

بررسی بسامدهای طبیعی میوه سیب با استفاده از روش آنالیز مودال اجزای محدود

رمضان میرزایی^{۱*} - سعید مینایی^۲ - محمد هادی خوش تقاضا^۳ - علی محمد برقی^۴

تاریخ دریافت: ۹۰/۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۲/۸

چکیده

مهمترین نمایشگر کیفیت میوه سفتی می‌باشد، که وابستگی زیادی با ضریب کشسانی دارد. در این تحقیق، تغییرات خصوصیات ارتعاشی (شکل مود و بسامد طبیعی) میوه سیب ناشی از تغییر خصوصیات ماده سیب (ضریب کشسانی، ضریب پواسون، چگالی و حجم) به وسیله روش اجزای محدود آنالیز مودال بررسی شده است. روش جدید پردازش تصویر برای ایجاد مدل سه بعدی غیر کروی و غیر متقارن میوه بکار رفته است. شکل دقیق و سه بعدی میوه با اندازه‌گیری مختصات نقاط سطح بیرونی میوه و ایجاد منحنی‌های دوار غیر یکنواخت از این نقاط و تشکیل سطح و حجم از این منحنی‌ها ایجاد گردیده است. آنالیز مودال به صورت شرایط مرزی آزاد انجام گرفته و ۲۰ مود اول و بسامدهای طبیعی میوه به دست آمد. شش مود اول دارای بسامدهای نزدیک به صفر بوده که مربوط به شش درجه آزادی هر جسم در فضا بوده و نشان‌دهنده صحت مدل اجزای محدود می‌باشد. اولین مود پیچشی با میانگین ۵۸۴ هرتز حاصل گردید. نتایج حاصل از آنالیز مودال نشان داد که بسامد تشدید با اضافه شدن ضریب کشسانی افزایش و با افزایش چگالی کاهش می‌یابد. اثر تغییرات پارامترهای ضریب کشسانی، چگالی و ضریب پواسون بر اولین بسامد تشدید به ترتیب ۸۵ درصد ۱۱ درصد و ۴ درصد به دست آمد. ضریب تغییرات بسامد تشدید نسبت به تغییرات ضریب کشسانی در حدود ۳-۲ برابر ناشی از تغییرات پارامتر چگالی می‌باشد، که نشان‌دهنده بیشترین اثر تغییرات ضریب کشسانی بر تغییر بسامد طبیعی میوه می‌باشد. با تعیین بسامد طبیعی میوه می‌توان ضریب کشسانی و سفتی میوه را تخمین زد.

واژه های کلیدی: آنالیز مودال، روش اجزای محدود، سیب، شکل مود، فرکانس تشدید

مقدمه

دخالته داد. بنابراین امروزه از روش‌های دینامیکی مثل آنالیز مودال که وابستگی کمتری به زمان دارد، جهت تعیین خصوصیات این نوع مواد استفاده می‌شود. بر خلاف تئوری کلاسیک ارتعاشات که عمدتاً پاسخ یک سیستم دینامیکی را مد نظر قرار می‌دهد، در آنالیز مودال خواص ذاتی سیستم یا ماده مورد توجه قرار می‌گیرد.

روش معمولی آزمون مخرب برای تعیین سفتی میوه، تست مگنس - تایلور با نفوذ سنج می‌باشد. در هر صورت این روش تست مخرب است و نمی‌تواند برای کنترل کیفیت میوه در خطوط تولید استفاده شود. فقط آزمون غیر مخرب به صورت online قابل استفاده می‌باشد. از جمله آزمون‌های غیر مخرب می‌توان به آنالیز مودال اشاره کرد. در این روش با تعیین بسامد طبیعی می‌توان سفتی میوه را مشخص نمود. برای به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی از معادله (۱) استفاده می‌شود:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = \{0\} \quad (1)$$

در فرمول ۱، X بردار جابجایی، \ddot{X} بردار شتاب، $[m]$ و $[k]$ ماتریس‌های جرم و سختی سیستم می‌باشند. از این معادله فرکانس‌های طبیعی سیستم در حوزه خطی الاستیک به دست می‌آید

تقاضا برای میوه‌های با کیفیت بالا باعث ایجاد ضرورت تهیه یک سیستم پایش (مونیتورینگ) کنترل کیفیت میوه در هنگام برداشت، انبار و توزیع را ایجاد نموده است. کیفیت میوه به وسیله ویژگی‌های درونی و بیرونی آن تعیین می‌شود. مهم‌ترین ویژگی‌های بیرونی اندازه، شکل، رنگ و خواص مکانیکی و مهم‌ترین خصوصیات درونی مزه و بافت می‌باشد. سفتی، یک مشخصه بافتی می‌باشد و یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفی محسوب می‌شود. رفتار مواد بیولوژیک به ویژه محصولات کشاورزی کم و بیش نسبت به مواد ایده‌آل متفاوت است. یکی از خواص جالب توجه محصولات کشاورزی این است که رابطه تنش - تغییر شکل در آن‌ها به سرعت تغییر شکل بستگی دارد. یعنی باید در معادله تنش - تغییر شکل عامل زمان را هم

۱ و ۴- به ترتیب دانش آموخته دکتری و استاد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: rm_mirzaei52@yahoo.com)

