

تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پوآسون محصولات کشاورزی

۱- فاطمه مرتضوی ۲- رسول خدابخشیان

۱- دانشجوی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد

Email: (mortazavi.fa@mail.um.ac.ir)

Email: (khodabakhshian@um.ac.i)

چکیده

باتوجه به تلفات مواد غذایی به خصوص در فرایندهای پس از برداشت محصولات محاسبه نیروها و ویژگی های فیزیکی محصولات اهمیت زیادی پیدا می کند. در این میان مدول الاستیسیته و مدول یانگ اهمیت ویژه ای دارند که به روش های ماکروسکوپی و میکروسکوپی اندازه گیری می شود. محاسبه مدول الاستیسیته با استفاده از سه تئوری هرتز، هوک و بوسینسک انجام می شود. در این میان استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به عنوان روشی مناسب برای محصولات کشاورزی معرفی شده است.

کلمات کلیدی: مدول الاستیسیته، نسبت پوآسون، محصولات کشاورزی

۱. مقدمه

بیشتر تلفات مواد غذایی از مدیریت ضعیف به ویژه نگهداری های پس از برداشت محصولات سرچشمه می گیرد [۲۷]. در حین انجام اکثر عملیات کشاورزی، محصولات تحت نیروها (عوامل مکانیکی) قرار می گیرند [۲]. ویژگی های مکانیکی و فیزیکی محصولات کشاورزی برای بازاریابی، انبارداری و مصرف حائز اهمیت است. مشکل عمده ای که مواد غذایی با آن روبرو هستند، ازدست دادن رطوبت در طول انبارمانی است. در صادرات محصول معمولاً سلامتی، ظاهر و سفتی میوه مورد بررسی قرار می گیرد [۲۸]. از آنجایی که این ویژگی ها برای حمل و نقل مناسب و فرایند روی محصولات بسیار حائز اهمیت است، باید تلاش کرد تا میزان آسیب به محصول به حداقل برسد. از میان تمام ویژگی های مکانیکی، نسبت پواسون و مدول الاستیسیته محصولات، از موارد مهم برای توصیف ویژگی های مکانیکی مواد هستند. نسبت پواسون نسبت کرنش عرضی به کرنش محوری است. کرنش به هرگونه تغییر در بعد محوری یا جانبی جسمی که تحت تنش مکانیکی قرار می گیرد اشاره دارد. مدول الاستیک یک جسم به عنوان شیب منحنی تنش - کرنش آن (نسبت تنش به کرنش) در ناحیه تغییر شکل الاستیک تعریف می شود. "تنش" به عنوان نیروی اعمال شده تقسیم بر ناحیه اعمال نیرو تعریف می شود. در محصولات کشاورزی شکل ناحیه تماس نامشخص است. از سوی دیگر برخلاف مواد مهندسی که می توان از آنها نمونه ها را به شکل استوانه ای ساخت تا سطح تماس دایره ای ثابت و مشخص باشد، برای اکثر محصولات کشاورزی امکان پذیر نیست. بنابراین، تعیین اندازه ناحیه اعمال نیرو، در طول آزمون تنش - کرنش چالش برانگیز است [۲۴، ۸، ۱۱، ۱۰، ۲۲، ۹، ۳۰].

خواص مکانیکی و بیولوژیکی مواد به عوامل متعددی بستگی دارد. اغلب روابط بین این عوامل هنوز به خوبی شناخته نشده اند، زیرا مواد بیولوژیکی مجموعه های بیومکانیکی با ساختمان خیلی پیچیده ای را تشکیل می دهند که رفتار آنها را با ثابت های ساده فیزیکی مانند فولاد نمی توان مشخص کرد [۲]. آگاهی از خصوصیات الاستیک ظاهری مانند نسبت پواسون و مدول الاستیک بذره های کشاورزی برای پیش بینی رفتار تغییر شکل بار و طراحی ماشین آلات فرایند آنها مهم است [۱۶].

