



Research Paper

## Linear regression model of experimental and modal frequencies of apple fruit in the impact test

Ebrahim Chavoshi<sup>1</sup>, vahid kahrizi<sup>\*2</sup>, Mahdi Kakaei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Bu-Ali Sina, Hamadan, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Bu-Ali Sina, Hamadan & Manager of the Edham Mozaffari Art School, Kurdistan, Kamyaran

Article history	Abstract
<p><b>Submitted:</b> 2025/10/28</p> <p><b>Revised:</b> 2025/11/20</p> <p><b>Accepted:</b> 2025/12/19</p> <p><b>Published online:</b> 2025/12/21</p>	<p>Apple fruit is subjected to operations such as harvesting, packaging, grading, storage, and transportation. During these stages, numerous static and dynamic loads are applied to individual fruits, leading to mechanical damage, quality deterioration, and consequently a reduction in marketability and export potential. The objective of this study was to analyze the dynamic behavior of export apples of the Golden Delicious and Red Delicious cultivars against impact-induced damage using finite element simulation. In addition, using an Instron texture analyzer available in the rheology laboratory, the mechanical properties of the apple peel, flesh, and core were determined separately. The measured physical and mechanical properties were then used as input data in the engineering data section of Abaqus software. To achieve the objectives of the study, an impact test was first conducted in a separate section as a factorial experiment with independent variables including two apple cultivars, three impact energy levels (0.0124, 0.0238, and 0.0712 J), and two curvature radii of the impact location (38.8 and 42.2 mm). The results of this study indicated that, in the simulation of the apple impact test using the finite element method, there was a high correlation and reliability between experimental results and modal analysis, such that the coefficient of determination (<math>R^2</math>) obtained from the comparison of experimental and modal frequencies was 0.98 and 0.99 for Golden Delicious and Red Delicious apples, respectively. The results of this study can provide a significant advantage in the design of harvesting and post-harvesting machinery for apples at a commercial scale.</p>
<p><b>Keywords:</b> Impact test, Finite element simulation Apple Linear regression model</p> <p>*Corresponding author email: <a href="mailto:vahidkahrizi2012@gmail.com">vahidkahrizi2012@gmail.com</a></p> <p>ORCID:  0000-0001-8590-0216</p> 	
<p><b>How to cite this paper:</b> Chavoshi, E., kahrizi, V. and Kakaei, M. (2025). Linear regression model of experimental and modal frequencies of apple fruit in the impact test. <i>Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery</i>. 37: 29-46. <a href="https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14549.738">https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14549.738</a> (In Persian)</p>	
	<p>Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by <a href="http://Shahrekord University">Shahrekord University</a>. This article is an open access article licensed under the <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)</a></p>
<p><a href="https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14549.738">https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14549.738</a></p>	

## ***EXTENDED ABSTRACT***

### ***Introduction***

Apples are affected by operations such as harvesting, packaging, grading, storage, and transportation on their way from the orchard to the sales centers. During these stages, various static and dynamic loads are applied to each product, which leads to damage and also causes a decrease in quality, and as a result, a decrease in marketability and export of the product. This research aims to analyze the dynamic behavior of export apples of Golden Delicious and Red Delicious varieties against damage caused by impact using finite element simulation, which is defined by defining a viscoelastic material model in the two parts of the flesh and core (central part) of the apple and an elastic-plastic material model in the apple skin section using finite element modal analysis using Abaqus software. In order to investigate the linear regression model of the dynamic behavior of apple fruit, an impact was applied to the apple fruit using three-axis force gauge and accelerometer sensors. The physical properties of the apple fruit were measured in the laboratory. Also, using the Instron texture analyzer available in the rheology laboratory, the mechanical properties of the skin, flesh, and seed of apple fruit were determined separately, and the results of the physical and mechanical properties were used as input in the engineering data section of the Abaqus software. To achieve the objectives of the study, first, in a separate section, an impact test was performed in the form of a factorial experiment with independent variables including two apple varieties, three levels of impact energy (0.0124, 0.0238, and 0.0712 Joules) and two levels of the radius of curvature of the impact site (38.8 and 42.2 mm). The results of this study showed that in simulating the apple impact test using the finite element method, there is a high correlation and reliability between the experimental results and modal analysis, so that the coefficient of determination ( $R^2$ ) resulting from the comparison of experimental frequencies and modal analysis

for the Golden Delicious and Red Delicious apple varieties is 0.98 and 0.99, respectively. So that the results of this study can provide a significant advantage for the design of harvesting and post-harvest machines on a commercial scale for apple fruit.

### ***Material and Methods***

To conduct this research, healthy, undamaged export apples of the Golden Delicious and Red Delicious varieties were selected from orchards in Mahabad city (longitude 34.5°45'47" and latitude 9.7°51'36"), the hub of apple production and export in the country, and were harvested manually. The harvested product was transferred to the rheology laboratory of the Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, in special containers under standard conditions. The fruits were then stored in a refrigerator at 4 degrees Celsius. Before conducting the experiments, the apple fruits were placed at the laboratory temperature to become isothermal with the ambient temperature. Then, mechanical tests and impact tests were performed on the samples.

### ***Results and Discussion***

To determine the natural frequencies of apple fruit by impact testing, the output data from the excited samples were recorded by a four-channel signal processing device (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004), and the results were then transferred from the time domain to the frequency domain using the fast Fourier transform in MATLAB software. In the polar direction, the first vibration mode for the Golden Delicious cultivar was sensed at a natural frequency of 125.27 Hz, and the second and third modes had natural frequencies of 151.12 and 185.17 Hz, respectively (Table 4). In the Red Delicious cultivar, the first vibration mode was sensed at a natural frequency of 121.61 Hz, and the second and third modes had natural frequencies of 148.21 and 174.23 Hz, respectively, in the polar direction (Table 6). The first modal frequency (simulated) in the polar direction in the Golden Delicious cultivar was considered to be 138.18 Hz (first

mode), the second modal frequency was considered to be 151.45 Hz (second mode), and the third modal frequency was considered to be 204.14 Hz (third mode) (Table 4). Also, in the Red Delicious variety, the first modal frequency in the polar direction was 132.18 Hz (first mode), the second was 155.61 Hz (second mode), and the third was 197.30 Hz (third mode) in the Abaqus simulation (Table 6). In the equatorial direction, the first vibration mode for the Golden Delicious variety was sensed at a natural frequency of 135.52 Hz, and the second and third modes had natural frequencies of 141.16 Hz and 175.17 Hz, respectively (Table 5). In the Red Delicious variety, the first vibration mode was sensed at a natural frequency of 124.18 Hz, and the second and third modes had natural frequencies of 158.25 Hz and 214.23 Hz, respectively, in the equatorial direction (Table 7). The first modal frequency in the equatorial direction in the Golden Delicious cultivar was 141.38 Hz (first mode), the second modal frequency was 155.86 Hz (second mode), and the third modal frequency was 187.45 Hz (third mode) (Table 5). For the Red Delicious cultivar, the first modal frequency in the equatorial direction was 137.16 Hz (first mode), the second modal frequency was 168.42 Hz (second mode), and the third modal frequency was 227.22 Hz (third mode) in the Abaqus software simulation (Table 7). As shown, the differences between these frequencies for both apple fruit groups are highly reliable, so that the linear regression model and the coefficient of determination  $R^2$  resulting from the comparison between the experimental and modal frequencies for the Golden Delicious and Red Delicious varieties are 0.98 and 0.99, respectively. These results can provide a significant advantage in the design of commercial-scale harvesting and post-harvest machines for apple fruit.

### ***Conclusions***

In the industry, before manufacturing engineering parts, modal tests are used to

determine the material, selecting a more compatible material for parts with greater displacement to extend their life and improve function. Considering this type of application of modal analysis, this approach can be used to genetically modify agricultural products, especially fruits, to change their texture, thereby increasing their useful life. Also, the finite element model is a fast, cost-effective, and non-destructive method for evaluating natural frequencies, especially the resonant frequency, and for providing a regression model with acceptable accuracy for the design of harvesting and post-harvest fruit machines.

### ***Acknowledgements***

Bu-Ali Sina University is appreciated for supporting this research in terms of supplying laboratory materials and equipment.

### ***Data Availability Statement***

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

### ***Ethical Considerations***

**Conflict of Interest:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper or any conflict of interest.

**Ethical Review:** This study does not involve any human or animal testing. **Informed Consent:** Not require

### ***Conflict of Interest***

There are no contributions of interest in this article, and this has been confirmed by all authors.

### ***Funding Statement***

The author(s) received no specific funding for this research.



## مدل رگرسیون خطی بسامدهای تجربی و مودال میوه سیب در آزمون ضربه‌ای

ابراهیم چاوشی<sup>۱</sup>، وحید کهریزی<sup>۲\*</sup> و مهدی کاکایی<sup>۱</sup>

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان و مدیر هنرستان زنده یاد ادهم مظفری، کامیاران، کردستان، ایران.