۲ و ۳- دانشیاران دانشگاه تربیت مدرس تهران

دو تابع غیر یکسان که شامل نقاط مرزی می‌باشد (Dewulf *et al.*, 1999). در هر صورت این روش‌ها به علت استفاده از تصاویر دو بعدی شکل تقریبی میوه را ایجاد می‌نمایند. در این پژوهش برای نخستین بار شکل هندسی میوه به صورت کامل و سه بعدی ایجاد می‌شود. روش کار به این صورت است که مختصات نقاط سطح بیرونی میوه به صورت رقومی درآمده و از روی این مختصات شکل سه بعدی واقعی ایجاد می‌گردد. برای ایجاد شکل واقعی، باید کل محصول به صورت رقومی شده درآمده و سطح بیرونی میوه مشخص گردد. به این منظور، برای تهیه مختصات نقاط از دستگاه اسکن تصویری ATTOSII^۱ استفاده شده است. این دستگاه مانند چشم انسان عمل می‌نماید، یعنی با گرفتن تصاویر مختلف از زوایای گوناگون و تطابق آن‌ها با یکدیگر شکل سه بعدی رقومی شده را ایجاد می‌نماید. به عبارت دیگر مختصات سه بعدی سطح بیرونی سیب را تهیه می‌کند. سپس با استفاده از این نقاط و به کمک نرم‌افزارهای مدل‌سازی Catia R16 و ایجاد منحنی‌های B-Spline به کمک این نقاط سطح و حجم ایجاد می‌شود.

در این پژوهش ابتدا ۳۰ نمونه سیب (قرمز دلشیس) به صورت تصادفی و با ابعاد و اندازه‌های مختلف، مطابق جدول ۱ انتخاب گردید. به دلیل اینکه هیچ‌گونه استاندارد برای درجه‌بندی سیب در مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران وجود ندارد از استاندارد ۳۰۰-۵۱ آمریکایی استفاده گردیده است (USDA 2002).

جدول ۱ - مشخصات وزنی نمونه‌ها مطابق استاندارد

Table 1- Wight properties of samples based standard

تعداد نمونه sample number	حدود وزنی (گرم) Weight (gr)
2	<75
10	75-100
2	100-115
7	115-139
9	>139

برای توزین دقیق سیب از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۱ گرم استفاده شد. مشخصات وزنی نمونه‌های انتخاب شده در جدول ۱ آمده است.

در تحقیق حاضر برای ایجاد شکل هندسی سیب از دستگاه اندازه‌گیری مختصات سطح بیرونی میوه استفاده شد. در این روش هر تصویر شامل ۱/۵ میلیون نقطه رقومی می‌باشد، که مربوط به مختصات نقاط است. یک نمونه از این داده‌ها در جدول ۲ آمده است.

1- Germany GOM mbH1Mittelweg 7-8 D-38106 Braunschweig

(Jimin, 2000).

جدیداً رشد روزافزونی در روش‌های غیر مخرب برای جداسازی میوه در خطوط تولید به وجود آمده است. پژوهشگران روش‌های مختلف غیر مخربی بر اساس ویژگی‌های دینامیکی مانند سیگنال اکوستیک و فرکانس‌های تشدید که به وسیله منبع ارتعاش ایجاد شده است را برای تعیین سفتی پیشنهاد کرده‌اند (Abbott *et al.*, 1992; De Belie *et al.*, 2000; Schotte *et al.*, 1999; Wang, 2003; Wang *et al.*, 2004a; Wang *et al.*, 2004b). گرچه اندازه‌گیری‌ها و فن‌آوری‌ها ممکن است متفاوت باشد اما هدف همه آن‌ها بررسی و مطالعه ضریب کشسانی میوه و سفتی و به دست آوردن روابط میان آن‌ها می‌باشد. چندین گزارش علمی در مورد روش آنالیز مودال اجزای محدود در مورد میوه‌های کروی مثل سیب (Chen and De Baerdemaeker, 1993b; Lu and Abbott, 1997; Chen *et al.*, 1994). خرپزه (Verstreken and De Baerdemaeker, 1994) و گوجه‌فرنگی (Langenakens *et al.*, 1997) موجود می‌باشد. روش آنالیز مودال اجزای محدود به عنوان روش مناسبی برای بررسی خصوصیات تشدید مواد جامد کروی معرفی شده است (Armstrong, 1989; Dewulf *et al.*, 1999; Langenakens *et al.*, 1997). در هر صورت برای میوه‌های غیر کروی و غیر متقارن مثل سیب قرمز و گلابی تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. الگوهای ارتعاشی گلابی به وسیله روش آنالیز مودال و روابط بین خواص مواد و مشخصات دینامیکی بررسی شده است (Dewulf *et al.*, 1999). جانسوک و همکاران اثر شکل بر فرکانس‌های تشدید گلابی را به وسیله روش آنالیز مودال بررسی کردند (Jancsok *et al.*, 2001). این تحقیقات نشان می‌دهد که روش آنالیز مودال یک روش غیر مخرب جهت تعیین سفتی میوه می‌باشد. اهداف این تحقیق عبارتند از:

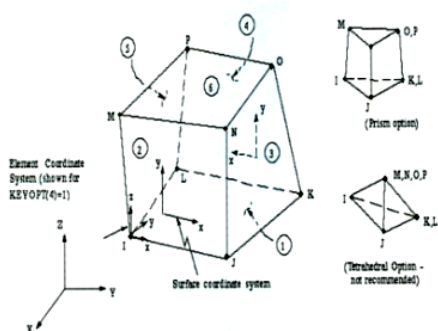
تعیین خصوصیات ابعادی سیب قرمز با استفاده از مدل هندسی آنالیز مودال شکل‌های مود به وسیله مدل اجزای محدود. بررسی تأثیر تغییرات خصوصیات ماده سیب (ضریب کشسانی، چگالی و ضریب پواسون) بر بسامد طبیعی آن.

