

Performance Analysis of a Walnut Peeler with a Rotating Cutting Plate

H. Samimi Akhijahani^{1*}, M. S. Barghi Jahromi²

1- Department of Bio Systems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran

(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.90199.1294>

Introduction

Walnut (*Juglans regia* L.) is a highly valued horticultural product, and significant efforts are underway to enhance its production in Iran. Despite the development of various tools aimed at increasing productivity and improving harvesting efficiency, over 90% of walnuts in Iran are still harvested manually, often with the aid of specialized tools or by striking the trees with sticks. Although numerous mechanical devices have been introduced, the considerable height of walnut trees and the asynchronous ripening of the nuts continue to make traditional harvesting methods predominant. In this research, a novel walnut peeling system incorporating a horizontally rotating cutting plate was developed and evaluated. The cutting plate, designed with specific grooves and curvature, aims to enhance the mechanical efficiency of the peeling process. This analysis investigates the influence of rotational speed and groove depth on system performance. In addition, the life cycle assessment is conducted to evaluate the environmental and operational impacts of the proposed system, with comparative analysis against conventional peeling methods.

Materials and Methods

The designed and constructed system consists of three main parts: the container, the rotating disk, and the power system, which includes the electric motor. The rotating disk, as the heart of the system, is made from a 1.5 mm thick steel sheet with a diameter of 640 mm. It has been laser-cut with sufficient precision to cut and transfer walnuts. The third part of the system is the power unit, which includes a 3-hp, 1400 rpm electric motor. Power transmission is carried out using a V-shaped belt. In this system, the product is first collected from the designated garden and stored in equally weighted bags. The rotating plate is the most important component of the walnut peeler, essentially the heart of the system. On this plate, there are 12 oval grooves, each 5 mm in diameter and 150 mm in length. One side of each groove is raised, with a depth that can be varied. Increasing the groove depth increases the amount of peel removed and exposes a larger surface of the walnut. The plate is connected to the driven pulley and then to the electric motor via a shaft. In this research, a life cycle assessment was also used to evaluate the impact of various parameters of the walnut peeling system on the environment and its pollution level.

Results and Discussion

The findings from the variance analysis regarding the impact of groove depth and rotation speed on peeling percentage indicate that variations in plate groove depth and electric motor rotation speed during walnut peeling are significant at the 1% level. Furthermore, the impact of changes in the groove depth of the cutting plate on machine performance and the reduction of walnut losses is substantial, showing significance at the 1% probability level. The effect of this factor on the amount of damage to walnuts is significant at the 5% level. By increasing the groove depth from 1.5 to 3 mm and from 3 to 5 mm, changes of 6.99% and 5.12% in walnut skin removal were observed. By reducing the elevation of the groove, the amount of cutting removed from the walnut surface is also reduced, and the peeling process becomes more abrasive. In this case, for proper peeling, the cycle duration and retention time in the machine should be increased. By increasing the rotational speed from 218 to 275 rpm, the momentum and linear velocity increase, resulting in more green shell removal. Conversely, reducing the rotational speed decreases the impact, leaving more green skin on the product. The interaction between rotational speed and groove depth is also significant in the amount of peeled product at the 1% level. The results of the life cycle assessment showed that the human health index has the highest value due to the use of electric power, iron profile (in the system chassis and container), and copper wire in the electric motor armature. Optimizing the system and using clean energy can help improve system efficiency and reduce environmental impact.

Conclusion

Utilizing a walnut peeling machine achieves an impressive 94% efficiency in walnut peeling while ensuring less than 5% damage. The results of the life cycle assessment showed that the use of a walnut peeling machine

has less environmental damage than the traditional method and is highly cost-effective.

Keywords: Damage, Life cycle assessment, Effective productivity, Rotary cutting plate, Walnut quality

ارزیابی عملکرد یک پوست کن گردو مجهز به صفحه برشی گردان

هادی صمیمی اخيجهانی^{۱*}، محمد صالح برقی جهرمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

چکیده

در این تحقیق یک دستگاه پوست گیر گردو با قابلیت جابه جایی و مجهز به یک الکتروموتور معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور تأثیر تغییر سرعت دورانی و عمق شیار صفحه برش بر عملکرد سامانه شامل پوست گیری و تأثیر آن بر ترک و شکست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت دورانی صفحه دوار، مدت زمان پوست کنی گردو کاهش یافته و کیفیت پوست گیری بهبود پیدا می کند. تأثیر سرعت دورانی صفحه برش (از ۲۱۸ تا ۳۲۲ دور بر دقیقه) بر میزان آسیب به محصول معنی دار بود. در سرعت دورانی ۳۲۲ دور بر دقیقه به طور میانگین بیش از ۶/۲۴ درصد گردوهای ریخته شده در سامانه آسیب دیده بودند. هرچند میزان پوست کنی بهبود پیدا کرده بود. این امر به دلیل افزایش مقدار حرکت خطی وارد شده به محصول و ایجاد ترک و شکستگی پوست محصول بود. همچنین افزایش عمق شیار باعث می گردید که سرعت برش پوسته ها افزایش یابد. در این حالت نیز تأثیر عمق شیار بر آسیب به محصول در سطح ۵ درصد معنی دار بود. حداکثر ظرفیت مؤثر کارایی پوست کندن برای گردو در سرعت دورانی ۲۸۰ دور بر دقیقه و عمق شیار صفحه ۳ میلی متر، ۱۲۰۰ کیلوگرم در ساعت با ۱۸ کیلوگرم محصول آسیب دیده به دست آمد.

واژه های کلیدی: آسیب دیدگی، ارزیابی چرخه زیست، بهره وری مؤثر، صفحه برش گردان، کیفیت گردو

مقدمه

می آید (Ebrahimi, Sharifi, Rafiei, & Fatahi, 2009). به عبارت دیگر در یک باغ برخی از آن ها ترک برداشته و برخی سالم و بدون ترک هستند. منظور از پوست در این تحقیق پوست سبز محصول (در اصطلاح محلی کزال) است. تحقیقات نشان داده است اگر به درخت گردو فرصت داده شود که محصول آن به صورت پوست کنده شود، بخش اعظمی از مغز گردوها به صورت قهوه ای درآمد و بازاری پسندی خود را از دست می دهد (Ghasemi, Arzani, & Hassani, 2012; Ramos, 1998). به ویژه اگر از گردو برای تولید مواد غذایی مانند شیرینی و ماست استفاده گردد، سالم و سفید بودن مغزها اهمیت خود را بیشتر نشان می دهد (Gachpazian et al., 2013). بر این اساس قبل از آن که به طور کامل پوست ترک داشته باشد، باید چیده شوند. اما این امر به نوبه خود باعث می گردد، جداسازی پوست سبز از پوسته چوبی به سختی انجام شود. بنابراین استفاده از ادواتی که بتوانند پوست کنی محصول را به طور کامل و همگن انجام دهد، ضروری به نظر می رسد.

استان آذربایجان شرقی به عنوان دومین تولیدکننده گردو در ایران نقش مهمی در صادرات این محصول دارد. گردوی آذرشهر در بسیاری از مناطق کشور به دلیل سفید و شیرینی بودن مغز آن منحصر به فرد بوده و طعم و مزه به خصوصی دارد. اقلیم منطقه آذربایجان شرقی طوری است که تابستان های گرم و خشک و زمستان های سرد و خشک دارد. به این دلیل معمولاً برداشت محصول

گردو (*Juglans regia* L.) یکی از محصولات باغی است که تلاش های زیادی برای تولید بیشتر آن در ایران انجام می شود. همه ساله ادوات زیادی در جهت بهره وری و تولید بهینه این محصول گران بها صورت می گیرد. ادوات عمل آوری این محصول شامل ادوات خاکورز، داشت و حتی پس از برداشت و فراوری آن می باشد (Ghafari, Chegini, Khazaei, & Vahdati, 2011). از بین این مراحل، مرحله برداشت و پوست کنی آن مشکل ترین و در عین حال پیچیده ترین مرحله است (Makarichian & Chegini, 2013). بیشتر از ۹۰ درصد گردوی ایرانی به دست آمده، به وسیله دست و با استفاده از ابزار مخصوصی یا با چوب چیده می شوند. ادوات زیادی برای برداشت این محصول تا به حال ساخته شده اند. اما به دلیل ارتفاع زیاد درختان و عدم هماهنگی در رسیدن محصول، هنوز هم برداشت محصول به صورت سنتی انجام می گردد. از طرف دیگر به دلیل تنوع ژنوتیپ های زیاد محصول، عدم یکنواختی در چیدن گردو به وجود

۱- گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: h.samimi@uok.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.90199.1294>

از نیمه شهریور ماه شروع و تا اواسط آبان ماه ادامه می‌یابد. گردو به دلیل خواص پزشکی که دارد، طبع گرمی داشته و در سفره‌های اکثر مردم کشور دیده می‌شود. این محصول هم به‌صورت مغز و هم به‌صورت روغن در مواد غذایی و آرایشی و بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rastegar, Shojae, & Tajeddin, 2019). پوست سبز گردو که در برخی موارد به‌صورت دورریز در نظر گرفته می‌شود حاوی مواد آنتی‌اکسیدان و ضد میکروب است (Ziaolhagh & Zare, 2022). علاوه بر آن کنسانتره آن مصرف دامی داشته و باعث از بین بردن انواع مختلف بیماری‌ها می‌گردد. میزان تولید گردو در ایران و سطح زیر کشت آن به ترتیب ۳۵۵۰۴۹ تن و ۵۲۱۵۰ هکتار در سال ۲۰۲۲، به عنوان سومین تولیدکننده گردو در جهان پس از چین و ایالات متحده آمریکا می‌باشد (FAO, 2022). میزان تولید آن به دلیل شرایط اقلیمی و سرمازدگی و خشکسالی از ۳۸۵۰۰۰ تن در سال ۲۰۲۱ به ۳۵۵۰۴۹ تن در سال ۲۰۲۲ کاهش یافته است. در ایران، استان آذربایجان شرقی با تولید ۲۴۵۶۰۰ تن پس از استان همدان دومین تولیدکننده گردو در ایران است.

