

Simulation of Natural Frequencies of Orange Fruit Using Finite Element Method

Vahid Kahrizi ^a, Ebrahim Ahmadi ^{a*}, Ali Reza Shoshtari ^b

^aDepartment of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

^bDepartment of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

*Corresponding author Email: eahmadi@basu.ac.ir

Introduction

Today, the increasing demand of consumers for high-quality products has led to the development of new technologies for the quality assessment of agricultural products. Iran is ranked the 9th in the world in terms of orange production. Annually, large quantities of agricultural products are degraded due to mechanical and physical damage during various operations such as harvesting, packaging, transportation, sorting, processing, and storage. This study is performed to identify natural frequencies and vibration modes of the Thomson orange fruit in small and large groups using finite element modal analysis by ANSYS software. In addition, physical properties including mass, volume, density and main dimensions were measured and mechanical properties were determined using Instron Texture Profile Analysis. Dynamic behavior of the orange fruit was simulated using the pendulum impact test. Next, the obtained impact was applied to the orange fruit by force gauge and three-axis accelerometer sensors in both polar and equatorial directions. The three-dimensional geometric model of the orange fruit was drawn in the ANSYS software. After meshing and applying the boundary conditions, the first 20 modes and corresponding natural frequencies were obtained. Since the objective of this study was to identify the natural frequencies of the orange fruit, it was considered free to move and rotate in space. The results showed that the natural frequencies of orange fruit are in the range of 0 to 248.41 Hz. Knowledge of the texture characteristics and dynamic behavior of horticultural products is essential for the design and development of agricultural machinery. Also, the design and development of agricultural machinery are directly related to the biological properties of agricultural products.

Materials and Methods

In the present study, Thomson orange variety is used. For experiments, a certain number of oranges were harvested from the Citrus and Subtropical Fruits Research Institute, Ramsar (50° 40' E and 36° 52' N). Performing finite element analysis needs knowing the physical and mechanical properties of the flesh and skin of the orange fruit. The physical and mechanical properties of the tested samples include geometric dimensions, modulus of elasticity, Poisson's ratio, and density. In the present study, the dynamic behavior of orange fruit under dynamic loads was investigated by performing an impact test using a pendulum. The orange fruit was hung from the ceiling using a thin thread to perform experimental tests and extract the modal parameters. Impact on orange samples was applied at three angles of 7° (below the yield point), 10° (dynamic yield point), and 20° (above the dynamic yield point).

Results and Discussion

To validate the experimental (laboratory) natural frequencies and simulation, the comparison between these frequencies showed that in large-group oranges, the first, second, and third modes have experimental natural frequencies of 125.4, 146.9, and 180.4 Hz, respectively. Also, the simulation frequencies (modal frequencies) are 133.80, 146.16, and 196.66 Hz. The lowest and the highest differences were observed in the second (0.5%) and third mode (9.01%), respectively. In small-group oranges, the first, second, and third modes have experimental natural frequencies of 152.2, 188.8, and 242.2 Hz, respectively, and simulation frequencies are 167.79, 187.50, and 248.30 Hz. The lowest and highest differences between experimental and simulation natural frequencies were observed in the second and first modes (i.e., 0.68% and 10.24%, respectively).

Conclusion

Although there are some limitations, it can be agreed that Computer Aided Engineering (CAE) applications are very useful in predicting natural frequencies and modes of vibration of round fruits such as oranges. Using the obtained frequencies, especially the resonance frequency and the vibrational mode shape, In the actual transportation of orange, it is possible to

avoid the resonance frequency by using appropriate packaging and transportation methods, so as to reduce the decay of fruit quality and predict the shelf life.

Keywords: vibration modes, Dynamic Behavior Modeling, Modal Analysis

شبیه‌سازی فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال با استفاده از روش اجزای محدود

وحید کههریزی^۱، ابراهیم احمدی^{۲*}، علی‌رضا شوشتری^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*- نویسنده مسؤل: eahmadi@basu.ac.ir

چکیده

سالانه مقادیر زیادی از محصولات کشاورزی در اثر بارهای دینامیکی و سایر آسیب‌های مکانیکی که از طرف اجزاء متحرک ماشین‌ها هنگام برداشت، حمل و نقل، انبار کردن و بسته بندی به آن‌ها وارد می‌شود از بین می‌روند یا دچار افت کیفیت می‌شوند. این در حالی است که تاکنون بیشتر تحقیق‌های انجام شده برای تجزیه و تحلیل عملیات‌های مذکور با آزمون‌های عملی همراه بوده است و نتایج آن فقط در شرایط خاص می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هدف از این مطالعه شناسایی فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی در میوه پرتقال رقم تامسون با استفاده از روش آنالیز مودال اجزای محدود می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی رفتار دینامیکی میوه پرتقال از آزمون پاندول بوسیله حسگرهای نیروسنج و شتاب‌سنج سه محوره در دو راستای قطبی و استوایی به میوه پرتقال ضربه وارد شد. مدل هندسی سه بعدی میوه پرتقال در نرم افزار انسیس ترسیم شد و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مشخص، خواص فیزیکی و مکانیکی پوست و گوشت میوه پرتقال تعیین گردید. پس از مرحله شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی، ۲۰ مود اول و فرکانس‌های طبیعی متناظر با آن به دست آمد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال در محدوده ۰ تا ۲۴۸/۴۱ Hz می‌باشد. از نتایج این تحقیق می‌توان در طراحی ماشین‌های برداشت و بهینه‌سازی مکانیزم‌های پس از برداشت و حمل و نقل به منظور کاهش ضایعات استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز مودال، مدل‌سازی رفتار دینامیکی، مودهای ارتعاشی

مقدمه

امروزه افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصول با کیفیت بالا، منجر به توسعه فناوری‌های جدید برای ارزیابی کیفی محصولات کشاورزی شده است. مرکبات از جمله محصولات باغی می‌باشد که از جایگاه ویژه‌ای در زمینه اشتغال و ارزآوری برخوردار هستند و علاوه بر مصارف تازه‌خوری در صنعت فرآوری و تولید آب میوه نیز استفاده می‌شود. سالانه مقدار زیادی از محصولات کشاورزی در اثر عدم شناخت کافی از ویژگی فیزیکی و مکانیکی محصولات در عملیات مختلف از جمله برداشت، حمل و نقل و بسته‌بندی از بین می‌روند (Chen *et al.*, 2013). امروزه روش‌های تحلیلی به وسیله کامپیوتر، کمک شایانی در شناخت خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی کرده‌اند. افزایش توانمندی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری به مهندسان اجازه می‌دهد مسائل پیچیده را با فناوری طراحی به کمک کامپیوتر و روش‌های عددی به صورت مجازی بدون ساخت فیزیکی و انجام آزمایش حل کنند. از آنجا که برداشت، بسته‌بندی و فرآوری مرکبات در بیشتر کشورهای پیشرفته به صورت مکانیزه می‌باشد، اهمیت و توسعه آن در ایران با توجه به تولید و سطح زیر کشت، حائز اهمیت می‌باشد. تلاش‌های بسیاری در چند دهه گذشته برای به کار گرفتن شیوه‌های نوین برای کنترل کیفی غیرمخرب محصولات کشاورزی انجام شده است. این روش‌ها مبتنی بر یافتن ویژگی‌های مکانیکی و رفتار دینامیکی مرتبط با شاخص‌های رسیدگی محصولات می‌باشد. روش‌های مورد استفاده برای به دست آوردن کیفیت میوه، توسط آزمون‌های غیرمخرب امروزه جایگاه ویژه‌ای در فرآوری محصولات کشاورزی پیدا کرده‌اند (Mizrach, 2007). تاکنون چندین گزارش علمی در مورد روش آنالیز مودال اجزای محدود در مورد میوه‌هایی مثل هندوانه، طالبی، گلابی، سیب، گوجه فرنگی و قهوه ارائه شده است. (Abbaszadeh *et al.*, 2014; Seyedabadi *et al.*, 2014; Celik, 2017; Celik *et al.*, 2011; Kabas *et al.*, 2008; Salarikia, Miraei Ashtiani, *et al.*, 2017; Yousefi *et al.*, 2016; Tinoco *et al.*, 2014).