مواد و روش‌ها

ایجاد شکل هندسی

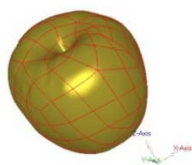
اولین مرحله در تحلیل اجزای محدود، ایجاد شکل هندسی سه بعدی (3D) میوه می‌باشد. روش‌های مختلفی برای ایجاد شکل هندسی موجود است، به دست آوردن نقاط مرزی از روی تصاویر دو بعدی عمومی‌ترین روش ایجاد شکل هندسی میوه می‌باشد که با دوران این نقاط حول محور فرضی تقارن یک شکل سه بعدی ایجاد می‌گردد (Jancsó *et al.*, 1997). روش دیگر عبارت است از دوران

در مدل‌های حجمی و غیر خطی به درستی ایفا می‌نماید (Anonymous, 2008; Dewulf *et al.*, 1999).

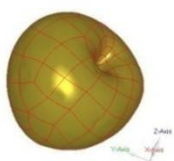


شکل ۱ - المان مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود solid 45
Fig.1. Used element in finite element analysis (solid45)

در شکل‌های ۲ تا ۴ نمونه‌هایی که به صورت حجم از منحنی‌ها ایجاد شده نمایش داده شده است.



شکل ۲ - نمونه شماره ۱ با منحنی‌های B-Spline
Fig.2. Sample No1 with contours B-Spline



شکل ۳ - نمونه شماره ۱۶ با منحنی‌های B-Spline
Fig.3. Sample No16 with contours B-Spline

جدول ۲ - مشخصات فضایی (X,Y,Z) سطح بیرونی بر حسب

میلی‌متر

Table 2- Space coordinate (mm) exterior surface of samples

X	Y	Z
3.390741	-2.960811	2.744561
3.448525	-2.901124	2.660532
-0.168434	-3.604336	5.873716
-0.249764	-4.051335	55.866573

حال با تشکیل شکل بیرونی سیب به صورت رقومی شده، لازم است از این نقاط سطحی عبور داده شود. هرچه دقت این سطح‌های خوابیده روی این نقاط بیشتر باشد، شکل هندسی ایجاد شده دارای دقت بیشتری نسبت به شکل واقعی خواهد بود. به علت شکل هندسی نامنظم سیب، باید از سطح‌هایی که شامل منحنی‌های B-Spline بوده و به صورت غیریکنواخت دارای دوران می‌باشند استفاده نماییم (De Boor, 1978).

مدل‌سازی اجزای محدود

اولین مرحله در تحلیل اجزای محدود مش‌بندی می‌باشد، مش‌بندی به شکل جسم و ابعاد آن و نوع المان بستگی دارد جهت مش‌بندی اجسام حجمی معمولاً از المان حجمی مکعبی استفاده می‌شود.

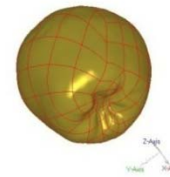
ابعاد مش‌بندی و کنترل المان‌های مدل اجزای محدود از مسائل مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. در این مرحله مدل المان‌بندی شده مورد بررسی قرار گرفته، تا از صحیح بودن آن (از نظر فیزیکی و عددی) اطمینان حاصل شود. پارامترهای کمی و کیفی المان‌ها در نرم‌افزار تجاری Hyper mesh work10 با حدود مشخص تعیین می‌شود، با این عمل می‌توان مطمئن شد که کلیه المان‌های تولید شده از نظر تحلیل‌گر اجزای محدود قابل قبول می‌باشند. در طی این عملیات کلیه المان‌های نامطلوب مشخص شده، تصحیح می‌شوند (Akin, 2005).

نوع المان

انتخاب المان در روش اجزای محدود یکی از موارد اصلی تحلیل می‌باشد. این المان باید رفتار ماده‌ای که تحت آنالیز قرار می‌گیرد را به درستی ایفا نماید. در مدل‌های حجمی معمولاً از المان‌های مکعبی یا هرمی استفاده می‌شود. در این پژوهش المان مکعبی که در هر گره (گوشه) آن سه درجه آزادی وجود دارد بکار برده شد. این نوع المان که قبلاً دی‌ویلف و همکاران برای میوه گلابی مورد استفاده قرار داده‌اند در شکل ۱ آمده است، این المان رفتار ماده را

بر اساس اندازه‌گیری، میانگین چگالی نمونه‌ها در حدود 0.84 g.cm^{-3} به دست می‌آید. که این مقدار با چگالی میوه سیب، تطابق دارد (Sitkei, 1998).

اندازه‌گیری ضریب پواسون به راحتی امکان‌پذیر نیست و در ضمن تأثیر به‌سزایی بر آنالیز مودال ندارد. بنابراین از محدوده مشخص شده استفاده می‌گردد. این مقادیر برحسب زمان متغیر است، مقدار آن در محدوده 0.1 تا 0.3 می‌باشد (Sitkei, 1998).



شکل ۴- نمونه شماره ۲۲ با منحنی‌های B-Spline
Fig.4. Sample No22 with contour B- Spline

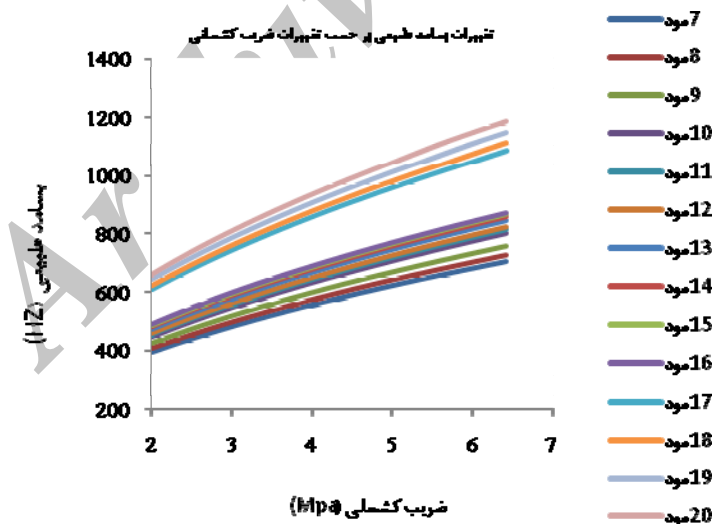
نتایج و بحث

پس از مش‌بندی، آنالیز مودال به روش زیرفضا^۱ در نرم افزار Ansys صورت پذیرفته و ۲۰ مود اول آن‌ها استخراج گردید که نتایج آن به صورت زیر می‌باشد.