عوامل زیادی بر میزان تولید و کیفیت تولید، فرآوری و بازاریابی گردو تأثیر می‌گذارد. این عوامل می‌تواند شامل ژنوتیپ، آب و هوای منطقه کشت، عوامل بیماری‌زا، نحوه برداشت و روش فرآوری و خشک کردن آن باشد (Rebufa, Artaud, & Dréau, 2022). با تغییر هر کدام از عوامل اشاره شده ویژگی‌های محصول مانند پوست آن نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. پوست‌کن‌های گردوی ساخته شده بسیار اندک بوده و تمام این ادوات به‌صورتی توانسته‌اند نیاز کشاورزان را به‌صورت مقطعی یا همیشگی برطرف نمایند. هرچند با به‌نژادی و تولید صنعتی گردو استفاده از پوست‌کن‌های گردو کاهش یافته است. اما همان‌طور که اشاره شد، در ایران به دلیل بودن بومی بودن درختان نیاز به این ادوات بسیار احساس می‌شود. تحقیقات اندکی در زمینه ارزیابی این سامانه‌ها صورت گرفته است و بیشتر این منابع قدیمی هستند. از جمله آن می‌توان به استفاده فرچه سیمی (Barton, 1956)، غلتک‌های دنداندار (Mcfarland & Saunders, 1977) و تیغه‌هایی فلزی (Cacho, 1978) اشاره نمود.

در سال‌های اخیر ادوات مشابهی برای پوست‌کنی طراحی و ساخته شده است. در ماشینی از سامانه انگشتی برای جدایش پوست گردو استفاده شده است. اما سرعت این سامانه بسیار پایین بود (۹۵ ثانیه برای هر بار پر شدگی مخزن) (Trujillo, 2003). در سامانه‌ای برای پوست‌کنی از روش استوانه قفسی استفاده گردید. محصول بین استوانه گردان که دارای تیغه می‌باشد و استوانه قفسی قرار گرفته و با دوران استوانه وسطی عملیات جدایش پوست صورت می‌گرفت (Karimi, Minaei, Hasani, & Eyvani, 2008). به دلیل سایش به‌وجودآمده امکان وارد شدن خسارت و تلفات (شکستگی و خرد شدن) محصول بیشتر بود. در سامانه‌ای از یک صفحه افقی با

شیارهای عمیق همراه با برس‌های سیمی استفاده شد. محیط استوانه مربوط به مخزن محصول نیز دارای شیارهایی برای پوسته محصول بود. برای پاک شدن کامل پوست سبز از روی محصول از پاشش آب نیز استفاده می‌شد (Makarichian & Chegini, 2013). در دستگاهی از خاصیت لایه‌برداری برای جداسازی لایه سبز گردو، با استفاده از کندن همراه با برش پوست شکسته و فشار پیچشی استفاده شد. به دلیل محدودیت پژوهش طرح آماری برای سامانه در نظر گرفته نشد (Jingtao, Pengxu, Xiaoxue, & Ye, 2016). پژوهشی از مکانیزم گریز از مرکز چندمنظوره جدید برای فرآوری گردو و پوسته استفاده شد. سامانه ارائه شده قادر به پوسته کردن، شستشو و تخلیه محصول بود و چهار تیمار گردو برای ارزیابی سامانه لحاظ گردید. نتایج نشان داد، مناسب‌ترین حالت در سرعت دورانی پوسته به میزان ۳/۷۵ رادیان بر ثانیه، باردهی به وزن ۴ کیلوگرم و مدت زمان ۱۰ دقیقه اتفاق می‌افتد. همچنین داده‌ها نشان دادند، برای گردوهای با قطر بزرگ‌تر نیاز به اینرسی بیشتر می‌باشد. از ضعف‌های سامانه به باردهی کم می‌توان اشاره نمود. در این پژوهش به میزان تلفات محصول اشاره نشده است (Younesi-Alamooti & Mahmoodi, 2015). در تحقیقی برای جدایش پوست سبز از محصول از روش پاشش Ethephone و Tween-80 بر روی محصول استفاده نمودند. نتایج نشان داد عملکرد حداکثری ۴ روز پس از پاشش ترکیب اتفاق می‌افتد. دستگاه مورد نظر شامل یک استوانه با ۱۸ میله بود که به‌صورت قفسی جدایش محصول را صورت می‌داد (Hussain, Ahad, Rather, & Naik, 2016).

همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره شد، سامانه‌های ساخته شده مورد ارزیابی دقیق قرار نگرفته و تأثیر پارامترهای مختلف بر کارایی و عملکرد آن‌ها صورت نگرفته است. از طرف دیگر این سامانه‌ها ایراداتی نظیر آسیب به محصول و سیاه شدن مغز را به همراه دارد. در این ادوات برای تمیز نمودن زائده‌های پوست سبز از روی پوست محصول از آب استفاده می‌شود. این امر باعث به‌وجود آمدن مشکلاتی می‌گردد. در این حالت تلفات آب بیشتر بوده و از طرف دیگر به دلیل مخلوط شدن مایع پوسته سبز این ماده برای محیط‌زیست مضر بوده و نمی‌تواند مورد مصرف گیاه قرار گیرد. همچنین به دلیل عدم آب‌بندی وارسته‌های مختلف گردو و این که درصدی از محصول مورد آسیب قرار می‌گیرد، آب به داخل محصول شده و مغز محصول به رنگ قهوه‌ای یا سیاه درمی‌آید. بنابراین استفاده از راه‌های جایگزین توصیه می‌شود. در این تحقیق از یک سامانه جدید برای پوست‌گیری گردو استفاده شده است. با توجه به خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده، طراحی پوست‌کن گردو با صفحه دوار با شیارها و انحنا باعث بهبود کارایی سامانه خواهد شد. بر این اساس تأثیر سرعت دورانی و عمق شیارها بر میزان کارایی سامانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علاوه بر آن ارزیابی چرخه زیست سامانه

برش پوست سبز گردو توسط همین شیارها صورت می‌گیرند. همچنین برای زیر و رو کردن محصول حین پوست‌گیری و انتقال گردوهای رویی به سطح زیرین، انحنایی به میزان نصف قطر گردوها (حداکثر ۱۵ میلی‌متر) در صفحه گردنده در نظر گرفته شده است. این انحنا (یا اعوجاج) هم‌زمان هم باعث زیر و رو کردن محصول می‌شود و هم باعث تخلیه سریع در مرحله آخر پس از اتمام پوست‌گیری از سامانه می‌گردد. قسمت سوم مجموعه، سامانه تواندهی مجموعه است که این سامانه شامل یک الکتروموتور با توان ۳ hp و سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه است. انتقال توان به‌وسیله تسمه V شکل و پولی صورت می‌گیرد. این امر باعث جلوگیری از خسارت به سامانه در صورت به‌وجود آمدن حالت بیش باری خواهد شد. برای به‌دست آوردن سرعت‌های متنوع، از تسمه و پولی‌های مختلف استفاده می‌گردد. انتقال توان به‌صورت موازی و در یک خط بدون انحراف صورت می‌گیرد. پولی بزرگ‌تر به محوری که به تسمه متصل است، باعث دوران دیسک شده و عملیات پوست‌کنی صورت می‌گیرد. کل مجموعه روی یک شاسی قرار گرفته و برای حرکت مجموعه از چرخ لاستیکی استفاده می‌شود. برای جلوگیری از ارتعاش مجموعه دو پایه از آن بر روی سطح زمین روی لاستیک تخت قرار می‌گیرد. اجزای مختلف سامانه پوست‌کن گردو همراه با متعلقات و جزئیات آن شامل نوع، جنس، اندازه و ویژگی هر جزء در جدول ۱ لیست شده است. در ادامه ابتدا اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سامانه و سپس زیر مجموعه هر عنصر با جزئیات توضیح داده می‌شود.

مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته و با روش سنتی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. با توجه به تحقیقات پیشین چنین مطالعه‌ای با لحاظ نمودن یک سامانه آب‌گیر قبلاً انجام نگرفته است.

مواد و روش‌ها

شرح دستگاه پوست‌کن گردو و متعلقات آن

سامانه‌ای که در این تحقیق (شکل ۲) طراحی و ساخته شده است، از سه قسمت اصلی شامل محفظه، دیسک دوار و سیستم تواندهی که شامل الکتروموتور است تشکیل شده است. در مرحله اول سامانه متناسب با یک کیسه استاندارد در نظر گرفته شد که ابعاد تقریبی آن به شکل استوانه به قطر ۴۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر طراحی شد. هرچند در صورت توسعه سامانه می‌تواند به حالت پیوسته نیز طراحی و ساخته شود. بر این اساس ابعاد این محفظه که به‌صورت استوانه‌ای نیز می‌باشد، قطر ۶۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ورودی محصول از بالا و خروجی آن از دریچه کناری که در شکل ۱ نشان داده شده است، صورت می‌گیرد. دیسک دوار به‌عنوان قلب سامانه از یک ورق فولاد ضد زنگ به ضخامت ۱/۵ و به قطر ۶۵۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شده است. برش این ورق با لیزر صورت گرفت تا دقت کافی برای برش و انتقال گردوها را داشته باشد. علاوه بر آن بر روی سطح این ورق شیارهایی به‌صورت بیضی در نظر گرفته شده است. این شیارها با انحرافی که به‌وسیله دستگاه خم‌کن صورت می‌گیرد، به میزان یک الی ۵ میلی‌متر می‌تواند از سطح اولیه ورق فاصله گرفته و عملیات

