کاربرد روش بارگذاری شبه‌استاتیک برای تعیین ویژگیهای مکانیکی دو رقم میوهٔ خرمای استان خوزستان (ارقام استعمران و زاهدی)

یعقوب منصوری[۱]- سعید مینایی[۲]

چکیده

اهمیت اطلاع از خواص فیزیکی و مکانیکی میوه‌ها در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های مرتبط با تولید و فرآوری این محصولات بر کسی پوشده نیست. این خواص برای اکثر محصولات در کشورهای مختلف اندازه‌گیری شده یا تحت مطالعه هستند. اهمیت میوهٔ خرما و فقدان اطلاعات زیربنایی و اساسی فوق‌الذکر برای این محصول انگیزهٔ این تحقیق است. در این مقاله در کنار مقایسهٔ برخی خواص فیزیکی، نیرو و انرژی مورد نیاز برای تغییرشکل و نیز چغرمگی ظاهری میوهٔ خرمای دو رقم زاهدی و استعمران تحت آزمون بارگذاری شبه‌استاتیک تعیین شده‌اند. مقایسهٔ میانگین کمیت‌های بدست آمده برای دو رقم نشان داد که طول، ضخامت و کرویت دو رقم تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند در حالی که تفاوت پهنا در دو رقم معنی‌دار نیست. نمونه‌های استعمران طول بیشتر و در عوض ضخامت و کرویت کمتری در مقایسه با نمونه‌های رقم زاهدی داشتند. خواص مکانیکی (نیرو، انرژی و چغرمگی ظاهری) در دو رقم نظیر به نظیر تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند. اندازهٔ میانگین هر یک از این خواص برای رقم زاهدی بیشتر بود.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس
۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

شناخت ویژگیهای مکانیکی میوهٔ خرمای تولیدی کشور از دو دیدگاه اهمیت دارد. دیدگاه مهندسی صنایع غذایی این خواص را برای کنترل و بهینه‌سازی کیفیت میوه یا فرآورده های آن مورد توجه قرار می‌دهد زیرا احساس خوشایند حاصل از تناول محصول گذشته از رنگ و طعم، تا حدود زیادی به مقاومت مکانیکی بافت آن در زیر دندانها وابسته است. از دیدگاه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانستن این ویژگیها علاوه بر آنکه در طراحی و ساخت ماشینهای مناسب ارقام مهم کشور اهمیت بسزایی دارد، برای کاربرد صحیح و بهینه‌سازی ماشینهای وارداتی و تطبیق آنها با وضعیت خاص ارقام اصلی کشور نیز مهم است. اساس تصمیمات و انتخابها در طراحی ابزار یا سیستم‌های برداشت، بسته‌بندی و یا فرآوری که به نحوی با میوه درگیر هستند، خصوصیات آن میوه است. تا زمانی که میوهٔ موردنظر از طریق ویژگیهایش تعریف نشده باشد، نمی‌توان در مورد بهترین روش مواجهه با آن تصمیم گرفت.

در کلیهٔ عملیات ماشینی این امکان وجود دارد که محصول در معرض نیروهای مکانیکی قرار گیرد. نیروی وارده، تغییرشکلی ایجاد می‌کند که بسته به شرایط و اهداف، یا باید به اندازهٔ کافی بزرگ باشد که باعث گسیختگی یا فشردگی موردنظر در محصول گردد (کاربرد اول) و یا باید به اندازه‌ای کم باشد که به محصول آسیب نرساند (کاربرد دوم). وضعیت اول هنگام طراحی مکانیزمها و ماشینهای فرآوری محصول و وضعیت دوم در برداشت، جمع‌آوری و تمیز کردن، بسته‌بندی و حمل و نقل محصول پیش می‌آید. به هر حال در هر دو صورت، آگاهی از مقاومت مکانیکی محصول در برابر انواع مختلف بارها نقش مهم و اساسی ایفا می‌کند.

