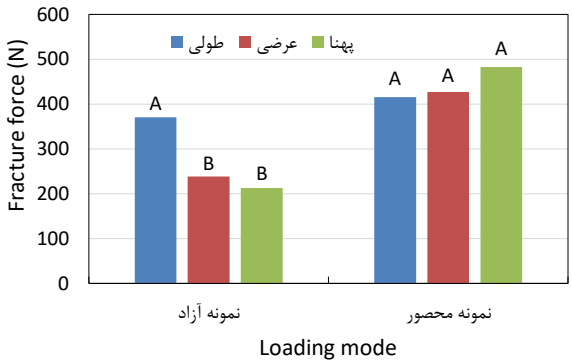
۳-۳- مقایسه میانگین‌های اثرات ساده عوامل مؤثر

جدول ۳ نتایج مقایسه میانگین اثرات مستقل عوامل مؤثر بر پارامترهای خواص مکانیکی گردوی پوست سخت را نشان می‌دهد. داده های جدول نشان می‌دهد که به طور کلی نیروی شکست گردو در حالت محصور شده به میزان ۴۴۱/۴۷ نیوتن به طور معنی‌داری از حالت بارگذاری آزاد به میزان ۲۷۳/۹۶ نیوتن بیشتر است. نیروی شکست در راستای محور طولی به طور معنی‌داری از دو راستای دیگر بزرگ‌تر بود. میزان نیروی شکست و تغییر شکل تا نقطه شکست برای گردوی با اندازه درشت بزرگ‌تر از اندازه متوسط بود. انرژی لازم برای شکست گردو در حالت بارگذاری محصور شده بیش‌تر بود. در حالت بارگذاری محصور از جابجایی جانبی نمونه جلوگیری شده است، از این‌رو در هر سه راستای بارگذاری نیروی شکست، تغییرشکل شکست تا قبل از صدمه به مغز نسبت به حالت نمونه آزاد افزایش یافته است.

ستاری نجف‌آبادی (۲۰۱۲) نشان داد که اثر رقم و جهت بارگذاری بر نیروی شکست گردو در سطح ۱٪ معنی‌دار بود و برای ارقام مختلف در راستای محور طولی در محدوده ۳۶۶/۳۸ – ۱۶۱/۹۸ نیوتن، و در راستای دو محور دیگر در محدوده‌های ۲۵/۹۱-۷۹/۱۸۴ و ۳۶۸/۷-۱۹۸/۸۶ نیوتن بوده است.

۳-۴- مقایسه میانگین‌ها در اثر متقابل عوامل مؤثر

شکل ۶ مقایسه میانگین‌های نیروی شکست در اثر متقابل حالت بارگذاری و جهت بارگذاری را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود نیروی شکست پوست گردو در حالت محصور در راستای بارگذاری مختلف با حالت آزاد کاملاً متفاوت است. در حالی که بیش‌ترین مقدار نیروی شکست برای حالت آزاد در راستای محور طولی گردو بوده است، در بارگذاری محصور بیش‌ترین مقدار نیروی شکست در راستای پهنای (ضخامت) گردو که شیار روی پوست وجود دارد به میزان ۴۸۲/۷۱ نیوتن بوده است. دو دلیل حصول این نتیجه جلوگیری از جابجایی جانبی گردوی محصور شده و باز نشدن از محل درز روی پوست و نیز ضخامت بیش‌تر پوست گردو در این ناحیه برشمرد.



شکل ۶- مقایسه میانگین‌های نیروی شکست در اثر متقابل دوگانه حالت بارگذاری و راستای اعمال نیرو.

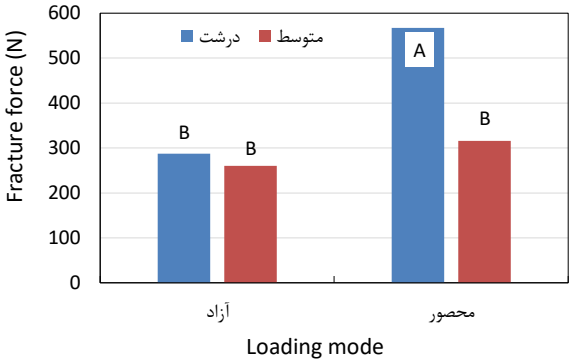
Figure 6- Comparison of the mean values of fracture force in the interaction effect of loading mode and direction.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات ساده عوامل مؤثر بر نیرو، تغییر شکل و انرژی شکست گردوی پوست سخت

Table 3- Comparison of means the parameter for simple effective mechanical properties