جدول ۱- جزئیات پوست‌کن گردوی طراحی و ساخته‌شده

Table 1- Components details of the designed and constructed walnut dehuller

سیستم اصلی Base system	توصیفیات اجزا Description of element	جزئیات زیرمجموعه اجزا Details of sub element
مخزن Container	شکل استوانه‌ای Cylindrical shape	ورق (ST37)، به ابعاد (قطر: ۶۵۰ میلی‌متر، ارتفاع: ۷۰۰ میلی‌متر) رنگ‌شده با رنگ ضد آب Steel (ST37) (diameter: 650 mm, height: 700 mm, thickness: 1 mm), coated with waterproof paint
	پاروک‌ها Paddles	ورق فولادی به ابعاد ۱۳۰ میلی‌متر در ۱۳۰ میلی‌متر، نصب‌شده با شیب ۴۵ درجه عمود به دیواره مخزن Stainless steel plate 130 mm × 130 mm, 1 mm thickness, installed at a 45° inclination perpendicular to the inner container face
صفحه برش Cutting plate	صفحه گردنده Rotary disk	ورق فولادی (قطر: ۶۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۱/۵ میلی‌متر) Stainless steel (diameter: 650 mm, thickness: 1.5 mm)
	شیارها Grooves	۱۲ شیار به شکل بیضی از طریق دیسک، با عمق ۱/۵-۳ میلی‌متر 12 grooves in oval shape through the disk, with 1.5-3 mm depth
	پیچ ثابت‌کننده Fixing screw	یک پیچ و مهره ۱۵ میلی‌متری برای ثابت کردن صفحه در محور سامانه A 15 mm screw and nut used to fix the plate on the powered shaft
	محور Shaft	شفت با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر متصل به پولی A shaft with a diameter of 20 mm and 300 mm length connected to pulley

الکتروموتور Electromotor	CR90L4A 1.1-1500	یک الکتروموتور تک فاز ۳ اسب بخار ۲۲۰ ولت ۱۴۰۰ دور در دقیقه مدل: موتوژن 54F تبریز، ایران
		A single phase 3 hp electromotor, 220 V, 1400 rpm, Model: Motogen, CR90L4A 1.1-1500 54F, Tabriz, Iran
		یک جفت پولی با شیار V شکل با سه قطر مختلف ۵۵، ۸۰ و ۱۰۵ میلی‌متر برای پولی کوچک و ۲۷۰ میلی‌متر برای قطر پولی بزرگ
سامانه توان‌دهی Power system	پولی Pully	A pair of V-grooved with three various diameters, d = 55, 80, and 105 mm, and D = 270 mm
تسمه Belt	تسمه Belt	تسمه V شکل تقویت‌شده تک کانال، مگاداین PL 1270 ساخت ابتکار صنعت تهران، ایران
		A refrained V shape belt in single channel, Megadyne PL 1270, made by Ebtekar Sanat, Tehran, Iran
		ورق فولادی (ST37)، با پروفیل گالوانیزه شده ۴۰×۲۰، رنگ‌شده با رنگ ضد آب
شاسی Chassis	طراحی‌شده بر اساس ابعاد سامانه Designed based on the system dimensions	Steel plate (ST37), reframed by 20×40 galvanized profile, coated with waterproof paint
یک جفت چرخ لاستیکی (قطر ۱۵۰ میلی‌متر) نصب شده روی شاسی به منظور انتقال مکانیزم	A pair of rubber wheels (150 mm diameter) installed in order to transfer the mechanism	

بررسی خواص مکانیکی اندازه‌گیری‌شده

گردوی تازه برداشت‌شده پس از برداشت برای تمامی تست‌های فشاری مورد استفاده قرار گرفت. گردوها توسط دستگاه تست Instron بارگیری شدند تا زمانی که پارگی پوسته سبز شروع شود. رفتارهای مکانیکی گردو بر حسب حداکثر نیروی لازم برای برش پوسته، تغییر شکل خاص گردو، انرژی جذب‌شده و توان لازم برای پارگی پوسته گردو بیان شد. این مقادیر از هر منحنی فشرده‌سازی، به‌دست‌آمده از دستگاه تست Instron، توسعه یافته است. در این آزمایش، بیشترین نیروی ثبت‌شده برای برش پوست گردو ۷۹۸ نیوتن بود.

انرژی جذب‌شده مستقیماً از طریق اندازه‌گیری ناحیه زیر منحنی (نیرو-تغییر شکل) تعیین می‌شود (Koyuncu, Ekinci, & Savran, 2004; Sharifian, Rahmani Didar, & Haddad Derafshi, 2008). این اندازه‌گیری با استفاده از یک پلاتومتر دیجیتالی با دقت $\pm 0.2\%$ درصد انجام شد (Sharifian et al., 2008; Güner, Dursun, & Dursun, 2003). بیشترین انرژی مورد نیاز برای پارگی پوسته گردو ۹۵۰ مگاژول ثبت شد. شکل ۱ منحنی نیرو-تغییر شکل را برای پوست گردو را نشان می‌دهد.

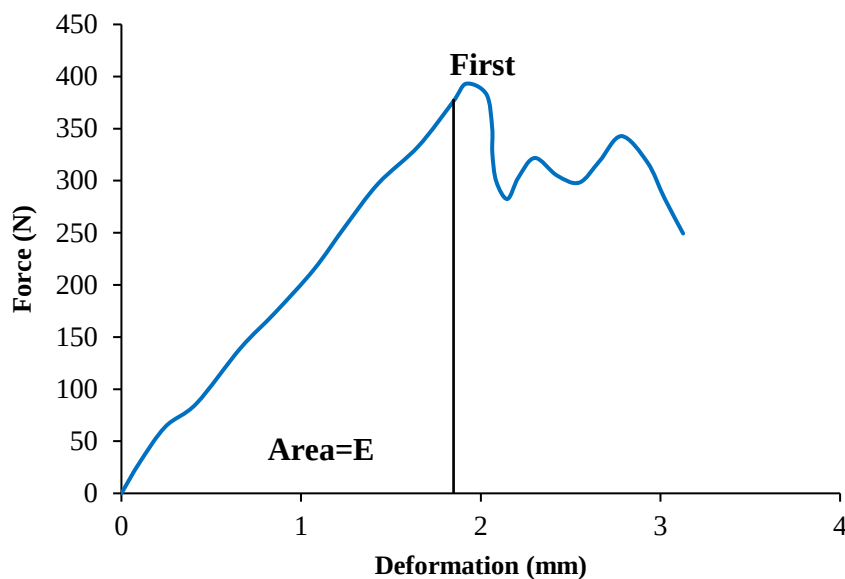
صفحه گردنده شیاردار

صفحه گردنده مهم‌ترین قسمت از پوست‌کن گردو و به عبارت دیگر به‌عنوان قلب سامانه می‌باشد. بر روی این صفحه ۱۲ شیار به‌صورت بیضی با قطر ۵ میلی‌متر به طول ۱۵۰ میلی‌متر ایجاد شده است. یک سمت از شیارها برآمده بوده و میزان ارتفاع قرارگیری این سمت می‌تواند متغیر باشد. با افزایش عمق شیار میزان برش ایجادشده افزایش یافته و سطح زیادی از گردو را بر می‌دارد. این صفحه به‌وسیله یک محور به پولی متحرک و سپس به پولی الکتروموتور اتصال پیدا می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، پوست‌گیری با استفاده از ضربه صورت می‌گیرد. که با استفاده از رابطه (۱) می‌توان نیروی واردشده به پوست گردو را محاسبه نمود (Meriam, Kraige, & Bolton, 2018):

$$G = mv, \int_0^t f \cdot dt = \Delta G \quad (1)$$

که در آن f مقدار نیرویی است که به پوست گردو در مدت زمان t وارد می‌شود. برای محاسبه این نیرو ابتدا محصول را درون سامانه قرار داده و سپس با شروع به کار الکتروموتور، صفحه شروع به دوران می‌کند و زمان برای رسیدن به سرعت دورانی ثبت می‌گردد. نیروی وارد ایستایی نیز از گشتاورسنج در محل محور اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱- نمودار نیرو- تغییر شکل برای پوست گردو
Fig. 1. Force-Deformation graph for walnut green shell

طرح آزمایش‌ها

در این تحقیق هدف به دست آوردن ترکیب بهینه برای پوست‌کنی گردو با بیشترین کارایی و کمترین اتلاف و آسیب به گردو می‌باشد. به این منظور سرعت دوران صفحه برش در سه سرعت و عمق شیارهای برشی در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفتند. به عبارت دیگر سرعت دورانی در سه سطح ۲۱۸، ۲۷۵ و ۳۲۲ دور بر دقیقه و عمق شیار در سه سطح ۱/۵، ۳ و ۵ میلی‌متر بر کیفیت گردوهای پوست‌کنده شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که سطوح مربوط به سرعت با توجه به سرعت دورانی لازم برای برش قسمت سبز و چوب گردو در حالت ایستایی در نظر گرفته شده است. همچنین سطوح مربوط به عمق شیار نیز با توجه به حداکثر ضخامت پوست سبز در نظر گرفته شده است. کیفیت مطرح شده در این طرح شامل میزان پوست‌کنی با حداقل ترک یا شکست محصول است. آزمایش‌ها در سه تکرار برای هر تیمار انجام شدند. محصول گردوی استفاده شده برای ارزیابی سامانه از باغ‌های گردو شهرستان آذرشهر واقع در استان آذربایجان شرقی تهیه شد. برای حصول نتیجه مناسب گردوها از یک واریته و یک باغ با شرایط اقلیمی و دوره آبیاری یکسان انتخاب گردیدند.

تغییر شکل یا کرنش (ϵ) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Sharifian et al., 2008).