نسبت پواسون و مدول یانگ دو خاصیت بنیادی جامدات الاستیک و جامدات ویسکوالاستیک هستند که در حل تمامی مسائل تماسی شامل محاسبه تنش، سطوح تماس و تغییر شکل الاستیک استفاده می شوند [۱۹، ۱۲].

از طرفی این خواص امکان پیش گویی رفتار نیرو - تغییر شکل محصولات کشاورزی را فراهم کرده و در طراحی تجهیزات فراوری این محصولات نقش مهمی ایفا می کند [۵، ۱۵].

۱.۱. مشکلات در اندازه گیری مدول الاستیسیته محصولات کشاورزی

گزارش های متعددی در مورد نحوه محاسبه نسبت پواسون و مدول یانگ انواع محصولات کشاورزی، از جمله دانه ها و حبه های با اشکال محدب و انواع مواد غذایی در منابع علمی قابل دسترسی است که در برخی موارد تفاوت در روش و نحوه محاسبه هر کدام از کمیت های مورد نظر تأمل برانگیز است [۲۱].

۲. پیشینه پژوهش

نسبت پواسون و مدول الاستیسیته دو رقم لوبیا قرمز را در سطوح رطوبتی مختلف و در چندین سرعت بارگذاری اندازه گیری کردند. در این مطالعه برای اندازه گیری انبساط عرضی از نوعی سنسور تماسی خاص به نام تیرهای خمشی استفاده نموده و بدون در نظر گرفتن شکل هندسی نمونه نسبت پواسون را به عنوان نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی در نظر گرفتند و برای تعیین مدول یانگ از تئوری هرتز برای اجسام محدب استفاده کردند [۱۸].

نسبت پواسون و مدول الاستیسیته دو رقم پیاز ایرانی (قرمز و زرد) در دو سرعت بارگذاری (۱۵ و ۲۵ میلی متر بر دقیقه) و دو جهت (طولی و عرضی) برای سه میزان جابه جایی (۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متر) تعیین شد. در هر نوبت آزمایش های بارگذاری توأم با عکس برداری انجام گرفت. نسبت پواسون نیز از طریق پردازش تصویر محاسبه شد. با استفاده از تئوری هرتز و نسبت پواسون محاسبه شده و نیز با در نظر گرفتن شکل پیاز، مدول الاستیسیته محاسبه گردید [۱].

برای تعیین نسبت پواسون و مدول الاستیسیته در دوره رسیدن انگور سفید بی دانه، نمونه میوه تازه طی هفت هفته متوالی، از پانزدهم شهریور تا بیست و ششم مهرماه، از یک باغ انگور برداشت گردید. در هر نوبت شش حبه آماده شده به صورت تصادفی انتخاب و آزمایش های بارگذاری استاتیک توأم با عکس برداری دیجیتالی انجام گرفت. با استفاده از تئوری هرتز و نسبت پواسون واقعی (آزمایشگاهی) و نیز با در نظر گرفتن شکل واقعی حبه انگور و تعریف مقدار مجاز تغییر شکل، مدول الاستیسیته محاسبه گردید. نسبت پواسون ظاهری نیز از طریق پردازش تصویر محاسبه و سپس مقادیر حاصل با استفاده از حل مدل فیزیکی مسئله با نرم افزار اجزا محدود (آباکوس) اصلاح شد [۳].

