



تأثیر شکل هندسی بر روی بسامدهای طبیعی میوه سیب در مدل‌سازی اجزای محدود

زاهد فتحی زاده^۱، محمد ابونجمی^۲، سیدرضا حسن بیگی^۳، نوید یزدانی^۴

^۱دانشجوی دکتری مهندسی بیوسیستم، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران؛ zahed.fathizadeh@ut.ac.ir

^۲دانشیار، گروه فنی مهندسی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران؛ abonajmi@ut.ac.ir

^۳استاد، گروه فنی مهندسی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران؛ rhbeigi@ut.ac.ir

^۴استادیار، گروه باغبانی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران؛ n.yazdani@ut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق تأثیر نوع طراحی مدل سیب برای بدست آوردن بسامدهای طبیعی به روش المان محدود و تأثیر تغییرات ضریب کشسانی در هسته و پوست سیب بر روی بسامدهای طبیعی بررسی شده است. میوه سیب به سه گونه در نرم افزار آباکوس مدل سازی شد. در روش اول میوه در سه بخش هسته، گوشت و پوست به طور تقریبی مشابه با شکل هندسی سیب و با حجم تقریبی ۲۱۷ سانتی متر مکعب طراحی شده و خواص مکانیکی شامل ضریب کشسانی، نسبت پواسون و چگالی برای هر بخش اختصاص یافت. در مدل سازی سه بخشی حالت های مختلف با تغییر ضریب کشسانی برای هسته و پوست سیب در نظر گرفته شد. در روش دوم میوه با همان شکل هندسی اما به صورت همگن و فقط در یک بخش و خواص یکسان با گوشت سیب در روش اول در نظر گرفته شد و در روش سوم میوه سیب به شکل یک کره با حجم تقریبی برابر با مدل های دیگر و خواص یکسان با گوشت سیب در روش اول در نظر گرفته شد. آنالیز مودال بر روی مدل ها انجام گرفت و بسامدهای طبیعی تا ۲۰ مود اول به دست آمد. ضریب کشسانی برای پوست در سه حالت به میزان ۱۲ و ۱۶ و ۲۰ مگا پاسکال و برای هسته به میزان ۴ و ۶ و ۸ مگا پاسکال در نظر گرفته شد و همبستگی بین حالت های بدست آمد.

کلمات کلیدی: اجزای محدود، فرکانس طبیعی، سیب

Effect of Geometrical Shape on Natural Frequencies of Apple in Finite Element Modeling

Zahed Fathizadeh¹, Mohammad Aboonajmi², Seyed Reza Hasanbeygi³, Navid Yazdani⁴

¹Department of Agrotechnology, Abouraihan Campus, University of Tehran, zahed.fathizadeh@ut.ac.ir

²Department of Agrotechnology, Abouraihan Campus, University of Tehran, abonajmi@ut.ac.ir

³Department of Agrotechnology, Abouraihan Campus, University of Tehran, rhbeigi@ut.ac.ir

⁴Department of Horticulture, Abouraihan Campus, University of Tehran, n.yazdani@ut.ac.ir

ABSTRACT

Apples have been studied to obtain natural frequencies by finite element method and the effect of changes in the Young's modulus in the apple core and skin on natural frequencies. Apples modeled in Abaqus software in three methods. First model has designed in three parts: the core, flesh and the skin similar to the real apple and a volume of approximately 217 cm³. Mechanical properties, including Young's modulus, Poisson ratio and density for each section specified. In three-part modeling, different states were considered by changing the Young's modulus for the apple core and skin. In the second method, the fruit was in the same geometric form but homogeneous and only in one section and the same properties with apple flesh in the first method were considered. In the third method, the apple fruit was shaped like a sphere with approximate volume equal to other models and the same properties with apple flesh in the first method was considered. The modal analysis was performed on models and natural frequencies were obtained up to 20 first modes. The Young's modulus of the skin were 12, 16 and 20 MPa, and for the core were 4, 6 and 8 MPa. The correlation between different models was obtained.