اکثر محصولات کشاورزی ویسکوالاستیک هستند و بنابراین رفتار بسیار پیچیده‌ای در برابر بارگذاری‌های مختلف از خود نشان می‌دهند. بعلاوه، نوع بارهای وارده بر محصول نیز گسترهٔ وسیعی را شامل می‌شود که خود مساله را پیچده‌تر می‌کند. علیرغم این دشواریها، تحقیق در این مورد اجتناب‌ناپذیر است زیرا نتایج آن از طریق کنترل آسیب‌های ناشی از ماشینی کردن عملیات می‌تواند منجر به توسعهٔ مکانیزاسیون در عرصهٔ تولید محصولات کشاورزی، کاهش هزینه‌های تولید، کاهش ضایعات و ارتقاء بازارپسندی محصول شده، در نهایت امکان رقابت در عرصهٔ تجارت جهانی را فراهم آورد.

در این تحقیق پس از بررسی تعدادی از پژوهشهای علمی- کاربردی انجام شده در این زمینه، برخی ویژگیهای مکانیکی میوهٔ خرما تحت بارگذاری شبه‌استاتیک اندازه‌گیری شده‌اند. این مقاله سرآغاز تحقیق گسترده‌ای است که در قالب رسالهٔ دکتری در حال انجام است.

بررسی منابع

مجموعهٔ بسیار جالبی از مطالعات مربوط به خواص مکانیکی محصولات کشاورزی از جمله میوه‌جات را محسنین جمع‌آوری و در کتاب خود منتشر کرده است ***(Mohsenin, 1986)***. این کتاب منحصر به فرد ضمن

ارایهٔ اطلاعات ذی‌قیمتی در زمینهٔ تعاریف، تئوری‌های اساسی و روشهای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی، به مقایسهٔ نتایج پژوهشهای مختلف می‌پردازد. در تحقیقات جدید همچنان از این اثر با ارزش به عنوان یکی از منابع اصلی یاد می‌شود.

براگا و همکاران رفتار مکانیکی ماکادمیا[۱] (از آجیلیان) را تحت بارگذاری شبه‌استاتیک با هدف تعیین فرآیند بهینهٔ شکستن محصول بررسی کرده‌اند. در این تحقیق نیرو، تغییرشکل و انرژی مورد نیاز برای آغاز شکست پوستهٔ محصول به صورت تابعی از رطوبت، اندازه و جهت بارگذاری فشاری به روش تجربی بررسی شد. از نتایج این تحقیق، انتخاب بارگذاری در راستای محور طولی به عنوان بهترین جهت بارگذاری بود ***(Braga et al., 1999)***.

طراحی دستگاهی برای شکستن میوهٔ درخت روغن قلم[۲] در سیکل فرآوری، انگیزهٔ پژوهشی بود که اولانیان روی بعضی خواص مکانیکی این محصول حین بارگذاری به روش شبه‌استاتیک انجام داده است. در این تحقیق، نیروی شکست، تغییرشکل، چغرمگی[۳] و سفتی در لحظهٔ گسیختگی در دما و رطوبت و نیز جهت‌های مختلف بارگذاری تعیین شده‌اند ***(Olaniyan, 2002)***.

آیدین و همکاران نیروی گسیختگی میوهٔ بَنه را تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی به عنوان بخشی از خواص فیزیکی-مکانیکی این محصول اندازه‌گیری کردند. آنها دریافتند که افزایش رطوبت باعث کاهش مقاومت به گسیختگی می‌گردد ***(Aydin et al. , 2002)***.

باریچ میوهٔ آووکادو را توسط دو صفحهٔ موازی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار داده، خواص مکانیکی آن را در فواصل زمانی مختلف پس از تاریخ برداشت بررسی کرده است. او دریافت که با گذشت زمان، از تحمل میوه در برابر بار وارده کاسته شده، تعداد لایه‌های مجاز برای چیدن آنها روی هم کمتر می‌شود. وی توصیه کرده است که اکثر عملیات انتقال و انبار کردن محصول در هفتهٔ اول پس از برداشت که هنوز مقاومت مکانیکی میوه به طور قابل ملاحظه‌ای افت نکرده است انجام شود ***(Barych, 2000)***.