چکیده	تاریخچه مقاله
میوه سیب تحت تأثیر عملیاتی چون برداشت، بسته‌بندی، درجه‌بندی، انبار کردن و حمل و نقل قرار می‌گیرد. طی این مراحل بارهای ایستایی و پویای متعددی بر تک‌تک محصولات وارد می‌شود که منجر به آسیب و هم‌چنین باعث افت کیفیت و در نتیجه کاهش بازاریابی و صادرات محصول می‌گردد. هدف از این تحقیق تحلیل رفتار پویای سیب صادراتی ارقام گلدن دلشیز و رد دلشیز در مقابل صدمات ناشی از ضربه به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود است. به‌منظور بررسی مدل رگرسیون خطی رفتار پویای میوه سیب به‌وسیله حسگرهای نیروسنج و شتاب‌سنج سه محوره به میوه سیب ضربه وارد شد. خواص فیزیکی میوه سیب در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. هم‌چنین با استفاده از دستگاه تحلیل بافت Instron موجود در آزمایشگاه رئولوژی، خواص مکانیکی پوست، گوشت و دانه میوه سیب به‌طور جداگانه تعیین گردید و نتایج خواص فیزیکی و مکانیکی به عنوان ورودی در قسمت داده‌های مهندسی در نرم‌افزار Abaqus به‌کار گرفته شد. برای رسیدن به اهداف مطالعه، ابتدا در بخش جداگانه‌ای آزمون ضربه در قالب آزمایش فاکتوریل با متغیرهای مستقل شامل دو رقم محصول سیب، ۳ سطح انرژی ضربه (۰/۰۲۳۸، ۰/۰۱۲۴، ۰/۰۰۷۱۲ و دو سطح شعاع انحنای محل ضربه (۳۸/۸ و ۴۲/۲ میلی‌متر) اجرا شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در شبیه‌سازی آزمون ضربه سیب با استفاده از روش اجزای محدود بین نتایج تجربی و تحلیل مودال از همبستگی و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است به طوری که ضریب تعیین ( $R^2$ ) ناشی از مقایسه بسامدهای تجربی و تحلیل مودال برای سیب رقم گلدن دلشیز و رد دلشیز به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۹ است به طوری که نتایج این مطالعه می‌تواند مزیت قابل توجهی برای طراحی ماشین‌های برداشت و پس از برداشت در مقیاس تجاری برای میوه سیب را امکان‌پذیر سازد.	دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰
	<b>واژه‌های کلیدی:</b> آزمون ضربه‌ای شبیه‌سازی اجزای محدود سیب مدل رگرسیون خطی *پست الکترونیکی نویسنده مسئول: <a href="mailto:yahidkahrizi20122@gmail.com">yahidkahrizi20122@gmail.com</a> ORCID:  ۰۰۰۰-۰۰۰۱-۸۵۹۰-۰۲۱۶
	

نحوه استناد به این مقاله:

چاوشی، ا.، کهریزی، و. و کاکایی، م. (۱۴۰۴). مدل رگرسیون خطی بسامدهای تجربی و مودال میوه سیب در آزمون ضربه‌ای. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۳۷: ۲۹-۴۶. شناسه دیجیتال: <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14549.738>

## مقدمه

فرآیندهای مزرعهای و صنایع غذایی شامل یک محدوده وسیع از فرآیندهای مکانیکی، شیمیایی و حرارتی است که محصولات کشاورزی را در مراحل مختلف برداشت، جابجایی، حمل و نقل، درجه بندی، بسته بندی و انبارداری تحت تأثیر قرار می دهند. مدل سازی این فرآیندها یکی از روش های کاربردی در تخمین صدمات وارده به محصولات، میزان تغییر شکل، تنش و کرنش های وارد بر آنها است. در این میان، هدف اصلی متخصصین پس از برداشت، شناسایی عوامل مؤثر بر ضایعات و استفاده از فناوری های مناسب جهت کاهش آنها است. امروزه فناوری های مرتبط با تجهیزات کشاورزی و صنایع غذایی به منظور پاسخگویی به نیاز روزافزون مواد غذایی پیشرفت های زیادی داشته است. با وجود این پیشرفت های فنی و مهندسی، هنوز تلاش های زیادی تا رسیدن به درک دقیق و اساسی از خواص و رفتارهای محصولات لازم است. مطالعات نشان می دهد عملیات برداشت و فرآیندهای پس از برداشت، عامل اصلی ضایعات وارده به محصولات کشاورزی است (Chiputula, 2009).

بارهای پویای مناسب، به انجام عملیات پس از برداشت کمک می کنند و نتیجه نامطلوبی روی محصول ایجاد نمی کنند. در حالی که بارهای پویای نامناسب باعث وارد شدن صدمات و اتلاف محصول خواهد شد. برای کاهش میزان آسیب های وارد شده به بافت محصول، مطالعه و تحلیل رفتار ماده تحت بارگذاری لازم است. برداشت، جابجایی، درجه بندی، حمل و نقل، بسته بندی و انبارداری از جمله فرآیندهای مکانیکی مؤثر بر کیفیت نهایی محصول است (Celik et al., 2011).

در پژوهشی برای شبیه سازی اجزای محدود کوفتگی در میوه سیب از نرم افزار LS-Dyna استفاده کردند. مدل سه بعدی از لایه های پوست، گوشت و هسته میوه در محیط نرم افزار ایجاد شد. هم چنین، ماده با خواص الاستیک خطی برای مدل سازی انتخاب گردید. نتایج نشان داد که میزان کوفتگی و انرژی جذب شده رابطه مستقیمی با بارگذاری پویای ضربه و شبه ایستایی دارد (Lewis et al., 2008). در پژوهشی دیگر، محققان با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Ansys شبیه سازی سقوط آزاد میوه گلابی را بررسی نمودند. آنها بین میوه و صفحه برخورد در محیط نرم افزار یک برخورد از نوع خودکار تعریف کردند و مدل ماده ای با خواص ویسکوالاستیک خطی

و اجزای ها با ابعاد ۳ میلی متر در مدل در نظر گرفته شد (Yousefi et al., 2016). در تحقیق دیگری پژوهشگران یک مدل اجزای محدود قابل اعتماد از سیستم شاخه - ساقه - میوه را برای مطالعات آتی در مورد برداشت سیب از طریق تکان دادن درخت یا برداشت کننده های خودکار میوه سیب ارائه نمودند (Lingxin et al., 2021).

پژوهشگران رفتار پویایی میوه سیب رقم گلدن دلشیز را با استفاده از تحلیل مودال اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از یک پویاگر سه بعدی، دوربین با فریم بالا و شبیه سازی های روش اجزای محدود (FEM) در نرم افزار Solidworks برای بررسی تغییر شکل میوه سیب در آزمون سقوط استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که یک همبستگی خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد (Celik et al., 2011).

در تحقیقی بسامدهای طبیعی میوه پرتقال با استفاده از تحلیل مودال اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از نرم افزار Solidwork مدل سه بعدی میوه پرتقال را ایجاد کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از روش اجزای محدود می توان با حداقل دقت ۹۱ درصد به منظور تعیین بسامدهای طبیعی میوه پرتقال استفاده کرد (Namdari, 2020).

طراحی و توسعه فرآیندهای کشاورزی و غذایی به طور مستقیم یا غیرمستقیم وابسته به خواص زیستی محصول و یا مواد تشکیل دهنده آنها است. از این رو، تحقیق در مورد خواص مواد غذایی و محصولات کشاورزی مانند میوه ها ضروری به نظر می رسد (Celik et al., 2011). امروزه با توجه به گسترش دانش رایانه ای و در دسترس بودن این فناوری می توان برای حل مسائل پیچیده با استفاده از طراحی به کمک رایانه بدون نیاز به واقعیت فیزیکی آن را شبیه سازی کرد (Celik et al., 2011).

مدل سازی فرآیندهای کشاورزی و صنایع غذایی به روش اجزای محدود، در مقایسه با مدل های نظری بسیار انعطاف پذیر است. به این دلیل که مدل های نظری نیاز به فرضیات و ساده سازی های زیادی دارند. کاربرد شبیه سازی اجزای محدود از نظر صرفه جویی در زمان و به لحاظ اقتصادی در مقایسه با مطالعات تجربی مناسب تر و قابل قبول تر است. تحلیل اجزای محدود روشی مناسب برای کاهش اثرات منفی بر محصولات

برای اندازه‌گیری وزن میوه سیب از ترازوی دیجیتال با دقت  $0.01$  گرم استفاده شد و برای اندازه‌گیری قطر اصلی، قطر متوسط و قطر کوچک سیب از ریزسنج دیجیتال با دقت  $0.1$  میلی‌متر استفاده گردید. گردی محصول از طریق رابطه ۱ تعیین شد (Alamar et al., 2008).

$$R_c = (4 \times \pi \times A_c) / (P_c^2) \quad (1)$$

$A_c$ : سطح مقطع ( $\text{mm}^2$ )

$P_c$ : محیط ( $\text{mm}$ )

$R_c$ : گردی

چگالی پوست، گوشت و هسته سیب به شکل جداگانه به عنوان خواص فیزیکی بافت برای کاربرد در شبیه‌سازی اجزای محدود مطابق رابطه ۲ تعیین گردید (Mohsenin, 1986؛ Asmamaw et al., 2010؛ Li et al., 2013).

$$SG_{water} \rho \times = \frac{m_{air}}{(m_{water}) - (m_{container+water})} \quad (2)$$

$\rho$ : چگالی نمونه ( $\text{gr/cm}^3$ )

$m_{air}$ : جرم نمونه ( $\text{gr}$ )

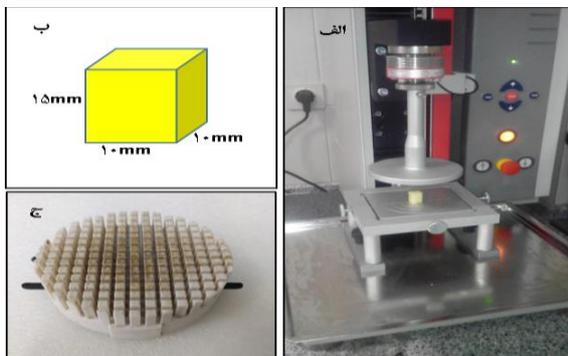
$m_{water}$ : جرم نمونه در حال غوطه‌وری در ظرف همراه آب ( $\text{gr}$ )

$m_{container+water}$ : جرم ظرف با آب ( $\text{gr}$ )

$SG_{water}$ : چگالی آب

### آزمون‌های فشاری

آزمون فشاری برای تعیین رفتار الاستیک و پلاستیک بافت گوشت و هسته (بخش داخلی) سیب در مقابل بارگذاری ایستا انجام شد. از طریق این آزمون مدول الاستیسیته و تنش تسلیم سیب برای ورود به نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود به دست آمد.