Keywords: Finite Element, Natural Frequencies, Apple



بسامدهای طبیعی میوه ها برای تعیین میزان سفتی آنها بکار می رود و میزان سفتی میوه ها شاخصی برای تازگی آنهاست. همچنین سفتی میوه برای تعیین میزان کوفتگی نیز بکار می رود (Kür, Ş, Topakci, İ, & Akinci, 2008). سفتی میوه وابستگی زیادی به ضریب کشسانی دارد (Mirzaei, Minaei, Khoshtaghaza, & Borghae, 2013). روش های مخرب مانند نفوذسنجی برای تعیین سفتی میوه ها کاربرد زیادی دارند (Grotte, Duprat, Piétri, & Loonis, 2002). اما این روش ها برای تعیین سفتی تعداد محدودی از کل میوه ها قابل استفاده است و برای استفاده برخط مناسب نیست. در روشهای غیرمخرب برای تعیین بسامدهای طبیعی از روش های تشدید صوتی فعال و غیرفعال استفاده می شود (Aboonajmi, Jahangiri, & Hassan-Beygi, 2015). این روش ها نیاز به تجهیزات خاصی دارد. روش شبیه سازی اجزای محدود همواره جهت پیش بینی نتایج آزمایشات اصلی بکار می رود و حتی گاهی محقق را از انجام آزمایش بی نیاز می کند. برای تعیین بسامدهای طبیعی به روش شبیه سازی اجزای محدود، از آنالیز مودال استفاده می شود که در این روش مودهای ارتعاشی نمونه بدست آمده و بسامدهای طبیعی متناظر با مودها استخراج می شود (Barikloo & Ahmadi, 2013; R Lu & Abbott, 1993; R Lu, Srivastava, & Ababneh, 2006; Renfu Lu & Abbott, 1996). محصولات باغی و کشاورزی شکل هندسی مشخصی ندارند و از طرفی نمونه های مختلف هم از نظر شکل و ظاهر کاملا مانند هم نیستند. در انجام شبیه سازی معمولا شکل آنها تقریب زده می شود و سعی می شود مدلی ارائه شود که بیشترین شباهت را به شکل اصلی محصول داشته باشد. در این تحقیق سه روش برای شبیه سازی شکل هندسی میوه سیب در نظر گرفته شده و آنالیز مودال بر روی این سه شکل انجام شده است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مدل سازی هندسی

برای انجام هر نوع تحلیل اجزای محدود از جمله آنالیز مودال ابتدا باید مدل سه بعدی نمونه ها طراحی شود. برای ایجاد شکل هندسی میوه سیب تا کنون روش های مختلفی توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از روش ها اسکن سه بعدی نمونه و انتقال آن به نرم افزارهای مدلسازی است (Celik, Rennie, & Akinci, 2011; Mirzaei et al., 2013). این روش بسیار دقیق است اما برای هر نمونه نیاز به انجام کلیه مراحل اسکن و انتقال مدل می باشد و مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است. روش دیگر که از دقت قابل قبولی برخوردار است و مورد استفاده زیادی قرار می گیرد عبارت است از دوران شکل دوبعدی از مقطع برش سیب است. در این روش هسته و پوسته سیب نیز مشابه سیب واقعی طراحی می شود تا بیشترین تشابه بین مدل و نمونه واقعی برقرار شود (Dintwa, Van Zeebroeck, Ramon, & Tijssens, 2008). در برخی از تحقیقات فقط خطوط بیرونی مقطع سیب را دوران می دهند و داخل آن را به صورت همگن و یکنواخت در نظر می گیرند (Kür et al., 2008). در روشی دیگر سیب را به عنوان یک کره الاستیک در نظر می گیرند (Cooke & Rand, 1973). در تحقیق حاضر مدل سه بعدی به سه صورت طراحی گردید، اولین مدل مدل سه بخشی است که شامل هسته و گوشت و پوست است. در این مدل اندازه های مقطع یک سیب گلدن دلشیز که از یک فروشگاه تهیه شده بود بدست آمد و مدل سه بعدی با دوران شکل مقطع دو بعدی به دست آمد. مدل سازی در نرم افزار SolidWorks 2015 انجام شد. مدل گوشت و هسته سیب مطابق شکل ۱ جداگانه طراحی شد و با فرمت step به نرم افزار Abaqus منتقل شد. در نرم افزار Abaqus گوشت و هسته سیب اسمبل شده و یک پوسته به ضخامت ۰.۲ میلی متر بر روی قسمت خارجی سیب تعریف شد. حجم مدل طراحی شده ۲۱۷ سانتی متر مکعب بود که با حجم اندازه گیری سیب واقعی تفاوت ناچیزی داشت. مدل دوم از نظر سطح بیرونی کاملا همانند مدل اول بود اما بصورت همگن و فقط شامل یک بخش با خواص ثابت بود. مدل سوم به صورت یک کره با حجم یکسان با دو مدل دیگر در نظر گرفته شد.