از جمله محدود تکنیک‌هایی که بر اساس میکروسکوپ در تحقیقات علوم غذایی و فناوری‌های مواد غذایی جهت بررسی مطالعات مکانیکی مواد بیولوژیکی، میکروسکوپ الکترونی عبوری انتقالی/اسکنی روی میوه و سبزی‌ها استفاده شده [۱۴]، میکروسکوپ نوری روی بستنی [۷]، میکروسکوپ اسکن لیزری کانفوکال روی لایه‌های سطح میوه [۳۱]، میکروسکوپ نیروی سلولی روی میوه و سبزی‌ها [۲۳]، میکروسکوپ نیروی اتمی در میوه موز [۲۱] مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳. مواد و روش‌ها

اساس تست‌های فشاری در تعیین مدول الاستیسیته بر سه تئوری استوار است:

۳.۱. تئوری هوک:

در این روش نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای شکلی از دانه تهیه و با نیروی معینی که تحت آن، نمودار نیرو – تغییر شکل در حد الاستیک باقی بماند بارگذاری می‌شوند. تحت این شرایط، مدول الاستیسیته دانه بر اساس شیب قسمت خطی نمودار تعیین می‌گردد [۳۳]. به عبارت دیگر با معلوم بودن سطح مقطع و طول اولیه نمونه، مدول الاستیسیته دانه طبق رابطه زیر برآورد می‌گردد [۳۳، ۵]:

$$E = \frac{Pl}{\delta A}$$

که در آن:

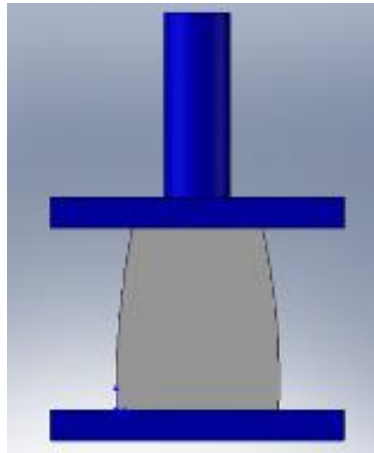
E: مدول الاستیسیته، MPa

P: نیروی وارده به نمونه، N

δ: تغییر طول نمونه، mm

l: طول اولیه نمونه، mm

A: سطح مقطع اولیه نمونه، mm²



شکل ۱- استفاده از قانون هوک برای تعیین مدول الاستیسیته [۱۶]

۲.۳. تئوری هرتز

باتوجه به شکل وسیله بارگذاری، نوع بارگذاری و شرایط نمونه، به دو صورت از این تئوری استفاده می شود:

الف) فشردن دانه کامل در بین دو صفحه موازی:

با استفاده از تئوری هرتز، مدول الاستیسیته دانه ای که در فاصله بین دو صفحه فشرده می شود از رابطه زیر قابل محاسبه است [۶، ۲۶، ۲۵، ۵]:

$$E = \frac{0.5P(1-\mu^2)}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{\frac{1}{2}}$$

که در آن:

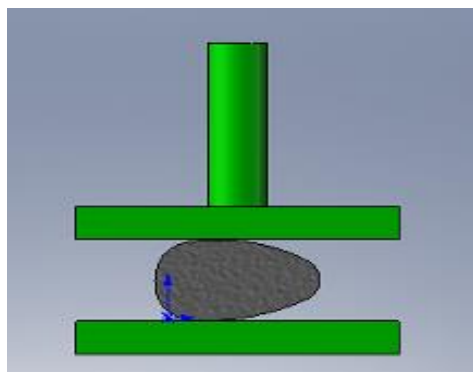
E: مدول الاستیسیته، MPa

P: نیروی وارده به محصول، N

Δl : تغییر شکل محصول، mm

μ : ضریب پواسون محصول

R و R' : کوچکترین و بزرگترین شعاع انحناي محصول در محل تماس با صفحات، mm



شکل ۲- فشردن محصول کامل بین دو صفحه موازی در تئوری هرتز [۱۶]

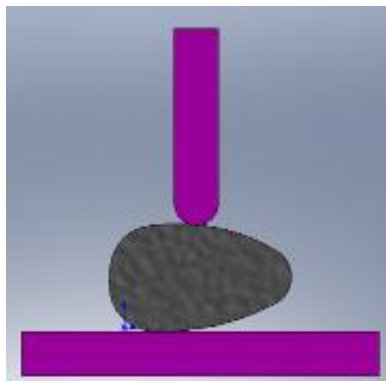
ب) فشردن کره‌ای با قطر معین روی دانه
 در این حالت با فشردن کره‌ای با قطر معلوم بر روی دانه و اندازه‌گیری نیروی وارد به دانه و مقدار تغییر شکل دانه،
 مدول الاستیسیته دانه با استفاده از تئوری هرتز برآورد می‌گردد [۲۵].