مدل به صورت شرایط آزاد تحت آنالیز مودال قرار گرفته و ۶ مود صلب^۲ که مقدار بسامد آن صفر است، به دست می‌آید و مدهای انعطاف پذیر از مود ۶ به بعد استخراج و بسامدهای طبیعی آن‌ها به دست آمد. آنالیز حساسیت نسبت به خصوصیات ماده صورت می‌پذیرد، که در شکل‌های ۵ تا ۸ این آنالیز همراه با داده‌های به دست آمده برای چند نمونه نشان داده شده است (تغییرات ضریب پواسون $0.49 - 0.2$ ، تغییرات ضریب کشسانی $2 - 6/7 \text{ MPa}$ ، تغییرات چگالی $0.7 - 1 \text{ g.cm}^{-3}$).

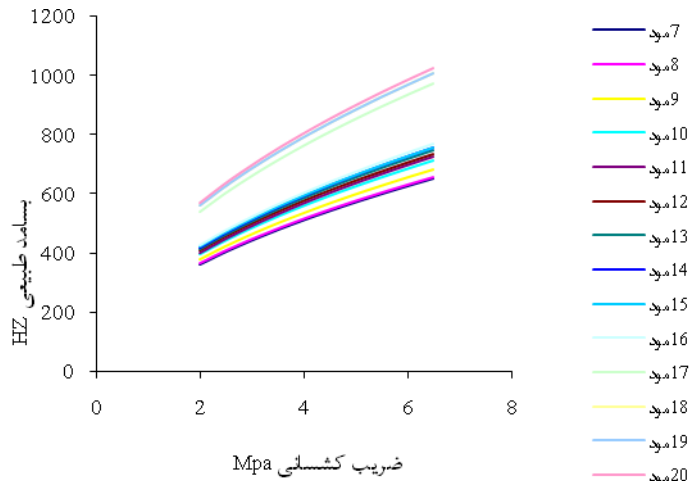
پس از ایجاد شکل هندسی نمونه‌ها در نرم‌افزار مدل‌سازی Catia R16، این مدل به صورت فرمت IGES ذخیره گردیده، تا در مدل‌سازی اجزای محدود مورد استفاده قرار گیرد. این فرمت در نرم‌افزارهای اجزای محدود قابل استفاده می‌باشد.

به منظور تعیین خصوصیات ماده از کارهای تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده استفاده می‌گردد. سه پارامتر مورد نیاز عبارتند از: ضریب کشسانی، چگالی و ضرایب پواسون. ضریب کشسانی مورد استفاده در تحلیل اولیه از کارهای تحقیقاتی آرمسترانگ استخراج شده است (Armstrong, 1989). این ضریب کشسانی که در تست‌های استاتیکی به دست آمده است باید به روز رسانی شود. در آنالیز مودال، ضریب کشسانی دینامیکی استخراج می‌گردد. چگالی واقعی از روی حجم و وزن اندازه‌گیری شده به دست آمده، این مقادیر با کارهای تحقیقاتی قبلی مطابقت داشت، یعنی با داشتن حجم نمونه و وزن، از رابطه $\rho = mv^{-1}$ چگالی به دست می‌آید (Sitkei, 1998).

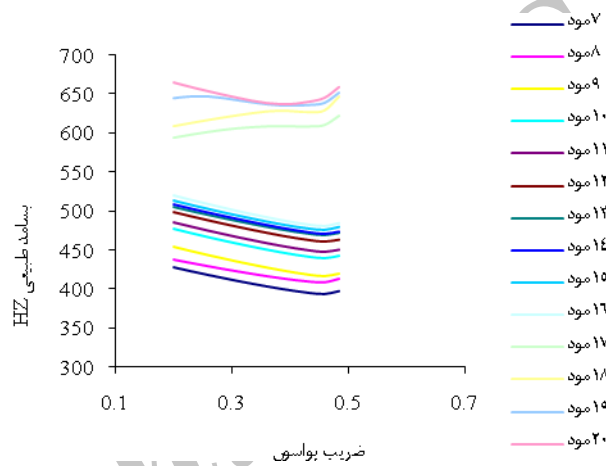


شکل ۵- تغییرات بسامد طبیعی نسبت به تغییرات ضریب کشسانی برای نمونه شماره ۵
Fig. 5. Variation natural frequency vs. young's modules for sample No5

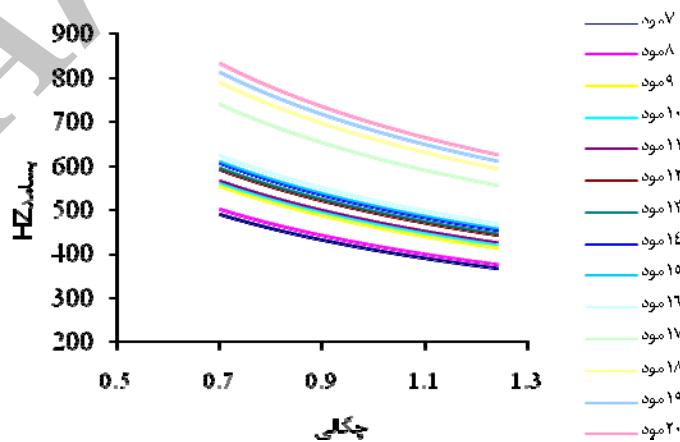
1- Subspace
2- Rigid



شکل ۶- تغییرات بسامد طبیعی نسبت به تغییرات ضریب کشسانی برای نمونه شماره ۸
Fig. 6. Variation natural frequency vs. young's modulus for sample No8