به طور کلی، محققان با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی مکانیکی، با استفاده از روش اجزای محدود، تحقیقاتی را برای تعیین ویژگی‌های مودال سیستم‌های بیولوژیکی انجام داده‌اند (Villibor, *et al.* 2019; Tinoco and Pe˜na, 2018; Coelho *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2015; Tinoco *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2018). با همه‌ی ویژگی‌های شبیه‌سازی، طراحان زیادی از گذشته تا به حال تمام عزم خود را جزم نموده‌اند که شبیه‌سازی خود را به واقعیت نزدیکتر، دقت طراحی بالاتر، بازده بالاتر و عملکرد بهینه‌تری را طراحی کنند. همواره تحقیقات متعددی با روش تحلیل المان محدود بر روی محصولات مختلف کشاورزی موجود می‌باشد، اما اغلب تحقیقاتی که در زمینه تحلیل خواص مکانیکی محصولات کشاورزی به وسیله روش المان محدود انجام گرفته شده بر روی میوه‌هایی چون سیب و گلابی بوده است (Lu *et al.*, 2006; Gyeong-Won *et al.*, 2008).

بدون پایگاه داده از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی، مهندسان و طراحان باید با استفاده از روش‌های تجربی به طراحی ماشین‌های کشاورزی و تجهیزات پردازند که این امر از لحاظ زمان و هزینه ناکارآمد است. ضربه مکانیکی، به عنوان یک عامل مهم باعث خسارت محصولات کشاورزی در هنگام برداشت و پس از برداشت شناخته شده است. با توجه به گسترش دانش کامپیوتری و در دسترس بودن این فناوری می‌توان برای حل مسائل پیچیده با استفاده از طراحی به کمک کامپیوتر¹ بدون نیاز به واقعیت فیزیکی، آن را شبیه‌سازی کرد (Celik *et al.*, 2011). با این حال شبیه‌سازی

¹ . Computer aided design

رفتار میوه پرتقال با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود تحت بار دینامیکی ضربه گزارش نشده است. به کمک نتایج به دست آمده از آزمون مودال می توان صحت طراحی و ساخت تجهیزات را بررسی و در صورت نیاز جهت بهینه سازی و بهبود آنها اقدام نمود. همچنین می توان نحوه عملکرد سیستم به ازای نیروهای مختلف که ممکن است در شرایط کاری پیش بیایند را پیش بینی و از وقوع پدیده های مخرب همچون تشدید پیشگیری نمود. رزونانس^۱ یا تشدید زمانی اتفاق می افتد که فرکانس تحریک خارجی با فرکانس طبیعی سیستم یکسان شود. اگر یک سیستم در معرض ارتعاش اجباری خارجی قرار گیرد و فرکانس ارتعاش اجباری خارجی با فرکانس طبیعی آن برابر باشد، رزونانس اتفاق می افتد. پس از آن دامنه ارتعاش سیستم بطور قابل توجهی افزایش می یابد. پدیده رزونانس می تواند به سیستم آسیب جدی رسانده و عمر آن را بطور قابل توجهی کاهش دهد. بنابراین ضروری است که پارامترهای دینامیکی میوه پرتقال را به منظور طراحی ماشین های برداشت، حمل و نقل، درجه بندی و بسته بندی به دست آورد و شبیه سازی نمود.

مواد و روش ها

مبانی آنالیز مودال تجربی

به طور کلی رفتار دینامیکی یک سیستم جرم- فنر و میرا کننده به وسیله معادله حرکت دیفرانسیل خطی مرتبه دوم به صورت معادله (۱) تعریف می شود.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (1)$$

که در معادله فوق $X(t)$ بردار جابجایی به عنوان تابعی از زمان، M ماتریس جرم یا ماتریس اینرسی، C ماتریس میرایی، K ماتریس سختی سیستم و $F(t)$ بردار نیروی اعمال شده به عنوان تابعی از زمان می باشد. از این معادله فرکانس های طبیعی سیستم در حوزه خطی الاستیک به دست می آید. مدل مودال به وسیله ماتریسی از توابع پاسخ فرکانسی $H(\omega)$ که به وسیله نسبت سیگنال پاسخ $\dot{X}(\omega)$ به سیگنال ورودی $F(\omega)$ در حوزه فرکانسی محاسبه می شوند.

$$H(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)} \quad (2)$$

در مرحله دوم، پارامترهای مودال با استفاده از روش های برآورد پارامتر غیرخطی استخراج می شوند. برآورد قطب ها (فرکانس ها و میرایی) در حوزه فرکانس به روش نمایی حداقل مربعات به دست می آیند. اگر $H(\omega)$ ماتریسی با n_i درجه آزادی ورودی و n_o درجه آزادی خروجی باشد، برای هر المان h_{ij} می توان نوشت.

$$h_{ij}(\omega) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{r_{ijk}}{(j\omega - \lambda_k)} + \frac{r_{ijk}^*}{(j\omega - \lambda_k^*)} \right] \quad (3)$$

رابطه مربوط به حوزه زمان به صورت معادله (۴) می باشد.

¹ . Resonance

$$h_{ij}(t) = \sum_{k=1}^N (r_{ijk} \cdot e^{\lambda_k t} + r_{ijk}^* \cdot e^{\lambda_k^* t}) \quad (4)$$

در معادلات فوق، $h_{ij}(\omega)$ تابع پاسخ فرکانسی^۱ بین پاسخ (یا خروجی) و مرجع (ورودی یا تحریک شده) و $h_{ij}(t)$ پاسخ پالسی^۲ بین ورودی و خروجی می باشد. N تعداد مدهای ارتعاشی به منظور ساختار پاسخ دینامیکی است که در داخل محدوده فرکانسی شرکت می کنند. r_{ijk} مقدار باقیمانده برای مود K ، r_{ijk}^* مزدوج مختلط^۳ از مقدار باقیمانده از مود k ، λ_k مقدار قطب برای مود k ، λ_k^* مزدوج مختلط از مقدار قطب برای مود k می باشد. قطب مود k می تواند به صورت معادله (۵) بیان شود (Coucke et al., 2003).

$$\lambda_k = C_K + j \cdot \omega_{dk} \quad (5)$$

در معادله فوق قسمت حقیقی از قطب، C_K مقدار میرایی از مود K می باشد. سیستم های فیزیکی همیشه مقدار میرایی منفی دارند زیرا بزرگی آن با زمان کاهش می یابد. قسمت موهومی از معادله فوق، ω_{dk} بیانگر فرکانس طبیعی مستهلک شونده^۴ از مود K می باشد. نسبت میرایی^۵، Z نسبت میرایی به مقدار میرایی بحرانی است که با معادله (۶) بیان می شود.

$$Z = \frac{C}{C_{crit}} \times 100 \quad (6)$$

فرکانس طبیعی میرا به صورت معادله (۷) بیان می شود.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - Z^2} \quad (7)$$

که ω_n فرکانس طبیعی نامیرا^۶ و ω_d فرکانس طبیعی میرا بر حسب رادیان بر ثانیه (rad/s) می باشند.