باتوجه به شرایط محصول در هنگام بارگذاری این روش به دو صورت انجام می‌گیرد:

ب-۱) استفاده از محصول به شکل کامل (شکل ۳):

که در آن d قطر کره بر حسب mm است.

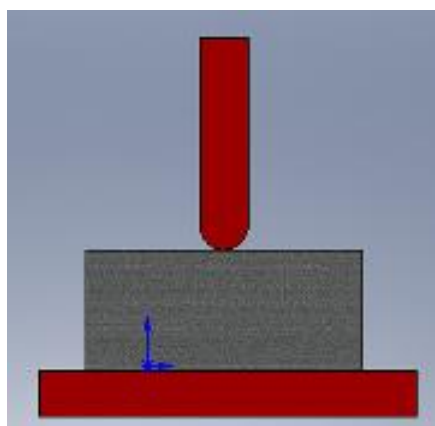
$$E = \frac{0.5P(1-\mu^2)}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} + \frac{4}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$$



شکل ۳- فشردن کره ای با قطر معین بر روی محصول کامل در تئوری هرتز [۱۶]

ب-۲) استفاده از نمونه مسطح از محصول (شکل ۴):

$$E = \frac{0.5P(1-\mu^2)}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{4}{d}\right)^{\frac{1}{2}}$$



شکل ۴- فشردن کره ای با قطر معین بر روی نمونه مسطح از محصول در تئوری هرتز [۱۶]

۳.۳. استفاده از تئوری بوسینسک

این تئوری توسط بوسینسک برای اندازه‌گیری مدول الاستیسیته مواد الاستیک ارائه شد و بعدها توسط تیموشنکو و گودیر توسعه داده شد [۲۵]. آنها اثبات کردند که در صورت معلوم بودن مقدار نیروی وارد به پلانجر و مقدار نفوذ آن در داخل دانه، مدول الاستیسیته دانه طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E = \frac{P(1 - \mu^2)}{2a\delta}$$

که در آن:

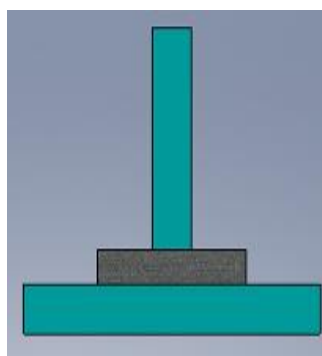
E: مدول الاستیسیته، MPa

P: نیروی وارده به پلانجر، N

δ : مقدار نفوذ پلانجر داخل محصول، mm

a: شعاع پلانجر، mm

μ : ضریب پواسون محصول



شکل ۵- استفاده از تئوری بوسینسک برای تعیین مدول الاستیسیته [۱۶]

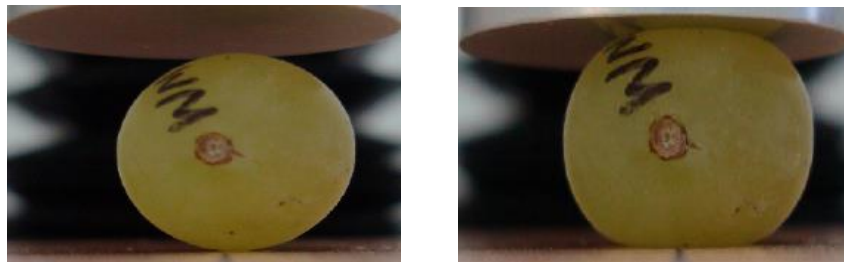
میکروسکوپ نیروی اتمی به‌عنوان روشی جدید برای محاسبه مدول الاستیسیته و مدول یانگ:

باتوجه به بررسی ای که در سال ۱۹۹۸ انجام شد میکروسکوپ نیروی اتمی امکان به دست آوردن رفتار مکانیکی مواد بیولوژیکی مانند مدول یانگ در مقیاس میکروسکوپی را می دهد. مهم ترین مزیت میکروسکوپ نیروی اتمی نسبت به سایر روش ها وضوح جانبی آن است و این اجازه را می دهد که داده های الاستیک با داده های مورفولوژیکی در ارتباط باشد، همچنین تعیین محلی از خصوصیات مکانیکی همراه با توپوگرافی علاوه بر بهبود درک خود نمونه می شود باعث بیش بهتر در مورد مکانیسم و عملکرد بیوسیستم ها خواهد شد [۳۲].

در سال ۲۰۰۷ تحقیقی در مورد کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی به عنوان ابزار نانو تکنولوژی در علوم صنایع غذایی انجام شد که نتایج حاکی آن است که AFM می تواند درک کاملی از خواص غذایی داشته باشد و از تجزیه و تحلیل AFM می توان برای نشان دادن برخی مکانیسم های تغییر خاصیت در طی پردازش و ذخیره سازی استفاده کرد [۳۴].

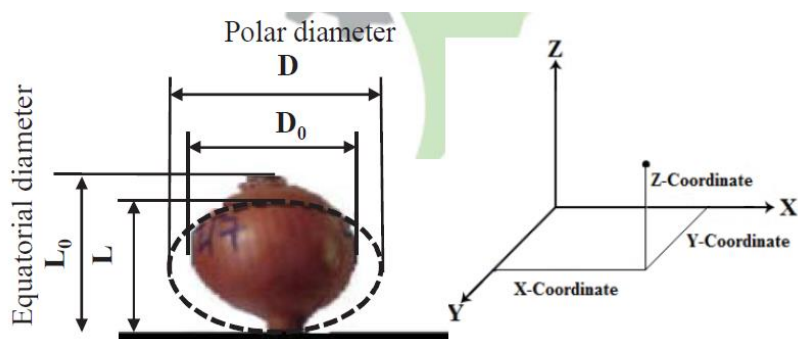
۴. نتایج و بحث

برای تعیین نسبت پواسون و مدول الاستیسیته در دوره رسیدن انگور سفید بی دانه، نمونه میوه تازه طی هفت هفته متوالی، از پانزدهم شهریور تا بیست و ششم مهرماه، از یک باغ انگور برداشت گردید. در هر نوبت شش حبه آماده شده به صورت تصادفی انتخاب و آزمایش های بارگذاری استاتیک توأم با عکس برداری دیجیتالی انجام گرفت. با استفاده از تئوری هرتز و نسبت پواسون واقعی (آزمایشگاهی) و نیز با در نظر گرفتن شکل واقعی حبه انگور و تعریف مقدار مجاز تغییر شکل، مدول الاستیسیته محاسبه گردید. نسبت پواسون ظاهری نیز از طریق پردازش تصویر محاسبه و سپس مقادیر حاصل با استفاده از حل مدل فیزیکی مسئله با نرم افزار اجزا محدود (آباکوس) اصلاح شد. تغییرات مدول الاستیسیته ظاهری انگور سفید بی دانه در حین رسیدن به ازای کرنش های محوری ۰,۰۵۵ و ۰,۰۶۰ و ۰,۰۷۰ و در نظر گرفتن تغییرات ضریب پواسون حبه در دوره رسیدن با به کارگیری تئوری هرتز [۳].