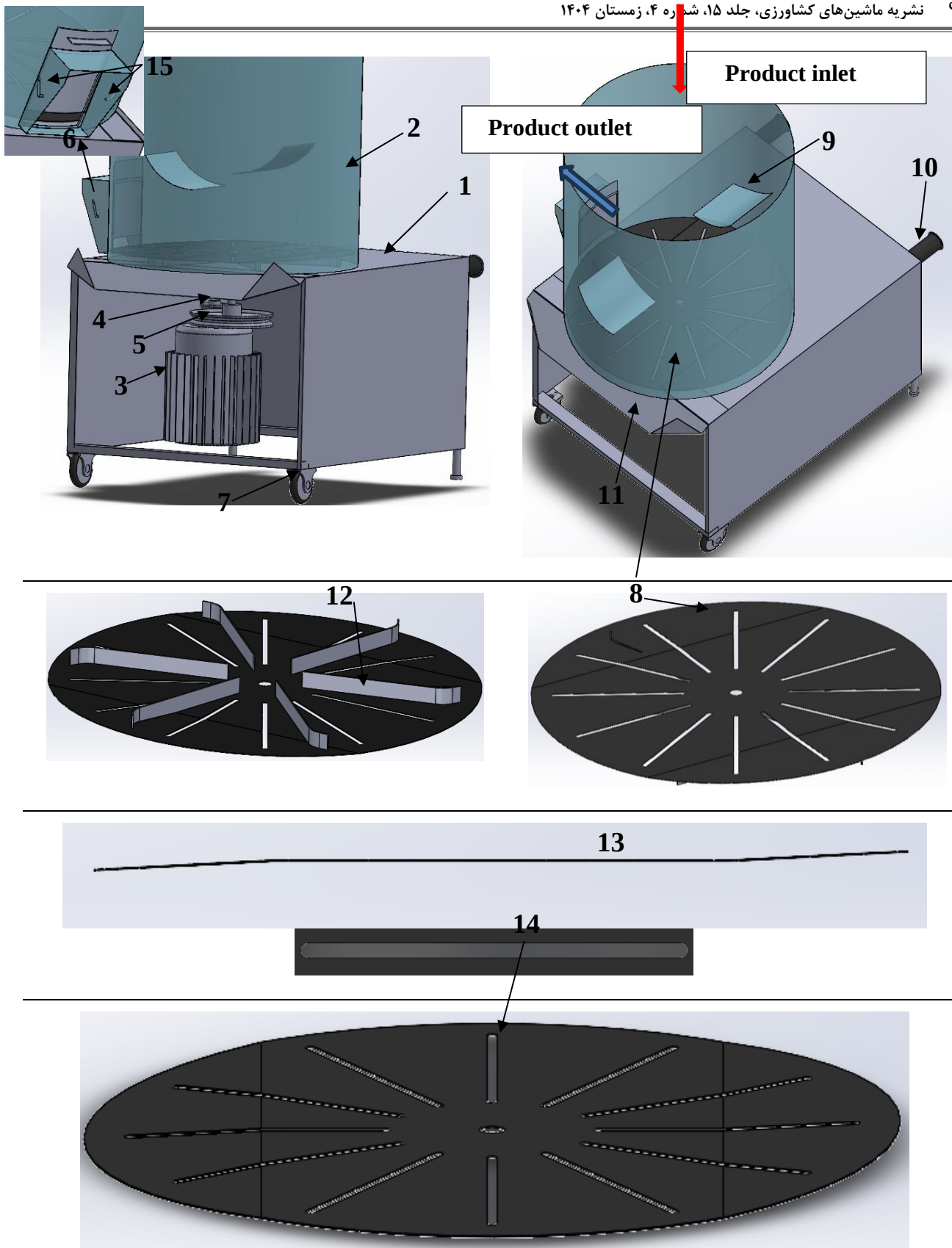
$$\epsilon = \frac{L_u - L_f}{L_u} \quad (2)$$

که در این رابطه L_u و L_f به ترتیب ابعاد گردو بدون تغییر شکل و تغییر شکل ایجاد شده در جهت محور فشاری می‌باشد. تغییر شکل مورد نیاز برای پارگی (کشش زیاد) گردو بین ۱/۸۰ تا ۳/۱۵ میلی‌متر متغیر است.

توان مورد نیاز نیز به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Khazaei, Rasekh, & Borghei, 2002; Sharifian et al., 2008).

$$P = \frac{E \times V}{60000 \times \Delta l} \quad (3)$$

که در این رابطه، P توان مورد نیاز بر حسب وات، E انرژی جذب شده بر حسب مگاژول، V سرعت بارگذاری بر حسب میلی‌متر بر دقیقه و Δl تغییر شکل تا پارگی اولیه پوست بر حسب میلی‌متر است. در پژوهش حاضر حداکثر توان ۱/۹۸ وات و سرعت بارگذاری ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه محاسبه شد.



شکل ۲- اجزای اصلی سامانه پوست‌کن گردو طراحی و ساخته شده برای تحقیق شامل: ۱- شاسی دستگاه، ۲- محفظه قرارگیری محصول، ۳-

الکتروموتور، ۴- پولی محرک، ۵- پولی متحرک، ۶- دریچه خروجی محصول، ۷- چرخ‌های انتقال دستگاه، ۸- صفحه برش گردان، ۹- پاروی فشار، ۱۰- دستگیره انتقال، ۱۱- خروجی پوست گردو، ۱۲- پاروک زیرین (برای پوست)، ۱۳- انحنای صفحه، ۱۴- شیار صفحه و ۱۵- قلاب‌های کیسه

Fig. 2. The main components of the walnut peeling system designed and built for research include: 1- Machine chassis, 2- Product container, 3- Electro-motor, 4- Driving pulley, 5- Moving pulley, 6- Product outlet valve, 7- Wheels for moving the system, 8- Rotary cutting disk, 9- Pressure paddle, 10- Transferring handle, 11- Walnut peels outlet, 12- Lower paddle (for peels), 13- Disk curvature, 14- Disk grooves, and 15- Bag hookers

رطوبت فعال سطحی گردوها تعیین گردید. برای محاسبه میزان پودر آبیگر، ابتدا گردوهای پوست‌گیری‌شده، بدون آبیگر از سامانه خارج شده و وزن می‌شوند و سپس در پودر آبیگر مستغرق شده و سپس دوباره جمع‌آوری شده و دوباره وزن می‌شوند. اختلاف دو وزن نشان‌دهنده‌ی میزان پودر آبیگر مورد نیاز برای گردو جهت کاهش رطوبت محصول و جلوگیری از نفوذ آب به درون گردو هاست. پس از پایان یافتن مرحله پوست‌گیری، دریچه تخلیه دستگاه باز شده و محصول مورد نظر (گردو) از مخزن خارج می‌شود. محصول روی یک سطح صاف و مشخص ریخته می‌شود و گردوهای آسیب‌دیده، پوست‌گیری‌نشده و کمتر پوست‌گیری‌شده جدا می‌شوند و در مرحله بعد وزن می‌شوند. ترتیب مراحل انجام‌شده برای پوست‌گیری گردو در شکل ۳ نشان داده شده است.

توضیح روند کارکرد سامانه

در این سامانه ابتدا محصول از باغ مورد نظر تهیه‌شده و در کیسه‌های هم وزن (به $1/2 \pm 40$ کیلوگرم) نگهداری شدند. همان‌طور که اشاره شد، ژنوتیپ استفاده‌شده برای این تحقیق ژنوتیپ فرنور برای تمام آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شد. پس از وزن‌کشی برای هر آزمایش یک کیسه را در نظر گرفته و با روشن شدن دستگاه گردوها در داخل محفظه ریخته شدند. مدت زمان پوست‌گیری برای هر آزمایش ۲ دقیقه لحاظ گردید. این زمان براساس میانگین کمترین و بیشترین سرعت پوست‌گیری و با توجه به نظر کشاورز مبنی بر مطلوب بودن پوست‌گیری در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از نفوذ مایع به درون گردوها، پس از ۱ دقیقه عملیات پاشش پودر آبیگر (پودر اره) به روی محصول صورت گرفت. برای هر آزمایش ۷۵۰ گرم پودر آبیگر لحاظ گردید که این مقدار بر اساس



برداشت و جمع‌آوری محصول
Harvest and collecting product



شروع به کار دستگاه
Machine starting



ریختن محصول در محفظه
Pouring the product into the container



فرآیند آبیگری با استفاده از پودر
Dehydration process using powder



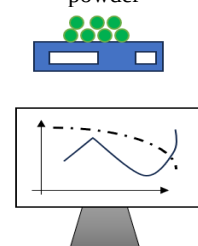
خروج پوست سبز از سامانه
Green husk outlet



پایان پوست‌گیری و پخش بر روی سطح
Finish peeling and spreading on the surface



جدایش گردوهای پوست‌گیری‌نشده و آسیب‌دیده
Separation of unpeeled and damaged walnuts



وزن‌کشی و تحلیل داده‌ها
Weighting and data analysis

شکل ۳- مراحل انجام پژوهش برای پوست‌گیری، پوست سبز گردو در سرعت دورانی و عمق شیارهای مختلف
Fig. 3. Research steps for peeling of walnut at various rotational speeds and groove depths

دیگر از عواملی که در پوست‌کندن محصول مورد توجه است، میزان شکستگی و یا آسیب‌دیدگی گردو (شامل هرگونه ترک و شکستگی) می‌باشد (Montero *et al.*, 2009). این عامل در گردو بسیار مورد توجه است. زیرا در مورد محصولاتی مانند بادام، فندق و پسته، با نفوذ آب پوسته به درون محصول اتفاق خاصی به‌وجود نمی‌آید. در صورتی که با نفوذ آب پوست سبز گردو به دلیل وجود ترکیبات فنولی و اسیدی (Latifi *et al.*, 2021) باعث سیاه شدن رنگ مغز گردو خواهد شد، که به شدت باعث کاهش بازاریابی محصول خواهد شد. علاوه بر آن بر اثر وجود ترک حشرات و عوامل قارچی سریع‌تر به درون مغز راه پیدا کرده و باعث آلودگی محصول می‌شود (Wei *et al.*, 2020).

