مروری بر روش های اندازه گیری خواص مکانیکی محصولات کشاورزی در مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی

فاطمه بیدادگر[۱*]، رسول خدابخشیان کارگر[۲]، محمدحسین آق خانی[۳]

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم در دانشگاه فردوسی مشهد

۲-استادیار در رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم در دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد در رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم در دانشگاه فردوسی مشهد

***ایمیل نویسنده مسئول: Fatemebidadgar@gmail.com**

چکیده

در این پژوهش، به بررسی روش‌های اندازه‌گیری خواص مکانیکی محصولات کشاورزی در مقیاس‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی پرداخته شد. آسیب‌های مکانیکی وارده بر محصولات کشاورزی طی عملیات‌های کاشت، داشت و برداشت منجر به کاهش کیفیت و ارزش اقتصادی آن‌ها می‌شود. از این رو آگاهی از رفتار فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی از قبیل مدول الاستیسیته، سفتی، سختی و تنش تسلیم جهت طراحی تجهیزات مربوطه و جلوگیری از خسارات وارده و همچنین بهبود کیفیت آن‌ها امری ضروری است. در این میان، با توجه به شکل نامنظم محصولات کشاورزی و نداشتن ساختمان داخلی همگن، تعیین رفتار مکانیکی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا به کار بردن تئوری‌های الاستیسیته که برای مواد مهندسی توسعه یافته‌اند، برای این محصولات به سادگی میسر نیست. با این وجود، مطالعات زیادی برای تعیین رفتار محصولات کشاورزی در مقیاس ماکروسکوپی (در مقیاس ابعاد واقعی محصول) تحت بارگذاری‌های شبه استاتیکی به کمک روش‌های مخرب (استفاده از دستگاه اینسترون و بافت‌سنج) و روش‌های المان محدود با مدل کردن محصولات انجام شده است که به دلیل ناهمگن بودن ساختمان داخلی و نامنظم بودن شکل محصولات با خطا در اندازه‌گیری همراه بوده است. تعیین خصوصیات ساختاری با استفاده از میکروسکوپ‌ها در مقیاس مناسب، فرصت‌های نوینی را برای تجزیه و تحلیل‌های مهندسی فراهم کرده است. در این تحقیق، مروری بر روش‌های اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی محصولات کشاورزی انجام شد. هدف از این پژوهش، بررسی و مقایسه روش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی موادغذایی در دو مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی است که باعث کمک به انتخاب بهترین و مناسب‌ترین روش و کاهش خطای اندازه‌گیری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خواص مکانیکی، محصولات کشاورزی، مقیاس ماکروسکوپی، مقیاس میکروسکوپی و میکروسکوپ نیروی اتمی(AFM)

مقدمه

امروزه با توجه به افزایش روزافزون جمعیت نیاز به موادغذایی افزایش پیدا کرده است. یکی از روش‌های کنترل مصرف موادغذایی، کاهش تلفات در حوزه پس از برداشت است. به این منظور تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی کمک بزرگی به کاهش این اتلاف می‌کند. خواص مکانیکی موادغذایی معمولا در مقیاس ماکروسکوپی اندازه‌گیری می‌شود که با خطا همراه است چرا که تئوری‌های موجود برای تعیین خواص مکانیکی مربوط به مواد مهندسی که الاستیک هستند، می‌باشد نه موادغذایی که دارای خاصیت ویسکوالاستیک هستند و هر کدام دارای شکل و بافت منحصر به فردی می‌باشند. بنابراین تعیین خواص مکانیکی در مقیاس میکروسکوپی می‌تواند راه حل مناسبی برای حل این معضل باشد.

به رفتار مواد در برابر پدیده‌ها و نیروهای خارجی در شرایط گوناگون خواص مکانیکی مواد می‌گویند. این پدیده‌ها می‌توانند شامل نیروهای اعمالی مختلف به صورت فشاری، کششی، پیچشی، خمشی و یا بارگذاری‌های استاتیکی، دینامیکی و متناوب، رفتار مواد در مقابل سیالات و واکنش آن‌ها در تماس با سطوح مختلف باشند. از جمله این شرایط متفاوت، شرایط محیطی مانند فشار هوا، درجه حرارت، رطوبت نسبی، شرایط مکانی همانند واکنش محصول در طول فرآیندهای گوناگون پس از برداشت (فرآوری، بسته‌بندی، حمل و نقل) و شرایط زمانی مثل واکنش‌های محصول در طول فرآیندهای مختلف کاشت، داشت و برداشت هستند. هر یک از این ویژگی‌ها، علاوه بر معرفی خصوصیات محصول، برای تجهیزات گوناگون در طول تولید و فرآوری محدودیت ایجاد می‌کند. در این قسمت می‌توان از مدول الاستیسیته به عنوان یکی از مهم‌ترین صفات نام برد (Mohsenin, 1986).