متاسفانه تحقیقات انجام شده در مورد خواص مکانیکی میوهٔ خرما بسیار کم هستند. ساخت جداکن خلائی میوه‌های خرما بر اساس محتوای رطوبتی اولین انگیزه برای تعیین مقاومت به تغییرشکل میوهٔ خرما (رقم دگلت نور) توسط چسان و همکاران بود. اساس کار دستگاه بر تفاوت مقاومت میوه‌های مختلف (از نظر رطوبت) در برابر فشار مکانیکی استوار است. درون استوانهٔ بزرگ توخالی سه اتاقک بطور مجزا و ثابت تعبیه شده است که میزان خلاء آنها مستقلاً تحت کنترل است (شکل ۱). ناحیهٔ ۱ بیشترین و ناحیهٔ ۳ کمترین خلاء را فراهم می‌آورند. استوانهٔ کوچک در حقیقت یک چرخ فشاری است که پوشش نایلونی دارد و در فاصلهٔ ثابتی از استوانهٔ بزرگ دوران می‌کند. این چرخ، خرمای واقع شده بین دو سطح را برای یک لحظه کمی می‌فشارد و سطح تماس میوه با استوانهٔ بزرگ را می‌افزاید. محصول سفت و خشک تنها به مقدار خیلی جزئی فشرده شده، سطح تماس زیادی با استوانهٔ بزرگ ایجاد نخواهد کرد و نتیجتاً تحت اثر نیروی غالب وزن به درون محفظهٔ ۱ سقوط می‌کند. به همین ترتیب میوه‌های نرم‌تر سطح تماس بیشتری تولید کرده در محفظهٔ

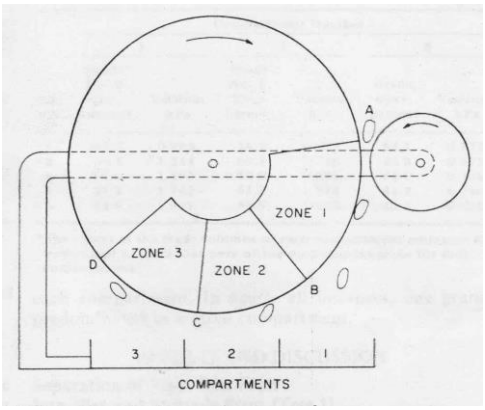
---

[۱] Macademia Nut

[۲] Shea Nut

[۳] Toughness

۲ و میوه‌های خیلی نرم که تحت اثر نیروی چرخ فشاری تغییرشکل بیشتری ازدو گروه قبل داشته‌اند سطح تماس بیشتری را در مقایسه با آن دو گروه پیدا خواهند کرد و حتی مکش متوسط در ناحیهٔ ۲ نیز برای غلبه بر نیروی وزن آنها کافی خواهد بود. در نتیجه این میوه‌ها تا ناحیهٔ ۳ همراه استوانه حرکت کرده در آنجا رها می‌گردند. آنچه در طراحی این ماشین اهمیت فوق‌العاده‌ای داشته است، فاصلهٔ ثابت بین استوانه و چرخ فشاری است. محققین در این پژوهش از طریق آزمون اولیهٔ نمونه‌ها، بار بیش از $\mathcal{N}$ ۷/۴ را غیرمجاز و منشاء پارگی پوست شناخته، فاصلهٔ بین دو استوانه را در حد ثابتی نگه داشته‌اند به گونه‌ای که بار وارد بر هر میوه از مقدار مجاز بالاتر نرود (***Chesson et al.,1979***).



شکل۱) جداکن خلائی خرما بر اساس رطوبت میوه

(***Chesson et al.,1979***)

شمیلوویچ و همکاران از خاصیت مکانیکی «سفتی میوه» در ساخت نوع دیگری از جداکن میوهٔ خرمای دگلت نور استفاده کردند. اساس این تحقیق بر فشردن میوه بین دو صفحهٔ ثابت و متحرک استوار است. موقعیت دو صفحه نسبت به هم، نیروی وارده و میزان تغییرشکل میوهٔ خرما اساس محاسبه سفتی میوه و کنترل مکانیزم جداکننده است که توسط یک کامپیوتر انجام می‌شود ***(Schmilovitch et al. , 1995)***.