شکل ۲- الف) آزمون فشاری روی نمونه گوشت و هسته سیب گلدن دلشیز و رد دلشیز و ب) نمونه تهیه شده برای آزمون فشاری از گوشت و هسته سیب ج) شابلون شیاردار (قطعه مخصوص برش دقیق نمونه)

کشاورزی ناشی از ماشین‌های برداشت و پس از برداشت است (Rashvand., 2022).

با این حال، تاکنون مدل رگرسیون خطی میوه سیب با استفاده از تحلیل مودال اجزای محدود تحت بار ضربه‌ای برای میوه سیب در محدوده ویسکو الاستیک گزارش نشده است. انجام این مطالعه می‌تواند خلاء ناشی از کمبود تحقیقات در این زمینه را مرتفع نماید. بنابراین هدف از این تحقیق تحلیل رفتار پویایی سیب صادراتی ارقام گلدن دلشیز و رد دلشیز در مقابل صدمات ناشی از ضربه به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود است که با تعریف مدل ماده ویسکو الاستیک در دو بخش گوشت و هسته (بخش مرکزی) سیب و مدل ماده الاستیک-پلاستیک در بخش پوست سیب به منظور بررسی مدل رگرسیون خطی رفتار پویایی میوه سیب با استفاده از تحلیل مودال اجزای محدود به وسیله نرم‌افزار Abaqus است.

### مواد و روش‌ها

#### تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های تجربی

برای انجام این پژوهش سیب سالم و بدون آسیب صادراتی ارقام گلدن دلشیز و رد دلشیز از باغ‌های شهر مهاباد (طول جغرافیایی  $36^\circ 51' 9.7''$  و عرض جغرافیایی  $45^\circ 47' 34.5''$ ) به‌عنوان قطب تولید و صادرات سیب کشور انتخاب شد و برداشت سیب به‌صورت دستی انجام گردید. محصول برداشت شده در ظروف مخصوص با رعایت شرایط استاندارد به آزمایشگاه رئولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا منتقل گردید. سپس میوه‌ها در یخچال در دمای  $4^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس نگهداری شدند. قبل از انجام آزمایش‌ها، میوه سیب در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شد تا با محیط همدم شود (شکل ۱).



شکل ۱- الف) برداشت دستی محصول (ب) ظروف مخصوص حمل محصول (ج) رقم سیب صادراتی

همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد، بیش‌ترین چگالی سیب رقم رد دلشیز مشابه رقم گلدن دلشیز به ترتیب در هسته سیب، پوست و گوشت سیب بوده و میانگین وزنی آن  $0/850$  گرم بر سانتی‌متر مکعب است. بر اساس نتایج همین جدول بیش‌ترین مقدار مدول الاستیسیته سیب رد دلشیز در بخش پوست سیب بوده و معادل  $5/047$  مگاپاسکال است. مدول الاستیسیته گوشت سیب معادل  $1/591$  مگاپاسکال و هسته سیب برابر با  $1/616$  مگاپاسکال است. مقدار تنش تسلیم سه بخش سیب مشابه مدول الاستیسیته بود به‌طوری‌که، بیش‌ترین مقدار تنش تسلیم در پوست سیب معادل  $0/853$  مگاپاسکال و کم‌ترین مقدار تنش تسلیم در گوشت سیب معادل  $0/212$  مگا پاسکال است. بالا بودن تنش تسلیم پوست سیب رقم رد دلشیز نسبت به گوشت سیب نیز قابل مشاهده است، که باعث می‌شود پوست این رقم سیب نیز در مقابل بارهای ایستایی و پویای تا حدود سه تا چهار برابر بیشتر از گوشت سیب مقاومت کرده و از گسیختگی پوست سیب جلوگیری نماید.

#### آزمایش‌های ضربه‌ای (پاندولی)

برای به‌دست آوردن داده‌های مورد نیاز در شبیه‌سازی اجزای محدود، آزمون ضربه با دستگاه پاندول ضربه انجام شد. تعداد نمونه‌های این آزمون برای هر کدام از ارقام سیب ۶۰ نمونه بود. آزمون ضربه به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۵ تکرار انجام گردید. به منظور انجام آزمون ضربه، به دلیل مؤثر بودن شعاع انحنای محل ضربه در آزمون، ابتدا شعاع انحنای محل به وسیله دستگاه شعاع‌سنج تعیین گردید و سپس آزمون ضربه انجام شد. متغیرهای مستقل آزمون ضربه شامل رقم محصول سیب، سطوح ضربه (سطح اول  $0/124$  ژول، سطح دوم  $0/238$  ژول و سطح سوم  $0/712$  ژول)، شعاع انحنای محل ضربه (شعاع انحنای  $38/8$  میلی‌متر و شعاع انحنای  $42/2$  میلی‌متر)، و دمای محصول (دمای اول ۴ و دمای دوم ۲۰ درجه سلسیوس) در نظر گرفته شد.

#### اندازه‌گیری شعاع انحنای محصول

محل اعمال ضربه بر روی هر میوه‌ی سیب پس از علامت‌گذاری به‌وسیله یک دستگاه شعاع‌سنج با دقت  $0/01$  میلی‌متر شعاع انحنای محل ضربه اندازه‌گیری گردید. محاسبه

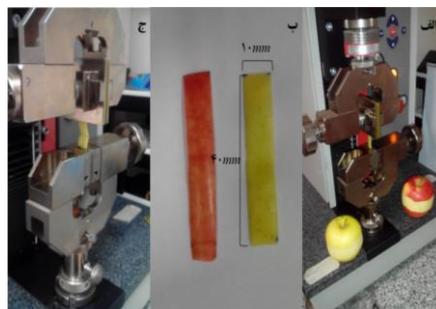
برای انجام آزمون فشاری از هر رقم سیب (۱۰ تکرار برای هر یک از نمونه‌های سالم سیب دو رقم نمونه‌ای به شکل مکعب مستطیل به ابعاد  $10 \times 10 \times 15$  میلی‌متر) از گوشت و هسته سیب (در مجموع ۴۰ آزمون) با استفاده از یک تیغه تیز<sup>۱</sup>  $30$  درجه بریده شد.

به منظور برش دقیق نمونه‌ها از یک شابلون شیاردار<sup>۲</sup> برای تسهیل در حرکت تیغه برنده استفاده شد (شکل ۲-ج). سپس نمونه بافت به‌طور عمودی روی فک ثابت دستگاه قرار داده شده و به‌وسیله یک صفحه فشاری<sup>۳</sup> متصل به فک متحرک در دمای آزمایشگاه ( $20 \pm 0/5$  درجه سلسیوس) تحت آزمون فشاری قرار گرفت (شکل ۲-الف).

آزمون فشاری بر اساس استاندارد آزمون‌های فشاری روی محصولات، با مقدار پیش‌نیروی  $0/1$  نیوتن و سرعت  $100$  میلی‌متر بر دقیقه برای رسیدن به این پیش‌نیرو تنظیم گردید. آزمون اصلی با سرعت  $50$  میلی‌متر بر دقیقه انجام شد، به‌طوری‌که در  $30$  درصد نیروی بیشینه متوقف گردد (استاندارد آس آی، ۲۰۱۲).

#### آزمون کشش پوست

برای تعیین خواص مکانیکی پوست سیب مانند مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و کرنش تسلیم از آزمون کشش پوست با دستگاه آزمون مواد فوق‌الذکر استفاده شد. جهت انجام آزمون کشش پوست از هر رقم سیب (۱۰ تکرار برای هر یک از پوست ارقام سیب گلدن دلشیز و رد دلشیز) نمونه‌ای به شکل نوار مستطیل شکل به ابعاد  $1 \times 10 \times 40$  میلی‌متر) از پوست سیب با استفاده از یک تیغه پوست کن تهیه گردید (ASAE standard 2012)، (شکل ۳).