شانزدهمین کنگره ملی مهندسی
مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون کشاورزی

از این رو تعیین خصوصیات و رفتار مکانیکی محصولات کشاورزی همواره موضوعی جذاب و چالش برانگیز برای محققین بوده است زیرا محصولات کشاورزی فاقد شکل هندسی منظم می‌باشند و ساختمان داخلی ناهمگنی دارند و تئوری‌های الاستیسیته موجود که عموما برای مواد مهندسی (مانند فولاد و بتن) توسعه یافته‌اند، برای این نوع مواد کاربرد ندارند. با این وجود پژوهش‌های بسیاری در مقیاس ماکروسکوپی (در مقایس ابعاد واقعی محصول) برای مشخص کردن رفتار محصولات کشاورزی تحت بارگذاری‌های شبه استاتیکی با استفاده از شیوه‌های مخرب (مانند استفاده از دستگاه‌های بافت‌سنج و کشش و فشار) و نیز روش‌های المان محدود و اجزا محدود به کمک مدل کردن محصولات صورت گرفته شده است (Khodabakhshian et al., 2019; Miraei Ashtiani et al., 2019). همان طور که پیشتر ذکر شد و بسیاری از محققین نیز گزارش کرده‌اند نتایج خصوصیات مکانیکی محصولات کشاورزی با استفاده از روش‌های ماکروسکوپی همانند روش‌های بیان شده به دلیل نامنظم بودن شکل هندسی آن‌ها و ناهمگن بودن ساختمان داخلی، وجود سلول و بافت‌های زنده و هم‌چنین رفتار ویسکوالاستیک آن‌ها با خطای اندازه گیری مواجه می‌شود (Posé et al., 2019; Zdunek & Kurenda, 2013).

استفاده از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ در مقیاس‌های مناسب برای تبیین خصوصیات ساختاری، باعث ایجاد فرصت‌های نوینی به منظور تجزیه و تحلیل مهندسی شده است. در این میان می‌توان به استفاده از روش میکروسکوپ نیروی اتمی[1] به عنوان یکی از این فرصت‌های جدید اشاره نمود. از این روش برای شناسایی ساختار در مقیاس نانو استفاده می‌شود و در حیطه‌های مختلف تحقیقاتی از جمله فناوری موادغذایی (پلیمریزاسیون و کیفیت مولکولی)، بررسی ساختار پیچیده یا کمی، واکنش‌های مولکولی، توپوگرافی سطح، خصوصیات نانو و در دهه‌های اخیر تبیین رفتار مکانیکی مواد کاربرد دارد (Posé et al., 2019). هدف از این پژوهش، بررسی تحقیقات انجام شده درباره تعیین خصوصیات مکانیکی محصولات کشاورزی در مقیاس‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی و استفاده از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد.

شانزدهمین کنگره ملی مهندسی
مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون کشاورزی

خواص مکانیکی:

واکنش یک ماده به بارگذاری را خصوصیات مکانیکی آن ماده مشخص می‌کند. در کاربردهای مهندسی این بارگذاری می‌تواند به صورت استاتیکی یا دینامیکی باشد. ویژگی‌های مختلف مکانیکی یک محصول کشاورزی مانند مقاومت فشاری[2]، مقاومت برشی[3]، سختی[4]، مقاومت در برابر ضربه[5] و خصوصیات رئولوژیکی[6] آن می‌توانند روی عملیات فرآوری تاثیرگذار باشند. به‌دست آوردن این ویژگی‌ها می‌تواند کمک بسزایی در طراحی تجهیزات ذخیره‌سازی و حمل و نقل محصولات غذایی بکند (سیتکی ۱۹۸۷).

[1] *Atomic Force Microscopy (AFM)*
[2] *Compressive*
[3] *Shear resistance*
[4] *Hardness*
[5] *Impact resistance*
[6] *Rheological properties*

آزمون‌های مکانیکی:

یکی از مهم‌ترین ویژگی محصولات کشاورزی حساسیت آن‌ها به آسیب‌های مکانیکی است که بستگی به میزان استحکام و همچنین خصوصیات بیولوژیکی آن‌ها دارد، لذا در مراحل مختلف برداشت، حمل و نقل و فرآوری آن‌ها باید به این نکته توجه کرد تا از خسارت رسیدن به آن‌ها جلوگیری شود. علاوه بر این باید به این موضوع نیز توجه شود که بیشتر محصولات کشاورزی الاستیک بوده و به بارگذاری‌های مکرر مانند لرزش در هنگام حمل و نقل حساس هستند و در اثر بارهای مکرر بافت آن‌ها نرم می‌شود. از این رو تاکنون خواص الاستیک مواد بیولوژیکی در مقیاس‌های کلان در پژوهش‌های بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. مانند آزمایشات فشرده‌سازی که معمولا با استفاده از دستگاه‌های تمام اتوماتیک مانند دستگاه‌های تست مکانیکی جهانی اینسترون[۷] (Khodabakhshian et al., 2019; Shiu et al., 2015) یا تحلیل‌گر بافت[۸] (Foegeding & Drake, 2007; Giunchi et al., 2008) انجام می‌شود. با این وجود به دلیل شکل پیچیده اکثر محصولات بیولوژیکی و ساختار پیچیده مرتبط با آن‌ها، نتایج به دست آمده از تعیین رفتار الاستیک این مواد در مقیاس ماکرو در تحقیق‌های مختلف متفاوت است(Khodabakhshian et al., 2019; Mohsenin, 1986). از این رو، مطالعه رفتار الاستیک مواد بیولوژیکی در هر دو مقیاس میکرو و نانو مورد نیاز است. روش‌های مکانیکی و استفاده از مدل‌های هندسی جز اولین روش‌ها برای مطالعات میکرومکانیکی مواد بیولوژیکی بود (LIN & PITT, 1986). در مقیاس ماکروسکوپی نیز از قوانین هوک (برای نمونه‌های استوانه‌ای شکل)، بوسینسگس (استفاده از سیلندر استوانه‌ای شکل و تماس آن با نمونه استوانه‌ای) و هرتز (صفحه موازی یا تماس با صفحه منفرد بر روی کل نمونه و یا تماس با فرورفتگی کروی شکل در نمونه‌های استوانه‌ای یا نمونه کامل) استفاده شده است. این نظریه‌ها در تلاش اند تا بعضی از خصوصیات الاستیک مواد بیولوژیکی را مانند مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، سفتی و استحکام را توصیف کنند (Khodabakhshian et al., 2019; Khodabakhshian & Emadi, 2011; Mohsenin, 1986; Shirvani et al., 2014).

خواص مکانیکی در سطح ماکروسکوپی:

در پژوهشی آسیب پذیری میوه گریپ فروت تحت شرایط بارگذری نیروی خارجی شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که بافت داخلی میوه در نقطه تسلیم به ۹/۵۵ و ۱۳/۷۷ میلی‌متر می‌رسد لازم به ذکر است که در این مقادیر جابجایی، پوست آسیب نمی‌بیند. اما با توجه به داده‌های تجربی، نمونه‌ها قبل از رسیدن به محدوده شکست و تسلیم کامل نیاز به ۲۹/۴۷ و ۳۶/۵۵ میلی‌متر جابجایی در هر دو جهت طولی و عرضی دارند (Miraei Ashtiani et al., 2019).

در تحقیقی دیگر برخی خواص مکانیکی از قبیل مدول الاستیسیته، نیروی لازم برای ایجاد حفره، تغییر شکل، سفتی، نسبت پواسون، تنش و انرژی لازم برای ایجاد حفره مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اثر زمان برداشت بر خواص مکانیکی میوه کامکوات مانند نیروی لازم برای ایجاد حفره، تنش، انرژی و سفتی در سطح ۱٪ ، برای تغییر شکل و مدول الاستیسیته در سطح ۵٪ معنی دار بوده است (Kabas et al., 2019).

---

[7] *Instron*
[8] *Texture analyser*

در پژوهشی دیگر خواص مکانیکی و فیزیکی هویج به منظور کاهش تلفات در طول برداشت و پس از برداشت بررسی شد. خواص مکانیکی هویج‌ها تحت شرایط فشار (کبودی) و خمیدگی (شکست) در راستای طولی و برش نصف هویج بر اساس استانداردهای پیشنهاد شده توسط دستگاه تست مکانیکی جهانی اینسترون اندازه گیری شد. در این بررسی، حداکثر نیروی مورد نیاز برای خمیدگی و برش میوه هویج به ترتیب ۴۸/۶۰ تا ۷۱/۹۰ و ۴۱/۴ نیوتن بود (Jahanbakhshi et al., 2018).

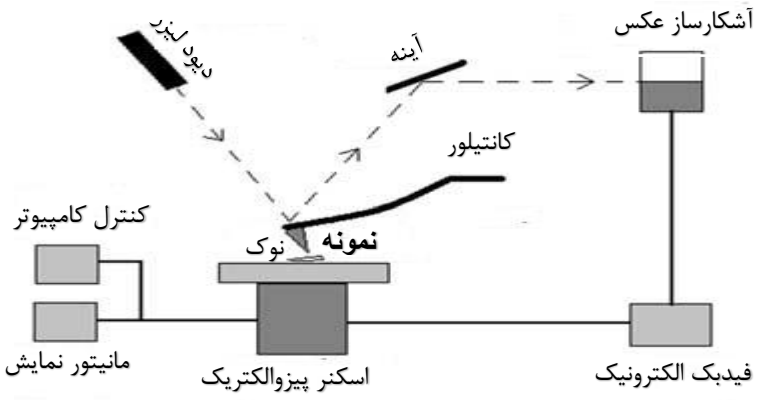
در پژوهشی دیگر خواص فیزیکی و مکانیکی نارنگی بررسی شد. برای این منظور آزمون فشار برای ارزیابی مقاومت میوه در برابر فشار و آزمون حفره برای ارزیابی آسیب ناشی از ساقه (شکل۱) میوه انجام شد. نتایج نشان داد که سفتی میوه بین ۱/۳۵۱ تا ۱/۶۵۰ کیلوگرم- متر متغییر بود (Rehal et al., 2017).