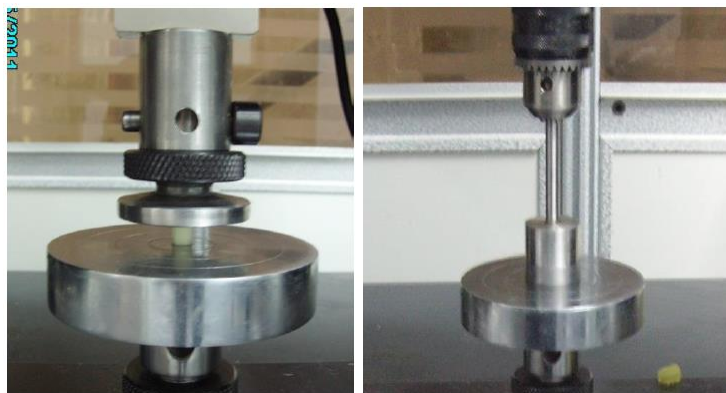
شکل ۶- تغییر شکل های محوری و عرضی در نمونه تحت بارگذاری [۳]

به طور میانگین نسبت پواسون و مدول الاستیسیته پیاز قرمز کمتر از پیاز زرد به دست آمد. نسبت پواسون $0.2623 - 0.4179$ و $0.2423 - 0.4179$ و مدول الاستیسیته $0.032 - 5.449$ و $0.032 - 5.449$ و $1.829 - 5.311$ مگاپاسکال به ترتیب برای پیاز زرد و قرمز بود [۱].



شکل ۷- تغییر شکل های محوری و عرضی در نمونه تحت بارگذاری [۱]

مدول الاستیسیته و نسبت پواسون بخش های مختلف میوه خیار با استفاده از آزمایش فشردگی تک محوری در دو حالت محصور و غیر محصور با استفاده از آزمایش های در قالب طرح کاملاً تصادفی محاسبه شد و نتایج حاصل از این است که با افزایش نسبت قطر میوه به محفظه دانه چگالی بالا می رود و مدول الاستیسیته بالاتر بخش گوشت نشان دهنده سفتی این بافت و تردی آن است. نسبت پواسون پایین تر بخش دانه به دلیل تراکم پذیری بالای این بخش است [۴].



شکل ۱۳- شکل سمت راست: تست محصور و شکل سمت چپ: تست غیر محصور [۴]

خدابخشیان و همکاران مدول الاستیک و سفتی دیواره های سلولی جدا شده از مزوکارپ موز را با نانو دندان زنی مبتنی بر AFM برآورد کردند. سپس مدول الاستیک سلول و سفتی با آنالیز منحنی های جداسازی نیرو با استفاده از تئوری هرتز و مکانیک اسندون تعیین شد. با استفاده از دو نوک با شعاع انحنای (۱۰ و ۱۰۰۰۰ نانومتر) مشخص شد که هندسه نوک به طور قابل توجهی بر خواص الاستو - مکانیکی اندازه گیری شده تأثیر می گذارد. مدول الاستیک حدود 45 ± 95 و 12.5 ± 18.5 کیلو پاسکال برای نوک با شعاع ۱۰ نانومتر و نوک با شعاع ۱۰۰۰۰ نانومتر به دست آمد. علاوه بر این تنوع زیادی با توجه به خاصیت الاستومکانیکی در بین سلول هایی که از همان منطقه در میوه نمونه برداری شده بودند در نظر گرفته شد [۱۷].

۵. مراجع

۱. جعفری، م، ا.خجسته پور، م.عمادی، ب.گلزاریان، م.۱۳۹۲. تعیین نسبت پوآسون و مدول الاستیسیته در شرایط مختلف بارگذاری دو رقم پیاز ایرانی. هشتمین کنگره مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون. مشهد. ۳۳۴۸-۳۳۶۰.
۲. جفت کار، ح.کلانتری، د.نجفی، ح.۱۳۹۱. تعیین مدول الاستیسیته سبب محلی مراغه و مدل رئولوژیکی آن. هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون. شیراز.
۳. حسن پور، ع.اسماعیلی، م.مدرس، م، ا.رحمانی، د، ع.نصیری، م. (۱۳۸۹). تعیین نسبت پوآسون در دوره رسیدن انگور سفید بی دانه. نشریه پژوهش های علوم و صنایع غذایی ایران. ۳۰۸: (۴) ۳۱۶-۳۰۸.
۴. دارائی، ف.همت، ع.۱۳۹۲. تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پوآسون بخش های مختلف میوه خیار. هشتمین کنگره مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون. مشهد.