پارامترهای اندازه‌گیری‌شده

در هر آزمایش، وزن محصول به‌دست‌آمده، وزن محصولی که پوست‌کنده شده و وزن محصول آسیب‌دیده به‌دست می‌آید. مجموع موارد اشاره‌شده با وزن محصول ریخته‌شده در محفظه برابر خواهد بود. گردوهای خارج‌شده از قسمت خروجی پوسته سبز نیز به‌عنوان محصول آسیب‌دیده در نظر گرفته شد. بنابراین با استفاده از رابطه (۴)، درصد گردوی پوست‌کنده‌شده سالم به‌دست آمد (Hussain *et al.*, 2016):

$$\eta = \frac{H}{H + R + L} \times 100 \quad (4)$$

در رابطه (۴)، η بیانگر درصد گردو پوست‌کنده‌شده، H وزن محصول پوست‌کنده‌شده، R وزن گردوهای که پوست آن‌ها یا کنده نشده و یا کمتر کنده شده و L وزن محصول آسیب‌دیده است. یکی



قسمتی از مغز گردو که در اثر نفوذ آب گردو سیاه شده است.
A part of the walnut kernel that has turned black due to the penetration of walnut shell juice.



شکل ۴- گردو با مغز سالم و با مغز آسیب‌دیده در اثر نفوذ آب گردو به درون مغز (هر دو با دستگاه پوست‌کنی شده‌اند)
Fig. 4. Walnut with a healthy nut and with a damaged nut due to the penetration of walnut shell juice to the inside section (both were peeled with a machine)

تعیین ترکیب بهینه

برای تعیین ترکیب بهینه از روش سطح پاسخ استفاده گردید. در این روش سعی می‌شود تا با استفاده از یک طرح آزمایش مناسب، راهی برای تخمین برهمکنش‌ها، اثرات درجه دوم و حتی شکل موضعی سطح پاسخ مورد مطالعه یافته شود. به عبارتی دیگر؛ روش سطح پاسخ به طراحی یک آزمایش تجربی می‌پردازد که تأثیرات چندگانه متغیرها را مدل‌سازی می‌نماید. با استفاده از این روش، تعداد آزمایش‌ها تا حدی کاهش یافته و بسیاری از محدودیت‌هایی که در روش‌های دیگر بهینه‌سازی اعمال می‌شود، برطرف می‌شود. در این تحقیق برای تعیین ترکیب مناسب، از قسمت بهینه‌سازی نرم‌افزار Design Expert 12 استفاده شده است. در این روش با تعیین تعداد متغیرها و حدود حداقل‌ها و حداکثرها برای پارامترها، ماتریس مناسب برای آزمایش به‌صورت کدبندی‌شده در محدوده ۱- تا ۱۰ طراحی

رابطه (۵) برای محاسبه میزان آسیب به گردو در نظر گرفته می‌شود:

$$\eta' = \frac{L}{H + R + L} \times 100 \quad (5)$$

η' بیانگر درصد گردوی تلف‌شده پس از خارج شدن از سامانه (شامل هرگونه ترک و شکستگی) است (Zhou, He, Karkee, & Zhang, 2014).

برای بررسی اثر فاکتورهای اشاره‌شده بر نحوه عملکرد دستگاه پوست‌کن به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با استفاده از نرم‌افزارهای (SAS V 9.2.1) و Matlab 2018 انجام شد. علاوه بر آن برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید.

می‌شود. سطوح کدبندی شده برای متغیرهای آزمایش در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲- سطوح کدبندی شده متغیرهای آزمایش با در نظر گرفتن مقادیر واقعی
Table 2- The coded levels of the test variables, considering the actual values

متغیر Variable	سطح ۱ Level 1	سطح ۰ Level 0	سطح -۱ Level -1
عمق شیار برش Plate cutting depth (mm)	5	3	1.5
سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	322	275	218

تأثیرات نقطه میانی در آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند: سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم، تغییرات آب و هوا و منابع (Mirzaei, Salami, Samimi-Akhijahani, & Zareei, 2023). نتایج مرحله دوم و سوم به عنوان مبنایی برای مرحله «تفسیر» خلاصه می‌شود. پس از تعریف هدف و محدوده، نتیجه‌گیری، پیشنهادات و تصمیمات مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار تأثیرات زیست‌محیطی پوست‌کن گردو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

نتیجه بررسی خواص مکانیکی

آزمایش‌های بیومکانیکی نشان داد که جهت نیروی وارد شده به گردو بر کرنش پارگی تأثیری ندارد. بنابراین نیازی به کنترل جهت نیروی اعمالی نبود و این امر به طرز قابل توجهی طراحی ماشین پوست‌کن گردو را ساده کرد. حداکثر نیرو، انرژی و توان برای پارگی پوست گردو به ترتیب ۷۹۸ نیوتن، ۹۵۰ مگاژول و ۱/۹۸ وات اندازه‌گیری شد. این مقادیر برای طراحی ماشین مورد استفاده قرار گرفت. سرعت نیروی اعمالی برای ایجاد ترک ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه بود. پوست گردو در این سرعت بیشترین کرنش (انعطاف‌پذیری) را داشت. هرچه انعطاف‌پذیری بیشتر باشد، میوه‌های آسیب‌دیده در فرآیند ترک‌خوردگی کمتر است (Sharifian et al., 2008).

ابعاد گردو تأثیر قابل توجهی بر نیروی گسیختگی، انرژی و توان مورد نیاز برای پارگی پوست گردو نداشت. بنابراین این امر باعث شد طراحی دستگاه مستقل از ابعاد گردو باشد. با این حال، کرنش پارگی به طور معنی‌داری تحت تأثیر اندازه گردو قرار گرفت. اما از طرف دیگر به دلیل تغییر شکل گردو طراحی سامانه با توجه به میزان انعطاف‌پذیری میوه گردو صورت گرفت. میزان کرنش پارگی به مقدار ۰/۰۷ با سرعت ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد. با در نظر گرفتن حداکثر و حداقل ابعاد گردو (۲۵-۴۵ میلی‌متر)، دامنه تغییر شکل ۱/۸۰ تا ۳/۱۵ میلی‌متر محاسبه شده است.

ارزیابی چرخه زیست

ارزیابی چرخه عمر یک روش نوآورانه است که به طور گسترده برای تعیین کمیت نیازهای انرژی و تأثیرات بالقوه زیست‌محیطی یک محصول یا سیستم تولید در طول چرخه عمر آن استفاده می‌شود. در این روش از فرآیند «گهواره تا گور» برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مهم بر تحولات زیست‌محیطی استفاده می‌شود. این روش شامل تجزیه و تحلیل تمام مراحل استخراج منابع، تولید مواد، تولید قطعات و مدیریت مصرف محصولات به شکل زباله، بازیافت یا دفع نهایی است (Guinee, 2002). مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها بر اساس استاندارد (International Organization for standardization) ISO تدوین شده است که مطالعات ارزیابی چرخه‌زیست (Life Cycle Assessment) LCA باید بر اساس آن انجام شود. بنابراین، تمام مدل‌های توسعه‌یافته بر اساس دستورالعمل‌های ISO 14040 ساخته شده‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر نیز بر اساس همین رهنمودها است. طبق استاندارد ISO 14040، هر پروژه LCA شامل چهار مرحله اساسی است که در چهار قسمت اشاره شده است: ۱. تعریف هدف و محدوده، ۲. تجزیه و تحلیل موجودی، ۳. ارزیابی گروه‌های تأثیر (LCIA) و ۴. تفسیر نتایج.

در این تحقیق تأثیرات مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها بر انسان و طبیعت مورد ارزیابی قرار گرفتند. به عبارت دیگر، در (Life Cycle Assessment) LCIA Impact Assessment از ورودی‌های مرحله دوم برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی استفاده گردید و برای این منظور روش ارزیابی IMPACT 2002+ در نرم‌افزار SIMAPRO نسخه ۹ مورد استفاده قرار گرفت. این روش توسعه‌یافته، توسط موسسه فناوری فدرال سوئیس، یک رویکرد ترکیبی شامل چندین گروه با اثر اصلی و گروه‌های آسیب، از جمله ۱۵ نقطه میانی و چهار گروه تأثیر نقطه پایانی تأثیرات نقطه میانی شامل تشعشعات یونیزه، سرطان‌زا، غیرسرطان‌زا، تخریب لایه ازن، مواد آلی تنفسی، سمیت زیست‌محیطی آب، سمیت زیست‌محیطی، اسید/نوتری، اشغال زمین، اسیدی شدن آب، اوتروفیکاسیون آب، گرمایش جهانی، انرژی غیرقابل استخراج معدنی است. چهار دسته اصلی نیز وجود دارد که

پوست کندن گردو در سطح یک درصد تأثیر می‌گذارد. به بیان دیگر سرعت‌های دورانی مختلف معنی‌داری در سطح یک درصد بر عملکرد دستگاه داشته و عملکرد در هر سه سطح متأثر از سرعت بوده است. همچنین اثر تغییرات عمق شیار صفحه برش بر میزان عملکرد دستگاه و کاهش تلفات گردوها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. تأثیر این عامل بر میزان آسیب به گردو در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد، در این تحقیق هدف افزایش میزان پوست‌گیری پوست سبز گردو با بیشترین کارایی و کمترین آسیب فیزیکی به محصول است. پس از داده‌گیری تحلیل بر روی محصول صورت گرفته و نتایج آن در این قسمت نمایش داده می‌شود. جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس را برای تأثیر عمق شیار و سرعت چرخش بر درصد پوست‌گیری نشان می‌دهد. یافته‌ها حاکی از آن است که تغییرات عمق شیار و سرعت موتور به‌طور قابل‌توجهی بر

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر عمق برش و سرعت دورانی صفحه بر درصد پوست‌کنی گردو

Table 3- The results of analysis of variance of the effect of cutting depth and rotational speed of the plate on the percentage of walnut peeling

منابع تغییرات Variation sources	درجه آزادی Degree of Freedom	F	آسیب Damage (%)	میزان پوست‌گیری Peeling amount (%)	
			میانگین مربعات (MS)	F	میانگین مربعات (MS)
			Mean squares		Mean squares
عمق شیار برش Cutting depth (mm)	2	17.14**	69.72	154.16*	295.32
سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	2	5.21*	29.04	49.26**	105.11
ارتفاع*سرعت Depth *Speed	4	128.29**	4.01	11.26**	1.87
خطا Error	18	-	0.029	-	0.179

**معنی‌دار در سطح یک درصد و * معنی‌دار در سطح ۵ درصد

**Significant at the level of 1%, and *Significant at the level of 5%

دوران و ماندن در دستگاه بایستی افزایش یابد. از طرف دیگر با افزایش سرعت دورانی درصد پوست‌کنی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش آن از ۲۱۸ به ۲۷۵ دور بر دقیقه و از ۲۷۵ تا ۳۲۲ دور بر دقیقه، میزان پوست‌گیری گردو به ترتیب ۱۲/۷۲ و ۹/۶۵ درصد افزایش یافت. با افزایش سرعت دورانی، از ۲۱۸ به ۲۷۵ دور بر دقیقه، مومنتوم و ضربه خطی در اثر سرعت واردشده افزایش یافته میزان جدایش پوسته سبز نیز افزایش می‌یابد. با کاهش سرعت دورانی ضربه کاهش یافته و پوست سبز بیشتری روی محصول باقی می‌ماند.