از آنجا که علی‌رغم جایگاه جهانی ایران از نظر تولید خرما، پژوهشی در زمینهٔ خواص میوهٔ خرما در کشور انجام نشده است، در تحقیق حاضر به این موضوع پرداخته می‌شود.

مواد و روشها

همزمان با فصل برداشت خرما ، نمونه‌هایی از دو رقم استعمران و زاهدی از نخلستان «مؤسسهٔ تحقیقات خرما و میوه‌های گرمسیری کشور» واقع در اهواز تهیه شده، پس از جداسازی میوه‌های سالم و بسته‌بندی، به آزمایشگاه خواص بیوفیزیکی محصولات کشاورزی واقع در دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس انتقال داده شدند. نمونه‌ها تا روز آزمون در دمای C ۴° درون یخچال نگهداری شدند. در برداشت نمونه‌ها حداکثر احتیاط به عمل آمد تا به میوه‌ها نیروی نامتعارفی که منجر به ایجاد خطا در نتایج گردد وارد نیاید. برای انتقال نمونه‌ها، از بسته‌های پلی‌اتیلنی فشردهٔ دردار استفاده شد. نمونه‌ها تنها در دو لایه چیده شده و با لایه‌ای از ابر پوشانده شدند. سپس در جعبه بسته شده، مجدداً به صورت گروهی بسته‌بندی شده به آزمایشگاه منتقل شدند. در مقصد با بررسی بسته‌ها و نمونه‌ها، از نیامدن بار اضافی اطمینان حاصل شد.

تعداد ۱۰ نمونه از هر رقم به فاصلهٔ زمانی ۲۴ ساعت قبل از انجام آزمایش از درون یخچال به محیط آزمایشگاه انتقال داده شدند تا با محیط به تعادل برسند. نمونه‌های آماده شده پس از اندازه‌گیری مشخصات

فیزیکی لازم (ابعاد، وزن)، توسط دستگاه آزمون کشش- فشار *Hounsfield H50K-S* تحت بارگذاری قرار گرفتند. برای این منظور، بارگذاری با صفحهٔ تخت به همراه لودسلی با ظرفیت $\mathcal{N}$ ۵۰۰ استفاده شد. سرعت بارگذاری *mm/s* ۱,۵بوده و حداکثر تغییرشکل به *mm* ۱۰ محدود شد. منحنی نیرو- تغییرشکل هر نمونه با استفاده از نرم‌افزارهای پشتیبان دستگاه ثبت شد. در کنار ثبت منحنی نیرو- تغییرشکل، فرآیند تغییرشکل میوه به صورت چشمی تعقیب و نقطهٔ شروع ترک قابل رؤیت ثبت شد. پس از پایان آزمایش نیز خواص فیزیکی میوهٔ تحت آزمون (قطر میوه بلافاصله پس از پایان بارگذاری، محل وقوع ترکها) مورد بررسی قرار گرفت. برای استخراج خواص مهم از منحنی نیرو- تغییرشکل، داده‌های خام حاصل از دستگاه آزمون کشش- فشار به نرم‌افزار *Excel* منتقل شده و مفصلاً مورد بررسی قرار گرفتند. شکل(۲) ابزار مورد استفاده و نمونه را نشان می‌دهد.