هنگامی که فرکانس های طبیعی و مقادیر میرایی به دست آیند، ضرایب شکل مود یا باقیمانده می توانند با استفاده از روش دامنه فرکانس حداقل مربعات مشخص شوند. قطب ها، فرکانس های طبیعی، فاکتورهای میرایی، شکل های مود و باقیمانده معمولاً به عنوان پارامترهای مودال اشاره می شود و می توانند از آزمایش های دینامیکی حاصل شوند (Coucke et al., 2003).

تهیه نمونه ها و انجام آزمایش های تجربی

پرتقال مورد استفاده در آزمایش ها وارسته تامسون می باشد. برای انجام آزمایش ها تعداد معینی پرتقال از پژوهشکده مرکبات و میوه های نیمه گرمسیری واقع در شهرستان رامسر (در شمال کشور ایران) از توابع استان مازندران برداشت شد. برای جلوگیری از وارد آمدن هر گونه صدمه به میوه، برداشت به

1. Frequency response function
 2. Pulse response
 3. Complex conjugate
 4. Damped natural frequency
 5. Damping ratio
 6. Undamped natural frequency

صورت دستی انجام شد و پرتقال‌ها به دقت در جعبه‌های پلاستیکی به صورت یک ردیفه جهت حمل به آزمایشگاه خواص مکانیکی و رئولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا قرار داده شدند. سپس میوه‌ها در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۵٪ نگه‌داری شدند. پرتقال‌ها در دو دسته با اندازه‌های کوچک و بزرگ جداسازی شدند و قبل از انجام آزمایش‌ها پرتقال‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شدند تا با دمای محیط هم‌دما شوند.

تعیین خواص فیزیکی

مشخصات هندسی و خصوصیات فیزیکی شامل جرم، ابعاد (قطر بزرگ، قطر متوسط و قطر کوچک) و چگالی در محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری جرم از ترازو دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری ابعاد پرتقال از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. چگالی از نسبت جرم نمونه در آب به اختلاف جرم نمونه در هوا و جرم نمونه در آب تعیین شد (Mohsenin, 1986).

در این تحقیق پرتقال‌های تامسون به دو گروه کوچک و بزرگ تقسیم شدند. از هر دسته، ۶۰ پرتقال برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی انتخاب شد. قطر متوسط نمونه‌های کوچک ۶۶ میلی‌متر، قطر متوسط نمونه‌های بزرگ ۸۲ میلی‌متر، ضخامت پوست میوه پرتقال ۳ میلی‌متر و جرم حجمی میوه پرتقال و پوست آن به ترتیب ۸۹۰ و ۹۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب اندازه‌گیری شدند.

تعیین خواص مکانیکی

آزمایش‌های مکانیکی بر روی گوشت و پوست میوه پرتقال با استفاده از دستگاه آنالیز بافت^۱ اینسترون (Zowick/roell) مدل (Bbt1-Fro.5th.D14) مجهز به نیروسنج (مدل X Force Hp با ظرفیت ۵۰۰ نیوتن با مشخصه ۲ میلی‌ولت بر ولت) ساخت کشور آلمان موجود در آزمایشگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی‌سینا صورت گرفت. به منظور استخراج پارامترهایی از قبیل مدول یانگ، تنش تسلیم و نیروی شکست برای پوست و گوشت میوه پرتقال به عنوان برخی ورودی‌های مدل‌سازی المان محدود (به صورت الاستیک خطی) در نرم افزار انسیس استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شدند. آزمایش پانچری^۲ (نفوذی) به صورت جداگانه در ۱۰ تکرار با استفاده از پروب‌های استوانه‌ای ۱۱/۳۵ و ۴/۵ میلی-متری و سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب برای گوشت و پوست میوه پرتقال انجام شد. آزمایش پانچری بر روی گوشت میوه پرتقال در راستای عرضی (قطر استوایی) انجام شد. منظور از بارگذاری عرضی در این آزمایش‌ها، هم راستا بودن بردار نیرو در جهت عمود بر محور طوقه و دم نمونه است.

¹. Texture Profile Analysis

². Puncture

آزمایش‌های پاندولی

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار دینامیکی میوه پرتقال تحت بارهای دینامیکی از آزمون ضربه با استفاده از پاندول انجام شد. پاندول شامل بازویی به طول ۰.۵۵۷ متر با یک محفظه آلومینیومی شکاف دار برای قرارگیری حسگر نیروسنج و یک ضربه‌زن محدب شکل از جنس تفلون (باشعاع انحنای ۲۵ میلی‌متر) می‌باشد. این دستگاه مجهز به حسگرهای نیروسنج (PCB 208c02, PCB Pizotronics, USA, sensitivity: 10.97 mV/N) و شتاب سنج سه محوری پیزوالکتریک (PCB 356A26, PCB Pizotronics, USA, sensitivity: 50.1 mV/g (X), 50.6 mV/g (Y), 49.08 mV/g (Z)) می‌باشد که تحت زوایای مختلف با استفاده از ضربه‌زن به پرتقال نیرو وارد شد و داده‌های نیروی برخورد و شتاب در راستای سه محور در مدت زمان اعمال ضربه با استفاده از دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004) استخراج گردید (Ahmadi and Barikloo, 2016 a, b). قبل از انجام آزمایش‌های پاندولی نقطه تسلیم دینامیکی برای نمونه‌های پرتقال تعیین گردید. بر اساس روش ضربه چندگانه با ارتفاع ثابت^۱ (CHMI) برای تعیین نقطه تسلیم دینامیکی از منحنی نیرو- زمان استفاده شد. به این صورت که عدم تغییر در منحنی نیرو- زمان در یک انرژی ثابت با تکرارهای ضربه متوالی در یک نقطه روی محصول، نشان دهنده شروع نشدن تغییر شکل پلاستیک می‌باشد (Ahmadi and Barikloo, 2016 a, b). بنابراین با افزایش انرژی ضربه تحت یک زاویه مشخص و براساس روش سعی و خطا، نقطه تسلیم دینامیکی تحت زاویه ۱۰ درجه برای میوه پرتقال رقم تامسون تعیین گردید. به منظور انجام آزمایش‌های تجربی و استخراج پارامترهای مودال، میوه پرتقال را مطابق شکل ۱ با استفاده از یک نخ از سقف آویزان شد. ضربه وارد بر نمونه‌های پرتقال تحت سه زاویه ۷، ۱۰ و ۲۰ درجه به ترتیب زیر نقطه تسلیم، نقطه تسلیم دینامیکی و بالای نقطه تسلیم دینامیکی وارد گردید. برای هر کدام از زوایای فوق در راستای قطبی و استوایی به نمونه‌های پرتقال نیرو (ورودی) وارد شد به طوری که دقیقاً در طرف مقابل نیروسنج، پاسخ دینامیکی توسط حسگر شتاب سنج سه محوره (خروجی) به دستگاه پردازش سیگنال ارسال و سپس در کامپیوتر ذخیره شدند. همواره تبدیل یک سیگنال از حوزه‌ای به حوزه‌ای دیگر ممکن است. استفاده از تبدیل فوری و تبدیل معکوس آن، این امکان را می‌دهد که سیگنالی را از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس و بالعکس، منتقل کرد. اما ملاحظاتی که در مورد میزان محاسبات، سهولت تفسیر داده و روش‌های کاهش نویز وجود دارد؛ انتخاب نهایی در مورد تبدیل سیگنال‌ها از یک حوزه به حوزه‌ای دیگر را روشن می‌کند. استفاده از توابع طیفی و به اصطلاح، کار در حوزه فرکانس بسیار ساده تر از کار در حوزه‌ی زمان است. دلیل این موضوع می‌تواند تجزیه سیگنال‌های پیچیده به قسمت‌های ساده‌تر جهت تسهیل در تحلیل آنها و همچنین تبدیل عملگرهای کانولوشن^۲ و معادلات دیفرانسیل در حوزه‌ی زمان به عملگرهای جبری در حوزه فرکانس باشد. از روش‌هایی که شناسایی را در حوزه فرکانس و با استفاده از توابع طیفی انجام می‌دهد می‌توان روش برگزینش قله^۳ را به منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی نام برد. به منظور استخراج پارامترهای مودال با استفاده از دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004)، ابتدا حسگرهای نیروسنج و شتاب-