عوامل مؤثر Effective factors	سطح Level	نیروی شکست (N) Fracture force	تغییرشکل در نقطه شکست (mm) Deformation at fracture point	انرژی شکست (mJ) Fracture energy
حالت بارگذاری Loading mode	نمونه آزاد Free	273.96 b	8.14 a	384.99 b
	نمونه محصور Enclosed	441.47 a	10.33 a	639.61 a
راستای بارگذاری Loading direction	محور طولی X-axis	392.65 a	9.98 a	444.86 a
	محور عرضی Y-axis	332.65 b	9.28 a	549.06 a
	محور پهنا (ضخامت) Z-axis	347.85 b	8.43 a	542.973 a
اندازه گردو Walnut size	درشت Large	427.28 a	13.35 b	634.584 a
	متوسط Medium	288.15 b	5.11 a	390.03 b

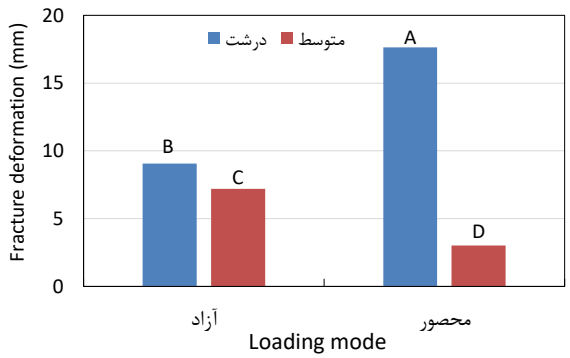
شکل ۷ مقایسه میانگین‌های مقدار نیروی شکست در اثر متقابل حالت بارگذاری و اندازه گردو نشان می‌دهد که در حالت بارگذاری آزاد بین اندازه گردو تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و در محدوده ۲۸۷/۴۸- ۲۶۰/۴۳ نیوتن قرار داشت، در حالی که در حالت محصور نیروی شکست گردوی با اندازه درشت به طور معنی-داری نسبت به اندازه متوسط از ۳۱۵/۸۷ به ۵۶۷/۰۸ نیوتن افزایش یافته است.



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های نیروی شکست در اثر متقابل حالت بارگذاری و اندازه گردو.

Figure 7- Comparison of the mean values of fracture force in the interaction effect of loading mode and walnut size.

شکل ۸ مقایسه میانگین‌های مقدار تغییرشکل در نقطه شکست در اثر متقابل حالت بارگذاری و اندازه گردو نشان می‌دهد که در حالت بارگذاری آزاد برای گردوهای با اندازه درشت و متوسط تفاوت معنی‌داری وجود ندارد، و در محدوده ۹/۰۸- ۷/۱۹ میلی‌متر بود، در حالی که در حالت محصور نیروی شکست گردوی با اندازه درشت به طور معنی‌داری نسبت به اندازه متوسط بیش‌تر بوده است.



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه حالت بارگذاری و اندازه گردو بر تغییر شکل در نقطه شکست.

Figure 8- Comparison of the mean values of deformation at fracture point in the interaction effect of loading mode and direction.

جدول ۴ نتایج مقایسه میانگین‌های تغییر شکل در نقطه شکست در اثر متقابل سه گانه عوامل مؤثر نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر در حالت بارگذاری گردو در حالت محصور به ترتیب در راستای طولی، ضخامت و پهنا با اندازه درشت حاصل گردید. پس از آن بیش‌ترین مقادیر برای حالت بارگذاری آزاد اندازه درشت بدست آمد که ترتیب راستای محورهای بارگذاری متفاوت بوده است.

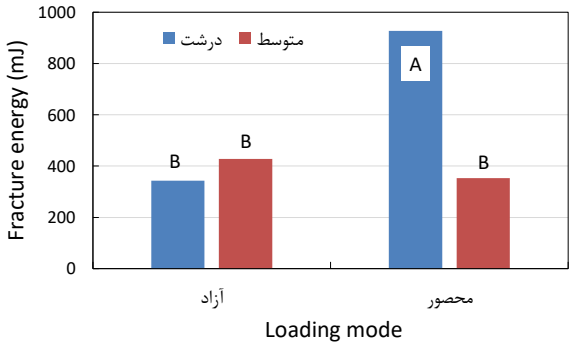
جدول ۴- مقایسه میانگین‌های تغییر شکل در نقطه شکست در اثر متقابل سه گانه عوامل مؤثر

Table 4- Comparison of the mean values of the deformation at the fracture point in the triple interaction effect of the independent factors

اندازه گردو Walnut size	حالت بارگذاری آزاد Free loading mode			حالت بارگذاری محصور Enclosed loading mode		
	طولی X-axis	ضخامت (پهنا) Z- axis	عرضی Y- axis	طولی X-axis	ضخامت (پهنا) Z- axis	عرضی Y- axis
درشت Large	7.94 bc	10.44 ab	8.85 b	18.56 a	17.18 a	17.16 a
متوسط Medium	11.32 ab	5.08 d	5.17 cd	2.11 e	4.43 de	2.55 de

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند، از نظر آماری در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند.

