تعیین نیرو و انرژی لازم برای شکست میوه لایم کوات بر اساس تئوری‌های الاستیسیته

ساناز وطنی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

ایمیل: sanaz.vatani@mail.um.ac.ir

محمد حسین عباسپور فرد

استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

ایمیل: abaspour@um.ac.ir

رسول خدابخشیان

استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

ایمیل: khodabakhshian@um.ac.ir

چکیده

امروزه تقاضا برای مصرف محصولات کشاورزی با کیفیت گسترش یافته بنابراین آگاهی ازخواص مکانیکی محصولات کشاورزی درتولید و فروش محصولات با کیفیت بالا حائز اهمیت است. علاوه براین محصولات کشاورزی دارای ترکیبات پیچیده‌ای بوده و فاقد ساختار منظم هستند، بعبارتی ناهمگن می باشند. بنابراین تعیین خواص مکانیکی محصولات کشاورزی همواره کاری مشکل و پیچیده است. در تحقیق حاضر ازتئوری‌های الاستیسیته شامل تئوری هرتز، قانون هوک و تئوری بوسینسک برای تعیین نیرو و انرژی لازم برای شکست میوه لایم کوات، که تولید آن در ایران رو به توسعه است، استفاده شده است. اطلاعات حاصل ازاین تحقیق می‌تواند بهبود عملکرد ماشین آلات مربوطه کمک کند. دراین مطالعه از تئوری‌های الاستیسیته هوک، بوسینسک و تئوری هرتز برای بررسی بافت داخلی میوه، از آزمون کششی جهت بررسی پوست میوه و ازطرح آزمایشی کاملا تصادفی شامل شش تیمار و پنج تکرار برای تعیین میزان تغییر شکل میوه لایم کوات استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داد بین آزمون‌های انجام شده برای تعیین میزان انرژی و نیروی شکست درسطح ۵ ٪ اختلاف معنی داری وجود دارد. دربین تئوری‌های مورد استفاده برای آزمون فشاری حداکثر انرژی و نیروی شکست مربوط به تئوری هرتز با استفاده از دوصفحه موازی بامقدار میانگین به‌ترتیب (۰/۸۲۲ ژول) و (۱۸۵/۶۸۰ نیوتن)، حداقل انرژی و نیرو شکست مربوط به تئوری هرتز با پراب کروی برروی نمونه مستطیلی با مقدار میانگین به ترتیب (۰/۰۴۹ ژول) و (۱۰/۶۰۰ نیوتن)، برای پوست محصول مقدار میانگین انرژی و نیروی شکست به‌ترتیب (۰/۲۰۵ ژول) و (۲۴/۷۰۰ نیوتن) به‌دست آمد.

واژگان کلیدی: تئوری‌های الاستیسیته، انرژی شکست، نیروی شکست، لایم کوات، آزمون‌های کششی و فشاری

