

بررسی اثر رطوبت بر خواص مکانیکی و سرعت حد میوه زرشک

احسان ولایتی^{۱*} - باقر عمادی^۲ - مهدی خجسته پور^۳ - محمد حسین سعیدی راد^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۲۱

چکیده

مطالعه خواص مکانیکی زرشک ضمن مفید بودن در طراحی و بهینه سازی ماشین‌های حمل، فرآوری و بسته بندی، می تواند از بروز صدمات مکانیکی و تولید ضایعات جلوگیری نماید. در این تحقیق نیرو، تغییر شکل نظیر گسیختگی، انرژی شکست و چقرمگی میوه زرشک در رطوبت‌های مختلف شامل ۷۰ تا ۷۶، ۴۵ تا ۵۰، ۳۰ تا ۷ و ۱۰ درصد بر مبنای تر مورد مطالعه قرار گرفتند. کاهش میزان رطوبت باعث افزایش نیروی شکست از ۱/۳۸۷ به ۲/۶۷۹ نیوتن، چقرمگی از ۴/۲۹۷ به ۸/۲۲۰ ژول بر سانتی متر مکعب، کاهش تغییر شکل از ۳/۳۸۷ به ۲/۴۱۳ میلی متر و کاهش انرژی شکست از ۰/۹۲۱ به ۰/۶۶۱ میلی ژول شد. تأثیر جهت بارگذاری، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آنها نیز تنها در میوه تازه با رطوبت ۷۶ درصد بررسی شد که فقط اثر جهت بارگذاری بر روی کلیه خواص به استثنای چقرمگی معنی دار شد. همچنین محتوای رطوبتی به عنوان عامل موثر بر سرعت حد میوه شناخته شد به طوری که با کاهش محتوای رطوبتی، سرعت حد زرشک از ۹ به ۴/۵ متر بر ثانیه کاهش یافت.

واژه های کلیدی: زرشک، خواص مکانیکی، سرعت حد، میزان رطوبت

مقدمه

زرشک بی دانه به دلیل رنگ و طعم دلپذیر آن، در انواع مختلف غذاهای ایرانی مورد استفاده قرار می گیرد. عصاره حاصل از پوست و ریشه این گیاه با ارزش، در معالجه بسیاری از بیماری‌ها، از جمله بیماری پسروریازیس (نوعی بیماری پوستی)، اعتیاد، فیروز، پلاک دندان کاربرد دارد (Filabi, 2008). حدود ۹۵ درصد زرشک کشور در خراسان جنوبی تولید می شود. تولید سالانه زرشک خشک بیش از ۸۴۰۰ تن بوده که از سطح ۶۴۴۲ هکتار اراضی باغی به دست می آید (Filabi, 2008). یکی از معضلات جدی محصول زرشک میزان بالای ضایعات آن می باشد (بین ۳۰ تا ۵۰ درصد) (Chaji, 1999). به همین لحاظ مطالعه عوامل موثر بر این ضایعات اهمیت خاصی دارد. از جمله عوامل این ضایعات، آسیب‌های مکانیکی میوه می باشد، همچنین با توجه به اینکه میوه تازه زرشک بسیار حساس بوده و عمر انبارمانی چندانی ندارد (۱۵ تا ۷۵ روز) فساد شیمیایی آن