۵. Arnold, P.C. and A. Robert, (۱۹۶۹). Fundamental aspects of load deformation behaviour of wheat grains. Trans. ASAE. ۱۲: ۱۰۴-۱۰۸
۶. Arnold, P.C., and A.W. Roberts. ۱۹۶۶. Stress distribution in loaded wheat grains. Journal of agriculture. Engng. Res. ۱۱(۱):۳۸-۴۳.
۷. Caillet, Alexandre, Claudia Cogné, Julien Andrieu, Pierre Laurent, and Alain Rivoire. (۲۰۰۳). Characterization of ice cream structure by direct optical microscopy. Influence of freezing parameters, LWT-Food Science and Technology, ۳۶: ۷۴۳-۴۹

۸. Cakir, E., Alayunt, F., Ozden, K., (۲۰۰۲). A study on the determination of Poisson's ratio and modulus of elasticity of some onion varieties. *Asian Journal of Plant Science*. ۱, ۳۷۶-۳۷۸.
۹. Chappel, T.W., Hanman, D.D., (۱۹۶۸). Poisson's ratio and Young's modulus for apple flesh under compressive loading. *Transact. ASAE* ۱۱ (۵), ۶۰۸-۶۱۲.
۱۰. Emadi, B., Abbaspour-Fard, M., Yarlagađa, K.D.V.P. (۲۰۰۹). Mechanical properties of melon measured by compression, shear, and cutting modes. *Int. Journal of Food Prop.* ۱۲, ۷۸۰-۷۹۰.
۱۱. Emadi, B., Kosse, V., Yarlagađa, P.K., (۲۰۰۵). Mechanical properties of pumpkin. *Int. Journal of Food Prop.* ۸ (۲), ۲۷۷-۲۸۷.
۱۲. Gentle, C. R. and M. Halsall.(۱۹۸۲). Measurement of Poisson's ratio using Newton's rings. *Optics and Lasers in Engineering.*, ۳: ۱۱۱-۱۱۸
۱۳. .
۱۴. He, SY, GP Feng, HS Yang, Y Wu, and YF Li. (۲۰۰۴). Effects of pressure reduction rate on quality and ultrastructure of iceberg lettuce after vacuum cooling and storage, *Postharvest Biology and Technology*, ۳۳: ۷۶۳-۷۳.
۱۵. Kang, Y. S., C. K., Spilman, and G.D. Chung. (۱۹۹۵). Mechanical properties of wheat. *Trans. ASAE.*, ۳۸: ۵۷۳-۵۷۸.
۱۶. Khodabakhshian, R, and B Emadi. (۲۰۱۱). Determination of the modulus of elasticity in agricultural seeds on the basis of elasticity theory, *Middle-East Journal of Scientific Research*, ۷: ۳۶۷-۷۳
۱۷. Khodabakhshian, R. Naeemi, A. and Bayati, M.R. (۲۰۲۱). Determination of texture properties of banana fruit cells with an Atomic Force Microscope: A case study on elastic modulus and stiffness , *Journal of Texture Stud.* ۳۹۹-۳۸۹:(۳)۵۲.
۱۸. Kiani Deh Kiani, M., H., Maghsoudi, and S. Minaei. (۲۰۰۹). Determination of Poisson's of ratio and Young's modulus of red bean grains. *Journal of Food Process Engineering.*, ۱۰: ۱۷۴۵-۱۷۵۶.
۱۹. Mohsenin, Nuri N. (۱۹۸۶).Physical properties of plant and animal materials.In.
۲۰. Pallottino, Federico, Corrado Costa, Paolo Menesatti, and Mauro Moresi. (۲۰۱۱). Assessment of the mechanical properties of Tarocco orange fruit under parallel plate compression , *Journal of food engineering*, ۱۰۳: ۳۰۸-۱۶.
۲۱. Roham, H., D., Jaros, and M. deHaan, (۱۹۹۷).A Video-Based method for determination of average stress-strain relations in uniaxial compression of selected food. *Journal of Texture Studies.*, ۲۸: ۲۴۵-۲۵۵.
۲۲. Rong, L., Wang, C.H., Bathgate, R.G., (۱۹۹۹). Fracture analysis of cracked macadamia nutshells under contact load between two rigid plates. *Journal of Agric. Eng. Res.* ۷۴, ۲۴۳-۲۵۰.
۲۳. Routier-Kierzkowska, Anne-Lise, Alain Weber, Petra Kochova, Dimitris Felekis, Bradley J Nelson, Cris Kuhlemeier, and Richard S Smith. (۲۰۱۲). Cellular force microscopy for in vivo measurements of plant tissue mechanics, *Plant physiology*, ۱۵۸: ۱۵۱۴-۲۲.