شکل ۲) الف- دستگاه آزمون کشش-فشار *Hounsfield* ب- نمونه حین بارگذاری

یافته‌ها و بحث

در طول آزمایش مشاهده شد که ظهور ترک و گسیختگی در دو رقم متفاوت است. در میوه‌های رقم زاهدی عموماً ترک در راستای محور طولی (خط واصل محل کلاهک به نوک میوه) بوده و مرحلهٔ جداگانه‌ای به شکل ترک برداشتن پوست به طور مشخص در آن دیده نمی‌شد. در حالیکه در رقم استعمران اولین علایم گسیختگی با ترکهای جانبی (عمود بر محور طولی میوه) روی پوست وجدا شدن آن از گوشت آغاز می‌شد که در ادامه با افزایش تغییرشکل به پارگی گوشت منجر می‌شد. از سوی دیگر در این دامنهٔ تغییرشکل ۱۰ میلیمتری در نمونه‌های استعمران در مقایسه با نمونه‌های زاهدی، نشانه‌های له‌شدگی نسبت به پارگی آشکارتر بودند. به عبارت دیگر، بافت استعمران در واکنش نسبت به بار بیشتر جریان می‌یابد. جریان یافتن بافت گوشتی درونی میوه تنشی کششی به پوست وارد می‌آورد و در نتیجه پوست بطور جداگانه از ضعیف‌ترین محل شروع به گسیختن می‌کند. این پدیده به دلیل بافت نرم رقم استعمران رخ می‌دهد.

میانگین اندازهٔ ابعاد و شاخص کرویت نمونه‌های خرمای زاهدی و استعمران در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. مقایسهٔ آماری ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های دو رقم بر اساس آزمون t نشان داد که طول و کرویت نمونه‌های دو رقم در سطح ۱٪ و ضخامت آنها در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند. پهنای

نمونه‌های دو رقم تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. نمونه‌های استعمران کشیده‌تر هستند و ضخامت و شاخص کرویت کمتری دارند.

دو نمونه از منحنی‌های نیرو- تغییرشکل در شکل (۳) آورده شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود، روند تغییرات نیرو نسبت به تغییرشکل در دو رقم تفاوت محسوسی دارد. با افزایش تغیرشکل، نمونه‌های استعمران عموماً روند رو به افزایش در نیرو را بدون کاهش قابل ملاحظه‌ای تا انتهای آزمایش نشان می‌دهند که شیب این تغییرات با افزایش تغییرشکل به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. برخلاف نمونه‌های استعمران، در نمونه‌های زاهدی عموماً نقطهٔ مشخصی به شکل افت بار و سپس افزایش مجدد آن مشاهده می‌شود.

میانگین مقادیر نیرو و انرژی مورد نیاز برای تغییر شکل نمونه‌ها به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد قطر اولیه آن و نیز نیرو، انرزی و انرژی بر واحد حجمِ متناظر با نقطهٔ گسیختگی (چغرمگی ظاهری) برای نمونه‌های هر دو رقم در جدول (۲) آمده است. نیرو با F و انرژی با $\mathcal{E}$ نشان داده شده است اندیس‌ها، به درصد تغییرشکل منتاطر کمیت اندازه‌گیری شده دلالت دارند. اندیس t برای نشان دادن نقطهٔ شکست استفاده شده است. $\mathcal{T}$ چغرمگی ظاهری است. مقایسهٔ آماری نشان داد که میانگین مقادیر این خواص مکانیکی برای دو رقم مورد آزمایش اختلاف معنی‌داری با هم دارند. میانگین هر یک از خواص مکانیکی بدست آمده برای نمونه‌های خرمای رقم زاهدی بیش از رقم استعمران است. به عنوان نمونه، چغرمگی اندازه‌گیری شدهٔ رقم زاهدی حدود دو برابر مقدار این کمیت برای رقم استعمران است.

جدول ۱) مقایسهٔ خواص فیزیکی دو رقم میوهٔ خرما†

رقم	طول	ضخامت	پهنا	کرویت
زاهدی	۳۱,۷۵**^{b}	۱۸,۳۰*^{a}	۱۹,۸۷^{ns}	۰,۷۱**^{a}
استعمران	۳۶,۷۷**^{a}	۱۷,۳۵*^{b}	۱۹,۲۸^{ns}	۰,۶۳**^{b}