1. Constant-Height Multiple-Impact technique

2. Convolution

3. Peak picking

سنگ کالیبره شدند. نرخ نمونه برداری ۷۵۰ نمونه در ثانیه و ۲۰۴۸ داده در محدوده فرکانس صفر تا ۳۷۵ هرتز با فواصل فرکانسی ۰/۱۸۳ انجام شد. نوع پنجره^۱ در دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال برای انجام آزمون‌های ضربه‌ای، هانینگ^۲ انتخاب شد. همچنین انتقال داده‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس، با استفاده از نرم افزار متلب^۳ و همچنین کدنویسی در این نرم افزار و استفاده از تبدیل فوریه سریع^۴ (FFT) می‌توان تمام مراحل شناسایی سیستم از وارد کردن داده‌ها، فیلتر کردن آنها، شناسایی سیستم و در نهایت نشان دادن پارامترهای مودال به دست آمده را در یک محیط گرافیکی برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک انجام داد. در این پژوهش هر آزمایش در ۵ تکرار انجام شد و در راستای قطبی (۲ سطح ضربه)، راستای استوایی (۲ سطح ضربه)، تحت زاویای ۷، ۱۰ و ۲۰ درجه (۳ سطح ضربه) نیرو به میوه پرتقال وارد گردید. تعداد کل آزمایش‌ها برای هر کدام از نمونه‌های کوچک و بزرگ میوه پرتقال که به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌شدند در جدول ۱ ارائه شده است.

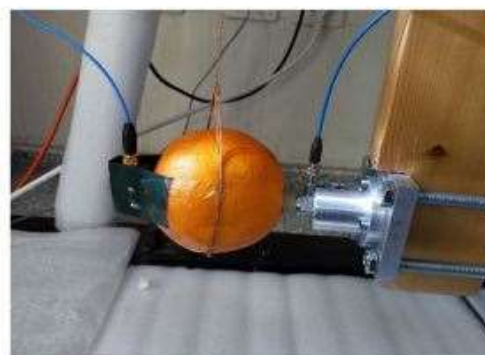
جدول ۱ - مقادیر مربوط به تعداد آزمایش‌ها

Table 1- Values related to the number of tests

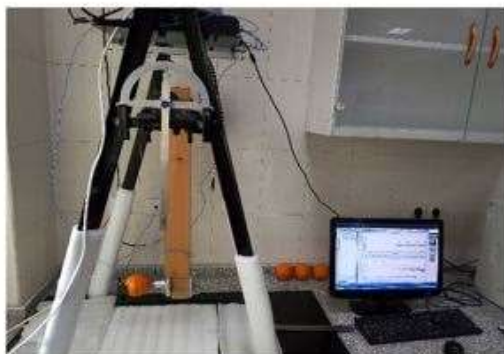
تعداد کل آزمایش‌ها Total number of tests	تعداد تکرار Replication	نیرو Force	راستای استوایی Equatorial direction	راستای قطبی Polar direction	نمونه مورد آزمایش Sample
60	5	3	2	2	بزرگ (Large)
60	5	3	2	2	کوچک (Small)



a (الف)



b (ب)



c (ج)

4. Win
2. Han
3. Mat
4. Fast

شکل ۱- آزمایش پاندولی برای نمونه‌های پرتقال (الف) راستای قطبی (ب) راستای استوایی (ج) دستگاه آزمون پاندولی و حسگرهای نیرو و شتاب سنج سه محوره

Fig. 1. pendulum test for orange samples (a) polar direction (b) equatorial direction (c) pendulum impact test, force sensor, and three-axis accelerometer sensor

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس

به طور کلی، شبیه‌سازی اجزای محدود شامل سه مرحله می‌باشد که عبارتند از: پیش پردازش (ایجاد مدل هندسی سه بعدی، اختصاص خواص مواد به مدل سه بعدی، انتخاب نوع تحلیل، شبکه‌بندی مدل و تعیین شرایط مرزی مناسب)، پردازش (حل) و در نهایت پس از پردازش (تجسم نتایج محاسبه شده) (Entwistle, 2001). در مطالعه‌ای سلیک (Celik, 2017) و همچنین سالاری کیا و همکاران (Salarikia et al., 2017) یک مدل هندسی از کل میوه به منظور محدود کردن عدم قطعیت‌های ناشی از خواص هندسی نامنظم از سلول‌ها برای بافت پوست و گوشت پیشنهاد کردند. خطاهای رایج در المان محدود می‌تواند ناشی از عدم قطعیت‌های انتخاب نوع المان، شکل هندسی، خواص ماده و شرایط مرزی باشد (Celik 2017; Fadiji et al., 2019). ابتدا در مازول مودال نرم افزار انسیس پس از ایجاد مدل هندسی سه بعدی، خواص میوه پرتقال برای پوست و گوشت میوه تعریف شد. در این پژوهش مطابق مقاله جیاسی و همکاران (Gyasi et al., 1981) نسبت پواسون برای گوشت و پوست میوه پرتقال به ترتیب ۰/۴۴۹ و ۰/۳۴۰ در نظر گرفته شد. سپس در محیط طراحی نرم افزار انسیس، مدل هندسی سه بعدی طراحی شد (قطر گوشت میوه پرتقال در گروه بزرگ و کوچک به ترتیب ۷۶ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر و همچنین ضخامت پوست میوه پرتقال ۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شد). پس از تعریف ماده و ایجاد مدل هندسی سه بعدی، مرحله شبکه‌بندی می‌باشد. با توجه به اینکه ویژگی‌های المان‌ها در تحلیل المان محدود تاثیر زیادی دارد، باید شبکه‌بندی با اندازه و انواع مختلف المان انجام شود. به منظور انجام آنالیز مودال، در مرحله شبکه‌زنی آنالیز حساسیت انجام شد. با افزایش یا کاهش اندازه شبکه، نتایج خروجی آنالیز مودال اجزای محدود که همان فرکانس‌های طبیعی می‌باشند تغییر چندانی نداشت (استقلال از شبکه برای نتایج خروجی). بنابراین بهترین حالت ممکن به لحاظ کمترین زمان حل و بهترین جواب برای گوشت و پوست میوه پرتقال به صورت جداگانه، شبکه‌بندی از نوع تتراهدرال (المان هرمی چهار وجهی) به ترتیب با اندازه‌های ۵ و ۴/۵ میلی‌متری در نظر گرفته شد (شکل ۲). تعداد گره‌ها و المان‌ها در میوه پرتقال در گروه بزرگ برای گوشت به ترتیب ۲۲۸۴۲ و ۱۵۸۸۹ و تعداد گره‌ها و المان‌ها برای پوست میوه پرتقال به ترتیب ۱۳۱۵۷ و ۶۶۸۵ به دست آمد (جدول ۲). همچنین تعداد گره‌ها و المان‌ها در میوه پرتقال در گروه کوچک برای گوشت به ترتیب ۱۱۶۷۸ و ۷۹۴۲ و تعداد گره‌ها و المان‌ها برای پوست میوه پرتقال به ترتیب ۸۵۲۸ و ۴۳۵۵ به دست آمد (جدول ۳). در نرم افزار انسیس جهت ایجاد تماس بین گوشت و پوست میوه پرتقال برای یکپارچه شدن آن‌ها به منظور به دست آوردن فرکانس‌های مودال، از تماس نوع به هم چسبیده^۱ به صورت متقارن استفاده شد که نتایج رضایت بخشی مشاهده شد. در صورت عدم تعریف تماس بین گوشت و پوست میوه پرتقال در هنگام شبیه‌سازی در نرم افزار انسیس، دوازده مود اول صفر می‌شوند که این ناشی از حرکت آزاد هر کدام از دو جسم (گوشت و پوست) می‌باشد که برای هر جسم به صورت جداگانه شش درجه آزادی به اشتباه در نظر گرفته شده است. بنابراین بین گوشت و پوست میوه پرتقال به

^۱. Bonded

اندازه ۰/۰۱ میلی‌متر تماس ایجاد شد که پوست میوه پرتقال به عنوان جسم هدف^۱ و گوشت میوه پرتقال به عنوان جسم تماس^۲ در نظر گرفته شد (جدول ۲).