جدول ۴ نتایج مقایسه میانگین میزان گردوهای پوست‌کنده‌شده سالم در عمق شیار و سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامتر ارتفاع و سرعت دورانی الکتروموتور دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد است. با افزایش عمق شیار از ۱/۵ به ۳ میلی‌متر و از ۳ به ۵ میلی‌متر، در میزان گردوهای سالم پوست‌کنده‌شده به میزان ۶/۹۹ و ۵/۱۲ درصد افزایش یافت. با کاهش ارتفاع شیار، میزان برشی که از سطح سبز گردو برداشته می‌شود نیز کاهش می‌یابد و بیشتر به‌صورت سایشی عمل پوست‌کنی را انجام می‌دهد. در این حالت برای پوست‌کنی مناسب، مدت زمان

جدول ۴- میانگین درصد محصول پوست‌کنده‌شده مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری‌شده (عمق شیار صفحه برش و سرعت دورانی)

Table 4- The average percentage of the peeled walnut product related to the measured variables (groove depth of the cutting plate and rotational speed)

منبع Source	عمق شیار صفحه برش Groove depth (mm)			سرعت دورانی Rotational speed (rpm)		
	1.5	3	5	218	275	322
درصد محصول پوست‌کنده‌شده Percentage of peeled product	85.42 ^a	91.18 ^b	95.31 ^c	86.54 ^a	89.85 ^a	92.69 ^b

آن در عمق برش ۱/۵ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۱۸ دور بر دقیقه با میانگین ۸۱/۴۳ درصد اتفاق می‌افتد. میزان بازده یک پوست‌کن گردو با شیارهای موجود در جداره به میزان ۸۲٪ گزارش شده است (Makarichian & Chegini, 2013). همچنین در تحقیق دیگری که از یک موتور گازوئیلی برای انرژی‌دهی استفاده شده بود، برای تیمارهای مختلف درصد پوست‌کنی از ۷۱/۶٪ تا ۹۸/۲٪ بر اساس وزن پوست کنده‌شده از محصول متغیر بود (Karimi et al., 2008).

اثر متقابل دو عامل سرعت دورانی و عمق شیار برش نیز در میزان محصول پوست‌کنده‌شده در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). در جدول ۵، نیز میانگین اثر متقابل سرعت دورانی و عمق شیار برش نشان داده شده است. با افزایش عمق شیار برش، میزان محصول پوست‌کنده‌شده افزایش می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش سرعت دورانی نیز میزان محصول پوست‌کنده‌شده، افزایش می‌یابد. بیشترین میزان محصول پوست‌کنده‌شده، در عمق برش ۵ میلی‌متر و سرعت دورانی ۳۲۲ دور بر دقیقه، با میانگین ۹۵/۷۱ درصد و کمترین

جدول ۵- مقایسه میانگین درصد محصول پوست‌کنده‌شده در اثر متقابل عمق شیار صفحه و سرعت دورانی آن

Table 5- Comparison of the average percentage of peeled product with the interaction between the depth of the plate groove and the rotational speed

منبع Source	میانگین درصد گردوهای پوست کنده شده Mean percentage of peeled walnuts (%)		
	سرعت دورانی صفحه Rotational speed (rpm)		
	عمق شیار صفحه برش Groove depth (mm)	218	275
1.5	81.43 ^h	83.95 ^g	85.05 ^f
3	92.06 ^e	88.16 ^d	92.06 ^c
5	90.15 ^e	93.24 ^b	95.71 ^a

میزان ۲۵/۶۲ درصد بود. میزان آسیب به محصول با تغییر عمق از ۳ به ۵ میلی‌متر معنی‌دار نبود. با افزایش سرعت دورانی از ۲۱۸ به ۳۲۲ دور بر دقیقه، میزان درصد تلفات گردوهای پوست‌کنده‌شده افزایش ۱/۴۱ برابری داشته است. با افزایش سرعت دورانی، با آن‌که میزان محصول پوست‌کنده‌شده افزایش می‌یابد، اما در اثر برخورد ضربه‌ای به پوست سبز و سپس پوست چوبی افزایش یافته و متعاقباً باعث افزایش تلفات و آسیب به محصول می‌گردد.

در جدول ۶ نتایج آنالیز داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن برای میانگین درصد آسیب به گردو در عمق برش و سرعت‌های دورانی مختلف نشان داده شده است. با توجه به جدول ۶، عمق شیار برش و سرعت‌های دوران مختلف دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال به‌ترتیب یک و پنج درصد هستند. با افزایش عمق صفحه برش، از ۳ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر، میزان شکستگی به میزان ۷۲/۲۵ درصد بیشتر بود. این میزان برای تغییر عمق از ۱/۵ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر به

جدول ۶- میانگین آسیب محصول مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری شده (و عمق شیار و سرعت دورانی)

Table 6- The average damage of product related to the measured variables (groove depth and rotational speed)

منبع Source	عمق شیار صفحه برش Groove depth (mm)			سرعت دورانی Rotational speed (rpm)		
	1.5	3	5	218	275	322
درصد تلفات Damage percentage	2.46 ^a	3.075 ^c	5.29 ^e	4.05 ^b	4.35 ^b	6.24 ^d

سرعت دورانی نشان می‌دهد که هرچه عمق شیار صفحه افزایش می‌یابد، میزان تلفات و آسیب‌دیدگی محصول نیز افزایش می‌یابد. بیشترین میزان تلفات گردو در عمق شیار ۵ میلی‌متر و سرعت دورانی ۳۲۲ دور بر دقیقه با میانگین ۶/۸۳ و کمترین آن در عمق ۱/۵ میلی‌متر با سرعت دورانی ۲۱۸ دور بر دقیقه با میانگین ۱/۹۲ درصد اتفاق می‌افتد. ترکیب‌های دیگر در گروه‌های بعدی قرار می‌گیرند که

میزان آسیب‌دیدگی محصول از نظر کشاورز بسیار مورد توجه است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با ترک، شکستگی و یا کنده شدن حتی قسمت جزئی از گردو، کیفیت محصول به شدت افت نموده و علاوه بر نفوذ مایع پوست گردو به درون آن، در بلندمدت باعث می‌شود حشرات و قارچ‌ها رشد کرده و بازارپسندی محصول به شدت افت کند. نتایج مقایسه میانگین‌های اثر متقابل عمق شیار صفحه و

در جدول ۷ نشان داده شده است. در تحقیقات مشابه میزان آسیب‌دیدگی به گردوهای تحت پوست‌کنی از ۰/۷٪ و ۲/۴٪ در تیمارهای مختلف به‌دست آمد (Karimi et al., 2008).

جدول ۷- مقایسه میانگین آسیب پوست‌کنی گردو در اثر متقابل عمق شیار و سرعت دورانی صفحه برش

Table 7- Comparison of the average walnut peeling damage due to the mutual effect of groove depth and rotational speed of the cutting blade

منبع Source	میانگین آسیب به گردوهای پوست‌کنده‌شده Mean percentage of damaged peeled walnuts (%)		
	سرعت دورانی صفحه Rotational speed (rpm)		
	عمق شیار صفحه برش Groove depth (mm)	218	275
1.5	1.92 ^a	2.04 ^a	3.05 ^b
3	4.07 ^c	4.15 ^c	4.62 ^d
5	5.64 ^e	6.17 ^f	6.83 ^f

شرط‌های بهینه‌سازی مطابق با جدول ۸ تعیین شد. مقادیر پارامترهای مذکور برای بیشینه کردن میزان عملکرد سامانه، کمینه‌کردن میزان محصول آسیب‌دیده و کاهش مدت زمان انجام عملیات پوست‌کنی در محدوده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها تعیین گردید. مقدار بهینه برای عمق برش ۳/۴ میلی‌متر با سرعت دورانی ۲۸۱ دور بر دقیقه با مطلوبیت ۹۵٪ به‌دست آمد. برای این تیمار مقادیر درصد پوست‌کنی، زمان آزمایش، محصول آسیب‌دیده به‌ترتیب ۹۳/۵ درصد، ۵۳ ثانیه و ۱/۷ درصد، محاسبه شد.