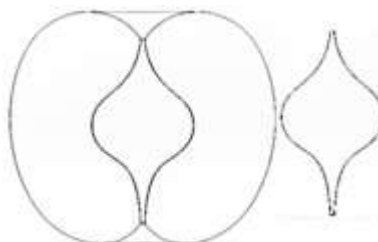


Figure 1. Geometrical model of apple core and flesh

شکل ۱- مدل هندسی هسته و گوشت سیب

۲-۲- شبیه سازی اجزای محدود

شبیه سازی اجزای محدود توسط نرم افزار Abaqus نسخه ۶،۱۴،۳ انجام شد. خواص بخش های مختلف سیب برای هر بخش تعریف شد و مدل مش بندی شد. المان مورد استفاده برای مش بندی هسته و گوشت منشور چهاروجهی از نوع C3D10 و مثلثی خطی از نوع S3 برای پوست بود. در شکل ۲ و ۳ به ترتیب مدل سیب و کره را قبل و بعد از مش بندی مشاهده می کنید.

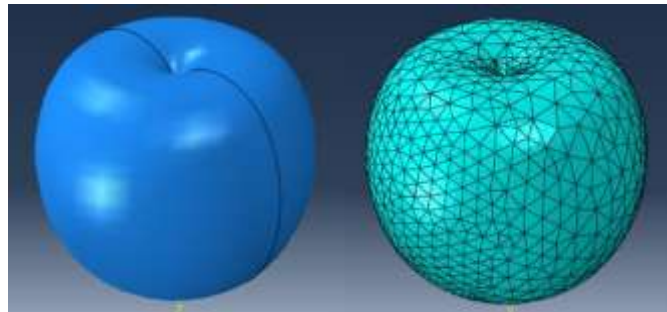


Figure 2. Apple 3-D model before and after meshing

شکل ۲- مدل سه بعدی سیب قبل و بعد از مش بندی

ضریب کشسانی بیشترین تاثیر را در فرکانس های طبیعی دارد، نسبت پواسون و چگالی به مراتب تاثیر کمتری بر روی فرکانس های طبیعی دارند (Mirzaei et al., 2013). برای تمامی مدل ها نسبت پواسون برابر ۰،۳ و چگالی برابر ۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته شد.

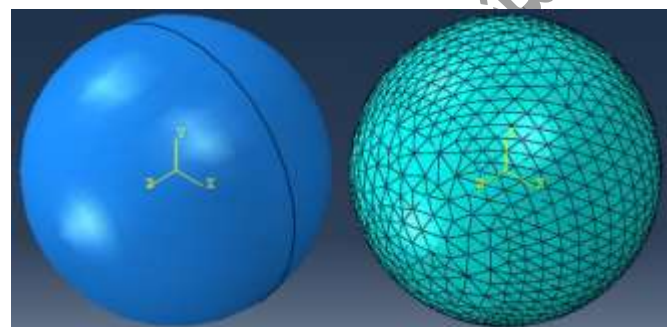


Figure 3. Sphere model before and after meshing

شکل ۳- مدل سه بعدی کره قبل و بعد از مش بندی

تغییرات ضریب کشسانی قسمت های مختلف سیب که در نرم افزار تعریف شد مطابق تحقیقات لو و همکاران بود که در جدول ۱ مشاهده می کنید (Renfu Lu & Abbott, 1996). برای مدل های یک بخشی و کره ضریب کشسانی ثابت ۴ برابر ۴ مگاپاسکال در نظر گرفته شد.