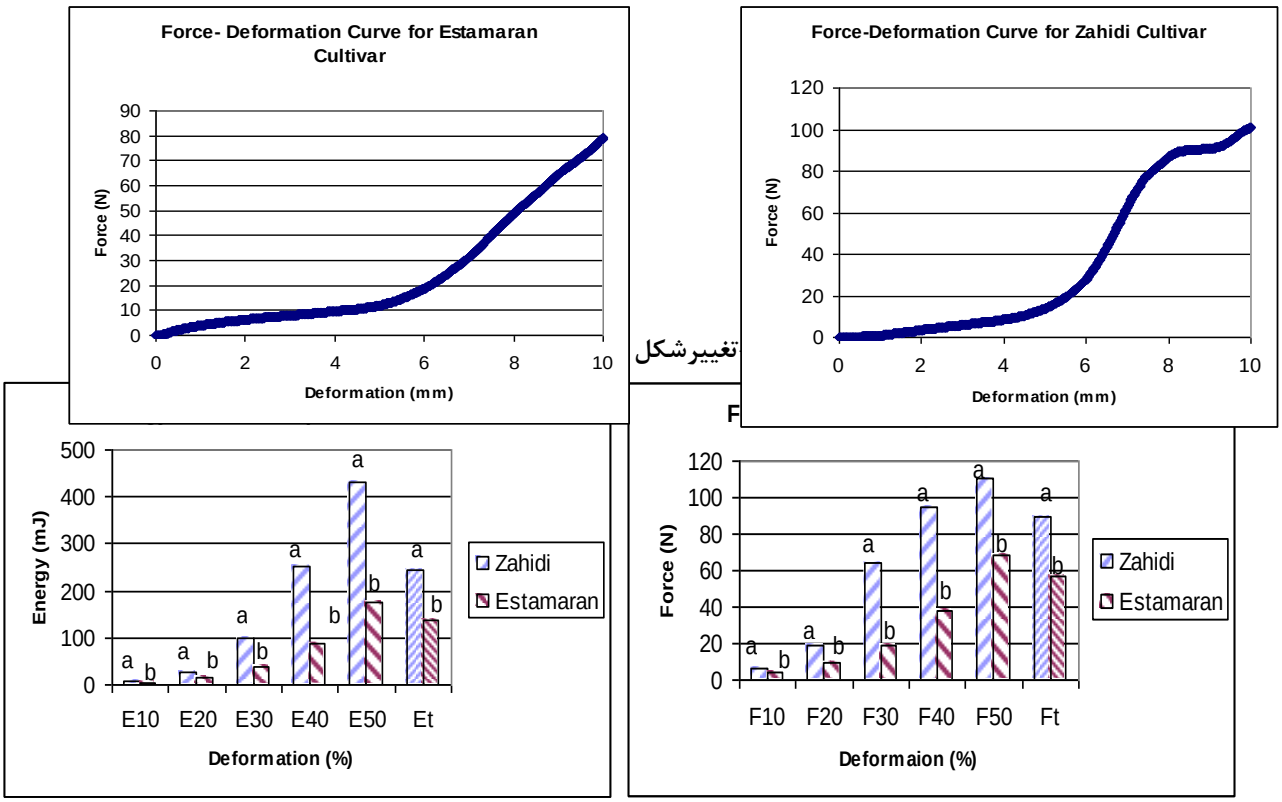
جدول ۲) مقایسهٔ خواص مکانیکی دو رقم میوهٔ خرما††

رقم	F_{10}	F_{20}	F_{30}	F_{40}	F_{50}	F_t	E_{10}	E_{20}	E_{30}	E_{40}	E_{50}	E_t	T
زاهدی	*^{a} ۶,۶۲	**^{a} ۱۹,۰۴	**^{a} ۶۴,۰۵	۹۴,۴۲**^{a}	۱۱۰,۱۳**^{a}	۸۹,۳۵**^{a}	*^{a} ۵,۹۱	**^{a} ۲۶,۵۰	۹۷,۵۹**^{a}	**^{a} ۲۵۰,۹۲	**^{a} ۴۳۲,۸۴	*^{a} ۲۴۵,۲۸	*^{a} ۰,۰۴۰۷
استعمران	۴,۶۰*^{b}	۹,۳۱**^{b}	۱۸,۷۰**^{b}	**^{b} ۳۸,۳۵	**^{b} ۶۸,۷۳	**^{b} ۵۷,۳۳	*^{b} ۴,۰۴	**^{b} ۱۵,۹۲	**^{b} ۳۸,۶۲	۸۶,۴۷**^{b}	۱۷۵,۱۶**^{b}	۱۳۷,۱۹*^{b}	۰,۰۲۰۴*^{b}