با توجه به بحث اقتصادی و این‌که زمان در این مرحله از برداشت گردو از مزرعه بسیار حایز اهمیت است، بنابراین عمق برش کم و سرعت‌های دورانی کم باعث اتلاف زمان پوست‌کنی و افزایش هزینه کارگری خواهد بود. چرا که در این حالت قسمت اعظمی از محصول پوست‌کنی نشده و دوباره بایستی در فرآیند پوست‌کنی وارد چرخه شود که این خود مستلزم صرف هزینه و وقت است. از طرف دیگر با افزایش عمق برش و سرعت دورانی بیشتر صفحه، باعث می‌شود، آسیب بیشتری به محصول رسیده و کیفیت محصول کاهش یابد. برای تعیین مقادیر بهینه برای عمق برش و سرعت دورانی، حد و

جدول ۸- شروط و محدوده بهینه‌سازی

Table 8- Limitations and ranges for optimization

شرط بهینه‌سازی Optimization condition	پارامتر Parameter	محدوده Data range
–	عمق برش Cutting depth (mm)	5 1.5
–	سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	322 218
بیشینه Maximize	درصد پوست‌کنی Peeling percentage (%)	95 80
کمینه Minimize	زمان انجام آزمایش Experiment duration (s)	72 40
کمینه Minimize	میزان محصول آسیب‌دیده Amount of the damaged product (%)	9.5 1

یک درصد معنی‌دار است. در محدوده‌های مورد اشاره، عمق ۵ و سرعت دورانی ۳۲۲ دور بر دقیقه بالاترین میزان عملکرد را حاصل نمود، اما با لحاظ نمودن درصد تلفات، عمق ۳ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۷۵ دور بر دقیقه برای عملکرد مطلوب پیشنهاد می‌شود. علاوه بر آن خروجی حاصل از بهینه‌سازی نشان داد بالاترین میزان

با توجه به تحلیل‌های انجام‌گرفته و نتایج آن، می‌توان چنین ابراز نمود که استفاده از ماشین پوست‌کن گردو، می‌تواند عمل پوست‌کنی را با عملکرد بیش از ۹۳ درصد و آسیب کمتر از ۲ درصد انجام دهد. در ارزیابی کلی کار دستگاه پوست‌کن، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد تأثیر عمق برش صفحه و سرعت دورانی بر پوست‌کنی گردو در سطح

به ترتیب ۸۵٪ و ۸۶٪ است که نشان‌دهنده پیشرفت در طراحی است. میزان آسیب به محصول در دستگاه طراحی شده تنها ۱/۸٪ است که به‌طور قابل‌توجهی کمتر از دیگر دستگاه‌هاست (آسیب ۵٪ تا ۱۰٪). این امر به حفظ کیفیت محصول و افزایش بازپسندی کمک می‌کند. دستگاه ساخته شده در این پژوهش با مصرف ۲/۵ کیلووات در ساعت از نظر انرژی بهینه‌ترین است. دستگاه‌های دیگر به‌ویژه سیستم‌های قفسی و انگشتی به دلیل استفاده از الکتروموتورهای بزرگ‌تر مصرف انرژی بیشتری دارند (۳/۵ تا ۴ کیلووات).

بهره‌وری در عمق برش ۳/۴ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۸۱ دور بر دقیقه حاصل می‌شود.

در جدول ۹، مقایسه دستگاه پوست‌کن ساخته‌شده با سه پوست‌کن مشابه نشان داده شده است. با تحلیل و مقایسه سامانه حاضر با سامانه‌های پیشین می‌توان دریافت، دستگاه طراحی‌شده با ظرفیت ۱۲۰۰ کیلوگرم در ساعت نسبت به دستگاه‌های دیگر عملکرد بهتری دارد. دستگاه سانتریفیوژ توری‌دار با ۹۰۰ کیلوگرم در ساعت نزدیک‌ترین ظرفیت را ارائه می‌دهد. بازدهی دستگاه طراحی‌شده (۹۳/۵٪) بالاتر از سایر دستگاه‌هاست. بازده دستگاه قفسی و انگشتی

جدول ۹- مقایسه دستگاه حاضر با سه پوست‌کن گردو

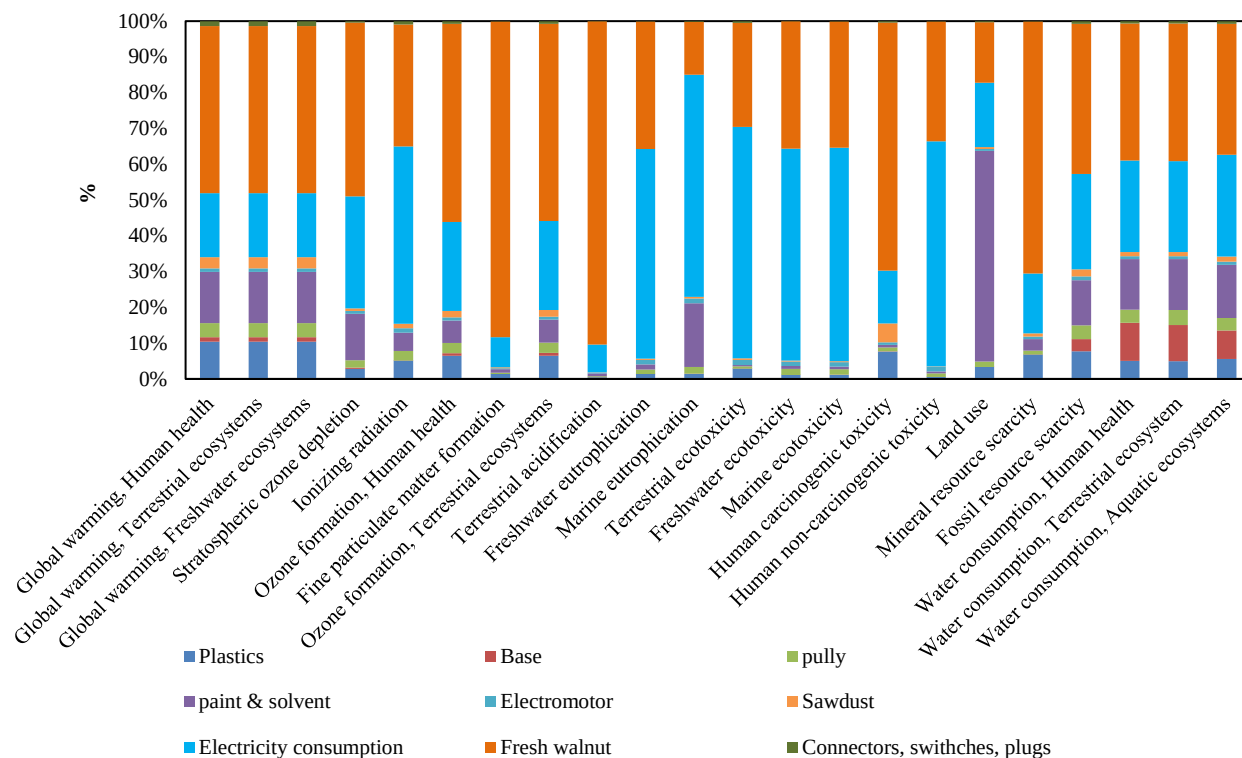
Table 9- Comparison of the present device with three walnut peelers

پارامتر Parameter	دستگاه سانتریفیوژ توری‌دار (Zhong et al., 2018) Centrifugal Net peeler	دستگاه قفسی (Karimi et al., 2008) Cage peeler	دستگاه انگشتی (Hussain et al., 2016) Finger peeler	دستگاه حاضر Present system
ظرفیت Capacity (kg h ⁻¹)	900	800	750	1200
بازدهی پوست‌کنی Peeling efficiency (%)	90	85	86	93.5
درصد آسیب Damage (%)	5	10	8	1.8
مصرف انرژی Energy consumption (kW)	3.2	3.5	4.0	2.5

مربوط به مرحله تولید گردو است که به فرآیند پوست‌کنی گردو مربوط نمی‌شود. بقیه نهاده‌ها تنها حدود یک درصد از مواد سرطان‌زا را تشکیل می‌دهند (Mao & Hua, 2012). به‌غیر از اشغال زمین و استخراج مواد معدنی، شاخص‌های دیگر شامل تخریب لایه اوزون، مواد آلی تنفسی، سمیت آبزیان، سمیت زمینی، اسیدی شدن زمین، اسیدی شدن آب، اوتروفیکاسیون آبزیان و انرژی‌های تجدیدناپذیر است. اثر مصرف برق بیشتر از تولید گردوی تازه و سایر نهاده‌ها بود.

نتایج ارزیابی چرخه زیست

شکل ۵ نتایج ارزیابی تأثیر چرخه حیات (LCIA) را بر حسب درصد برای پوست‌کن گردو نشان می‌دهد. جریان الکتریکی مصرف‌شده، ۶۲/۹ درصد بزرگ‌ترین سهم در رده اول قرار دارد. پس از آن همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، گردوی تازه در اکثر شاخص‌ها به‌جز گرم شدن کره زمین در فرآیند عمل‌آوری بیشترین تأثیر را بر آلودگی دارد. این بدان معناست که بخش عمده آلودگی

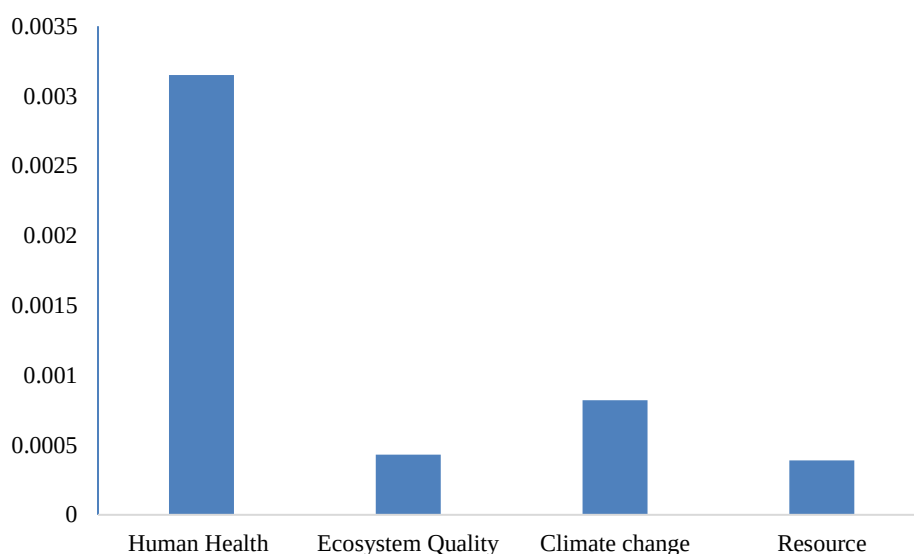


شکل ۵- سهم هر ورودی در نتایج ارزیابی تأثیر چرخه حیات (LCIA) پوست‌کن گردو بر حسب درصد

Fig. 5. The share of each input in the results of the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) of the walnut peeler, in percentage points