شکل۱- مطالعه به منظور تاثیر طول ساقه بر میزان آسیب دیدگی میوه

خواص مکانیکی در سطح میکروسکوپی:

استفاده از انواع میکروسکوپ‌ها از جمله معدود روش‌هایی است که برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی مواد بیولوژیک در مقیاس میکروسکوپی در حوزه صنایع غذایی به کار رفته است. در بسیاری از تحقیقات علوم غذایی از این تکنیک استفاده شده است. از جمله استفاده از میکروسکوپ نوری[9] روی بستنی (Caillet et al., 2003)، میکروسکوپ نیروی سلولی[10] روی سبزی و میوه‌ها (Routier-Kierzkowska et al., 2012) و میکروسکوپ نیروی اتمی در سلول‌های زنده گیاهان (Posé et al., 2019). میکروسکوپ نیروی اتمی در سال ۱۹۸۶ توسط گردبینینگ و کالوین کوات و کریستوفر گربر اختراع و ساخته شد. میکروسکوپ نیروی اتمی به خانواده‌ای از ابزارها گفته می‌شود که به عنوان کاوشگر روبشی عمل می‌کنند و تصاویر بدست آمده از آن نه از روش مشاهده‌کردن بلکه از روش حس‌کردن است. وضوح و بزرگنمایی این میکروسکوپ بیشتر از میکروسکوپ نوری است. این دستگاه می‌تواند از انواع سطوح رسانا و غیر رسانا با وضوح مولکولی و اتمی در مایع و همچنین هوا عکس‌برداری کند (شکل۲). زمینه بیولوژیکی میکروسکوپ نیروی اتمی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط آندریاس انگل بررسی شد (Paniagua et al., 2014; Parot et al., 2007).

[9] *Light microscopy*
[10] *Cellular force microscopy*



شکل۲- اصول کار میکروسکوپ نیروی اتمی

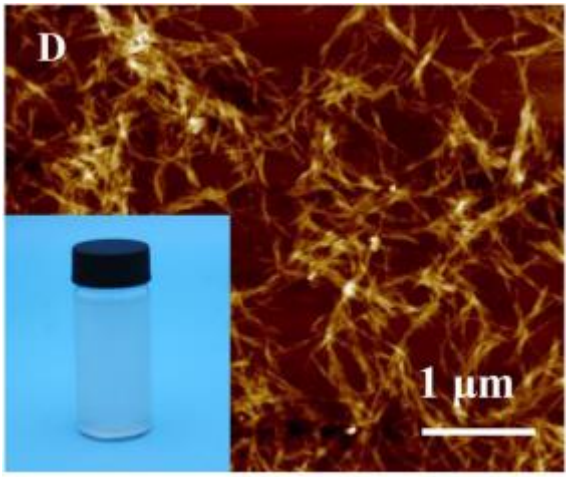
تحقیقی در سال ۲۰۰۷ درباره کاربرد دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی به عنوان ابزار نانوتکنولوژی در علوم صنایع غذایی انجام شد. در این تحقیق ابتدا اساس کار دستگاه *AFM* مانند اصول، مهارت‌های کاربرد و آنالیز دستگاه و سپس تحقیقات اساسی در حوزه صنایع غذایی و فناوری از جمله ماکرو مولکول‌های کیفی و تصویربرداری پلیمری، تجزیه و تحلیل ساختار پیچیده یا کمی، تعامل و دستکاری مولکولی، توپوگرافی سطحی و خصوصیات نانو مواد بررسی شد. نتایج نشان داد که *AFM* می‌تواند درک کاملی از خواص مواد غذایی داشته باشد و از تجزیه و تحلیل‌های این دستگاه برای نشان دادن بعضی از مکانیسم‌های تغییر خاصیت در طی پردازش و ذخیره سازی می‌توان استفاده کرد (Yang et al., 2007).

در تحقیقی دیگر خصوصیات اپیکارپ[11] میوه قهوه توسط میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شد. با استفاده از این دستگاه ویژگی سطحی اپیکار قهوه در حالت‌های رسیده و سبز، سفتی سطح میوه، پارامترهای میانگین سفتی (*Ra*)، میانگین ریشه درجه دوم از سفتی (*Rq*)، تراکم و ابعاد دیواره سلولی قهوه بدست آمد. نتایج نشان داد که محدوده *Ra* و *Rq* برای میوه رسیده به ترتیب برابر است با ۰/۱۹ –۰/۰۳ میکرومتر و ۰/۲۴ –۰/۰۵ میکرومتر و برای میوه سبز برابر است با ۰/۳۸ –۰/۲۳ میکرومتر و ۰/۴۹ –۰/۲۹ میکرومتر و سلول‌ها از فرم بیضی شکل با متوسط مساحت ۱۹۴/۶۲ میکرومتر مربع و متوسط تراکم ۴/۲۰۶ سلول در میلی‌متر مربع می‌باشد (Cardona et al., 2008).