جدول ۲- پارامترهای مشخص کننده خصوصیات مش FEM از هندسه اعمال شده در مدل برای پرتقال های گروه بزرگ

Table 2- parameters characterizing the properties of the FEM mesh of each geometry applied in the model for large group oranges (group A)

Part	نوع المان Type element	اندازه المان Size element (mm)	تعداد گره‌ها Number of nods	تعداد المان Number of elements	نوع تماس Type contact	تماس بخش‌ها Contact between the parts (mm)
گوشت flesh	3D Tetrahedrons	5	22842	15889	Bonded (به هم چسبیده)	0.01
پوست skin	3D Tetrahedrons	4.5	13157	6685	Bonded (به هم چسبیده)	

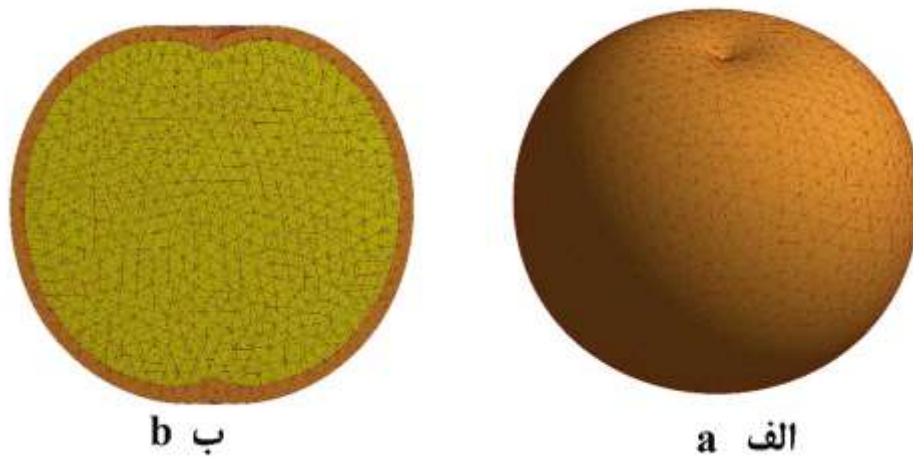
جدول ۳- پارامترهای مشخص کننده خصوصیات مش FEM از هندسه اعمال شده در مدل برای پرتقال های گروه کوچک

Table 3- parameters characterizing the properties of the FEM mesh of each geometry applied in the model for SMALL group oranges (group B)

Part	نوع المان Type element	اندازه المان Size element (mm)	تعداد گره‌ها Number of nods	تعداد المان Number of elements	نوع تماس Type contact	تماس بخش‌ها Contact between the parts (mm)
گوشت flesh	3D Tetrahedrons	5	11678	7942	Bonded (به هم چسبیده)	0.01
پوست skin	3D Tetrahedrons	4.5	8528	4355	Bonded (به هم چسبیده)	

¹ . Target Bodies

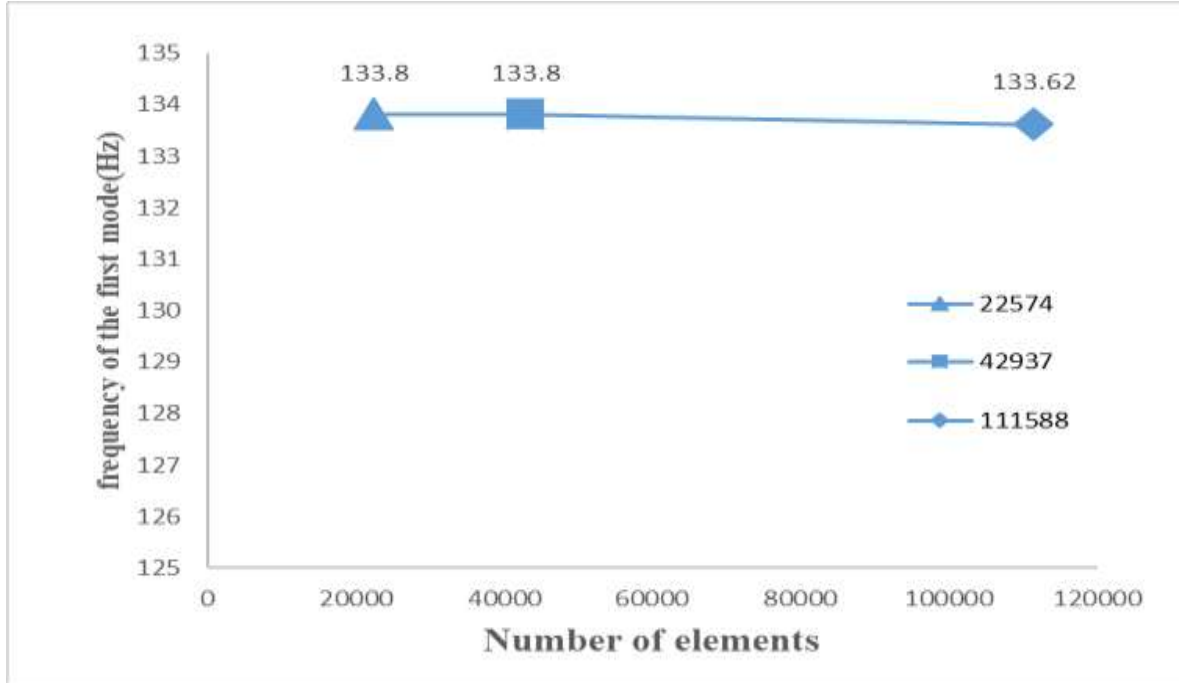
² . Contact Bodies



شکل ۲ - شبکه سه بعدی تتراهدرال (الف) میوه پرتقال کامل (ب) نیم رخ میوه پرتقال

Fig. 2. 3D tetrahedral mesh (a) Whole orange fruit (b) Orange fruit profile

به منظور بررسی استقلال از شبکه، نمودار فرکانس مود اول برحسب تعداد المان‌ها در سه حالت با اندازه المان‌های (گوشت ۵ mm و پوست ۵ mm)، (گوشت ۴ mm و پوست ۳/۵ mm)، (گوشت ۳ mm و پوست ۲/۵ mm) به ترتیب با تعداد المان‌های ۲۲۵۷۴، ۴۲۹۳۷ و ۱۱۱۵۸۸ برای یک گروه از پرتقال‌ها (گروه بزرگ) در شکل ۳ مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، بهترین حالت ممکن به لحاظ کمترین زمان حل و بهترین جواب تعداد المان‌های ۲۲۵۷۴ با اندازه المان ۵ mm برای گوشت و ۴/۵ mm برای پوست انتخاب شد.