در اثر صدمات مکانیکی و رسیدگی بیش از حد باعث تسهیل فساد میکروبی می شود (Kafi and Balandari, 2002). جلوگیری از بروز صدمات مکانیکی در کلیه مراحل جابجایی و مراحل جداسازی میوه از خوشه و شاخه، بوجاری، شستشو و موارد مشابه آن امری ضروری به حساب می آید، که با اطلاع از خواص مکانیکی آن محقق می گردد. محققان، خواص مکانیکی بسیاری از انواع میوه را تا کنون مورد مطالعه قرار داده اند از جمله سیب (Ragni and Berardinelli, 2001; Pasini et al., 2004; Guillermina et al., 2006; Vursavuş and Özgüven, 2004; Zerdalo, Lewis et al., 2008)، زردآلو (Lewiss et al., 2008)، زیتون (Kılıçkan and Güner, 2008)، گیلاس (Çalışır et al., 2007) پرتقال (Haciseferoğulları et al., 2007) و انجیر (Çalışır et al., 2008)، زیتون (Kılıçkan and Güner, 2008)، گیلاس (Çalışır et al., 2007) و انجیر (Çalışır et al., 2007) در مورد زرشک تنها تحقیق انتشار یافته محدود به برخی از خواص مکانیکی آن که توسط فتح اله زاده و رجیبی پور (Fathollahzadeh and Rajabipour, 2008) انتشار یافته است، می شود. این خواص شامل نیروی شکست، تغییر شکل و چقرمگی می شوند که با کاهش میزان رطوبت محصول از ۸۹/۲۳ به ۵۳/۱۱ درصد بر مبنای تر، به ترتیب از ۱۹/۶۶۹ به ۴۷/۲۳۸ نیوتن، از ۲/۳۸۱ به ۰/۳۴۰ میلی متر و ۰/۱۰۵ به ۱/۱۴۹ ژول بر سانتی متر مکعب می رسند. از آنجا که تحقیق مذکور برای محصول تولید کرج انجام شده است. بنابر این لازم بود که علاوه بر خواص مذکور، انرژی شکست در

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، استادیاران گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
* - نویسنده مسئول: (Email: ehsanvelayat@yahoo.com)

۴- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی

نهایتاً رطوبت میوه بر مبنای تر بر حسب درصد (U_w) با استفاده از وزن نمونه اولیه ($G_{dm}+G_w$)، وزن رطوبت از دست رفته (G_w) و وزن نمونه خشک شده (G_{dm}) بر طبق معادله (۱) محاسبه شد (Aghbashlo *et al.*, 2008).

$$U_w = \frac{G_w}{(G_w + G_{dm})} \times 100 \quad (1)$$

رطوبت میوه زرشک تازه معادل ۷۵/۸ درصد (پایه تر) تعیین شد. برای انجام آزمایشات خواص مکانیکی، چهار گروه بر اساس محتوای رطوبتی از نمونه اولیه در دامنه رطوبتی ۷۰ تا ۷۶ درصد، ۴۵ تا ۵۰ درصد، ۲۵ تا ۳۰ درصد و ۷ تا ۱۰ درصد با کاهش رطوبت توسط آون آماده و آزمایشات انجام شد.

آزمایش مکانیکی فشار با دو صفحه موازی^۱

هدف از این آزمایش تعیین تغییرات متناسب نیرو و تغییر شکل، تعیین مدول الاستیسیته میوه، انرژی مورد نیاز برای شکست، چقرمگی (انرژی به ازای واحد حجم میوه)، نیروی مورد نیاز برای شکست و میزان تغییر شکل است. برای انجام این آزمایش از دستگاه تحلیل بافت (QTS Texture Analyzer CNS FRANEL) مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی به همراه فک استاندارد آزمایش فشار دو صفحه موازی استفاده شد. این آزمایش روی میوه کامل، در سرعت بارگذاری ۲ و ۱۰ میلی متر بر دقیقه و در رطوبت‌های مختلف ۷۰ تا ۷۶ درصد، ۴۵ تا ۵۰ درصد، ۲۵ تا ۳۰ درصد و ۷ تا ۱۰ درصد بر پایه تر میوه و در جهت افقی و جهت عمودی بارگذاری (به ترتیب شکل A1 و B1) انجام شد لازم به ذکر است در حالت عمودی و در دامنه رطوبتی ۷۰ تا ۷۶ درصد، دم میوه با دقت تمام بدون آنکه آسیب جدی به بافت آن برسد، کنده شد و در رطوبت‌های کمتر به دلیل کاهش انسجام ساختاری بافت، امکان جداسازی دم از میوه بدون تخریب جدی بافت اطراف دم وجود نداشت به همین دلیل از انجام آزمایش در این مرحله صرف نظر شد و در نهایت اطلاعات خروجی به صورت نمودار نیرو-تغییر شکل (شکل C1) و اطلاعات مربوط به آن به شرح ذیل به دست آمد:

۱ - نیروی شکست (F_r) با قرائت نقطه بیشینه نمودار نیرو-تغییر شکل که در آن نیرو در بیشترین حالت خود قبل از پارگی میوه زرشک قرار گرفته است بدست آمد.

۲ - تغییر شکل متناظر شکست (D) که عبارت است از حرکت نسبی نقاط درون یک جسم در اثر اعمال نیرو که به صورت تغییر در اندازه، زاویه و یا حجم در نقطه شکست بروز می کند (Razavi and Akbari, 2006) با استفاده از مختصات افقی (جابجایی) نمودار نیرو-تغییر شکل در نقطه شکست تعیین شد.

مورد میوه زرشک بومی خراسان که عمده تولید زرشک کشور را شامل می شود محاسبه و تأثیر عوامل مختلف از جمله میزان رطوبت و سرعت بارگذاری بر آنها بررسی گردد.

سرعت حد میوه جات و غلات کوچک نقش مهمی در طراحی تجهیزات خرمن کوبی، نقل و انتقال بادی و آبی مواد، طراحی خشک کن های بستر سیال و انواع سیستم‌های تمیز کننده مواد خارجی از محصول ایفا می کند که مورد توجه محققین است و از تحقیقات صورت گرفته در این باره می توان به تعیین سرعت حد پسته (Kashaninejad and Tabil, 2009) و نخود سبز (Nimkar and Chattopadhyay, 2002) اشاره کرد. بنا بر جستجوی انجام گرفته، هیچ تحقیق مستندی درباره سرعت حد زرشک تا کنون منتشر نشده است. لذا تعیین سرعت حد زرشک با توجه به لزوم جداسازی از مواد زائد و انتقال آن در رطوبت‌های مختلف مورد توجه واقع شد. با توجه به آنچه گفته شد تأثیر رطوبت بر صفات مکانیکی میوه زرشک شامل نیروی شکست، تغییر شکل متناظر شکست و چقرمگی مورد بررسی قرار گرفت. به علاوه رابطه سرعت حد با تغییرات رطوبت نیز به دست آمد.