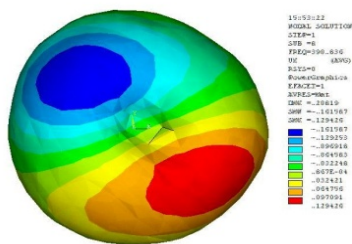


شکل ۷- تغییرات بسامد طبیعی نسبت به تغییرات ضریب پواسون برای نمونه شماره ۱۱
Fig. 7. Variation natural frequency vs. Poisson's ratio for sample No 11



شکل ۸- تغییرات بسامد طبیعی نسبت به تغییرات چگالی برای نمونه شماره ۲
Fig. 8. Variation natural frequency vs. density for sample No 2

به مکان های دیگر دارا می باشد.

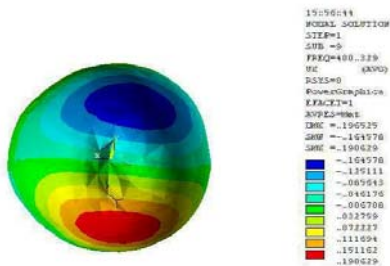


شکل ۱۱- منحنی های هم ارز جابجایی در مود شماره ۸ در نمونه شماره ۱۶

Fig. 11. Displacement contours in eight modes for sample No 16

شکل ۱۱ مقدار جابجایی در مود شماره ۸ برای نمونه ۱۶ را نشان می دهد. این مود مثل مود ۷ مود پیچشی می باشد، با این تفاوت که محور پیچش عمود بر محور پیچش در مود ۷ می باشد و همان طوریکه در شکل مشخص است، مقدار جابجایی در این ناحیه زیاد بوده و در جهت مخالف هم می باشد.

شکل ۱۲ مقدار جابجایی در مود ۹ را نشان می دهد. این مود اولین مود خمشی می باشد، محور خمش محور تقارن میوه می باشد، چنانچه از فرمول خمش حول یک محور $(\sigma = M \times C \times I^{-1})$ مشخص است هر چه فاصله از محور خمش (تار خنثی) بیشتر باشد، تنش و در نتیجه کرنش و مقدار جابجایی بیشتر است. پس مقدار جابجایی در قسمت هایی که بیشترین فاصله را از تار خنثی داشته باشد ماکزیمم است. مقادیر جابجایی منفی مربوط به تنش فشاری و مقادیر جابجایی مثبت مربوط به تنش کششی می باشد.



شکل ۱۲ - منحنی های هم ارز جابجایی در مود شماره ۹ در نمونه شماره ۱۶

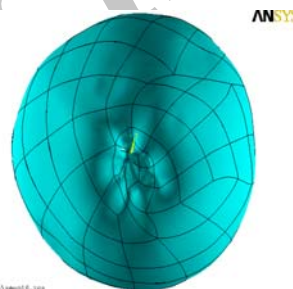
Fig. 12. Displacement contours in nine modes for sample No 16

از شکل های مربوط به آنالیز حساسیت نتایج زیر حاصل می شود:
۱- با افزایش ضریب کشسانی سیب، بسامد طبیعی در تمام مودها به صورت خطی افزایش پیدا می کند (شکل ۵ و ۶).

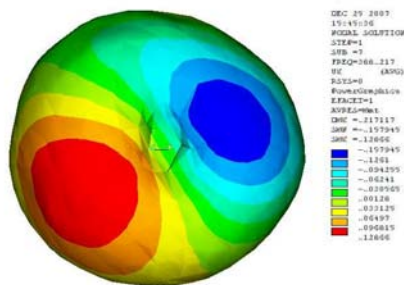
۲- با افزایش ضریب پواسون، بسامد طبیعی برای مودهای تا شماره ۱۵ با شیب کمتری نسبت به تغییرات چگالی، کاهش پیدا می کند (شکل ۷).

۳- با افزایش چگالی در میوه سیب، بسامد طبیعی برای تمام مودها کاهش می یابد (شکل ۸).

مودهای بالاتر از ۱۵ به علت اینکه مودهای ترکیبی هستند، مطالعه آن ها خارج از این پژوهش می باشد و از مودهای پایین ۴ مود اول که مودهای خالص می باشد برای مطالعه بیشتر در نظر گرفته می شوند. شکل ۹ مدل اجزای محدود در نرم افزار Ansys را نشان می دهد.



شکل ۹- مدل اجزای محدود نمونه شماره ۱۶ در نرم افزار Ansys
Fig. 9. Finite element model of sample No 16 in Ansys software



شکل ۱۰- منحنی های هم ارز جابجایی در مود شماره ۷ در نمونه شماره ۱۶

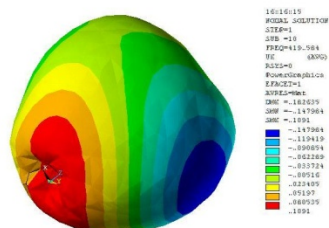
Fig.10. Displacement contours in seven modes for sample No 16

همان گونه که از شکل ۱۰ مشاهده می شود، مود ۷ مربوط به پیچش ناحیه بالای میوه می باشد. با توجه به اصل آنالیز مودال که تغییر شکل های نسبی را نشان می دهد، مقدار جابجایی در این ناحیه در دو طرف در خلاف جهت یکدیگر بوده و بیشترین مقدار را نسبت

شکل ۱۳ مقدار جابجایی در مود ۱۰ در قسمتی که تحت پیچش می‌باشد را نشان می‌دهد. محور پیچش محور تقارن است که از قسمت بالا و پایین میوه می‌گذرد.