جدول ۱- تغییرات ضریب کشسانی در مدل سازی اجزای محدود

Table 1. Young's modulus variations in finite element modeling

	Young's modulus (Mpa)	Poisson's ratio	Density (kg/m)
core	4 , 6 , 8	0.3	800
flesh	4	0.3	800
skin	12 , 16 , 20	0.3	800

آنالیز مودال بر روی مدل ها و ترکیب های مختلف از ضریب کشسانی مطابق جدول ۲ برای ۲۰ مود اول انجام شد. به دلیل اینکه اجسام آزاد در فضا دارای ۶ درجه آزادی هستند در همه تحلیل ها ۶ مود اول برابر صفر بود. بنابراین مودهای ۷ تا ۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۴ تصاویر مربوط به شکل مود ۷ و ۹ به عنوان نمونه برای مدل شماره ۶ و مدل کره نشان داده شده است.

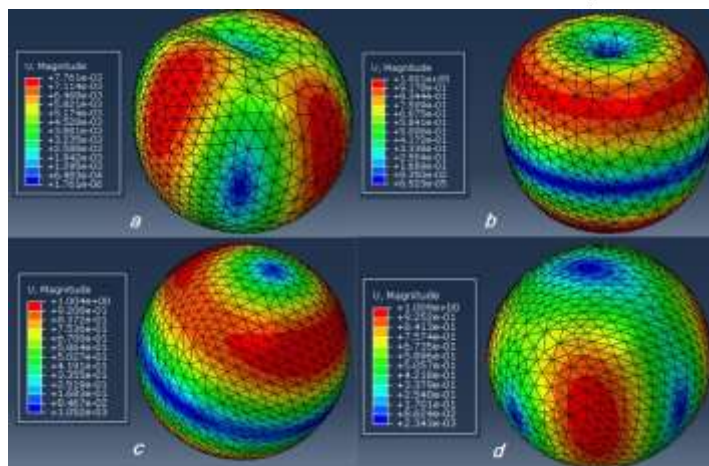


Figure 4. Mode shapes for (a) model 6 mode 7, (b) model 6 mode 9, (c) spherical model mode 7, (d) spherical model mode 9

شکل ۴- شکل مدها برای (a) مدل ۶ مود ۷، (b) مدل ۶ مود ۹، (c) مدل کروی مود ۷، (d) مدل کروی مود ۹

۳- نتایج و بحث

میانگین و کمینه و بیشینه فرکانس های طبیعی به دست آمده از آنالیزمودال ۱۱ مدل طراحی شده، در جدول ۲ آورده شده است. نتایج حاصل از تحلیل ها نشان می دهد که با افزایش ضریب کشسانی پوست و هسته فرکانس های طبیعی افزایش می یابد و این نتیجه نشان دهنده صحت مدلسازی می باشد. نتایج بدست آمده برای فرکانس های طبیعی تطابق خوبی با نتایج سایر پژوهش ها دارد.