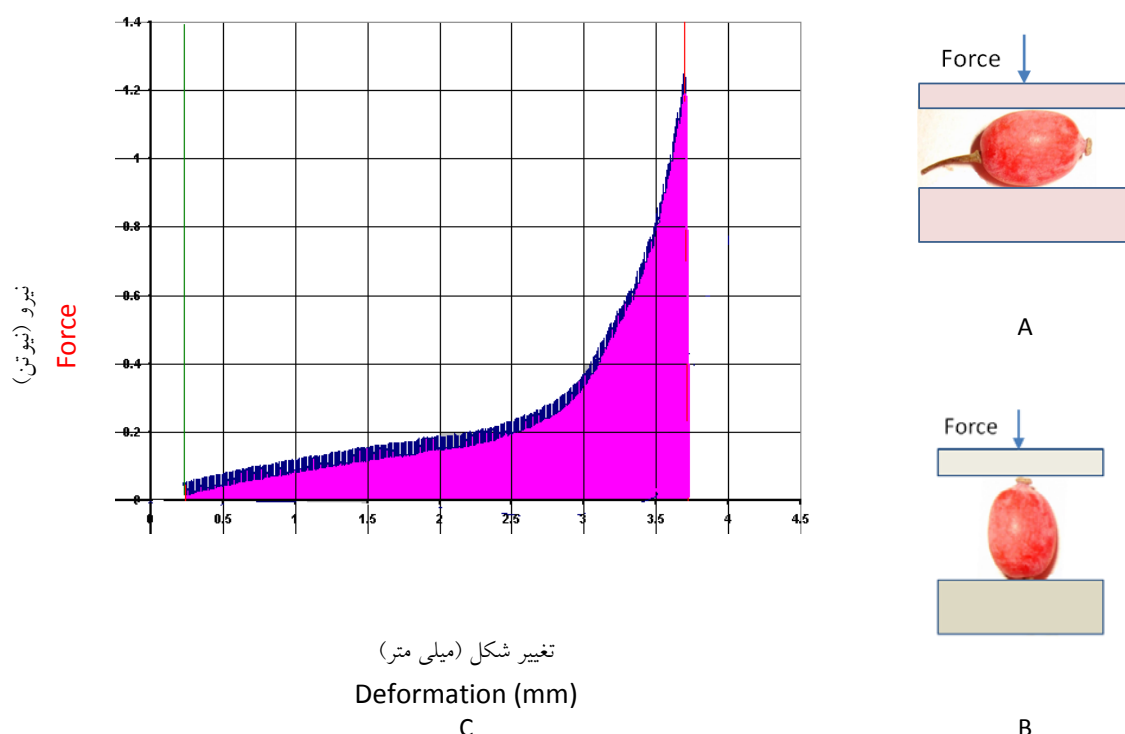
مواد و روش‌ها

تهیه نمونه

محصول زرشک استان خراسان جنوبی همراه با شاخه و برگ از بازار تهیه و به مدت یک هفته در داخل یخچال آزمایشگاهی در دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری گردید. برای هر آزمایش مقدار محصول مورد نیاز به صورت دستی جدا و از وجود مواد خارجی پاکسازی شده و قبل از انجام آزمایش به مدت یک ساعت خارج از فریزر و در دمای اتاق ($25^{\circ}C$) نگهداری شد (ASAE, 1998). کلیه مراحل انجام آزمایشات در آزمایشگاه بخش فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی انجام گرفت.

تعیین میزان رطوبت محصول

برای تعیین میزان رطوبت محصول از آون فن دار (مدل Memmert 600 ساخت آلمان) استفاده گردید. حدود ۲۰ گرم میوه زرشک در ظرف مخصوص که قبلاً وزن شده بود در آون با دمای 105 ± 2 درجه سلسیوس و در مدت ۴ ساعت قرار گرفت و بعد از این مدت نمونه‌ها از آون خارج و در داخل دیسیکاتور به مدت ۱۰ دقیقه سرد شد و سپس با ترازوی دیجیتال (مدل GEC AVERY ساخت انگلیس) با دقت ± 0.001 گرم توزین شدند و دوباره داخل آون گذاشته شد تا زمانی که اختلاف وزن حاصل کمتر از 0.05 گرم نشد این کار ادامه پیدا کرد (Aghbashlo *et al.*, 2008).



شکل ۱: A: آزمون فشار با دو صفحه موازی در جهت افقی و B: آزمون فشار با دو صفحه موازی در جهت عمودی، C: نمودار نمونه نیرو- تغییر شکل میوه زرشک

Fig. 1. A: Pressure test with parallel plates, B: A typical force-deformation diagram of the Berberis fruit

در هر تیمار ۵ عدد میوه زرشک به طور تصادفی انتخاب و به صورت افقی یا عمودی با توجه به تیمار مربوطه تحت آزمایش قرار گرفت. سپس نرم افزار دستگاه برای تامین سرعت ۲ تا ۱۰ میلی متر بر دقیقه بسته به تیمار مربوطه تنظیم شد و بر روی میوه اعمال نیرو انجام گرفت تا میوه به حد پاره گی یا له شده گی برسد.