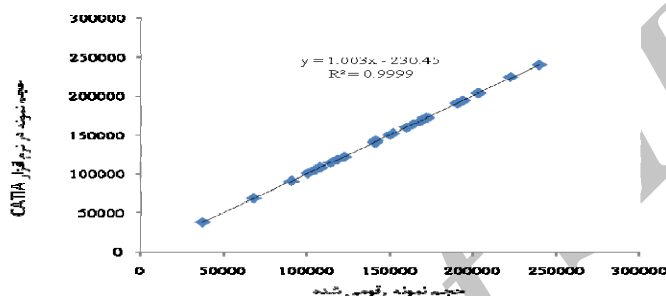
یکی از روش‌های صحنه‌گذاری مدل اجزای محدود، کنترل حجم مدل اصلی و حجم مدل هندسی می‌باشد که این کار در شکل ۱۴ برای نمونه‌ها انجام گردیده و اختلافی مشاهده نگردید.

شکل ۱۵ تغییرات اولین فرکانس طبیعی نسبت به حجم نمونه را نمایش می‌دهد. با افزایش حجم اولین فرکانس طبیعی به علت افزایش وزن کاهش پیدا می‌کند.

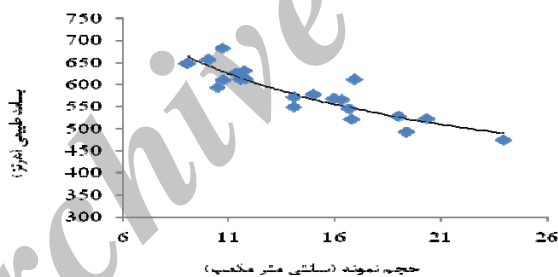


شکل ۱۳- منحنی‌های هم ارز جابجایی در مود شماره ۱۰ در نمونه شماره ۱۶

Fig. 13. Displacement contours in ten modes for sample No 16



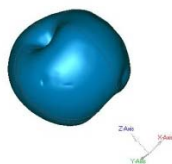
شکل ۱۴- مقایسه حجم مدل هندسی در نرم‌افزار Catia (mm^3) نسبت به حجم مدل رقمی شده نمونه‌ها (mm^3)
Fig. 14. Comparison geometry volume's model in Catia software (mm^3) and volume digitizer's samples



شکل ۱۵- تغییرات اولین فرکانس طبیعی نسبت به تغییرات حجم نمونه‌ها
Fig. 15. Variation natural frequency vs. sample's volume

جدول ۳ مقادیر چهار فرکانس اول مود انعطاف‌پذیر همراه با شکل مودها را مشخص می‌نماید.

شکل ۱۶، نمونه مدل میوه سیب همراه با جهت‌های محورهای مختصات جهت تعیین راستای حرکت شکل مودها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- نمونه میوه سیب جهت تحلیل مودال همراه با محور مختصات
Fig.16. Apples fruit sample for modal analysis with axis coordinate

جدول ۳- چهار فرکانس اول مود انعطاف‌پذیر همراه با شکل مود

Table 3- First frequency four flexible mode with mode shape

شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)	شکل مود
No mode	Natural frequency (Hz)	Mode shape
7	584.15	پیچش قسمت فوقانی میوه Twisting the upper part of the fruit
8	595.98	پیچش قسمت فوقانی میوه (محور مخالف مود 7) Twisting the upper part of the fruit (Axis of abuse Made 7)
9	635.60	خمش Bending
1	655.27	پیچش حول محور تقارن میوه Fruit twisting about the axis of symmetry

در جدول‌های ۴ و ۵ مقادیر آماری برای تمام نمونه و مودهای شماره ۷ تا ۲۰ مشخص شده است.

جدول ۴- داده‌های آماری محاسبه شده برای تمام مودها (بر حسب هرتز)

Table 4- Calculated statistical data for all modes (Hz)

وزن (گرم)	ضریب تغییرات ضریب کشسانی	ضریب تغییرات چگالی	ضریب تغییرات نسبت پواسون
Weight (gr)	Coefficient of variation of young's modules	Coefficient of variation of Density	Coefficient of variation of Poisson's ratio
82	16.89	8.66	2.77
83	17.25	4.91	2.51
91	18.64	7.02	2.75
94	16.45	5.69	4.8
96	17.86	10.62	2.46
98	16.89	5.17	2.82
100	18.03	6.59	2.83
101	17.19	7.02	1.61
118	18.98	6.91	2.34
119	16.72	11.55	4.57

جدول ۵- مقایسه ضریب تغییرات پارامترهای خصوصیات ماده بر حسب تغییرات وزن نمونه‌ها

Table 5- Comparison C.V. property's material parameters vs. variation weight's samples

کل نمونه‌ها	مود ۷	مود ۸	مود ۹	مود ۱۰	مود ۱۱	مود ۱۲	مود ۱۳	مود ۱۴
میانگین	582.15926	595.98651	635.60342	655.26435	663.54347	681.10309	689.26289	701.8183
واریانس	3125.5746	3087.9432	4763.6117	4731.428	4813.0465	4561.5194	4966.615	5427.6164
ضریب تغییرات	11.362093	10.973264	12.312451	11.78631	11.873658	11.419401	11.875242	11.793502
کل نمونه‌ها	مود ۱۵	مود ۱۶	مود ۱۷	مود ۱۸	مود ۱۹	مود ۲۰		
میانگین	705.84563	716.99477	876.36198	918.24874	929.14139	944.693334		
واریانس	5563.3714	6032.3104	8414.1925	12057.73	12275.223	12858.048		
ضریب تغییرات	11.871665	12.132167	11.867579	13.877925	13.615374	13.765202		