پژوهشی دیگر برای استفاده کامل از پوسته برنج برای ارزیابی زیست فعالیت‌های فیتوشیمیایی و تهیه نانوبلورهای سلولز انجام شد. برای این منظور یک قطره از سوسپانسیون فیبر سلولز (*CNC*) پس از سفید کردن، خشک شد و سپس با میکروسکوپ نیروی اتمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. طول‌ها و قطرها با استفاده از ابزار تحلیل مقطع نرم افزار تحلیل نانو اسکوپ (بروکر، نسخه ۱/۴۰) از حالت ارتفاع تصاویر *AFM* بدست آمد و بیش از ۱۰۰ *CNC* به منظور تعیین میانگین طول و قطر به طور تصادفی اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که

[11] *Epicarp*

عرض فیبر سفید شده بین ۵–۱۵ میکرومتر و طول متناظر آن بین ۱ –۰/۱ نانومتر بود *CNC* های تولید شده از باقی‌مانده‌ها با تصویر *AFM* تائید شد (شکل۳) (Gao et al., 2018).



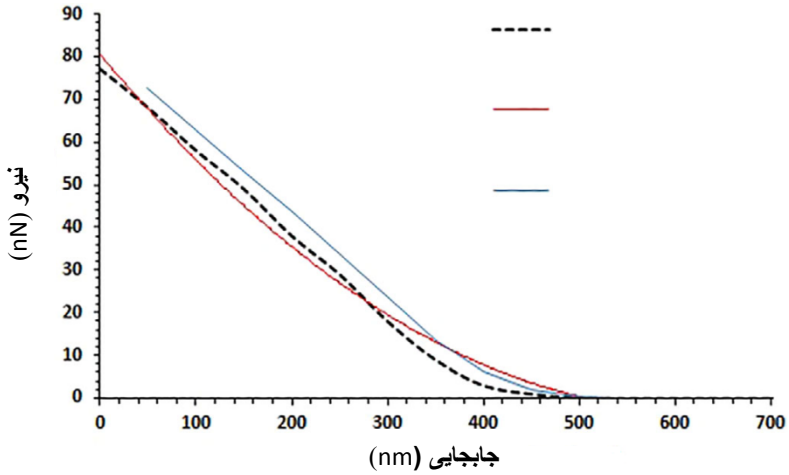
شکل۳- تصاویر *AFM* حالت ارتفاع از *CNC* ها و *تصویر CNC* های واقعی

در پژوهشی دیگر در راستای بررسی پیشرفت‌های جدید در میکروسکوپ نیروی اتمی برای ارزیابی ویژگی‌های نانو مکانیکی موادغذایی انجام شد. این مطالعه بیان کرد که می‌توان از *AFM* برای بررسی ساختار مولکولی مواد بیولوژیک استفاده کرد و این دستگاه یکی از ابزارهای جدید برای اندازه گیری خصوصیات نانومکانیکی موادغذایی است. ارزیابی این خواص در موادغذایی به دلیل ارتباط نزدیک عملکردهای بیولوژیکی با جسم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Posé et al., 2019).

در تحقیقی دیگر بر روی بررسی خواص مکانیکی ارقام گندم سخت و نرم در سطوح مختلف ساختاری در رطوبت‌های ۱۰٪ و ۱۵٪ انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که سلول‌های پریکارپ بیرونی رقم نرم در رطوبت ۱۰٪ سفت‌تر از رقم سخت هستند و سفتی لایه‌های سبوس در نتیجه سطوح رطوبت بالاتر در هر دو رقم کاهش یافت. همچنین رابطه بین خواص نانو، میکرو و ماکرو مکانیکی دانه گندم نشان داد که رقم نرم در ۱۰٪ و ۱۵٪ به ترتیب با سلول‌های بیرونی پریکارپ سفت‌تر و تغییر شکل شکستگی بیشتر همراه بود. با این حال، رقم سخت در ۱۰٪ و ۱۵٪ به ترتیب مربوط به سختی بالاترتر اندوسپرم و نیروی شکست و سختی بالاتر لایه‌های سبوس بود (Barrera et al., 2019).

در پژوهشی دیگر مدول الاستیک میوه آناناس را در حالت ماکروسکوپی و میکروسکوپی به ترتیب به وسیله دستگاه‌های اینسترون و میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شد. آن‌ها در این مطالعه از دو تئوری هوک (بر روی نمونه استوانه‌ای شکل) و تئوری هرتز (در حالت تماس فرورفتگی کروی بر روی کل نمونه) استفاده کردند. نتایج نشان داد که با تغییر نوع تئوری، رفتار مدول الاستیک به طور معنی داری در سطح ۱٪ تغییر می‌کند. کمترین و بیشترین مدول الاستیک برابر با ۰/۱۳۵ و ۰/۷۷۹ مگاپاسکال بود که به ترتیب مربوط به تئوری‌های