جدول ۲-مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه فرکانس های طبیعی بدست آمده از تحلیل ۱۱ مدل طراحی شده

Table 2. The Average, Minimum and Maximum Natural frequency values of 11 models analysed

Natural Frequencies (Hz)			Young's modulus (Mpa)			Model number
Min	Max	Average	Skin	Core	Flesh	
437.86	680.30	529.85	12	4	4	1
442.01	687.51	532.96	16	4	4	2
446.06	694.49	535.98	20	4	4	3
439.34	681.52	537.48	12	6	4	4
443.52	688.72	540.58	16	6	4	5
447.60	695.70	543.61	20	6	4	6
440.45	682.41	542.67	12	8	4	7
444.65	689.60	545.78	16	8	4	8
448.73	696.57	548.80	20	8	4	9
430.76	667.65	525.91	4 (One part model)			10
468.00	723.19	537.19	4 (Spherical model)			11

کمترین فرکانس طبیعی برابر ۴۳۰،۷۶ و کمترین میانگین برابر ۵۲۵،۹۱ مربوط به مدل یک بخشی است و دلیل آن یکسان بودن ضریب کشسانی کل میوه است. زیرا همانطور که از نتایج پیداست در مدل های سه بخشی ضریب کشسانی پوست و هسته بیشتر است که موجب افزایش فرکانس طبیعی کل میوه می شود. بیشترین فرکانس طبیعی برابر ۷۲۳،۱۹ مربوط به مدل کروی است. در نمودار شکل ۵ تغییرات فرکانس های طبیعی موده های ۷ تا ۲۰ برای مدل های ۱ و ۵ و ۹ و مدل یک بخشی و مدل کروی نمایش داده شده است.

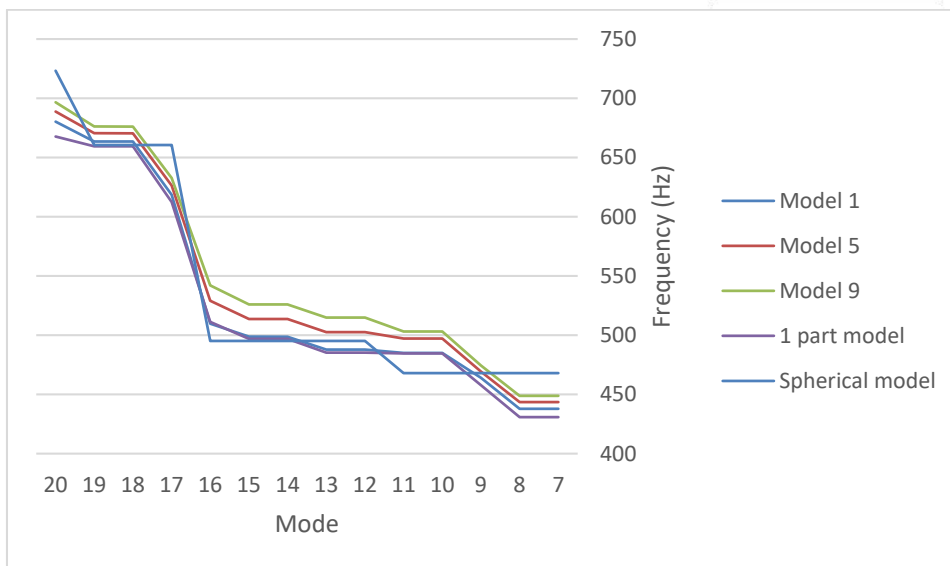


Figure 5. Frequency variations in selected models

شکل ۵- تغییرات فرکانس در مدل های انتخابی

همانطور که از نمودار مشخص است فرکانس های طبیعی برای مدل های ۱ و ۵ و ۹ با افزایش ضریب کشسانی، افزایش می یابد. فرکانس های طبیعی مدل یک بخشی نیز با روندی مشابه و نزدیک به مدل ۱ رو به افزایش است اما فرکانس های طبیعی مدل کروی با وجود افزایش، روند متفاوتی نسبت به سایر مدل ها دارد و این تفاوت به دلیل اختلاف شکل هندسی مدل کروی با سایر مدل ها می باشد. در هر صورت بیشترین تغییرات در میانگین فرکانس های طبیعی در همه مدل ها کمتر از ۴٫۵ درصد می باشد. که مربوط به تفاوت میانگین فرکانس های مدل ۹ و مدل یک بخشی است. روند تغییرات فرکانس طبیعی مدل هایی که در نمودار نمایش داده نشده نیز همانند مدل های ۱ و ۵ و ۹ است و صرفاً جهت پرهیز از همپوشانی نمودارها مدل های منتخب در نمودار نمایش داده شده است.