شکل ۳-الف) ابتدای آزمون کشش پوست سیب (ب) آماده سازی نمونه پوست سیب برای آزمون کشش (ج) انتهای آزمون کشش و ثبت نتایج

و در ادامه شعاع انحنای معادل از رابطه ۴ محاسبه گردید  
(Mohsenin, 1986):

$$R = \frac{(2R_1R_2)}{(R_1 + R_2)} \quad (۴)$$

$R$ : شعاع انحناء کلی محصول (mm)

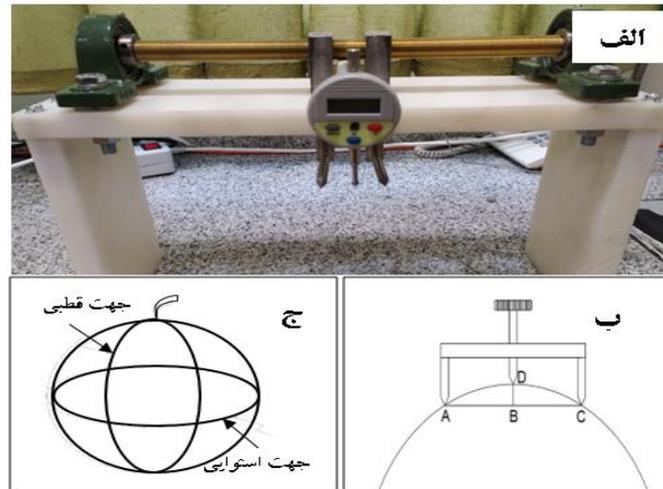
$R_1$ : شعاع انحناء در جهت قطبی (mm)

$R_2$ : شعاع انحناء در جهت استوایی (mm)

شعاع انحنای محل ضربه با استفاده از رابطه ۳ انجام شد  
(Mohsenin, 1986):

$$RADIUS = \frac{(AC)^2}{8(BD)} + \frac{(BD)}{2} \quad (۳)$$

در رابطه ۳ اندازه AC فاصله افقی بین دو فک و BD میزان متغیر است (شکل ۴- الف). محصول سبب معمولاً کروی کامل نیست که شعاع انحناء در دو جهت قطبی و استوایی در محل ضربه روی میوه تعیین گردید (شکل ۵- ب)



شکل ۴- الف) تصویر شعاع سنج مورد استفاده در این تحقیق (ب) نمایش هندسی از محاسبه شعاع انحناء (ج) نمایش جهت‌های قطبی و استوایی روی محصول

آزمایشگاه رتولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا استفاده شد. این دستگاه دارای نیروسنج مدل Xforce/ HP با ظرفیت ۵۰۰ نیوتن با مشخصه ۲ میلی‌ولت بر ولت است (شکل ۵ و ۶).

برای تعیین نقطه تسلیم زیستی، ۲۰ عدد سیب از دو رقم تحقیق حاضر، با شعاع انحنای تقریباً یکسان انتخاب شدند. آزمون ضربه با زاویه پاندول ۳ درجه آغاز و به تدریج با افزایش ۰/۵ درجه به ازای هر ضربه، تا ۷/۵ درجه انجام گردید. به منظور فراهم نمودن شرایط جهت اثرات ضربه، با انجام پیش آزمون‌های متعدد، فاصله زمانی تکرار ضربات بعدی در همان نقطه ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. برای هر کدام از زوایای فوق در راستای قطبی و استوایی به نمونه‌های سیب نیرو (ورودی) وارد شد به طوری که دقیقاً در طرف مقابل نیروسنج، پاسخ پویا، توسط حسگر شتاب سنج سه محوره (خروجی) به دستگاه پردازش سیگنال ارسال و سپس در رایانه ذخیره شدند. انتقال

### دستگاه آزمون ضربه پاندول

آزمون ضربه توسط دستگاه پاندول اعمال گردید. این سامانه شامل بازویی به طول ۰/۵۷۷ متر بوده و دارای یک محفظه آلومینیومی شکاف‌دار برای قرارگیری حسگرها<sup>۱</sup> و یک ضربه‌زن<sup>۲</sup> کروی شکل از جنس تفلون<sup>۳</sup> (با شعاع انحنای ۱۲/۵ میلی‌متر) است. یک حسگر نیرو (PCB 208c02, PCB حسگر شتاب (Piezotronics, USA, sensitivity: 10.97 mV/N و یک حسگر شتاب (PCB 320c33, PCB Piezotronics, USA, sensitivity: 105.2 mV/g) به ضربه‌زن متصل شده است. به‌وسیله دستگاه پردازشگر سیگنال (ECON, AVANT Lite, ) نیروی برخورد، جابجایی و نرخ جابجایی ضربه‌زن در طول زمان آزمون ضربه ثبت شد. به منظور انجام آزمون‌های مکانیکی از جمله آزمون فشاری و کششی از دستگاه آزمون مواد Zwick/Roell مدل BT1\_FR0.5TH.D14 ساخت کشور آلمان مستقر در

3- Teflon

1- Sensor  
2- Impactor

برای شروع به ثبت داده‌های نیرو، جابجایی و نرخ جابجایی در بازه آزمون یک سطح ولتاژ (نیرو در شروع برخورد) مناسب برای دستگاه پردازش سیگنال ۰/۱ ولت که معادل نیروی برخورد ۱ نیوتن است در نظر گرفته شد. جهت محاسبه نرخ جابجایی (سرعت) ۱ مرتبه و برای محاسبه جابجایی ۲ مرتبه انتگرال‌گیری از داده‌های حسگر شتاب‌سنج صورت گرفت. استفاده از این روش با توجه به اضافه شدن ثابت‌های انتگرال، کم دقت است، لذا برای افزایش دقت در اندازه‌گیری جابجایی و نرخ جابجایی یک رمزگذار نوری (Autonics E50S8) در محور چرخش بازوی پاندول استفاده شد. رمزگذار نوری موقعیت زاویه‌ای محور پاندول را بر اساس آستانه<sup>۲</sup> تعریف شده در بازه زمانی مذکور اندازه‌گیری می‌کند (Van Zeebroeck *et al.*, 2003) و سرعت برخورد ضربه‌زن را با دقت بسیار بالایی ثبت می‌کند.

رمزگذار نوری در هر بار چرخش بازوی پاندول، تعداد ۱۸۰۰۰ سیگنال را بوسیله داده جمع‌کن ثبت می‌کند و با توجه به طول بازوی ۰/۵۷۷۵ متر، جابجایی خطی ضربه‌زن برای به ازای هر یک سیگنال معادل ۰/۲۰۱۵ میلی‌متر به دست آمد. با استفاده از جابجایی زاویه‌ای به دست آمده و طول بازوی پاندول، جابجایی خطی از لحظه برخورد تا زمان جدا شدن ضربه‌زن از محصول قابل محاسبه است، جابجایی در اولین نقطه تماس ضربه‌زن با پوست سیب، صفر در نظر گرفته شد. انرژی ضربه و انرژی جذب شده مطابق روش انرژی محاسبه گردید. انرژی جذب شده در طول ضربه از طریق کاستن انرژی الاستیک از انرژی ضربه محاسبه گردید. انرژی الاستیک و انرژی ضربه از طریق انرژی جنبشی بازوی پاندول قبل و بعد از برخورد محاسبه شد (رابطه ۵)

(Van Zeebroeck *et al.*, 2003):

$$\Rightarrow E_{absorbed} = E_{impact} - \quad (5)$$

$$E_{elastic} \begin{cases} E_{impact} = E_{kin}(t_{n-1}) \\ E_{elastic} = E_{kin}(t_{n+1}) \end{cases}$$

$E_{impact} = E_{kin}(t_{n-1})$ : انرژی جنبشی در لحظه شروع

برخورد (J)

$E_{elastic} = E_{kin}(t_{n+1})$ : انرژی جنبشی در لحظه پایان

برخورد (J)

$E_{absorbed}$ : انرژی جذب شده در حین ضربه (J)

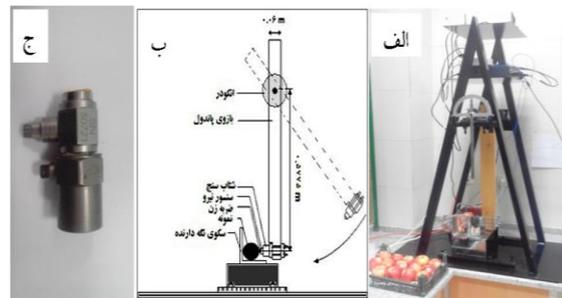
انرژی جنبشی مطابق معادله (۶) به دست آمد:

$$E_{kin}(t) = \frac{1}{2} I \omega(t)^2 = \frac{1}{2} I \dot{\delta}(t)^2 \quad (6)$$

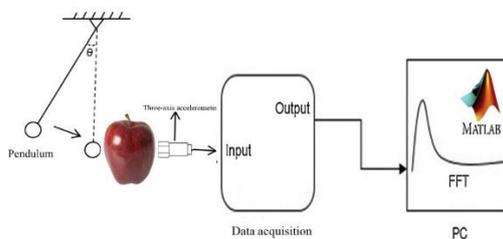
داده‌ها از حوزه زمان به حوزه بسامد، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و همچنین کدنویسی در این نرم‌افزار و استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) انجام شد (شکل ۷).