مقدمه

خواص مکانیکی برای تجزیه و تحلیل بافت و درک کیفیت محصول به کار گرفته می‌شوند بطور مثال از اطلاعات استحکام محصولات باغی برای تعیین بلوغ و رسیدگی در آن‌ها استفاده می‌شود که در فرایند ذخیره‌سازی و فراوری این محصولات با ارزش هستند (Razavi & BahramParvar, 2007). بلوغ در زمان برداشت فاکتور مهمی است که تاثیر چشم‌گیری در کیفیت و تغییر در میزان کیفیت می‌گذارد (Shamsudin et al., 2009). بنابراین سیستم‌هایی که بدون در نظر گرفتن این اطلاعات مهم طراحی می‌شوند باعث افزایش تلفات و کاهش بازدهی می‌شوند (رضوی و بهرام پرور، ۲۰۰۷). علاوه بر این برای مقایسه مقاومت نسبی محصولات مختلف کشاورزی و نیز طراحی و توسعه‌ی ماشین‌های برداشت، حمل و نقل و فراوری محصولات آگاهی از خواص مکانیکی محصولات کشاورزی سودمند و ضروری است (Khodabakhshian & Hassani, 2021). آسیب‌های مکانیکی در میوه‌ها در طول انجام فرایندهای کنترل، بسته‌بندی، حمل و نقل و فشردن محصول برای بررسی میزان رسیدگی محصول با توجه به اینکه سفتی میوه عامل مهمی در تخمین بلوغ برای برداشت است (Shamsudin et al., 2009)، ایجاد می‌شود. این آسیب‌های مکانیکی ایجاد شده باعث رسیدگی غیر یکنواخت بافت محصول می‌شود که بر طعم و ظاهر آن تاثیر قابل توجهی می‌شوند (Nnodim et al., 2019). آسیب مکانیکی میوه یکی از مشکلات عمده مربوط به برداشت مکانیکی است (Li et al., 2011)، شکل آسیب به عواملی مانند ویژگی‌های ساختار و مقدار بار و سرعت بارگذاری بستگی دارد(De Ketelaere et al., 2006). ویژگی‌های ساختاری با رابطه بین نیرو وتغییر شکل، تنش و فشار نشان داده می‌شوند، که برای پیش‌بینی نحوه رفتار یک بافت در داخل بدنه باید آن‌ها را به خوبی درک کرد (Pal, 2014). شناخته شده است که بافت‌های نرم تحت تنش کم تغییر شکل می‌دهندو شکست محصولات کشاورزی به دو عامل شدت تنش و میزان استحکام در محصولات بستگی دارد (Schoorl & Holt, 1983). ویژگی‌های ساختاری بافت‌های بیولوژیکی معمولا از طریق نوعی آزمایش‌های مکانیکی، به عنوان مثال، آزمایش کششی، آزمایش فشاری، آزمایش خمشی و پیچشی تعیین می‌شوند (Pal, 2014). با توجه به ساختار پیچیده و شکل نامنظم محصولات کشاورزی استفاده از تئوری‌های الاستیسیته در تلاش هستند که پارامترهای بهتری برای بیان مقاومت در مقابل آسیب مکانیکی تعریف کنند. می‌توان به کمک آن‌ها ویژگی‌های مکانیکی مهم غذایی مانند سفتی و سختی را توصیف کرد (Khodabakhshian & Emadi, 2011). تا کنون تحقیقات بسیاری در زمینه تعیین خواص مکانیکی مواد بیولوژیکی انجام شده است اما تا کنون هیچ تحقیقی در مورد تعیین نیرو و انرژی شکست میوه لایم کوات که می‌تواند جایگزین بسیار خوبی برای لیمو باشد انجام نشده است که آگاهی از آن می‌تواند در طراحی تجهیزات مرتبط و یا بهینه سازی آن‌ها مورد استفاده قرار بگیرد.

در رابطه با بررسی خواص مکانیکی و آسیب‌های مکانیکی محصولات کشاورزی می‌توان به تحقیقاتی مانند: خواص مکانیکی و فیزیکی میوه‌های مرکبات (Joshi & Awate, 2016)، بهبود بسته بندی مرکبات بمنظور کاهش آسیب مکانیکی در میوه‌ها (Manetto et al., 2017)، شناسایی آسیب مکانیکی لیموشیرین (Firouzjaei et al., 2018)، خواص مکانیکی ساقه و میوه گوجه فرنگی (Liu et al., 2021)، تعیین خواص مهندسی میوه پرتقال شیرین (Selvan et al., 2021) انجام گرفته شده است، اشاره نمود.

میوه لایم کوات ترکیبی از کی لایم *(Citrus aurantiifolia)* و کامکوات گرد (*Citrus japonica*) می‌باشد در سال ۱۹۰۹ در فلوریدا توسط دکتر والتر سینگل با نام علمی *Citrus x floridana (J. Ingram & H. Moore) Mab.* و از خانواده مرکبات پرورش یافته که در حال حاضر سه گونه رایج *Eustis*، *Lakeland*، *Tavares* لایم کوات می‌باشد. لایم کوات بصورت کامل یا طعم دهنده برای آبمیوه‌ها و غذاها استفاده می‌شوند، همینطور برای تهیه مربا، ژله مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lim, 2012; Walheim, 1996).

در تحقیق حاضر نیرو و انرژی لازم برای شکست میوه لایم کوات بر اساس تئوری‌های االاستیسیته (تئوری هرتز، بوسینسک و قانون هوک) مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها

به منظور انجام این آزمایش ۳۵ عدد لایم کوات در اندازه و رنگ یکسان از یکی از باغ‌های شهرستان ساری واقع در استان مازندران تهیه شد (شکل ۱) و به آزمایشگاه خواص گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد منتقل شد.