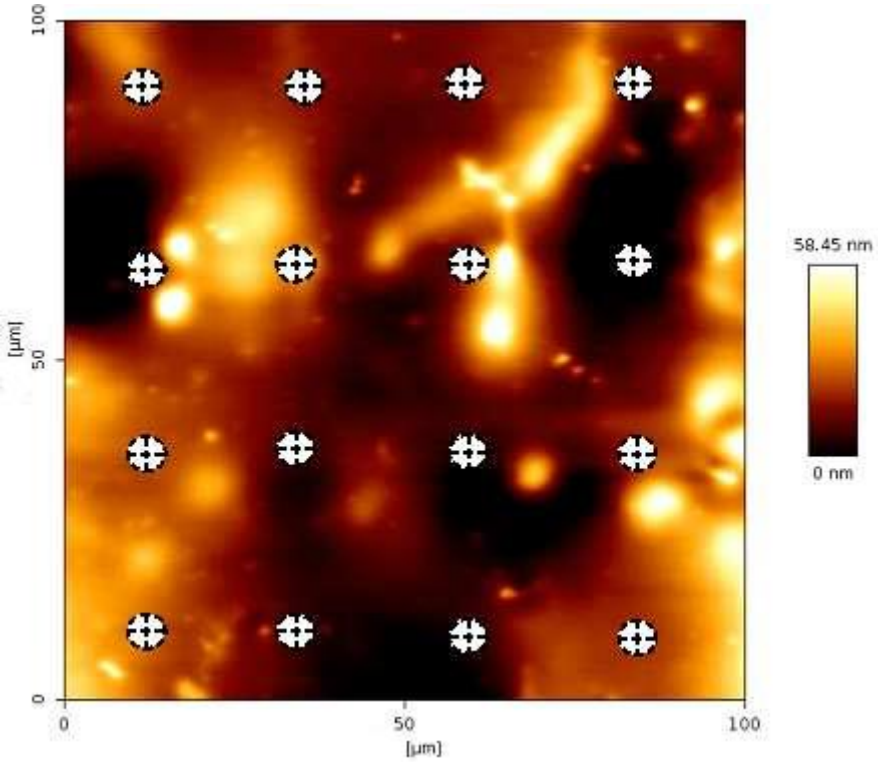
هرتز و هوک بود. نتایج مطالعات در حالت میکروسکوپی نشان دهنده این بود که کمترین مدول الاستیک متعلق به مدل اسندون و بیشترین متعلق به مدل هرتز می‌باشد (شکل۴) (Khodabakhshian & Hassani, 2021).



شکل٤- نمودار نیرو- جابجایی میوه آناناس با استفاده از *AFM*

محققین در پژوهشی دیگر زبری سطح (پوست) موز با استفاده از میانگین حسابی بین قله‌ها و فرورفتگی‌ها (Ra) و زبری ریشه میانگین مربع (Rq) به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار دادند. از این مطالعه نتیجه گیری شد که با تغییر مراحل رسیدن، رفتار زبری به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. فرآیند رسیده‌شدن میوه، باعث گسترش اپی کارپ و کاهش زبری سطح (پوست) می‌شود که دلیل آن بزرگ‌شدن حجم میوه است. بالاترین میانگین زبری در مرحله ۱، Ra= 8.25 و Rq= 9.65 نانومتر بود Khodabakhshian & (Baghbani,) 2021.

در تحقیقی دیگر که در سال ۲۰۲۱ انجام شد، مدول الاستیک و سفتی دیواره‌های سلولی جدا شده از مزوکارپ موز با نانو تورفتگی مبتی بر *AFM* برآورد شد. سپس مدول الاستیک یک سلول و سفتی با آنالیز منحنی‌های جداسازی نیرو با استفاده از نظریه هرتز و مکانیک اسندرون تعیین شد. با استفاده از دو نوک شعاع انحنا مشخص (۱۰ و ۱۰۰۰۰ نانومتر) مشخص شد که هندسه نوک به طور قابل توجهی بر خواص الاستو-مکانیکی اندازه گیری شده تاثیر گذار است. همچنین مدول الاستیک ۴۵±۹۵ و ۱۲/۵±۱۸/۵ کیلوپاسکال به ترتیب برای نوک تیزتر (۱۰ نانومتر) و ۱۰۰۰۰ نانومتر بود. بنابراین، *AFM* می‌تواند برای ارزیابی خواص مرتبط با ساختار مواد بیولوژیکی در مقیاس سلولی و درون سلولی با ترکیب خواص الاستو-مکانیکی نانو با تصویر برداری توپوگرافی بسیار مناسب باشد (شکل۵) (Khodabakhshian et al., 2021).