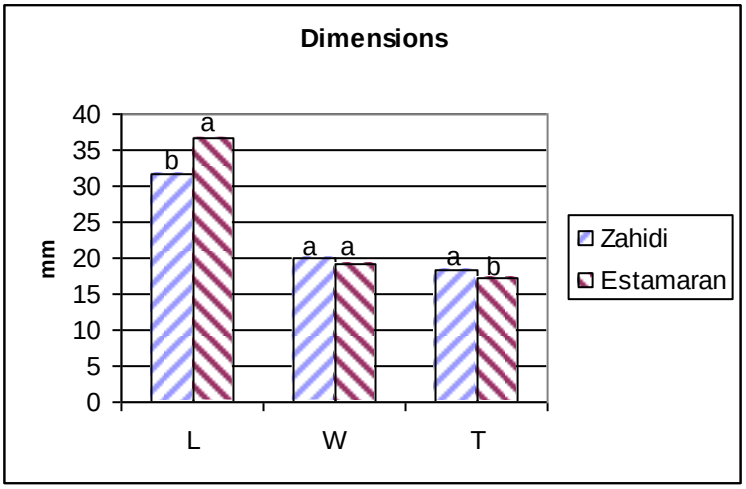
† ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند.

†† نیرو، انرژی و چغرمگی به ترتیب بر حسب نیوتن، میلی‌ژول و میلی‌ژول بر میلی‌متر مکعب هستند.

توجه: * و ** به ترتیب نشان‌دهندهٔ وجود اختلاف معنی‌دار در سطوح ۵٪ و ۱٪ هستند.



شکل ۳) مقایسهٔ ویژگی‌های مکانیکی دو رقم خرمای استعمران و زاهدی



شکل ۳) مقایسهٔ ابعاد دو رقم خرمای استعمران و زاهدی

($\mathcal{L}$= طول ، $\mathcal{W}$= پهنا ، $\mathcal{T}$= ضخامت)

منابع

عباسپورفرد م. ح، شبیه‌سازی عددی تصادم در میوه‌جات و سبزیجات به کمک مدلی در محیطهای گسسته. مجموعه خلاصه مقالات نخستین همایش ملی بررسی ضایعات محصولات کشاورزی. تهران، ۲۹ مهر ۱۳۸۲.ص ۶-۳.

Aydin, C. and Ozcan, M. (2002). Some physico-mechanic properties of terebinth (Pistacia terebinthus L.) fruits. Journal of Food Engineering. 53: 97-101

Barych, E. A. (2000). Strength properties of Avocado pear. Journal of Agricultural Enginering Research. 76: 389-397

Braga, G. C.; Couto, S. M.; Hara, T. and Neto, J. T. P. A. (1999). Mechanical behaviour of Macademia Nut under compression loading. Journal of Agricultural Engineering Resarch.72: 239-245

Chesson, J. H.; Burkner, P. F. and Perkins, R. M. (1979). An experimental vaccum separator for dates. Transactions of the ASAE. 21:594-600

Fabbro, I. M. D.; Linares, A. W. and Abrsso, R. F. (2001). Mechanical behaviour of packed oranges. Acta Horticultuare No. 562

Mohsenin, N. N. (1986). Physical properties of plants and animal materials. Gordon and Breach science publishers. New york. 891 pp

Olaniyan, A. M. and Oje, K.(2002). Some aspects of the mechanical properties of Shea Nut. Biosystems Engineering. 81:413-420

Schmilovitch, Z.; Zaltzman, A., Hoffman, A. and Yael, E. (1995). Firmness sensor and system for date sorting. Applied Engineering in Agriculture. 4: 554-560