شکل ۱- نمونه لایم کوات مورد استفاده در این تحقیق

آماده سازی نمونه‌ها

در ابتدا نمونه‌های سالم و عاری از هرگونه آفت و بیماری به صورت کاملا تصادفی انتخاب شدند، تمام نمونه‌ها بصورت جداگانه شسته، شماره گذاری شده و بلافاصله به آزمایشگاه پس از برداشت واقع در محل گروه مکانیک بیوسیستم انتقال یافت. قبل از انجام آزمایش‌ها مقدار لازم میوه لایم کوات از یخچال بیرون آورده شد و اجازه هم دمایی با محیط به مدت ۲ ساعت داده شده و در نهایت لایم کوات‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند (Khodabakhshian & Hassani, 2021).

اندازه‌گیری نیروی و انرژی لازم برای شکست

از دستگاه آزمایش کشش-فشار با نام تجاری اینسترون مدل H5KS ساخت شرکت Tinius Olsen و کشور انگلستان مجهز به لودسل ۵۰۰ نیوتن و دقت ۰/۰۰۱ $\pm$ نیوتن در نیرو و ۰/۰۰۱ $\pm$ میلی‌متر در تغییر شکل استفاده شد (شکل ۲). برای انجام آزمون فشاری هر نمونه میوه لایم کوات بصورت طولی بین دوفک قرار گرفت و همچنین برای انجام آزمون کششی پوست

محصول بصورت مستطیلی برش داده شد و بین گیره‌های کششی قرار گرفتند سپس دستور شروع آزمون‌ها از طریق رایانه متصل به دستگاه صادر شد. با مشاهده کاهش نیرو در نمودار نیرو- تغییر شکل بارگذاری داده‌های متناظر نیرو و تغییر شکل در نرم‌افزار اکسل ذخیره شدند. تجزیه واریانس نتایج با آزمایش طرح پایه کاملا تصادفی و با ۵ تکرار انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن و با استفاده از نرم‌افزار Spss استخراج شد.

شکل ۲- دستگاه کشش- فشار اینسترون مورد استفاده در آزمایش

کاربرد تئوری‌های الاستیسیته در تعیین میزان نیرو و انرژی لازم برای شکست

قانون هوک

در این روش (شکل ۳) نمونه‌های استوانه‌ای یا مکعبی شکل از میوه لایم کوات تهیه و تحت نیروی معینی (میزان نیرویی که نمودار نیرو- تغییر شکل در حد الاستیک باقی بماند) بارگذاری می‌شود. با توجه به مدول الاستیسیته حداکثر نیرو قرائت شده و سپس میزان تغییر شکل به دست می‌آید در این آزمایش سرعت بارگذاری ۱۵ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد (Khodabakhshian & Emadi, 2011).

شکل ۲) نمونه استوانه‌ای میوه لایم کوات بین دو صفحه موازی در قانون هوک

تئوری هرتز

این تئوری برای دسترسی به تنش تماسی مواد الاستیک توصیه می‌شود. با توجه به نوع بارگذاری و شرایط نمونه این تئوری به دو شکل مورد استفاده قرار می‌گیرد (Khodabakhshian & Emadi, 2011).

الف) فشردن محصول کامل بین دو صفحه موازی:

با بکارگیری تئوری هرتز میتوان به میزان تغییر شکل محصول کاملی که بین دو صفحه موازی فشرده می‌شود (مطابق شکل ۳) دست یافت برای افزایش دقت سرعت بارگذاری ۱۵ میلی‌متر در دقیقه مورد استفاده قرار گرفت.

شکل ۳) فشردن محصول کامل بین دو صفحه موازی در تئوری هرتز

ب) فشردن پراب کروی با قطر معین بر روی محصول:

(مطابق شکل ۴) در این حالت با فشردن پرابی با سطح مقطع کروی دستگاه اینسترون با قطر معین روی محصول و اندازه گیری تغییر شکل و نیروی وارده به محصول، تغییر شکل حاصل شده اندازه گیری می‌شود. در این بررسی نسبت پواسون ۰/۵ و رفتار محصول ویسکوالاستیک خطی فرض می‌شود.

سرعت بارگذاری ۳۰ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد. با توجه به شرایط محصول در طول بارگذاری این روش به دو صورت انجام می‌شود.

الف) استفاده از نمونه محصول کامل نشان داده شده در شکل (۴)، در این آزمایش از پراب کروی به قطر ۸ میلی‌متر استفاده شد.