شکل۵- یک نمای آزمایشی در طول نانو تورفتگی سلول‌های مزوکارپ موز رشد یافته طبیعی با *AFM*

در سال ۲۰۲۳ کاربردهای ضد میکروبی نانو سیلیس مشتق شده از پوسته دانه برنج با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شد. در این مطالعه مواد نانو سیلیس مشتق شده از پوسته برنج ($RH\text{-}SiO_2$) از طریق هضم توسط هیدروکسید سدیم سنتز و از روش سل–ژل برای ایجاد $RH\text{-}SiO_2$ در دمای اتاق استفاده شد. نتایج دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داد که ذرات و منافذ نانو سیلیس به طور تصادفی توزیع شده‌اند اما تمایل به منظم‌بودن دارند. در شرایط آزمایشگاهی، این ضد میکروب بر روی جهش‌یافته‌های استرپتوکوک و کاندیدا اسبیکنس در غلظت‌های مختلف محلول‌های سوسپانسیون نانو سیلیس آزمایش شد. استرپتوکوک و کاندیدا اسبیکنس‌ها به نانو سیلیس حساس بودند و این حساسیت با افزایش غلظت با اختلاف معنی داری افزایش یافت که نشان می‌دهد این ماده دارای فعالیت ضدباکتریایی و ضدقارچی است (Ali et al., 2023).

نتیجه‌گیری:

نتایج به دست آمده از پژوهش‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با یکدیگر نشان داد که بدست‌آوردن خصوصیات مکانیکی محصولات کشاورزی در مقیاس میکروسکوپی با استفاده از میکرسکوپ‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های مخرب اندازه‌گیری (استفاده از دستگاه‌های اینسترون و بافت سنج) باشد و همچنین باعث رفع محدودیت‌های موجود مانند عدم دقت مناسب و از بین رفتن نمونه شود. علاوه بر این، میکروسکوپ‌ها باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه آزمایش می‌شوند. بنابراین، انتظار می‌رود میکروسکوپ‌های مختلف با بهبود دقت

اندازه‌گیری در بدست‌آوردن ویژگی‌های مکانیکی محصولات کشاورزی باعث طراحی دقیق‌تر تجهیزات ذخیره‌سازی و حمل و نقل و فرآوری محصولات شوند.

منابع

Ali, H. H., Hussein, K. A., & Mihsen, H. H. (2023). Antimicrobial Applications of Nanosilica Derived from Rice Grain Husks. *Silicon*, *15*(13), 5735–5745. https://doi.org/10.1007/s12633-023-02467-7

Barrera, G. N., Méndez-Méndez, J., Arzate-Vázquez, I., Calderón-Domínguez, G., & Ribotta, P. D. (2019). Nano- and micro-mechanical properties of wheat grain by atomic force microscopy (AFM) and nano-indentation (IIT) and their relationship with the mechanical properties evaluated by uniaxial compression test. *Journal of Cereal Science*, *90*(March), 102830. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102830

Caillet, A., Cogné, C., Andrieu, J., Laurent, P., & Rivoire, A. (2003). Characterization of ice cream structure by direct optical microscopy. Influence of freezing parameters. *LWT - Food Science and Technology*, *36*(8), 743–749. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0023-6438(03)00094-X

Cardona, Y. P., Oliveros, C. E., Arias, D. F., Alvarez, F., & Devia, A. (2008). Epicarp characterization of coffee fruits by atomic force microscopy. *Journal of Food Engineering*, *86*(2), 167–171. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.031

Foegeding, E. A., & Drake, M. A. (2007). Invited review: Sensory and mechanical properties of cheese texture. *Journal of Dairy Science*, *90*(4), 1611–1624. https://doi.org/10.3168/jds.2006-703

Gao, Y., Guo, X., Liu, Y., Fang, Z., Zhang, M., Zhang, R., You, L., Li, T., & Liu, R. H. (2018). A full utilization of rice husk to evaluate phytochemical bioactivities and prepare cellulose nanocrystals. *Scientific Reports*, *8*(1), 1–8. https://doi.org/10.1038/s41598-018-27635-3

Giunchi, A., Versari, A., Parpinello, G. P., & Galassi, S. (2008). Analysis of mechanical properties of cork stoppers and synthetic closures used for wine bottling. *Journal of Food Engineering*, *88*(4), 576–580.

https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.004

Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., & Gundoshmian, T. M. (2018). Determination of physical and mechanical properties of carrot in order to reduce waste during harvesting and post-harvesting. *Food Science & Nutrition*, *6*(7), 1898–1903. https://doi.org/10.1002/fsn3.760

Kabas, O., Cagatay Selvi, K., & Unal, I. (2019). Determination of some engineering properties of kumquat related to design parameters. *TAE 2019 - Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2019, September*, 241–244.

Khodabakhshian, R., & Baghbani, R. (2021). Classification of bananas during ripening using peel roughness analysis—An application of atomic force microscopy to food process. *Journal of Food Process Engineering*, *44*(11). https://doi.org/10.1111/jfpe.13857

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., Emadi, B., Khojastehpour, M., & Golzarian, M. R. (2019). Instrumental measurement of pomegranate texture during four maturity stages. *Journal of Texture Studies*, *50*(5), 410–415. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jtxs.12406

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. https://doi.org/10.1002/jemt.23790

Khodabakhshian, R., Naeemi, A., & Bayati, M. R. (2021). Determination of texture properties of banana fruit cells with an atomic force microscope: A case study on elastic modulus and stiffness. *Journal of Texture Studies*, *52*(3), 389–399. https://doi.org/10.1111/jtxs.12594