همان طوری که از جدول ۵ مشاهده می‌شود ضریب تغییرات (حساسیت) برای تمام وزن‌های نمونه‌ها برای پارامتر ضریب کشسانی در حدود ۲-۳ برابر پارامتر چگالی و حداقل ۴ برابر پارامتر ضریب پواسون می‌باشد. بنابراین تغییرات ضریب کشسانی می‌تواند به عنوان یک فاکتور اصلی در تعیین تغییرات بسامد طبیعی مورد استفاده قرار گیرد. تغییر در بسامد طبیعی نمونه بیشترین رابطه را با تغییرات ضریب کشسانی دارد.

مهمترین نمایشگر کیفیت میوه سفتی می‌باشد که وابستگی زیادی به ضریب کشسانی و این پارامتر رابطه مستقیم با بسامد طبیعی دارد. با استفاده از مدل اجزای محدود ایجاد شده در این تحقیق بسامدهای طبیعی و شکل مود میوه سیب به دست آمد. با روش آنالیز مودال شرایط مرزی آزاد ۲۰ مود اول همراه با شکل مود استخراج گردید. اولین مود پیچش میوه با میانگین بسامد طبیعی ۵۸۴/۱۵ هرتز در حدود تغییرات ضریب کشسانی میوه سیب به دست آمد. کمترین

انعطاف‌پذیر دارای تغییر شکل منظم (پیچشی - خمشی - فشاری - دایره بیضی) دارای مقادیر یکسان می‌باشد. بنابراین نخستین بسامد طبیعی انعطاف‌پذیر که مود پیچشی می‌باشد، به عنوان فاکتور تعیین سفتی میوه سیب پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

خواص محصولات کشاورزی وابسته به زمان می‌باشد و این خصوصیات با گذشت زمان تغییر می‌کنند. سفتی یکی از ویژگی‌های اصلی میوه می‌باشد که وابستگی زیادی به ضریب کشسانی دارد. تعیین این ویژگی در زمان‌های مختلف و در حالت استاتیکی انجام شده که نیازمند زمان و هزینه زیادی می‌باشد و به راحتی هم شرایط قابل کنترل نمی‌باشد. بنابراین استفاده از روش‌های عددی از جمله اجزای محدود امروزه این مشکلات را حل نموده و به آسانی اثر پارامترهای مختلف بر خواص ماده قابل بررسی می‌باشد. در این پژوهش برای اولین بار شکل هندسی میوه سیب به طور دقیق اندازه‌گیری شده و ابعاد هندسی آن تعیین گردیده است. مدل اجزای محدود میوه سیب با امان حجمی ایجاد شده و در نرم‌افزار تجاری Hyper mesh خطاهای مربوط به مدل گرفته شد. مدل اجزای محدود و مدل هندسی از نظر حجم مقایسه شده و خطایی مشاهده نگردید و نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- آنالیز مودال به صورت شرایط مرزی آزاد انجام شده و ۲۰ مود اول همراه با شکل مود آن‌ها استخراج گردید و ۶ مود صلب دارای مقادیر نزدیک به صفر بوده که نشان‌دهنده صحت مدل می‌باشد.
- ۲- آنالیز حساسیت نسبت به تغییر خواص میوه سیب انجام گردید و نشان‌دهنده ۳-۲ برابر اثر ضریب کشسانی بر بسامد طبیعی نسبت به چگالی و ۴ برابر نسبت به ضریب پواسون بود.
- ۳- اولین بسامد طبیعی با فرکانس ۵۸۴ هرتز برای مود پیچش به‌دست آمد که با نتایج دیگر محققین تطابق مناسبی داشت.
- ۴- مدل اجزای محدود ایجاد شده به عنوان یک مدل پایه برای مطالعه خواص مکانیکی بدون نیاز به تست‌های تجربی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

بسامد طبیعی با ضریب کشسانی ۲ مگاپاسکال برای تمام نمونه‌ها با حجم و وزن مختلف بین ۳۰۰ تا ۴۹۰ هرتز به‌دست آمد که با کارهای تحقیقاتی دیگر محققین مطابقت داشت (Cooke and Rand, 1973) اثر تغییرات پارامترهای ضریب کشسانی، چگالی و ضریب پواسون بر اولین بسامد تشدید به‌ترتیب ۸۵ درصد، ۱۱ درصد و ۴ درصد به‌دست آمد که تأثیر این پارامترها با کارهای تحقیقاتی مربوط به تعیین ضریب کشسانی به روش اکوستیک مطابقت مناسبی دارد (Armstrong et al., 1990). محققین با روش اکوستیک و تعیین بسامد طبیعی میوه سیب رابطه زیر را برای تعیین ضریب کشسانی پیشنهاد کرده‌اند این رابطه شکل میوه را که پارامتر اصلی در تعیین بسامد طبیعی می‌باشد به صورت ساده یک کره همسان در نظر گرفته است. نتایج این تحقیق تأثیر سه پارامتر ضریب کشسانی، چگالی و ضریب پواسون با توجه به معادله بر بسامد طبیعی را نشان می‌دهد. چنانچه از معادله با توجه به توان و ضرایب عددی ضریب پواسون، چگالی و ضریب کشسانی و نتایج تحقیق مشخص است، بیشترین تأثیر را ضریب کشسانی بر بسامد طبیعی میوه دارد.

$$G = (\omega a \times \Omega^{-1})^2 \rho \quad (2)$$

$$E = m^{2/3} \rho^{1/3} (6\pi^2)^{2/3} 2^{1+\nu} \Omega^{-2} f^2 \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳، a شعاع کره (mm)، ω سرعت دورانی، Ω از ضرایب ثابت لا‌ما، G مدول برشی، E ضریب کشسانی (MPa) و f بسامد طبیعی (Hz) میوه سیب می‌باشد.