۲۴. Sagsoz, S., Alayunt, F.N., (۲۰۰۱). Some methods to determine the modulus of elasticity of some onion varieties. *J. Biol. Sci.* ۱ (۹), ۷۹۸-۸۰۰.
۲۵. Shelef, L. and N.N. Mohsenin. (۱۹۶۷). Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grains. *էէ*: ۳۹۲-۴۰۲.
۲۶. Shelef, L. and N.N. Mohsenin. (۱۹۶۹). Effect of moisture content on mechanical properties of shelled corn. *Cereal Chem.* *է۶*: ۲۴۲-۲۵۳.
۲۷. Shitanda, D., Y. Nishiyama, and S. Koide. (۲۰۰۲). Compressive strength properties of rough rice considering variation of contact area. *Journal of Food Engineering.* *۵۳*: ۵۳-۵۸.
۲۸. Steenkamp, J.-B., (۱۹۹۷). Dynamics in consumer behaviour with respect to agricultural and food products. In:
۲۹. Wierenga, B., van Tilburg, A., Grunert, K., Steenkamp, J.-B., Wedel, M. (Eds.), *Agricultural Marketing and Consumer Behavior in a Changing World.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. ۱۴۳-۱۸۸.
۳۰. Timbers, G.E., Statleyand, L.M., Watson, E.L., (۱۹۶۵). Determining modulus of elasticity in agricultural products by loaded plungers. *Agricult. Eng.* *է۶*, ۲۷۴- ۲۷۵.
۳۱. Veraverbeke, Els A, Pieter Verboven, Patrick Van Oostveldt, and Bart M Nicolai. (۲۰۰۳). Prediction of moisture loss across the cuticle of apple (*Malus sylvestris* subsp. *Mitis* (Wallr.)) during storage: part ۱. Model development and determination of diffusion coefficients, *Postharvest Biology and Technology*, *۳۰*: ۷۵-۸۸.
۳۲. Vinckier, Anja, and Giorgio Semenza. (۱۹۹۸). Measuring elasticity of biological materials by atomic force microscopy, *FEBS letters*, *է۳۰*: ۱۲-۱۶.
۳۳. Wouters, A., and J.D. Baerdemaeker. (۱۹۸۸). Effect of moisture content on mechanical properties of rice kernels under quasi – static
۳۴. Yang, Hongshun, Yifen Wang, Shaojuan Lai, Hongjie An, Yunfei Li, and Fusheng Chen. (۲۰۰۷). Application of atomic force microscopy as a nanotechnology tool in food science', *Journal of food science*, *۷۲*: R۶۵-R۷۵.