برای بررسی تأثیر سرعت و جهت بارگذاری می بایست آزمایشات مذکور در هر دو جهت افقی و عمودی انجام می پذیرفت اما با توجه به عدم امکان آزمایش در رطوبت ی پایین تر (دم میوه می بایست جدا می گردید تا بتوان آن را در داخل دستگاه گذاشت و در رطوبتهای پایین جدا کردن دم باعث تخریب بافت میوه می شد) صرفاً در محدوده رطوبتی ۷۰ تا ۷۶ درصد (بر پایه تر) و در دو سرعت بارگذاری ۲ و ۱۰ میلی متر بر دقیقه و در جهت افقی و عمودی انجام پذیرفت.

این مقدار معرف بیشترین میزان تغییر شکل در میوه قبل از پارگی آن است که بر حسب واحد میلی متر سنجیده شد.

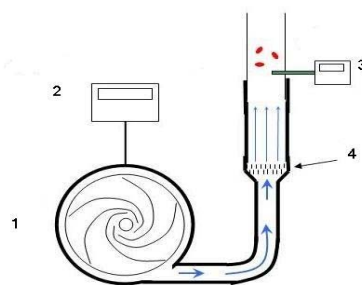
۳- انرژی شکست (E) به عنوان میزان انرژی مورد نیاز بر حسب ژول برای شکست و پارگی محصول که برابر مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر شکل است توسط نرم افزار دستگاه تحلیل بافت محاسبه و به دست آمد (شکل ۱).

۴- چقرمگی (P) که عبارت است کار لازم برای ایجاد پارگی به ازای واحد حجم ماده با استفاده از تقسیم انرژی شکست به حجم نمونه (معادله ۲) و از معادله (۳) بر حسب واحد ژول بر سانتی متر مکعب محاسبه شد (Fathollahzadeh et al., 2008).

$$V = \frac{\pi(LWT)}{6} \quad (2)$$

$$P = \frac{E}{V} \quad (3)$$

که L، W و T به ترتیب سه بعد متوسط میوه بر حسب میلی متر و V حجم بر حسب میلی متر مکعب می باشد. این پارامترها توسط کولیس دیجیتال با دقت ± 0.1 میلی متر اندازه گیری شدند.



شکل ۲. تونل باد عمودی برای تعیین سرعت حد میوه زرشک، ۱- موتور الکتریکی و فن ۲- تنظیم کننده سرعت موتور ۳- بادسنج دیجیتال ۴- پخش کننده

Fig. 2. Wind tunnel for determination of the terminal velocity of Berberis, 1- AC electric motor and fan 2- variety speed supplier 3- electronic anemometer 4- diffuser

۵۰، ۲۵ تا ۳۰ و ۷ تا ۱۰ درصد (پایه تر) قابل مشاهده است. هر سه بعد میوه با کاهش میزان رطوبت کاهش یافت که در نتیجه آن حجم میوه نیز کم شد. ضخامت با کاهش ۴۸/۲ درصد بیشترین تغییرات را در دامنه رطوبتی ۷ تا ۷۶ درصد (پایه تر) داشت.

نیرو، انرژی جذب شده، چقرمگی و تغییر شکل نقطه شکست میوه در رطوبت‌های مختلف

نتایج تجزیه واریانس برای نیروی شکست، انرژی شکست، چقرمگی و میزان تغییر شکل و مقادیر متوسط آنها در رطوبت‌های مختلف به ترتیب در جدول ۳ و ۲ قابل مشاهده است. همان طور که از جدول ۲ مشخص است، نیرو، انرژی و تغییر شکل شکست فقط تحت تأثیر محتوای رطوبتی قرار داشتند و اثر سرعت بارگذاری و اثر متقابل سرعت بارگذاری و محتوای رطوبتی معنادار نبود. ولی چقرمگی بطور معنی داری تحت تأثیر هر دو عامل میزان رطوبت و سرعت بارگذاری و اثر متقابل آنها بوده است.