داده‌های تجربی در منبع تحقیقاتی (Finney, 1970) با ضریب کشسانی ۶/۷ مگاپاسکال و وزن سیب ۱۳۹ گرم، بسامد طبیعی را برای مود پیچشی خالص با در نظر گرفتن دایره همسان ۸۲۱ هرتز مشخص می‌نماید که با توجه روش اکوستیک بکار رفته که مود ۱۸ را تحریک نموده است. عدد به‌دست آمده از روش آنالیز مودال ۸۷۲ هرتز می‌باشد، که مطابقت مناسبی با آن دارد و خطای کمتر از ۵ درصد را نشان می‌دهد.

با داشتن یک سیستم پایش اتوماتیک تعیین فرکانس طبیعی، می‌توان تغییرات ضریب کشسانی و سفتی را بررسی کرد و یا به عنوان یک سیستم کنترل کیفی غیر مخرب در خطوط بسته‌بندی مورد استفاده قرار داد. مدل اجزای محدود ایجاد شده در این تحقیق تغییرات بسامد طبیعی بر حسب تغییر ضریب کشسانی میوه سیب را به‌درستی پیش بینی نموده همچنین ضریب تغییرات در تمام مودهای

منابع

1. Abbott, A. J., A. H. Affeldt, and A. L. Liljedahl. 1992. Firmness measurement of stored 'Delicious' apples by sensory methods, Magness-Taylor, and sonic transmission. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117: 590-595.
2. Akin, J. E. 2005. *Finite Element Analysis with Error Estimators*. Elsevier.
3. Anonymous. 2008. *ANSYS Users Manual: Swanson Analysis Systems*

4. Armstrong, P. R., H. R. Zapp, and G. K. Brown. 1990. Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination. *Transactions of the ASAE* 33: 1353-1359.
5. Armstrong, P. R. 1989. Measurement of apple firmness using the acoustic impulse response state univ .east lansing.MI. Mich.
6. Chen, H., and J. De Baerdemaeker. 1993b. Finite-element-based modal analysis of fruit firmness. *Transactions of the ASAE* 36: 1827-1833.
7. Chen, H., J. De Baerdemaeker, V. Bellon. 1996. Finite element study of the melon for nondestructive sensing of firmness. *Transactions of the ASAE* 39: 1057-1065.
8. Cooke, J. R., and R. N. Rand. 1973. A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a three media elastic sphere model. *Journal of agricultural engineering research*, 18: 141-157.
9. De Belie, N., S. Schotte, P. Coucke, and J. De Baerdemaerker. 2000. Development of an automated monitoring device to quantify changes in firmness of apple during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 18: 1-8.
10. De Boor, C. 1978. *Practical Guide to Splines*. New York. Springer Verlag.
11. Dewulf, W., P. Jancsó, B. M. Nicolai, G. De Roeck, and D. Briassoulis. 1999. Determining the firmness of a pear using finite element modal analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74: 217-224.
12. Finney, E. E. 1970. Mechanical resonance within Red Delicious apples and relation to fruit texture. *Transactions of the ASAE* 13: 177-180.
13. Jancsó, P., B. Nicolai, P. Coucke, and J. De Baerdemaeker. 1997. 3D Finite element model generation of fruits based on image processing. Paper presented at 3rd IFAC/ISHS Workshop on Mathematical and Control Application in Agriculture and Horticulture; September 28 - October 2, Hannover, Germany.
14. Jancsó, P. T., L. Clijmans, B. M. Nicolai, and J. de Baerdemaeker. 2001. Investigation of the effect of shape on the acoustic response of 'conference' pears by finite element modeling. *Postharvest Biology and Technology*, 23: 1-12.
15. Jimin, H. 2000. *Modal Analysis*. New York: Academic Press.
16. Langenakens, J., X. vandewalle, and J. De Baerdemaeker. 1997. Influence of global shape and internal structure of tomatoes on the resonant frequency. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66: 41-49.
17. Lu, R., J. A. Abbott. 1997. Finite element modeling of transient responses of apples to impulse excitation. *Transactions of the ASAE* 40: 1395-1406.
18. Schotte, S., N. De Belie, and J. De Baerdemaerker. 1999. Acoustic impulse-response technique for evaluation and modeling of firmness of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 17:105-115.
19. Sitkei, G. 1998. *Mechanics of Agricultural materials*: John Willy and Sons Inc.
20. USDA. 2002. *United States Standards for Grades of Apples*. Washington, D.C: United States Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service, Fruit and Vegetable Programs. Fresh Products Branch.
21. Verstreken, E., and J. De Baerdemaeker. 1994. Evolution of maturity of peaches: non-destructive firmness measurement from the acoustic impulse response. *International Agrophysics*, 8: 469-473.
22. Wang, J. 2003. Anisotropic relaxation properties of pear. *Biosystems Engineering*, 85: 59-65.
23. Wang, J., B. Teng, and Y. Yu. 2004a. Pear dynamic characteristics and firmness detection. *European Food Research and Technology*, 218: 289-294.
24. Wang, J., B. Teng, and M. Zhou. 2004b. Dynamic response of impact forces on pear. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 35: 65-68.