شکل ۹ مقایسه میانگین های مقدار انرژی شکست در اثر متقابل حالت بارگذاری و اندازه گردو نشان می‌دهد که در حالت بارگذاری آزاد برای گردوهای با اندازه درشت و متوسط تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و در محدوده ۴۲۷/۵۱- ۳۴۲/۴۹ میلی‌ژول بود، در حالی که در حالت محصور نیروی شکست گردوی با اندازه درشت به طور معنی‌داری نسبت به اندازه متوسط بیش‌تر بوده است. تغییرات میانگین‌ها مشابه این اثر مشابه نیروی و تغییرشکل در نقطه شکست است.



شکل ۹- مقایسه میانگین‌های انرژی شکست در اثر متقابل حالت بارگذاری و اندازه گردو.

Figure 9 – Comparison of the mean values of fracture energy in the interaction effect of loading mode and walnut size.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این تحقیق خواص گسیختگی گردوی پوست سخت در دو حالت بارگذاری نمونه آزاد و نمونه محصور شده در صفحه عمود بر راستای بارگذاری و در سه جهت بارگذاری اصلی در راستای طول، عرض و ضخامت، برای دو اندازه بزرگ و متوسط مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات نشان داد که به طور کلی در بارگذاری گردو در حالت محصور شده گسترش و توسعه شکستگی روی پوست بیش‌تر از حالت بارگذاری آزاد بود. این موضوع موجب سهولت استخراج مغز از درون پوست می‌گردد. از این‌رو، از این حالت بارگذاری برای شکستن پوست گردو می‌تواند به عنوان ایده‌ای برای ساخت دستگاه گردوشکن به ویژه برای ژنوتیپ‌های سوزنی و پوست سخت مورد بهره‌برداری قرار گیرد. نتایج حاصل از بررسی خواص مکانیکی نشان داد که نیرو و انرژی شکست گردو در حالت محصور شده به طور معنی‌داری از حالت بارگذاری آزاد بیش‌تر بود. با توجه به مقادیر ضریب کرویت بالا و نسبت ضخامت پوست به قطر گردو، پیشنهاد می‌شود بررسی روابط تحلیلی و شبیه‌سازی عددی بارگذاری گردو به عنوان پوسته کروی جدار نازک و تحلیل تنش و نحوه گسترش شکست روی پوست در حالت بارگذاری پیشنهادی به‌عنوان گام بعدی تحقیق باشد.

منابع

Anonymous. (2021). FAOSTAT. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL, available 10 March 2023.

Anonymous. (2022). Agricultural statistics of 2021, third volume: report of horticultural and greenhouse products. Information and Communication Technology Center, Ministry of Jihad Agriculture. (In Persian).

Anonymous. (2023). Export of raw walnut from Iran. https://www.tridge.com/intelligences/walnut/IR/export, available 10 March 2023.

Biabani Agdam, E., Khoshtaghaza, M. H., & Najafi, Gh. (2021). Optimization effect of ultrasound on rupture force and kernel extracting quality of walnut using response surface method (RSM). Journal of Agricultural Machinery, 11(2): 331-342. (In Persian).

Koyuncu, M. A., Ekinci; K., & Savran, E. (2004). Cracking characteristics of walnut. Biosystems Engineering, 87 (3): 305–311.

Makarichian, A. R. (2014). Design and manufacture of rotary walnut cracker. M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, College of Aburihan, University of Tehran. (In Persian).

Mohammadi, Kh. Ghasemzadeh, H. R. Navid, H. Moghaddam, M. & Ghaffari, H. (2014). Evaluation of

walnut kernel quality (as degree of crushing) obtained under impact loading. Journal of Agricultural Machinery, 4(1): 11-20. (In Persian).

Mohsenin, N. N. (1986). Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA.

Sattari Najaf Abadi, M. (2012). Mechanical properties of three major Iranian walnut varieties under compression loading. Journal of Agricultural Engineering Research, 12(4): 87–102. (In Persian).

Sharifian, F. & Haddad Derafshi, M. (2008). Mechanical behavior of walnut under cracking conditions. Journal of Applied Science, 8(5): 886–890.

Zhang, H., Shen, L., Lan, H., Li, Y., Liu, Y., Tang, Y., & Li, W. (2018). Mechanical properties and finite element analysis of walnut under different cracking parts. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(6): 81–88.