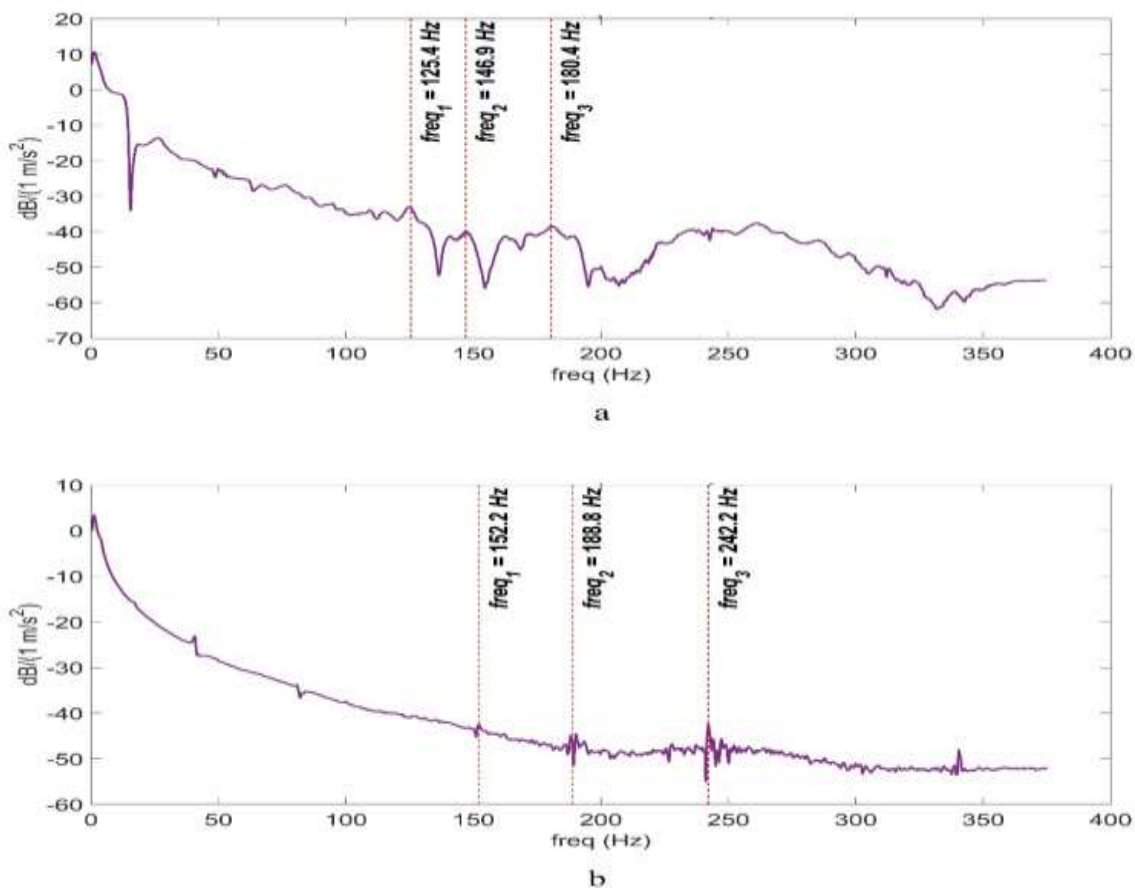
شکل ۳- نمودار فرکانس مود اول برحسب تعداد المان‌ها جهت تعیین استقلال از شبکه

Fig. 3. Frequency diagram of the first mode according to the number of elements to determine independence from the mesh

نتایج و بحث:

حداکثر و حداقل نیروی ضربه در میوه پرتقال گروه بزرگ در موقعیت قطبی و بالای نقطه تسلیم دینامیکی ($F_{max} = 26.17 \text{ N}$, $F_{min} = 2.180 \text{ N}$) و در پرتقال‌های گروه کوچک ($F_{max} = 7.235 \text{ N}$, $F_{min} = 0.930 \text{ N}$) در موقعیت قطبی و نقطه تسلیم دینامیکی می‌باشد. در ابتدای لحظه برخورد پاندول ($t=0.0053 \text{ ms}$)، بیشترین نیرو به میوه پرتقال وارد شده است. این نتایج با نتایج نامداری قراقانی و همکاران مطابقت دارد (Namdari Gharaghani et al., 2020). برای تعیین فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال به وسیله آزمون تجربی، 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 نرم افزار متلب، نتایج از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال داده شد. فرکانس‌های طبیعی آزمون تجربی نمونه‌ها مطابق شکل ۴ برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک استخراج گردید. براساس مطالعه لانگ (Láng, 2006)، پارامترهای مودال اساس تحلیل‌های مهندسی به منظور طراحی ماشین‌های برداشت و به ویژه ماشین‌های ارتعاشی هستند. همانطور که در شکل ۳ پیداست نقاط قله در این نمودارها به ترتیب بیانگر مودهای اول، دوم و سوم می‌باشند. در پرتقال‌های گروه بزرگ (شکل ۴-الف) اولین مود ارتعاشی توسط دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال در فرکانس طبیعی $125/4 \text{ Hz}$ حس شده و مود دوم نسبت به مود اول با ۱۷٪ و همچنین مود سوم نسبت به مود دوم با ۲۲٪ افزایش تغییرات به ترتیب دارای فرکانس‌های

طبیعی ۱۴۶/۹ و ۱۸۰/۴ می‌باشند. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک (شکل ۴-ب) اولین مود ارتعاشی در فرکانس طبیعی ۱۵۲/۲ Hz حس شده و مود دوم نسبت به مود اول با ۲۴٪ و مود سوم نسبت به مود دوم با ۲۸٪ افزایش تغییرات به ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی ۱۸۸/۸ و ۲۴۲/۲ می‌باشند.



شکل ۴- سیگنال حس شده توسط دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال و انتقال آن به نرم افزار متلب و استفاده از تبدیل فوریه سریع الف- پرتقال گروه بزرگ ب- پرتقال گروه کوچک

Fig. 4. The diagram of the force acting on the orange fruit according to time (a) large group oranges. (b) small group oranges

در هر دو گروه پرتقال‌های کوچک و بزرگ روند تغییرات در فرکانس‌های طبیعی آنها به صورت صعودی می‌باشد. فرکانس طبیعی در یک سیستم یک

درجه آزادی به صورت تئوری از رابطه $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ به دست می‌آید. باتوجه به اینکه در پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک، سفتی نمونه‌ها K^1 ، دارای

مقدار یکسانی می‌باشند و فرکانس طبیعی با متوسط جرم نمونه‌ها نسبت عکس دارد، بنابراین فرکانس طبیعی پرتقال‌های گروه کوچک از فرکانس طبیعی

¹ . Sample Stiffness

پرتقال‌های گروه بزرگ بیشتر است. به منظور به‌دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای متناظر با هریک از فرکانس‌های طبیعی با استفاده از مازول مودال نرم افزار انسیس، ۲۰ مود اول به‌دست آمدند. در هر دو گروه کوچک و بزرگ فرکانس طبیعی ۶ مود اول تقریباً صفر می‌باشند (سه فرکانس اول مربوط به حرکت در راستای محورهای مختصات و سه فرکانس دوم مربوط به حرکت چرخشی حول محورهای مختصات می‌باشد) که این نشان دهنده این است که طراحی به درستی صورت گرفته است چرا که میوه پرتقال به صورت کاملاً آزاد در نرم افزار انسیس شبیه‌سازی شده است. باتوجه به این که در مرحله شبکه‌زنی در نوع و اندازه شبکه دقت و حساسیت خوبی صورت گرفته است (استقلال از شبکه برای نتایج خروجی)، فرکانس‌های طبیعی مودهای هفتم تا یازدهم در پرتقال‌های گروه بزرگ $133/80$ Hz (به عنوان مود اول)، مود دوازدهم تا شانزدهم $146/16$ Hz (به عنوان مود دوم) و فرکانس‌های طبیعی مودهای هفدهم تا نوزدهم $196/66$ Hz به عنوان مود سوم در نظر گرفته شد. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک فرکانس‌های طبیعی مودهای هفتم تا یازدهم $167/79$ Hz (به عنوان مود اول)، مود دوازدهم تا شانزدهم $187/50$ Hz (به عنوان مود دوم) و فرکانس‌های طبیعی مودهای هفدهم تا نوزدهم $248/30$ Hz به عنوان مود سوم در نظر گرفته شد (جدول ۴). نتایج این تحقیق با نتایج به‌دست آمده از مطالعه وانگ و همکاران (Wang et al., 2017) و ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) مطابقت دارد. همانطور که از شکل مودها پیداست در هر دو گروه میوه پرتقال، مود اول به صورت مود طولی، مود دوم به صورت مود پیچشی و مود سوم به صورت مود خمشی می‌باشد.