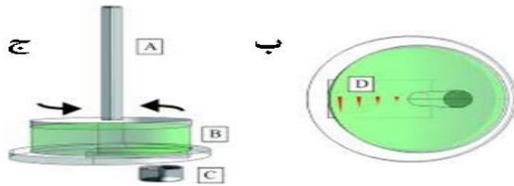
شکل ۵- دستگاه تحلیل بافت اینسترون جهت تعیین خواص مکانیکی



شکل ۶- دستگاه پاندول مورد استفاده در آزمون ضربه: الف) نمای واقعی دستگاه پاندول ضربه، ب) شماتیک سامانه پاندول ضربه ج) حسگر نیروسنج و شتاب‌سنج



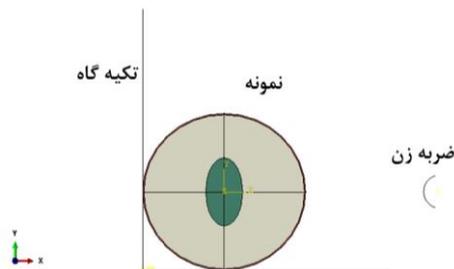
شکل ۷- نمای آزمون ضربه‌ای برای میوه سیب تحت سطوح مختلف انرژی ضربه‌ای



شکل ۸- رئومتر نوسانی با صفحات موازی<sup>۲</sup>: الف) نمونه واقعی (ب) نمای بالای دستگاه (ج) نمای جانبی

### مراحل شبیه‌سازی اجزای محدود پویا

برای انجام شبیه‌سازی اجزای محدود ضربه، از نرم افزار Abaqus استفاده شد. نرم افزار Abaqus، یکی از معروفترین نرم‌افزارهای مهندسی به کمک رایانه و از قدرتمندترین ابزارهای تحلیل اجزای محدود به شمار می‌رود. این نرم‌افزار، عموماً به منظور تحلیل غیرخطی مواد تحت شرایط بارگذاری ایستایی، شبه‌ایستایی و پویای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های رفتاری متنوع و منحصر به فرد در این نرم‌افزار، آن را به یکی از بهترین گزینه‌های تحلیل اجزای محدود تبدیل می‌کند. مراحل انجام شبیه‌سازی پویا در این مطالعه، به این ترتیب بود که در مرحله اول شبیه‌سازی سه قطعه اصلی شامل سیب، ضربه‌زن و تکیه‌گاه بر اساس ابعاد تجربی در محیط Part نرم‌افزار ایجاد شد. در این مرحله برای شبیه‌سازی سیب از متوسط ابعاد و میانگین شعاع انحنای اندازه‌گیری شده ۶۰ عدد سیب استفاده شد. ابعاد تکیه‌گاه به صورت L شکل به اندازه ۱۲۰ میلی‌متر و ضربه‌زن به صورت یک نیم‌دایره به قطر ۱۲ میلی‌متر به صورت صلب<sup>۳</sup> ایجاد گردید (شکل ۹).



شکل ۹- شبیه‌سازی سه قطعه اصلی شامل ضربه‌زن، نمونه و تکیه‌گاه

$\omega$ : سرعت زاویه‌ای ضربه‌زن (rad/s)

$I$ : ممان اینرسی بازوی پاندول ( $\text{kg.m}^2$ )

$l$ : طول بازوی سامانه پاندول (m)

نرخ جابجایی (سرعت) ضربه‌زن  $\dot{\delta}$  با استفاده از محور رمزگذار در لحظه برخورد از موقعیت لحظه‌ای آن و به صورت رابطه ۷ محاسبه شد:

$$\dot{\delta}_i = \frac{\delta_{i+1} - \delta_{i-1}}{2dt} \quad (7)$$

$\dot{\delta}_i$ : زمان در جابجایی نرخ (m/s)

$\delta_{i+1}$ : جابجایی در زمان  $t_{i+1}$  (m)

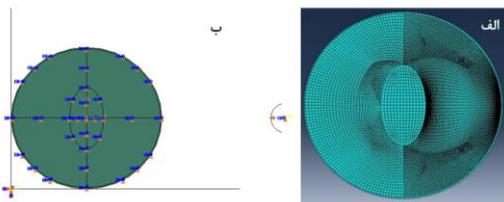
$\delta_{i-1}$ : جابجایی در زمان  $t_{i-1}$  (m)

$dt$ : زمان سپری شدن بین دو سیگنال متوالی (s)

### آزمون خواص رئولوژیکی

برای به‌دست آوردن خواص ویسکوالاستیک بخش هسته و گوشت هر دو رقم سیب، آزمون رئولوژی مطابق استاندارد ASTM (2015) D4440 صورت گرفت. این آزمون با استفاده از دستگاه رئومتر نوسانی با عنوان تجاری Anton Paar مدل MCR 300 مستقر در آزمایشگاه رئولوژی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران صورت پذیرفت. مشخصات دستگاه رئومتر شامل حداکثر گشتاور ۱۵۰ نیوتن متر، دقت گشتاور نوسانی ۰/۰۲ میکرونیوتن متر، دقت گشتاور ثبتي ۰/۰۱ میکرونیوتن متر و انحراف زاویه ای ۰/۱ میکرو رادیان تا بینهایت و بسامد ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰ هرتز) است. در شکل (۸) روش انجام آزمون به صورت شماتیک نمایش داده شده است. جهت انجام آزمون رئولوژی نمونه‌هایی به شکل مکعب مستطیل به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۰ میلی‌متر از بخش هسته و گوشت سیب بوسیله کاتر و قالب پلاستیکی مخصوص تهیه شد. نمونه‌های تهیه شده با استفاده از فک مخصوص شیردار مضرس<sup>۱</sup> (مدل PP25/P2) در محدوده بسامد ۰/۱ هرتز تا ۱۰۰ هرتز توسط دستگاه رئومتر مورد نوسان قرار گرفت. نتایج این آزمون شامل مدول‌های برشی افت و ذخیره و مدول‌های حجمی افت و ذخیره در بسامدهای مختلف به‌دست آمد که در بخش تعریف مدل ماده ویسکوالاستیک در نرم‌افزار Abaqus وارد گردید.

مدل CPS4R با تعداد ۹۹۹۶ اجزا و تمرکز مش بیشتر در ناحیه برخورد، برای سه بخش پوست، گوشت و هسته سیب انجام شد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- الف) شبکه‌بندی سه بخش پوست، گوشت و هسته ب) تعریف شرایط مرزی و اولیه در شبیه‌سازی

در مرحله چهارم شرایط اولیه<sup>۶</sup>، شرایط مرزی<sup>۷</sup> و قیدها<sup>۸</sup> برای هر سه قطعه تعریف شد. به طوری که تکیه‌گاه کاملاً ثابت و فاقد جابجایی و چرخش در راستای هر سه محور باشد و نمونه سیب دارای امکان جابجایی در راستای محور X و Y به صورت محوری بوده و دارای محدودیت در چرخش و حرکت در راستای محور Z است. نوع اجزای به لحاظ ساختار و با توجه به نوع تحلیل، هندسه شکل، مزیت‌های خود اجزای و نرم‌افزار اجزای محدود مورد نظر تعیین می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار Abaqus با کلیک بر روی گزینه حل<sup>۹</sup>، بسامدهای طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی به دست آمد.

### نتایج و بحث

خواص فیزیکی و ابعاد هندسی دو رقم سیب گلدن دلشیز و رد دلشیز در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج در طی آزمایشات انجام شده در بخش تعیین رطوبت و چگالی در ۵ تکرار و در بخش اندازه‌گیری جرم، حجم و ابعاد هندسی روی ۶۰ نمونه در هر رقم تعیین (جدول ۱) و مقادیر میانگین آن‌ها در جدول ۱ ارائه گردیده است.

نتایج آزمون‌های مکانیکی انجام شده روی سه بخش پوست، گوشت و هسته (بخش داخلی سیب) سیب گلدن دلشیز و رد دلشیز به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. بررسی نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد، بیش‌ترین چگالی به ترتیب در هسته سیب، پوست و گوشت سیب در رقم گلدن دلشیز بوده و میانگین وزنی آن ۰/۸۳۳ گرم بر سانتی‌متر

در ادامه بوسیله قطعه‌بندی<sup>۱</sup> (از نوع Face به صورت Sketch) قطعه ایجاد شده برای سیب به سه بخش پوست، گوشت و هسته تقسیم‌بندی شد تا قابلیت اختصاص<sup>۲</sup> مدل ماده متفاوت برای سه بخش سیب وجود داشته باشد. مزیت قطعه‌بندی نسبت به تعریف سه قطعه متفاوت برای محصول این است که نیازی به تعریف تماس بین سه قسمت سیب وجود ندارد و تمام سه بخش یک نوع تماس طبیعی با هم خواهند داشت.

به منظور شبیه‌سازی میوه سیب، ابتدا در ماژول مودال نرم‌افزار Abaqus پس از ایجاد مدل هندسی سه بعدی، خواص مکانیکی گوشت، پوست و هسته میوه سیب تعریف شد. برای بخش گوشت و هسته سیب، مدل ماده ویسکوالاستیک تعریف شد و در این بخش‌ها داده‌های چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و نتایج آزمون رئولوژی شامل مدول افت و مدول ذخیره و مدول مختلف تخصیص داده شد. سپس در محیط طراحی نرم‌افزار Abaqus، مدل هندسی سه بعدی طراحی شد. پس از تعریف ماده و ایجاد مدل هندسی سه بعدی، مرحله شبکه‌بندی است. با توجه به اینکه ویژگی‌های اجزا در تحلیل اجزای محدود تأثیر زیادی دارد، باید شبکه‌بندی با اندازه و انواع مختلف اجزای انجام شود. کیفیت شبکه‌بندی در کنار تعیین درست شرایط مرزی که در مرحله بعد از شبکه‌بندی انجام می‌شود تأثیر بسیار زیادی در دقت و پایداری حل دارد. در مرحله بعد گام<sup>۳</sup> زمان حل مسئله با انجام پردازش‌های مختلف با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه به تعداد ۲۰ گام با نمو<sup>۴</sup> ۱ برای هر گام برای حل مسئله در نظر گرفته شد. در مرحله تعریف برهم کنش<sup>۵</sup> تماس‌ها بین ضربه زن با سیب بدون اصطکاک و تماس بین سیب و تکیه‌گاه به صورت اصطکاکی با ضریب اصطکاک ۰/۲ در نظر گرفته شد (Puchalski, 2003, et al.).