شکل (۴) فشردن پراب کروی با قطر معین بر روی میوه کامل لایم کوات در تئوری هرتز

ب) استفاده از نمونه مستطیلی از محصول شکل (۵) با سرعت بارگذاری ۱۵ میلی‌متر در دقیقه این تئرری مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۵) فشردن پراب کروی با قطر معین روی نمونه مستطیلی از میوه لایم کوات در تئوری هرتز

تئوری بوسینسک

این تئوری (شکل ۶) برای اولین بار توسط بوسینسک برای دست یافتن به مدول الاستیسیته مواد الاستیک پیشنهاد گشت و بعدها توسط تیموسنگو گودیر گسترش یافت (Shelef & Mohsenin, 1969). در این آزمایش از پراب استوانه‌ای به قطر ۸ میلی‌متر استفاده شد(Khodabakhshian & Emadi, 2011) و همچنین سرعت بارگذاری در این تئوری ۱۰ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد.

شکل ۶) استفاده از تئوری بوسینسک برای تعیین مدول الاستیسیته

آزمون کششی

برای انجام این آزمون پوست میوه لایم کوات (مطابق شکل ۷) به شکل مستطیل دارای طول و عرض ۲۰ میلی‌متر در ۳۰ میلی‌متر برش داده شد و بین گیره‌های کششی دستگاه قرار داده شد. سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر در دقیقه اعمال شد.

شکل ۷) ازمون کششی بر روی پوست محصول لایم کوات

یافته‌ها

نتایج حاصله بر مبنای طرح کاملا تصادفی با پنج تکرار و با استفاده از تجزیه واریانس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. عوامل مورد مطالعه میانگین تیمارها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن و با کمک نرم افزار Spss مقایسه شد نتایج حاصله در جدول(۱) و جدول (۲) و شکل (۸) و شکل (۲) ارائه شده است.

جدول ۱) تجزیه واریانس تئوری‌های الاستیسیته و آزمون کششی برای انرژی در لحظه شکست

منبع تغییر	مجموع مربعات SS	درجه آزادی df	میانگین مربعات Ms	F محاسبه شده
تیمار	۲/۲۴۰	۵	۰/۴۴۸	۳۷/۱۲۳
اشتباه	۰/۲۹	۲۴	۰/۱۲	
کل	۲/۵۳۰	۲۹		

جدول ۲) تجزیه واریانس تئوری‌های الاستیسیته و آزمون کششی برای انرژی در لحظه شکست

منبع تغییر	مجموع مربعات SS	درجه آزادی df	میانگین مربعات Ms	F محاسبه شده
تیمار	۱۱۹۵۵۶/۰۱۸	۵	۲۳۹۱۱/۲۰۴	۲۶۲/۲۵۵
اشتباه	۲۱۸۸/۲۱۰	۲۴	۹۱/۱۷۵	
کل	۱۲۱۷۴۴/۲۲۸	۲۹		

جدول ۳) مقایسه میانگین تئوری‌های مورد استفاده و آزمون کششی برای انرژی در لحظه شکست

آزمون کششی	آزمون‌های فشاری					نوع آزمون نوع تئوری
	بوسینسک	**هوک**	**هرتز**			
			۳	۲	۱	
گیره کششی برای پوست محصول	فشردن پراب استوانه‌ای روی نمونه مستطیلی	فشردن نمونه استوانه‌ای بین دو صفحه موازی	فشردن پراب کروی روی نمونه مستطیلی	فشردن پراب کروی روی محصول کامل	فشردن محصول کامل بین دو صفحه موازی	نوع بارگذاری
^{b}۰/۲۰۵	^{c}۰/۰۴۶۱	^{bc}۰/۱۰۶	^{c}۰/۰۴۹	^{c}۰/۱۰۳	^{a}۰/۸۲۲	میانگین

جدول ۴) مقایسه میانگین تئوری‌های مورد استفاده و آزمون کششی برای نیروی لازم در لحظه شکست

آزمون کششی	آزمون‌های فشاری					س
	بوسینسک	**هوک**	**هرتز**			
			۳	۲	۱	
گیره کششی برای پوست محصول	فشردن پراب استوانه‌ای روی نمونه مستطیلی	فشردن نمونه استوانه‌ای بین دو صفحه موازی	فشردن پراب کروی روی نمونه مستطیلی	فشردن پراب کروی روی محصول کامل	فشردن محصول کامل بین دو صفحه موازی	نوع بارگذاری
^{b}۲۴/۷۰۰	^{bc}۱۱/۷۶۰	^{bc}۱۵/۲۲۰	^{c}۱۰/۶۰۰	^{bc}۲۱/۹۱۰	^{a}۱۸۵/۶۸۰	میانگین