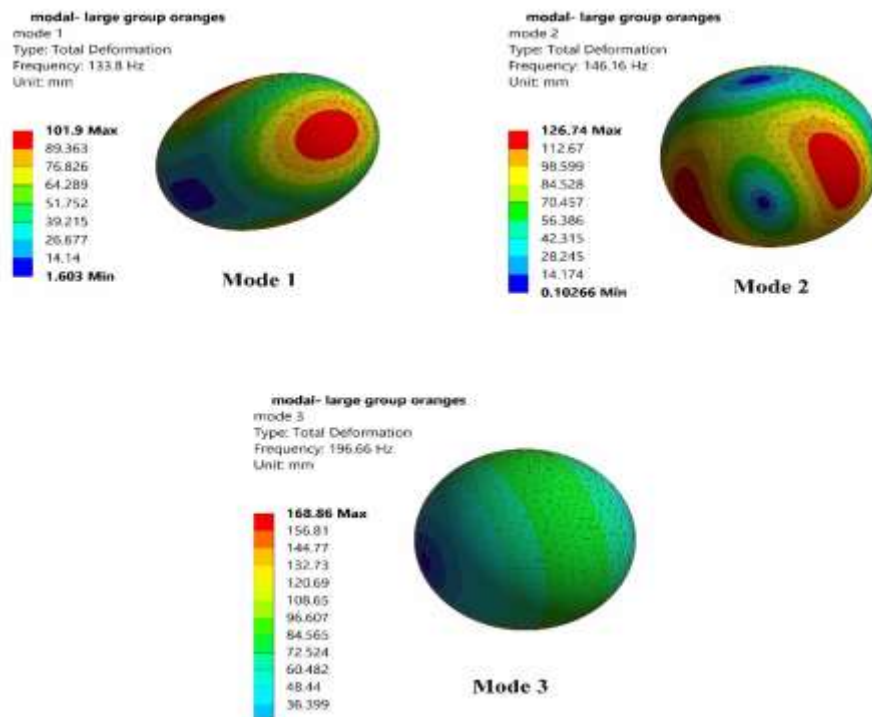
جدول ۴- فرکانس‌های طبیعی به‌دست آمده از شبیه‌سازی پرتقال‌های گروه بزرگ (Group A) و گروه کوچک (Group B) با استفاده از نرم افزار انسیس

Table 4 -Natural frequencies (Hz) obtained from simulation of large group (Group A) and small group (Group B) oranges using ANSYS software

Stage	Group A (Hz)	Group B (Hz)
Mode1	133.80	167.79
Mode2	146.16	187.5
Mode3	196.66	248.30

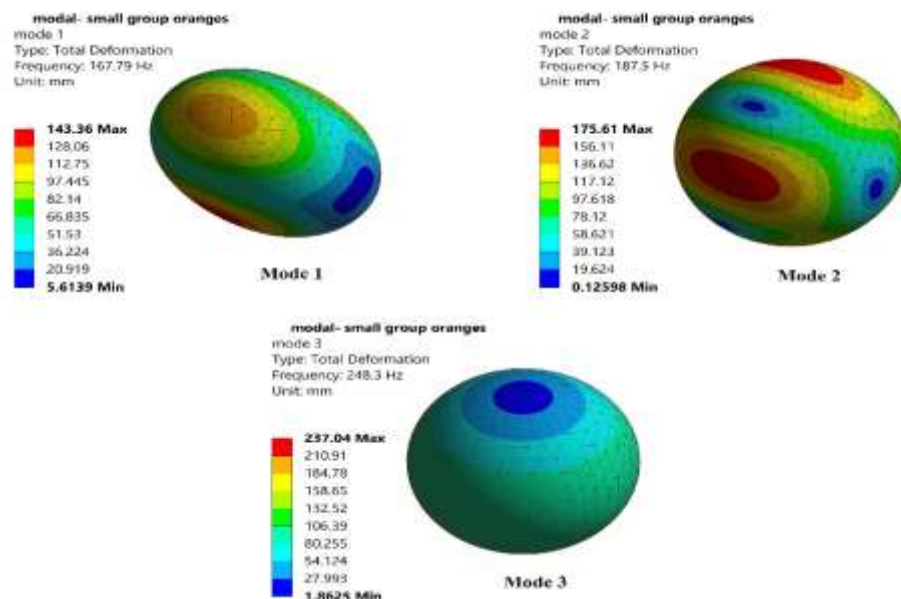
در مطالعه‌ای، میرزایی و همکاران (Mirzaei et al., 2013) گزارش کردند که چگالی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون فاکتورهای تاثیرگذاری بر روی مقادیر فرکانس‌های طبیعی هستند. اگرچه مطالعات زیادی بر روی فرکانس‌های طبیعی محصولات کشاورزی انجام نشده است، اما مقایسه نتایج با برخی از کارهای تحقیقاتی روی میوه سیب (Mirzaei et al., 2013) و میوه گلابی (Song et al., 2006; zhang et al., 2018) انجام شد و تقریباً رفتار مشابهی مشاهده شد. به منظور اعتبارسنجی فرکانس‌های طبیعی تجربی (آزمایشگاهی) و شبیه‌سازی (آنالیز مودال)، مقایسه بین این فرکانس‌ها نشان داد که در پرتقال‌های گروه بزرگ مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی تجربی $125/4$ ، $146/9$ و $180/4$ Hz و همچنین فرکانس‌های شبیه‌سازی $133/80$ ، $146/16$ و $196/66$ Hz می‌باشند که کمترین اختلاف در مود دوم (۵٪) و بیشترین اختلاف در مود سوم (۹/۰۱٪) مشاهده گردید. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی تجربی $152/2$ ، $188/8$ و $242/2$ Hz و فرکانس‌های شبیه‌سازی $167/79$ ، $187/50$ و $248/30$ Hz می‌باشند که کمترین و بیشترین اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی تجربی و

شبهه‌سازی در موده‌های دوم و اول به ترتیب ۰/۶۸٪ و ۱۰/۲۴٪ مشاهده شد. در شکل‌های ۵ و ۶ سه مود اول به ترتیب برای پرتقال‌های تامسون گروه بزرگ و کوچک نمایش داده شده است.