برای تعیین ضریب اصطکاک بین سیب و تکیه‌گاه آلومنیومی، آزمایش سطح شیب‌دار در ۲۰ تکرار روی نمونه سیب انجام شد. در این آزمایش از سطح آلومنیومی (تکیه‌گاه) به عنوان سطح شیب‌دار با تغییر زاویه شیب مطابق استاندارد (ASTM G194) استفاده شد. مقدار ضریب اصطکاک سیب با سطح تکیه‌گاه ۰/۲ به دست آمد که در شبیه‌سازی به کار رفت. در مرحله شبکه‌بندی با بررسی نتایج شبیه‌سازی و با توجه به ساختار سلولی محصول نوع شبکه تعیین گردید. شبکه‌بندی

6 - preliminary Conditions  
7 - Boundary Conditions  
8 - Constraints  
9 - solve

1 - Partitioning  
2 - Assignment capability  
3 - Step  
4 - Incerementation  
5 - Interaction

پوست در برابر بارها توجه نماید. تنش تسلیم سیب رقم Pink Lady در مطالعه (Celik et al., 2021) معادل ۰/۳۸۵ مگاپاسکال گزارش شد.

برای تعیین بسامدهای طبیعی میوه سیب به وسیله آزمون ضربه‌ای، داده‌های خروجی از نمونه‌های تحریک شده توسط دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004) ثبت شد و سپس با استفاده از تبدیل فوریه سریع در نرم‌افزار MATLAB، نتایج از حوزه زمان به حوزه بسامد انتقال داده شد.

مکعب است. مدول الاستیسیته پوست سیب گلدن دلشیز حدود ۴/۵ مگاپاسکال، سپس هسته ۱/۸۷۴ مگاپاسکال و گوشت سیب ۱/۵۸۳ مگاپاسکال است. مقدار تنش تسلیم در پوست سیب معادل ۰/۳۰۶ مگاپاسکال و کم‌ترین مقدار تنش تسلیم در گوشت سیب معادل ۰/۱۷۳ مگاپاسکال است. نکته قابل ملاحظه در تنش تسلیم بالاتر پوست سیب نسبت به گوشت سیب باعث می‌شود پوست سیب در مقابل بارهای ایستایی و پویا تا حدود دو برابر بیشتر از گوشت سیب مقاومت کرده و از گسیختگی پوست سیب جلوگیری نماید، این موضوع می‌تواند عامل کوفتگی زیر پوستی سیب را بدون آسیب دیدن

جدول ۱- خواص فیزیکی و ابعاد هندسی دو رقم سیب

رقم محصول	حجم (cm <sup>3</sup> )	رطوبت اولیه (%)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	ابعاد متوسط (mm)		
				جرم متوسط (g)	قطر بزرگ	قطر متوسط
گلدن دلشیز	۱۵۱/۳۸	۸۵	۰/۸۴۶	۱۳۰/۳۹	۶۶/۶۴	۶۰/۶۰
رد دلشیز	۱۵۶/۰۳	۸۵	۰/۸۶۸	۱۴۰/۴۰	۶۷/۶۲	۶۲/۷۱

جدول ۲- خواص مکانیکی پوست، گوشت و هسته سیب رقم گلدن دلشیز (در رطوبت اولیه ۸۵ درصد بر مبنای تر)

بخش سیب	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	تنش تسلیم (MPa)
پوست	۰/۸۶۷	۴/۴۹۶	۰/۳۵*	۰/۳۰۶
گوشت	۰/۸۲۵	۱/۵۸۳	۰/۳۵	۰/۱۷۳
هسته	۰/۸۹۶	۱/۸۷۴	۰/۳۵	۰/۲۰۲
میانگین (وزنی)	۰/۸۳۳	۲/۶۵۱	۰/۳۵	۰/۲۲۷

\* بر اساس منابع موجود (محسنین، ۱۹۸۶)

جدول ۳- خواص مکانیکی پوست، گوشت و هسته سیب رقم رد دلشیز (در رطوبت اولیه ۸۵ درصد بر مبنای تر)

بخش سیب	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	تنش تسلیم (MPa)
پوست	۰/۹۲۰	۵/۰۴۷	۰/۳۵*	۰/۸۵۳
گوشت	۰/۸۳۶	۱/۵۹۱	۰/۳۵	۰/۲۱۲
هسته	۰/۹۵۳	۱/۶۱۶	۰/۳۵	۰/۲۴۸
میانگین (وزنی)	۰/۸۵۰	۲/۷۵۱	۰/۳۵	۰/۴۳۸

\* بر اساس منابع موجود (محسنین، ۱۹۸۶)

دارای بسامدهای طبیعی ۱۴۸/۲۱ و ۱۷۴/۲۳ Hz در راستای قطبی است (جدول ۶).

اولین بسامد مودال (شبیه‌سازی شده) در راستای قطبی در رقم گلدن دلشیز ۱۳۸/۱۸ Hz (مود اول)، دومین بسامد مودال ۱۵۱/۴۵ Hz (مود دوم) و سومین بسامد مودال Hz

در راستای قطبی اولین مود ارتعاشی برای رقم گلدن دلشیز در بسامد طبیعی ۱۲۵/۲۷ Hz حس شده و مود دوم و سوم به ترتیب دارای بسامدهای طبیعی ۱۵۱/۱۲ و ۱۸۵/۱۷ Hz است (جدول ۴). در رقم رد دلشیز اولین مود ارتعاشی در بسامد طبیعی ۱۲۱/۶۱ Hz حس شده و مود دوم و سوم به ترتیب

تغییرات بسامدها صعودی است و با تجزیه و تحلیل تحلیل مودال سازگاری دارد.

میانگین تفاوت بین بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول برای رقم گلدن دلشیز در راستای قطبی و استوایی به ترتیب ۶/۶ و ۶/۸۶ می باشد (جدول ۴ و ۵) و برای رقم رد دلشیز در راستای قطبی و استوایی به ترتیب ۸/۰۶ و ۶/۲۰ درصد است (جدول ۶ و ۷) که این امر نشان دهنده این است که درصد خطا بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی نتایج قابل قبولی ارائه شده است که این امر می‌تواند به دلیل شبیه‌سازی بسیار خوب، شبکه‌بندی مناسب، خواص فیزیکی و مکانیکی محاسبه شده دقیق به عنوان پارامترهای ورودی در نرم‌افزار Abaqus هم‌چنین استفاده از حسگرهای نیروسنج و شتاب‌سنج با دقت بسیار بالا می‌باشد.

#### اعتبارسنجی بسامدهای طبیعی و شبیه‌سازی

با توجه به اهمیت بسامدهای طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی میوه سیب، سه بسامد طبیعی اول به‌دست‌آمده از میوه سیب ارقام گلدن دلشیز و رد دلشیز با استفاده از آزمون فرضیه‌های آماری ناپارامتریک<sup>۱</sup> و یلکاکسون<sup>۲</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از آزمون فرضیه‌های آماری ناپارامتریک و یلکاکسون برای پی بردن به اینکه تفاوت بسامدهای طبیعی در هر دو رقم میوه سیب (گلدن دلشیز و رد دلشیز) متفاوت است یا خیر، با مراجعه به آزمون  $Z(-۳/۲۲)$  در سطح خطای کمتر از ۰/۰۱ معنی‌دار است ( $\text{Sig} = ۰/۰۰۱$ ). به عبارت دیگر می‌توان گفت که اختلاف بسامدهای طبیعی در دو گروه با اطمینان ۰/۹۹ از نظر آماری معنی‌دار است. این نتیجه نشان دهنده رد فرضیه  $H_0$  تحقیق در مورد برابری بسامدهای طبیعی در هر دو گروه است. جرم یک شتاب‌سنج می‌تواند به طور قابل توجهی بر ویژگی‌های پویای سازه‌ای که روی آن نصب شده است تأثیر بگذارد. این معمولاً اثر بارگذاری جرم نامیده می‌شود که تمایل به کاهش بسامدهای طبیعی اندازه‌گیری شده دارد. قواعد کلی این است که جرم شتاب‌سنج باید کمتر از یک دهم جرم مؤثر سازه‌ای باشد که به آن متصل است (Baharin & Rahman, 2009).

بر اساس این اصل، جرم شتاب‌سنج سه محوره (۱۰/۵ گرم) متصل به نمونه‌های سیب در آزمون ضربه‌ای کمتر از یک دهم جرم نمونه‌های مورد آزمایش است، بنابراین می‌توان از تأثیر جرم شتاب‌سنج بر بسامدهای طبیعی چشم‌پوشی کرد.

۲۰۴/۱۴ (مود سوم) در نظر گرفته شد (جدول ۴). هم‌چنین در رقم رد دلشیز اولین بسامد مودال در راستای قطبی ۱۳۲/۱۸ Hz (مود اول)، دومین بسامد مودال ۱۵۵/۶۱ Hz (مود دوم) و سومین بسامد مودال ۱۹۷/۳۰ Hz (مود سوم) در شبیه‌سازی نرم‌افزار Abaqus به‌دست آمدند (جدول ۶).