بحث و نتیجه گیری

با توجه به جداول (۱و۲) اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ بین تئوری‌های بکار گرفته شده در آزمون فشاری برای بافت میوه و آزمون کششی برای پوست جهت بررسی تغییر شکل ایجاد شده، مشاهده می‌شود. با توجه به جداول (۳و۴) حداکثر مقدار میانگین انرژی و نیرو در لحظه شکست مربوط به آزمون فشاری با استفاده از تئوری هرتز تحت شرایط فشردن محصول کامل بین دو صفحه موازی به ترتیب (۰/۸۲۲ ژول) و (۱۸۵/۶۸۰ نیوتن) بدست آمد و همچنین حداقل مقدار میانگین انرژی و نیرو شکست مربوط به آزمون فشاری با استفاده از تئوری هرتز تحت شرایط فشردن پراب کروی روی نمونه مستطیلی به ترتیب (۰/۰۴۹ ژول) و (۱۰/۶۰۰ نیوتن) در بین تئوری‌های بکار گرفته می‌باشد. هادی عبداله زاده و همکاران در تعیین حداکثر نیرو و انرژی گسیختگی میوه گوجه فرنگی طی سه مرحله رسیدگی میوه به نتایج مشابهی دست یافتند (عبدالله زاده و همکاران، ۱۳۹۶).

بطور کلی تعیین نیرو و انرژی لازم برای گسیختگی محصولات کشاورزی برای طراحی و بهبود ماشین‌آلات کشاورزی مربوطه جهت اعمال حداکثر بار مجاز قابل تحمل برای محصول در حین انجام عملیات کشاورزی (در مراحل برداشت و پس از برداشت) برای جلوگیری از آسیب‌های مکانیکی و همچنین عرضه محصول قابل مصرف و با کیفیت به بازار مهم است. آرنولد و ریترز که مدول الاستیسیته گندم را بدست آوردند اظهار داشتند که انتخاب بهترین روش از بین تئوری‌های بکار برده تقریبا غیر ممکن است(Arnold & Roberts, 1969). بنابراین نمی‌توان تعیین کرد که از بین تئوری‌های الاستیسیته بکار گرفته شده می‌تواند بعنوان دقیق‌ترین روش برای تعیین نیرو و انرژی گسیختگی محصولات کشاورزی باشد. بر اساس نتایج این تحقیق، میوه لایم کوات که از لحاظ کیفی شبیه به میوه لیمو است بیشترین مقدار میانگن را در آزمون فشاری با استفاده از تئوری هرتز تحت شرایط فشردن محصول کامل بین دو صفحه موازی (۰/۸۲۲ ژول) و (۱۸۵/۶۸۰ نیوتن) دارا است و همچنین کمترین مقدار میانگین مربوط به آزمون فشاری با استفاده از تئوری هرتز تحت شرایط فشردن پراب کروی بر روی نمونه مستطیلی

(۰/۰۴۹ ژول) و (۱۰/۶۰۰ نیوتن) در بین تئوری‌های بکار گرفته می‌باشد. مقدار میانگین انرژی و نیرو برای نمونه پوست محصول به ترتیب می‌باشد (۰/۲۰۵ ژول) و (۲۴/۷۰۰ نیوتن) می‌باشد. بنابراین حداکثر نیروی لازم برای گسیختگی میوه لایم کوات با توجه به آزمون و تئوری به کار گرفته شده ۱۸۵/۶۸۰ نیوتن می‌باشد

منابع

عبداله زاده, ه., گل محمدی, ع., بجائی, ف. (۱۳۹۶). بررسی تغییر شکل و مدل الاستیسیته گوجه فرنگی طی مراحل مختلف رسیدگی پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی کشاورزی ارگانیک و مرسوم.

Arnold, P., & Roberts, A. (1969). Fundamental aspects of load-deformation behavior of wheat grains. *Transactions of the ASAE*, *12*(1), 104-0108 .

De Ketelaere, B., Desmet, M., & De Baerdemaeker, J. (2006). Determination of bruise susceptibility of tomato fruit by means of an instrumented pendulum. *Postharvest biology and technology*, *40*(1), 7-14 .

Firouzjaei, R. A., Minaei, S., & Beheshti, B. (2018). Sweet lemon mechanical damage detection using image processing technique and UV radiation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *12*(3), 1513-1518 .