۴- نتیجه گیری

روش مدل سازی اجزای محدود در بسیاری از پژوهش ها ما را از انجام آزمایش های پرهزینه و زمان بر بی نیاز می کند. در این پژوهش از روش اجزای محدود برای تعیین فرکانس های طبیعی میوه سیب استفاده شد. فرکانس های طبیعی میوه سیب که عامل تعیین کننده سفتی سیب است رابطه مستقیم با ضریب کشسانی آن دارد. در این پژوهش فرکانس های طبیعی میوه سیب با روش اجزای محدود بدست آمد و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱) مدل سازی میوه سیب به سه روش سه بخشی، یک بخشی و کروی انجام شد.
- ۲) آنالیز مودال برای بدست آوردن فرکانس های طبیعی انجام شد و ۲۰ مود ارتعاشی بدست آمد که ۶ مود اول برابر یا نزدیک به صفر بود که این دلالت بر صحت مدل سازی دارد.
- ۳) اثر تغییرات ضریب کشسانی پوست و هسته سیب بر روی فرکانس های طبیعی بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش ضریب کشسانی موجب افزایش فرکانس های طبیعی می شود.
- ۴) پوست و هسته سیب در صد کمی از کل حجم میوه را دارند به همین دلیل تغییرات ضریب کشسانی پوست و هسته بر روی فرکانس طبیعی اثر کمی داشته و در اغلب کاربردها قابل چشم پوشی است و می توان ضریب کشسانی کل میوه را یکسان در نظر گرفت.
- ۵) در پژوهش هایی که نیاز به دقت بالای ندارد برای مدل سازی اجزای محدود سیب می توان از مدل یک کره هم حجم با میوه سیب برای به عنوان مدل استفاده کرد.



- Aboonajmi, M., Jahangiri, M., & Hassan-Beygi, S. R. (2015). A Review on Application of Acoustic Analysis in Quality Evaluation of Agro-food Products. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 3175–3188. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12444>
- Barikloo, H., & Ahmadi, E. (2013). Evaluation of impact effect and fruit properties on apple dynamic behavior. *Australian Journal of Crop Science*, 7(11), 1661–1669.
- 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(2), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.020>
- Cooke, J. R., & Rand, R. H. (1973). A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3-media elastic sphere model. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 18(2), 141–157. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(73\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0021-8634(73)90023-1)
- Dintwa, E., Van Zeebroeck, M., Ramon, H., & Tijskens, E. (2008). Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 49(2), 260–276. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.01.012>
- Grotte, M., Duprat, F., Piétri, E., & Loonis, D. (2002). Young's Modulus, Poisson's Ratio, and Lamé's Coefficients of Golden Delicious Apple. *International Journal of Food Properties*, 5(2), 333–349. <https://doi.org/10.1081/JFP-120005789>
- Kür, H., Ş, Ö. K., Topakci, M., İ, A. Ö., & Akinci, İ. (2008). Deformation Behavior Simulation of a Sample Apple under the Impact Effect with Finite Elements Method, (October), 893–897.
- Lu, R., & Abbott, J. A. (1993). Finite Element modeling of Transient Responses Of apples To Impulse Excitation, 40(5), 1395–1406.
- Lu, R., & Abbott, J. A. (1996). Finite Element Analysis of Modes of Vibration in Apples. *Journal of Texture Studies*, 27(3), 265–286. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1996.tb00075.x>
- Lu, R., Srivastava, A. K., & Ababneh, H. A. A. (2006). Finite Element Analysis and Experimental Evaluation of Bioyield Probes for Measuring Apple Fruit Firmness, 49(1), 123–132.
- Mirzaei, R., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., & Borghae, A. M. (2013). Investigation of Apple Vibration Characteristics Using Finite Element Modal Analysis. *Journal of Agricultural Machinery*. Ferdowsi University of Mashhad.