در راستای استوایی اولین مود ارتعاشی برای رقم گلدن دلشیز در بسامد طبیعی ۱۳۵/۵۲ Hz حس شده و مود دوم و سوم به ترتیب دارای بسامدهای طبیعی ۱۴۱/۱۶ و ۱۷۵/۱۷ Hz است (جدول ۵). در رقم رد دلشیز اولین مود ارتعاشی در بسامد طبیعی ۱۲۴/۱۸ Hz حس شده و مود دوم و سوم به ترتیب دارای بسامدهای طبیعی ۱۵۸/۲۵ و ۲۱۴/۲۳ در راستای استوایی است (جدول ۷). اولین بسامد مودال در راستای استوایی در رقم گلدن دلشیز ۱۴۱/۳۸ Hz (مود اول)، دومین بسامد مودال ۱۵۵/۸۶ Hz (مود دوم) و سومین بسامد مودال ۱۸۷/۴۵ Hz (مود سوم) در نظر گرفته شد (جدول ۵). برای رقم رد دلشیز اولین بسامد مودال در راستای استوایی ۱۳۷/۱۶ Hz (مود اول)، دومین بسامد مودال ۱۶۸/۴۲ Hz (مود دوم) و سومین بسامد مودال ۲۲۷/۲۲ Hz (مود سوم) در شبیه‌سازی نرم‌افزار Abaqus به‌دست آمدند (جدول ۷). نتایج این تحقیق با نتایج به‌دست آمده از مطالعه (Wang et al., 2017) و (Zhang et al., 2018) مطابقت دارد.

برای تأیید و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی شده در تحلیل مودال اجزای محدود (FEM) در مقایسه با نتایج تجربی (آزمایشگاهی)، ترتیب مودها (از بسامد پایین به بالا) و نسبت‌های بسامدی از تفاوت بین آن‌ها مهم‌تر است. برای سیب رقم گلدن دلشیز نسبت بسامد سه مود اول در آزمایش‌های تجربی در راستای قطبی به ترتیب برابر با ۱:۱/۲۰:۱/۴۷ و در راستای استوایی به ترتیب ۱:۱/۰۴:۱/۲۹ است (جدول ۴ و ۵) در حالی که این نسبت‌ها در FEM در راستای قطبی ۱:۱/۰۹:۱/۴۸ و در راستای استوایی ۱:۱/۱۰:۱/۳۲ است (جدول ۴ و ۵). برای سیب رقم رد دلشیز، نسبت بسامد در راستای قطبی برای سه مود اول در آزمایش‌های تجربی برابر با ۱:۱/۲۱:۱/۴۳ است و این نسبت‌ها در راستای استوایی ۱:۱/۲۷:۱/۷۲ است (جدول ۶ و ۷) در حالی که نسبت‌های بسامدی در FEM در راستای قطبی و استوایی برای رقم رد دلشیز به ترتیب ۱:۱/۱۷:۱/۴۹ و ۱:۱/۲۳:۱/۶۵ است (جدول ۶ و ۷). نسبت‌های بسامدی نشان دهنده این امر است که روند

جدول ۴- مقایسه بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول برای رقم گلدن دلشیز در راستای قطبی

مود	بسامد تجربی (Hz)	نسبت بسامدهای تجربی ( $\frac{f_n}{f_1}$ )	بسامد مودال (Hz)	نسبت بسامدهای مودال ( $\frac{f_n}{f_1}$ )	تفاوت بین بسامدهای تجربی و مودال (%)
مود اول	۱۲۵/۲۷	۱	۱۳۸/۱۸	۱	۱۰/۳۰
مود دوم	۱۵۱/۱۲	۱/۲۰	۱۵۱/۴۵	۱/۰۹	۰/۲۱
مود سوم	۱۸۵/۱۷	۱/۴۷	۲۰۴/۶۶	۱/۴۸	۱۰/۵۲
مود چهارم	۲۰۶/۲۶	۱/۶۴	۲۱۸/۶۵	۱/۵۸	۶
مود پنجم	۲۲۶/۹۶	۱/۸۱	۲۴۰/۵۷	۱/۷۴	۵/۹۹
میانگین بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول					۶/۶

جدول ۵- مقایسه بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول برای رقم گلدن دلشیز در راستای استوایی

مود	بسامد تجربی (Hz)	نسبت بسامدهای تجربی ( $\frac{f_n}{f_1}$ )	بسامد مودال (Hz)	نسبت بسامدهای مودال ( $\frac{f_n}{f_1}$ )	تفاوت بین بسامدهای تجربی و مودال (%)
مود اول	۱۳۵/۵۲	۱	۱۴۱/۳۸	۱	۴/۳۲
مود دوم	۱۴۱/۱۶	۱/۰۴	۱۵۵/۸۶	۱/۱۰	۱۰/۴۱
مود سوم	۱۷۵/۱۷	۱/۲۹	۱۸۷/۴۵	۱/۳۲	۷/۰۱
مود چهارم	۱۹۸/۴۸	۱/۴۶	۲۰۹/۸۵	۱/۴۸	۵/۷۲
مود پنجم	۲۱۶/۳۵	۱/۵۹	۲۳۱/۱۸	۱/۶۳	۶/۸۵
میانگین بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول					۶/۸۶

جدول ۶- مقایسه بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول برای رقم رد دلشیز در راستای قطبی

مود	بسامد تجربی (Hz)	نسبت بسامدهای تجربی ( $\frac{f_n}{f_1}$ )	بسامد مودال (Hz)	نسبت بسامدهای مودال ( $\frac{f_n}{f_1}$ )	تفاوت بین بسامدهای تجربی و مودال (%)
مود اول	۱۲۱/۶۱	۱	۱۳۲/۱۸	۱	۸/۶۹
مود دوم	۱۴۸/۲۱	۱/۲۱	۱۵۵/۶۱	۱/۱۷	۴/۹۹
مود سوم	۱۷۴/۲۳	۱/۴۳	۱۹۷/۳۰	۱/۴۹	۱۳/۲۴
مود چهارم	۲۰۳/۱۴	۱/۶۷	۲۱۴/۱۲	۱/۶۱	۵/۴۰
مود پنجم	۲۳۷/۱۷	۱/۹۵	۲۵۶/۱۵	۱/۹۳	۸
میانگین بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول					۸/۰۶

جدول ۷- مقایسه بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول برای رقم رد دلشیز در راستای استوایی

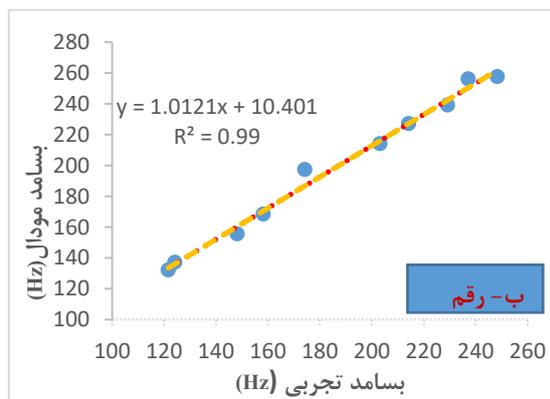
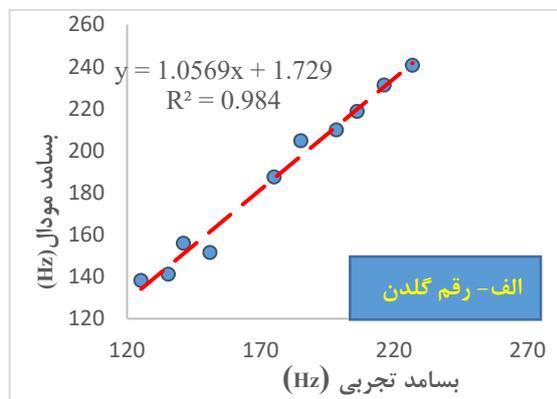
مود	بسامد تجربی (Hz)	نسبت بسامدهای تجربی ( $\frac{f_n}{f_1}$ )	بسامد مودال (Hz)	نسبت بسامدهای مودال ( $\frac{f_n}{f_1}$ )	تفاوت بین بسامدهای تجربی و مودال (%)
مود اول	۱۲۴/۱۸	۱	۱۳۷/۱۶	۱	۱۰/۴۵
مود دوم	۱۵۸/۲۵	۱/۲۷	۱۶۸/۴۲	۱/۲۳	۶/۴۲
مود سوم	۲۱۴/۲۳	۱/۷۲	۲۲۷/۲۲	۱/۶۵	۶/۰۶
مود چهارم	۲۲۹/۲۴	۱/۸۴	۲۳۹/۲۳	۱/۷۴	۴/۳۵
مود پنجم	۲۴۸/۳۶	۲	۲۵۷/۶۵	۱/۸۸	۳/۷۴
میانگین بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول					۶/۲۰

شبه‌سازی ۱۳۸/۱۸، ۱۵۱/۴۵ و ۲۰۴/۶۶ Hz است که کم‌ترین اختلاف در مود دوم (۰/۲۱٪) و بیش‌ترین اختلاف در مود سوم (۱۰/۵۲٪) مشاهده گردید. همچنین در رقم رد دلشیز مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب دارای بسامدهای طبیعی تجربی ۱۲۱/۶۱، ۱۴۸/۲۱ و ۱۷۴/۲۳ Hz و بسامدهای شبه‌سازی ۱۳۲/۱۸، ۱۵۵/۶۱ و ۱۹۷/۳۰ Hz است که کم‌ترین و بیش‌ترین اختلاف بین بسامدهای طبیعی تجربی و شبه‌سازی در مودهای دوم و سوم به ترتیب ۴/۹۹٪ و ۱۳/۲۴٪ مشاهده شد.