LIN, T.-T., & PITT, R. E. (1986). RHEOLOGY OF APPLE AND POTATO TISSUE AS AFFECTED BY CELL TURGOR PRESSURE. *Journal of Texture Studies*, *17*(3), 291–313. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1986.tb00554.x

Miraei Ashtiani, S.-H., Sadrnia, H., Mohammadinezhad, H., Aghkhani, M. H., Khojastehpour, M., & Abbaspour-Fard, M. H. (2019). FEM-based simulation of the

mechanical behavior of grapefruit under compressive loading. *Scientia Horticulturae*, *245*, 39–46. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.006

Mohsenin, N. N. (1986). Physical properties of plant and animal materials : structure, physical characteristics and mechanical properties. In *TA - TT* - (2. rev. an). Gordon and Breach New York. https://doi.org/LK - https://worldcat.org/title/924986708

Paniagua, C., Posé, S., Morris, V. J., Kirby, A. R., Quesada, M. A., & Mercado, J. A. (2014). Fruit softening and pectin disassembly: an overview of nanostructural pectin modifications assessed by atomic force microscopy. *Annals of Botany*, *114*(6), 1375–1383. https://doi.org/10.1093/aob/mcu149

Parot, P., Dufrêne, Y. F., Hinterdorfer, P., Le Grimellec, C., Navajas, D., Pellequer, J.-L., & Scheuring, S. (2007). Past, present and future of atomic force microscopy in life sciences and medicine. *Journal of Molecular Recognition : JMR*, *20*(6), 418–431. https://doi.org/10.1002/jmr.857

Posé, S., Paniagua, C., Matas, A. J., Gunning, A. P., Morris, V. J., Quesada, M. A., & Mercado, J. A. (2019). A nanostructural view of the cell wall disassembly process during fruit ripening and postharvest storage by atomic force microscopy. *Trends in Food Science & Technology*, *87*, 47–58. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.011

Rehal, J., Kaur, G. J., & Bons, H. K. (2017). Studies on physico-mechanical properties of W. Murcott mandarin. *Journal of Applied and Natural Science*, *9*(1), 80–84. https://doi.org/10.31018/jans.v9i1.1154

Routier-Kierzkowska, A.-L., Weber, A., Kochova, P., Felekis, D., Nelson, B. J., Kuhlemeier, C., & Smith, R. S. (2012). Cellular Force Microscopy for in Vivo Measurements of Plant Tissue Mechanics . *Plant Physiology*, *158*(4), 1514–1522. https://doi.org/10.1104/pp.111.191460

Shirvani, M., Ghanbarian, D., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2014). Measurement and evaluation of the apparent modulus of elasticity of apple based on Hooke's, Hertz's and Boussinesq's theories. *Measurement*, *54*, 133–139. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.014

Shiu, J. W., Slaughter, D. C., Boyden, L. E., & Barrett, D. M. (2015). Effect of the shear-to-

compressive force ratio in puncture tests quantifying watermelon mechanical properties. *Journal of Food Engineering*, *150*, 125–131. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.11.007

Yang, H., Wang, Y., Lai, S., An, H., Li, Y., & Chen, F. (2007). Application of Atomic Force Microscopy as a Nanotechnology Tool in Food Science. *Journal of Food Science*, *72*(4), R65–R75. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00346.x

Zdunek, A., & Kurenda, A. (2013). Determination of the Elastic Properties of Tomato Fruit Cells with an Atomic Force Microscope. In *Sensors* (Vol. 13, Issue 9, pp. 12175–12191). https://doi.org/10.3390/s130912175

شانزدهمین کنگره ملی مهندسی
مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون کشاورزی

An overview of methods for measuring the mechanical properties of agricultural products at the macroscopic and microscopic level

Abstract:

This research investigated methods for measuring the mechanical properties of agricultural products at macroscopic and microscopic scales. Mechanical damage to agricultural products during planting, harvesting and storage reduces their quality and economic value. Therefore, knowledge of the physical and mechanical behaviour of agricultural products, such as modulus of elasticity, stiffness, hardness and yield stress, is necessary to design related equipment and to prevent damage and improve quality. However, given the irregular shape of agricultural products and the lack of homogeneity of their internal structure, the determination of their mechanical behaviour is of particular importance, as it is simply not possible to apply the elasticity theories developed for engineering materials to these products. Nevertheless, many studies have been carried out to determine the behaviour of agricultural products on a macroscopic scale (on the scale of the actual product dimensions) under quasi-static loads, using destructive methods (use of Instron and texture testers) and finite element methods by modelling products. The determination of structural properties using microscopes at the appropriate scale has opened up new possibilities for engineering analysis. In this research, a review of the methods for measuring the mechanical properties of agricultural products has been carried out. The aim of this research is to investigate and compare the methods of measuring the mechanical properties of food at two macroscopic and microscopic scales, which will help to select the best and most suitable method and reduce the measurement error.

Keywords: **Agricultural products, Atomic force microscope (AFM), Macroscopic scale, Microscopic scale and Mechanical properties**

مکانیک بیوسیستم و ماشین‌های کشاورزی