Joshi, A. V., & Awate, N. (2016). Review Paper on Physical and Mechanical Properties of Citrus Fruits and Various Techniques used in Fruit Grading System Based on their Sizes. *International Journal of Science Technology & Engineering*, *3*(04), 129-132 .

Khodabakhshian, R., & Emadi, B. (2011). Determination of the modulus of elasticity in agricultural seeds on the basis of elasticity theory. *Middle-East Journal of Scientific Research*, *7*(3), 367-373 .

Khodabakhshian, R., & Hassani, M. (2021). The study and comparison of elastic modulus of pineapple fruit in macroscopic and microscopic modes. *Microscopy Research and Technique*, *84*(6), 1348-1357 .

Li, Z., Li, P., & Liu, J. (2011). Physical and mechanical properties of tomato fruits as related to robot's harvesting. *Journal of food engineering*, *103*(2), 170-178 .

Lim, T. (2012). Citrus x floridana. In *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants* (pp. 843-845). Springer .

Liu, J., Li, Z., & Li, P. (2021). The Physical and Mechanical Properties of Tomato Fruit and Stem. In *Rapid Damage-Free Robotic Harvesting of Tomatoes* (pp. 127-195). Springer .

Manetto, G., Cerruto, E., Pascuzzi, S., & Santoro, F. (2017). Improvements in citrus packing lines to reduce the mechanical damage to fruit. *Chemical Engineering Transactions*, *58*, 391-396 .

Nnodim, C. T., El Bab, A., Ikua, B. W., & Sila, D. N. (2019). Estimation of the modulus of elasticity of mango for fruit sorting. *Int J Mech Mech Eng*, *19*(02), 1-10 .

Pal, S. (201 .(٤Mechanical properties of biological materials. In *Design of Artificial Human Joints & Organs* (pp. 23-40). Springer .

Razavi, S. M. A., & BahramParvar, M. (2007). Some physical and mechanical properties of kiwifruit. *International Journal of Food Engineering*, *3*(6).

Schoorl, D., & Holt, J. (1983). Mechanical damage in agricultural products: a basis for management. *Agricultural Systems*, *11*(3), 143-157 .

Selvan, S. S., Edukondalu, L., Kumar, A. A., & Madhava, M. (2021). Determination of engineering properties of sweet orange (Citrus sinensis L.) fruits .

Shamsudin, R., Daud, W. R. W., Takrif, M. S., & Hassan, O. (2009). Physico-mechanical properties of the Josapine pineapple fruits. *Pertanika Journal of Science and Technology*, *17*(1), 117-123 .

Shelef, L., & Mohsenin, N. N. (1969). Effect of moisture content on mechanical properties of shelled corn. *Cereal Chemistry*, *46*(3), 242-253 .

Walheim, L. (1996). *Citrus:* Complete guide to selecting & growing more than 100 varieties for California, *Arizona, Texas, the Gulf Coast and Florida*. Tucson, Ariz: Ironwood Press .

Determining the force and energy required to fracture the lime quat fruit based on theories of elasticity

Sanaz Vatani: Master student, Dept. of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Email: sanaz.vatani@mail.um.ac.ir

Mohammad Hossein Abbaspour-Fard[1]: Professor, Dept. of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Email: abaspour@um.ac.ir

Rasool Khodabakhshian[2]: Assistant Professor, Dept. of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Email: khodabakhshian@um.ac.ir

Abstract

Today, the demand for quality agricultural products has expanded, so knowledge of the mechanical properties of agricultural products in their production and sale is important. Moreover, agricultural products have complex compositions, with irregular structure, in other words, they are heterogeneous. Therefore, determining the mechanical properties of agricultural products is a difficult and complex procedure. Knowledge of mechanical properties can assist in enhancement of related machines. In this study, the existing theories of elasticity including Hook, Boussinesq, and Hertz theory were used to examine the internal texture of lime quat fruit, whose production is expanding in Iran. The results showed that there is a significant difference between the test methods performed to determine the fracture energy and force at the 5% level. Among the various theories used, the maximum energy and fracture force obtained from the Hertz theory for compression two parallel plates with an average value of (0.822 J) and (185.680 N), respectively; and the minimum energy and fracture forces from the Hertz theory for compression with a spherical probe on a rectangular specimen with mean values of (0.049 J) and (10.600 N), respectively. For the product skin, the average of fracture energy and force were obtained as (0.205 J) and (24.700 N), respectively.

Key words: Theories of elasticity, fracture energy and force, lime quat, compression test, tensile test