شکل ۵- سه مود اول در پرتقال تامسون گروه بزرگ با استفاده آنالیز مودال اجزای محدود در نرم افزار انسیس

Fig. 5. The first three modes in Thomson oranges large group using finite element modal analysis in Ansys software



شکل ۶- سه مود اول در پرتقال تامسون گروه کوچک با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود در نرم افزار انسیس

Fig. 6. The first three modes in Thomson oranges small group using finite element modal analysis in Ansys software

طبق رابطه تنش خمشی حول یک محور $\sigma = \frac{MC}{I}$ ، بدیهی است که هر چقدر فاصله از محور خمش (تار خنثی) بیشتر شود، تنش و در نتیجه کرنش و مقدار جابجایی نیز بیشتر می‌گردند. چنین می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌هایی که بیشترین فاصله را از تار خنثی داشته باشد بیشترین جابجایی را دارد. مقادیر جابجایی منفی برای تنش فشاری (ناحیه قرمز رنگ) و مقادیر جابجایی مثبت مربوط به تنش کششی (ناحیه آبی رنگ) هستند (شکل‌های ۵و ۶). 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 سازگارتری انتخاب کنند تا قطعات، عمر و کارکرد بیشتری داشته باشند (He and Fu, 2001). باتوجه به این نوع کاربرد آنالیز 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.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ۲۰ فرکانس طبیعی اول و همچنین شکل مودهای متناظر آن با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود بر اساس پاسخ تحریک دینامیکی به وسیله آزمون پاندول (ضربه‌ای) برای میوه پرتقال رقم تامسون در دو گروه بزرگ و کوچک تعیین شدند. فرکانس طبیعی برای میوه پرتقال رقم تامسون توسط نرم افزار انسیس بر اساس پارامترهای ورودی (چگالی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون) در محدوده ۰ تا ۲۴۸/۴۱ Hz به دست آمد. اگرچه محدودیت‌هایی وجود دارد، اما می‌توان پذیرفت که طراحی به کمک کامپیوتر در پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی میوه‌های گرد مانند پرتقال بسیار مفید هستند. با استفاده از فرکانس‌های به دست آمده و شکل مودهای ارتعاشی، در حمل و نقل واقعی میوه پرتقال می‌توان با استفاده از روش‌های بسته‌بندی مناسب در حمل و نقل از به وجود آمدن فرکانس‌های تشدید جلوگیری کرد تا از افت کیفیت میوه کاسته شود.

References

1. Abbaszadeh, R., Rajabipour, A., Sadrnia, H., Mahjoob, M.J., Delshad, M., Ahmadi, H. (2014). Application of modal analysis to the watermelon through finite element modeling for use in ripeness assessment. *Journal of Food Engineering*, 127, 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.020>.
2. Ahmadi, E., & Barikloo, H. (2016 a). Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.017>.
3. Ahmadi, E., & Barikloo, H. (2016 b). Mechanical property evaluation of apricot fruits under quasi-static and dynamic loading. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1), 139-152. <https://doi.org/10.22067/jam.v6i1.29489>.
4. Celik, H. K. (2017). Determination of bruise susceptibility of pears (Ankara variety) to impact load by means of FEM-based explicit dynamics simulation. *Postharvest Biology and Technology*, 128, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.015>.
5. 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>.
6. Chen, L., & Opara, U. L. (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review. *Food Research International*, 51, 823–835. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.046>.
7. Coelho, A.L.F., Santos, F.L., Queiroz, D.M., & Pinto, F.A.C. (2016). Dynamic behavior of the fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. *Coffee Sci*, 11 (1), 1–10. <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/8167>.
8. Couck, P., Ketelaere, B. De., & Baerdemaeker, J. De. (2003). Experimental analysis of the dynamic, mechanical behavior of a chicken egg. *Journal of Sound and Vibration*, 266, 711–721. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00596-0](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00596-0).
9. Entwistle, K. (2001). Basic Principles of the Finite Element Method. IOM Communications.
10. Fadiji, T., Coetzee, C. J., Berry, T. M., & Opara, U. L. (2019). Investigating the role of geometrical configurations of ventilated fresh produce packaging to improve the mechanical strength – experimental and numerical approaches. *Food Packaging and Shelf*, 20, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100312>.
11. Gao, Y., Song, C., & Rao, X. (2018). Image processing-aided fea for monitoring dynamic response of potato tubers to impact loading. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.027>.
12. Gyasi, S., Fridley, R. B., & Chen, P. (1981). Elastic and viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits. *Transactions of the ASAE*, 24(3), 747-0750. doi: 10.13031/2013.34332.
13. Gyeong-Won kim, Gab-Soo, Yeonghwan, Yasuyuki SAGARA. (2008). Analysis of Mechanical Properties of Whole Apple Using Finite Element Method Based on Three-Dimensional Real Geometry. *Food Science and Technology Research*, 14 (4), 329 – 336. <https://doi.org/10.3136/fstr.14.329>.
14. He, J., & Fu, Z. F. (2001). Modal Analysis: Butterworth-Heinemann. Hoffman, J. D., & Frankel, S. (2001). Numerical methods for engineers and scientists: CRC press.
15. Kabas, O., Celik, H.K., Ozmerzi, A., & Akinci, İ. (2008). Drop test simulation of a sample tomato with finite element method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88, 1537–1541. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3246>.
16. Láng, Z. Dynamic modelling structure of a fruit tree for inertial shaker system design. *Biosystems Engineering*, v. 93, n. 1, p. 35-44, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.003>.
17. Lu, R., Srivastava, A.K., & Ababneh, H.A.A. (2006). Finite element analysis and experimental evaluation of bio yield probes for measuring apple fruit firmness. *Transactions of the ASAE*, 49, 123–131. <https://doi.org/10.13031/2013.20220>.
18. Mirzaei, R., Minaei, S., Khoshtaghaza, M., & Borghei, M. (2013). Evaluation of natural frequencies apple using finite element modal analysis. *Journal of Agricultural Machinery*, 3, 48–57 [In Farsi].
19. Mizrach, A. (2007). Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. *Postharvest Biology and Technology*. 46, 271–274. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.05.012>.
20. Mohsenin, N.N. (1986). Physical properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Sci.publ, New York, 1986. <https://doi.org/10.1002/food.19870310724>.
21. Namdari Gharaghani, B., Maghsoudi, H., & Mohammadi, M. (2020). Ripeness detection of orange fruit using experimental and finite element modal analysis. *Scientia Horticulturae*, 261, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2019.108958>.
22. Salarikia, A., Miraei Ashtiani, S.-H., Golzarian, M. R., & Mohammadinezhad, H. (2017). Finite element analysis of the dynamic behavior of pear under impact loading. *Information Processing in Agriculture*, 4, 64–77.

<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.12.003>.

23. Santos, F.L., Queiroz, D.M., Valente, D.S.M., & Coelho, A.L.F. (2015). Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. *Acta Scientiarum Technol*, 37, 11–17. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.19814>.
24. Seyedabadi, E., Khojastehpour, M., & Sadrnia, H. (2015). Predicting Cantaloupe Bruising Using Non-Linear Finite Element Method. *International Journal of Food Properties*, 18(9), 1–28. doi:10.1080/10942912.2014.951892.
25. Song, H.Z., Wang, J., & Li, Y.H. (2006). Studies on vibration characteristics of a pear using finite element method. *Journal of Zhejiang University Science*, 7, 491–496. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.b0491>.
26. Tinoco, H.A., Ocampo, D.A., Pena, F.M. & Sanz-Urbe, J.R. (2014). Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of Coffee arabica L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 108, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.06.011>.
27. Tinoco, H.A., & Peña, F.M. (2018). Harmonic stress analysis on Coffea arabica L. Var. Colombia fruits in order to simulate the selective detachment: A finite element analysis, 94 (2), 163–174. <https://doi.org/10.1177/0037549717738068>.
28. Tinoco, H. A., & Peña, F. M. (2019). Mechanical and geometrical of fruits Coffea Arabica L. var. Colombia to simulate the ripening process by finite element analysis. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12, 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.04.004>.
29. Villibor, G.P., Santos, F.L., Queiroz, D.M., Khoury Junior, J.K., & Pinto, F.A.C. (2019). Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modelling of flexible bodies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105009>.
30. Wang, F., Ma, S., Wei, W., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2017). Frequency sweep test and modal analysis of watermelon during transportation. *International Journal of Food Engineering*, 13(5). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0362>.
31. 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>.
32. 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 and Technology*, 138, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.12.002>.