می‌باشد. گازهای گلخانه‌ای به‌طور عمده شامل گازهای CO_2 و NO_x و SO_x که با پراکندگی در فضا علاوه بر آثار زیست‌محیطی در بلندمدت باعث تغییرات اقلیمی می‌گردد. کیفیت اکوسیستم و منابع در رده‌های بعدی از تأثیر آلودگی قرار می‌گیرند. با بهینه نمودن سامانه، کاهش وزن آن و استفاده از انرژی پاک خورشیدی به جای انرژی الکتریکی می‌توان تا حد زیادی از تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از استفاده از جریان الکتریکی و منبع مورد نیاز کاست.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج مقایسه شاخص‌های LCIA نشان داده شده است. با توجه به نمودار شاخص مربوط به سلامت انسانی نسبت به بقیه شاخص‌ها، در بالاترین سطح قرار دارد. این امر به دلیل استفاده از جریان الکتریکی، استفاده از پروفیل و ورق آهن و سیم مسی درون الکتروموتور می‌باشد، که برای استحصال این مواد نیاز به پروسه‌هایی نظیر خالص‌سازی و پالایش در رده بعدی تغییرات اقلیمی قرار دارد که بیشترین تأثیر در این عامل در اثر آزاد شدن گازهای گلخانه‌ای ناشی از محصول و اجزای سامانه



شکل ۶- مقایسه شاخص‌های اصلی نرمال شده LCIA برای دستگاه پوست کن گردو

Fig. 6. Comparison of the main normalized LCIA indices for the walnut peeling machine

نتیجه گیری

با استفاده از دستگاه پوست کنی گردو، می توان عمل پوست کنی گردو را با کارایی بالای ۹۴ درصد و آسیب کمتر از ۵ درصد انجام داد. در ارزیابی کلی عملکرد دستگاه چنین استنباط شد که تأثیر عمق شیارهای برش و سرعت دورانی بر پوست کنی گردو در سطح یک درصد معنی دار است. در محدوده های مورد اشاره، عمق برش ۳ میلی متر و سرعت دورانی ۲۷۵ دور بر دقیقه مناسب ترین عملکرد را از نظر پوست کنی و آسیب به گردوها داشت. علاوه بر آن خروجی حاصل از بهینه سازی نشان داد بالاترین میزان بهره‌وری در عمق ۳/۴ میلی متر و سرعت دورانی ۲۸۱ دور بر دقیقه حاصل می شود. نتایج ارزیابی چرخه زیست نشان داد، شاخص مربوط به سلامت انسان به دلیل استفاده از جریان الکتریکی (جهت توان دهی سامانه)، پروفیل آهن (در شاسی و مخزن سامانه)، سیم مسی در آرمیچر الکتروموتور بیشترین مقدار را دارد. بهینه نمودن سامانه و استفاده از انرژی های

پاک می تواند به بهبود کارایی سامانه و کاهش تأثیرات زیست محیطی کمک کند.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت های مالی و معنوی دانشگاه کردستان و شرکت خودباوران صنعت آذرشهر تشکر و سپاسگزاری می نمایند.

مشارکت نویسندگان

هادی صمیمی اخيجهانی: مفهوم سازی، تحقیق، جذب سرمایه، تحلیل رسمی، نرم افزار، مرور و ویرایش.
محمد صالح برقی جهرمی: مفهوم سازی، روش شناسی، مصور سازی، تحلیل داده ها، نگارش، پیش نویس اصلی، مرور و نگارش.

References

- Barton, R. P. (1956). Nut Hulling Machine. *United States patent*, 2,747.632.
- Cacho, M. (1978). Nut Huller or Sheller. *United States patent*, Pp, 868-320.
- Ebrahimi, A., Sharifi, M., Rafiei, Sh., & Fatahi, M. (2009) Determination of Physical and Morphological Properties in Four Genotypes of Walnut. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 40(1). 63-70.
- FAO. (2022). Statistics of Quantity of walnut Production in Iran. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Ghafari, A., Chegini, G. R., Khazaei, J., & Vahdati, K. (2011) Design, Construction and Performance Evaluation of the Walnut Cracking Machine. *International Journal of Nuts and Related Science*, 2(1), 11-16. <https://doi.org/10.22034/jon.2011.515757>
- Gachpazian, A., Azadmard Damirchi, S., Hesari, J., Peighambaroust, S. H., Nemati, M., Alijani, S., & Ahmadi, E. (2013). Production of Yoghurt Fordified with Walnut Powder. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 9(4), 66-73. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v9i4.3136>
- Ghasemi, M., Arzani, K., & Hassani, D. (2012). Evaluation and identification of walnut (*Juglans regia* L.) genotypes in Markazi province of Iran. *Crop Breeding Journal*, 2(2), 119-124.

- <https://doi.org/10.22092/cbj.2012.100429>
8. Güner, M. E. T. İ. N., Dursun, E. R. G. İ. N., & Dursun, I. G. (2003). Mechanical behavior of hazelnut under compression loading. *Biosystems Engineering*, 85(4), 485-491. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00089-8)
 9. Guinee, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(5), 311-313.
 10. Karimi, N., Minaei, S., Hasani, D., & Eyvani, A. (2008). Parameters involved in walnut peeling process. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 4(4), 389-393.
 11. Hussain, S. Z., Ahad, T., Rather, A. H., & Naik, H. R. (2016). Development of walnut dehulling machine and assessment of its performance using Ethephon and Tween-80 as pre-treatments for hull loosening. *Journal of Food Science Technology*, 53, 2835-2843. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2261-5>
 12. Khazaei, J., Rasekh, M., & Borghei, A. M. (2002). Physical and Mechanical Properties of Almond and its Kernel related to cracking and peeling. In 2002 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.10847>
 13. Koyuncu, M. A., Ekinci, K. A. M. İ. L., & Savran, E. (2004). Cracking characteristics of walnut. *Biosystems Engineering*, 87(3), 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.001>
 14. Latifi, Y., Chaharlang, M., Daneshniya, M., Khaki Arani, S., Barzаноoni, M., & Boghori, P. (2021). Antioxidant and antimicrobial properties of methanolic extract of green walnut skin. *FSCT*, 17(108), 127-136. <https://doi.org/10.52547/fsct.17.108.127>
 15. Jingtao, Z., Pengxu, S., Xiaoxue, W., & Ye, F. (2016). Design of the mechanism principle of the new green walnut peeling machine. *Food and Machinery*, 32(8), 20. <https://doi.org/10.13652/j.issn.1003-5788.2016.08.020>
 16. Mao, X., & Hua, Y. (2012). Composition, Structure and Functional Properties of Protein Concentrates and Isolates Produced from Walnut (*Juglans regia* L.). *International Journal of Molecular Science*, 13, 1561-1581. <https://doi.org/10.3390/ijms13021561>
 17. Meriam, J. L., Kraige, L. G., & Bolton, J. N. (2018). *Engineering Mechanics: Dynamic*. Published by Wiley, New York. 9th edition.
 18. Mirzaei, P., Salami, P., Samimi-Akhijahani, H., & Zareei, S. (2023). Life cycle assessment, energy and exergy analysis in an indirect cabinet solar dryer equipped with phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 61, 106760. <https://doi-org.access.semantak.com/10.1016/j.est.2023.106760>
 19. Montero, C. R. S., Schwarz, L. L., Dos, L. C., Santos, C. S., Andreazza, C. P., & Kechinski, R. J. (2009). Postharvest mechanical damage affects fruit quality of 'Montenegrina' and 'Rainha' tangerines. *Brazilian Agricultural Research*, 44, 1636-1640. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200011>
 20. Rastegar, S., Shojaei, A., & Tajeddin, B. (2019). The effect of packaging method on the physical, chemical, and organoleptic characteristics of walnut kernel during its storage. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(5), 699-713. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v14i5.68814>
 21. Makarichian, A., & Chegini, G.R. (2013). Design and Construction a Walnut peeler. *International Journal of Nuts and Related Science*, 5, 19-29. <https://doi.org/10.22034/JON.2014.515692>
 22. McFarland, J., & Saunders, E. (1977). Pistachio huller. *United States patent*. 587, 918.
 23. Rebufa, C., Artaud, J., & Dréau, Y. L. (2022). Walnut (*Juglans regia* L.) oil chemical composition depending on variety, locality, extraction process and storage conditions: A comprehensive review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 110, 104534. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104534>
 24. Ramos, D. (1998). *Walnut Production Manual*. University of California. 328 pp.
 25. Sharifian, F., Rahmani Didar, A., & Haddad Derafshi, M. (2008). Design of a walnut cracking machine based on acquired mechanical properties. In V: 10th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture. Antalya, Turkey. (pp. 826-831).
 26. Trujillo, G. (2003). Nut Hulling tub Agitating fingers. *United States patent*, 10, 424, 241.
 27. Wei, L., Fu, H., Lin, M., Dang, H., Zhao, Y., & Y. Xu, B. (2020). Zhang, Identification of dominant fungal contamination of walnut in Northwestern China and effects of storage conditions on walnut kernels. *Scientia Horticulture*, 264, 109141. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109141>
 28. Younesi Alamooti, Y., & Mahmoodi, S. (2015). Evaluation of a new multipurpose centrifugal mechanism for nut process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.09.002>
 29. Zhou, J., He, L., Karkee, M., & Zhang, Q. (2014). Effect of excitation position of a handheld shaker on fruit removal efficiency and damage in mechanical harvesting of sweet cherry. *Biosystems Engineering*, 125, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.016>
 30. Zhong-qiang, Y., Kuan-bo, C., Sheng-kun, Y., Li-na, S., Ba-siti, A., Zhong-xin, L., & Qing-hui, W. (2018). Design and experiment of centrifugal-mesh green walnut peeling machine. *Science and Technology of Food Industry*, 39(8), 195-198. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.08.035>
 31. Ziaolhagh, S. H., & Zare, S. (2022). Effect of ultrasound on the extraction of phenolic compounds and antioxidant activity of different parts of walnut fruit. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*,

18(3), 85-98. <https://doi.org/10.22067/IFSTRJ.2021.72602.1114>