همان‌طور که پیداست اختلاف بین این بسامدها برای هر دو گروه میوه سیب از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است به طوری که مدل رگرسیون خطی و ضریب تعیین  $R^2$  ناشی از مقایسه بین بسامدهای تجربی و مودال برای رقم گلدن دلشیز و رقم رد دلشیز به ترتیب ۰/۹۸۴ و ۰/۹۹۹ است (شکل ۱۱ الف و ب). این نتایج می‌تواند مزیت قابل توجهی برای طراحی ماشین‌های برداشت و پس از برداشت در مقیاس تجاری برای میوه سیب را امکان‌پذیر سازد.

در صنعت قبل از ساخت قطعات مهندسی برای تعیین جنس، آزمون‌های مودال به این منظور استفاده می‌شود که در بخش‌هایی که مقدار جابجایی بیشتر می‌شود جنس سازگارتی انتخاب کنند تا قطعات عمر و کارکرد بیشتری داشته باشند (He and Fu 2001). با توجه به این نوع کاربرد تحلیل مودال، می‌توان در محصولات کشاورزی از این نکته استفاده کرد تا با اصلاح ژنتیکی محصولات کشاورزی به خصوص میوه‌ها، بافت آن‌ها را به گونه‌ای تغییر داد تا عمر مفید محصولات کشاورزی و میوه‌ها افزایش یابد.

همچنین مدل اجزای محدود ایجاد شده یک روش سریع، مقرون به صرفه و غیرمخرب برای ارزیابی بسامدهای طبیعی به ویژه بسامد تشدید و ارائه مدل رگرسیونی با دقت قابل قبول برای طراحی ماشین‌های برداشت و پس از برداشت میوه‌ها است. به منظور اعتبارسنجی بسامدهای طبیعی تجربی (آزمایشگاهی) و شبه‌سازی (تحلیل مودال)، مقایسه بین این بسامدها نشان داد که در رقم گلدن دلشیز مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب دارای بسامدهای طبیعی تجربی ۱۲۵/۲۷، ۱۵۱/۱۲ و ۱۸۵/۱۷ Hz و همچنین بسامدهای



شکل ۱۱- مدل رگرسیون خطی و ضریب تعیین میوه سیب الف) رقم گلدن دلشیز ب) رقم رد دلشیز

رقم رد دلشیز و گلدن دلشیز به ترتیب ۰/۸۵۲ و ۰/۳۰۶ مگاپاسکال و همچنین بخش گوشت و هسته میوه سیب برای ارقام رد دلشیز و گلدن دلشیز به ترتیب ۰/۲۱۲، ۰/۱۷۳ و ۰/۲۴۸، ۰/۲۰۲ مگاپاسکال بدست آمد. همچنین نتایج آزمون ضربه نشان داد بسامد تجربی در مود اول (بسامد تشدید) برای رقم گلدن دلشیز در راستای قطبی و استوایی به ترتیب ۱۲۵/۲۷ و ۱۳۵/۵۲ هرتز و برای رقم رد دلشیز در راستای قطبی و استوایی به ترتیب ۱۲۱/۶۱ و ۱۲۴/۱۸ هرتز بدست آمد. سپس با استفاده از مدل رگرسیونی ارائه شده بین بسامد مودال

### نتیجه‌گیری نهایی

در این تحقیق دو مدل سیب صادراتی ارقام گلدن دلشیز و رد دلشیز تحت تأثیر بارهای پویا مطالعه شد. در این تحلیل رفتار پویای نمونه‌ها جهت بررسی صدمات ناشی از ضربه در زمان برداشت و مراحل آن در دو بخش گوشت و پوست میوه سیب توسط آزمون‌های فشاری، کششی و ضربه‌ای با استفاده از داده‌های تجربی و صحت‌سنجی آن با استفاده نرم‌افزار Abaqus مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی کلی نتایج داده‌های تجربی نشان داد با توجه به آزمون فشاری و کششی، تنش تسلیم بخش پوست

## منابع

- Alamar, M.C., Vanstreels, E., Oey, M.L., Molto, E. and Nicolai, B.M. (2008) "Micromechanical behavior of apple tissue in tensile and compression tests: storage conditions and cultivar effect". *Journal of Food Engineering*, 86:324-333.
- ASAE standard (2012) "Compression Test of Food Materials of Convex Shape". ASAE S368.4 DEC2000.
- Asmamaw Y., Tekalign T. and Workneh T.S. (2010) "Specific gravity, dry matter concentration, pH, and crisp-making potential of ethiopian potato (*Solanum tuberosum L.*) cultivars as influenced by growing environment and length of storage under ambient conditions". *Potato Research*, 53:95-109.
- ASTM D4440 Standard Test Method for Plastics: Dynamic Mechanical Properties Melt Rheology, 2015.
- ASTM Standards (2015) "Standard Test Method for Wound Closure Strength of Tissue Adhesives and Sealants". ASTM F2458- 05.
- Baharin, N. H., Rahman, R. A., 2009. Effect of accelerometer mass on thin plate vibration. *Jurnal Mekanikal*. No.29, 100-111. <https://www.researchgate.net/publication/44707632>.
- Celik, H. K., Rennie, A. E. W., & Akinci, I. (2011). Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*, 104, 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.020>.
- Celik, H. K., Ustun, H., Erkan, M., Rennie, A. & Akinci, I. (2021). Effects of bruising of 'Pink Lady' apple under impact loading in drop test on firmness, colour and gas exchange of fruit during long term storage, *Postharvest Biology and Technology*, Volume 179, 2021, 111561, ISSN 0925-5214.
- Chiputula, J. (2009). Evaluating mechanical damage of fresh potato during harvesting & postharvest handling. Master of Science thesis, University of Florida.
- He, J., & Fu, Z. F. (2001). *Modal Analysis*: Butterworth-Heinemann.
- Lewis, R., Yoxall, A., Marshall, M. B. and Canty, L. A. (2008). "Characterizing pressure and bruising in apple fruit". *Wear* 264: 37-46.
- Li, Z., Li, P., Yang, H. and Liu, J. (2013) "Internal mechanical damage prediction in tomato compression using multiscale finite element models". *Journal of Food Engineering*, 116(3): 639-647.
- Lingxin, B., Chengkun C., Guangrui H., Jianguo Z., Adilet S. & Jun C. (2021). "Investigating the dynamic behavior of an apple branch-stem-fruit model using experimental and simulation analysis". *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 186, 2021, 106224.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach

(شبیه‌سازی) و تجربی (آزمایشگاهی) برای مود ارقام گلدن دلشیز و رد دلشیز ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۹ درصد به‌دست آمد.

نتایج آزمون شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Abaqus با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که میانگین تفاوت بین بسامدهای تجربی و مودال در پنج مود اول برای رقم گلدن دلشیز در راستای قطبی و استوایی به ترتیب ۶/۶ و ۶/۸۶ و برای رقم رد دلشیز در راستای قطبی و استوایی به ترتیب ۸/۰۶ و ۶/۲۰ درصد است که نشان‌دهنده درصد خطای پایین آزمون شبیه‌سازی ارائه شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند مزیت قابل توجهی برای طراحی ماشین‌های برداشت و پس از برداشت در مقیاس تجاری برای میوه سیب را فراهم سازد.

## مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

- ابراهیم چاوشی: گردآوری داده‌ها، نرم‌افزار، اعتبارسنجی
- وحید کهریزی: گردآوری داده‌ها، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، نگارش و ویرایش
- مهدی کاکایی: روش شناسی، مفهوم سازی، مصورسازی

## دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

## اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که ممکن است بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

## حمایت مالی

نویسنده(ها) هیچ حمایت مالی خاصی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.

- Sci.publ, New York, 1986.  
<https://doi.org/10.1002/food.19870310724>.
- Namdari Gharaghani, B., Maghsoudi, H., & Mohammadi, M. (2020). Ripeness detection of orange fruit using experimental & finite element modal analysis. *Scientia Horticulturae*, 261, 1-8.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108958>.
- Puchalski, C., Brusewitz G., and Slipek Z., 2003. "Coefficients of Friction for Apple on Various Surfaces as Affected by Velocity. Agricultural Engineering International": the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript FP 03 002. Vol. V. December 2003.  
<https://hdl.handle.net/1813/10323>.
- Rashvand, M., Altieri, G., Genovese, F., Li, Z. & Di Renzo, G. C. (2022). "Numerical simulation as a tool for predicting mechanical damage in fresh fruit", *Postharvest Biology and Technology*, Volume 187, 2022, 111875.
- Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., Van Liedekerke, P., Deli, V., De Baerdemaeker, J. and Roman, H. (2003) "Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device". *Journal of Sound and Vibration*, 266: 465-480.
- Wang, F., Ma, S., Wei, W., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2017). Frequency sweep test & modal analysis of watermelon during transportation. *International Journal of Food Engineering*, 13(5).  
<https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0362>.
- Yousefi, S., Farsi, H., & Kheiralipour, K. (2016). Drop test of pear fruit: Experimental measurement and finite element modelling. *Biosystems Engineering*, 147, 17-25.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.004>.
- Zhang, H., Wu, J., Zhao, Z., & Wang, Z. (2018). Nondestructive firmness measurement of differently shaped pears with a dual-frequency index based on acoustic vibration. *Postharvest Biology & Technology*, 138, 11-18.  
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.12.002>.