مقادیر متوسط نیرو، انرژی و تغییر شکل شکست به تفکیک سرعت بارگذاری در جدول ۳ آمده است. حروف لاتین متفاوت وجود اختلاف معنی دار را مشخص می کند و حروف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار دو گروه در سطح احتمال ۰/۰۵ است. همچنین گروه‌هایی که با دو حرف لاتین مشخص شده اند بین همان دو گروه قرار گرفته اند و متعلق به هر دو هستند لذا با هر دو گروه تفاوت بی معنایی را در سطح احتمال مذکور دارند.

بیشترین مقدار نیروی شکست در محتوای رطوبتی بین ۷۰ تا ۷۶ درصد که متوسط آن در سرعت‌های مختلف برابر است با ۱/۳۸۷ نیوتن و کمترین میزان آن در رطوبت بین ۲۵ تا ۳۰ درصد به مقدار ۰/۷۹۰ نیوتن مشاهده شد. بطور کلی برای نیروی شکست میوه زرشک و محتوای رطوبتی یک رابطه غیر خطی افزایشی به ازای کاهش رطوبت بدست آمد که معادله (۴) آنرا نشان می دهد.

تعیین سرعت حد

با استفاده از تونل باد، ویژه سنجش سرعت حد محصولات کشاورزی که در شکل (۲) مشاهده می شود، سرعت حد میوه زرشک در هر سطح رطوبتی و در ۱۰ تکرار اندازه گیری شد. در این روش، میوه در درون تونل دستگاه به آرامی رها و از تابلوی فرمان الکتریکی دستگاه سرعت دمش هوا را زیاد کرده و آنقدر اینکار ادامه یافت تا میوه به حالت شناوری در داخل تونل مشاهده شد. در این حالت سرعت هوا از دریچه مخصوص به وسیله یک دستگاه سرعت سنج باد^۱ (بادسنج) دیجیتالی با دقت ± 0.1 متر بر ثانیه اندازه گیری و به عنوان سرعت حد میوه ثبت گردید (Razavi and Akbari, 2006).

روش تحلیل آماری داده ها

آزمایش های بررسی تأثیر میزان رطوبت و سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی میوه زرشک در چهار دامنه رطوبتی، دو سرعت بارگذاری و ۵ تکرار برای هر تیمار و بررسی سرعت بارگذاری و جهت بارگذاری فقط در رطوبت اول و سرعت بارگذاری در دو سطح و جهت بارگذاری در دو سطح و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شدند و نتایج آنها به روش آزمون دانکن بررسی شد. همچنین سرعت حد میوه در چهار دامنه رطوبتی بررسی گردید و نهایتاً تمامی آنالیزها توسط نرم افزار SPSS 12 انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

ابعاد مختلف میوه زرشک در رطوبت‌های مختلف

ابعاد مختلف میوه که به منظور تعیین حجم هندسی میوه به کار گرفته شد در جدول ۱ در چهار محدوده رطوبتی ۷۰ تا ۷۶، ۴۵ تا

1- Anemometer

جدول ۱. ابعاد میوه زرشک در رطوبت‌های مختلف

Table 1. Dimensions of Berberis in various moisture contents

7-10	25-30	45-50	70-76	محتوای رطوبتی Moisture content (%w. b)
8.94 ± 0.62	9.67 ± 0.63	10.18 ± 0.50	10.31 ± 0.49	طول (Length)، mm
5.41 ± 0.77	5.90 ± 0.61	6.06 ± 0.56	6.49 ± 0.68	عرض (Width)، mm
3.17 ± 0.65	4.66 ± 0.66	5.28 ± 0.59	6.12 ± 0.63	ضخامت (Thickness)، mm
80.27	139.20	170.55	214.41	حجم میوه به روش هندسی (Volume)، mm ³

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر محتوای رطوبتی و سرعت بارگذاری بر پارامترهای مکانیکی میوه زرشک

Table 2. The variance analysis of the effects of moisture content and loading speed on mechanical properties of Berberis

میانگین مربعات Mean squares	درجه آزادی Degree of freedom	متغیر Variable	خواص مکانیکی Mechanical properties
0.116 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری Loading speed	نیروی شکست Rupture force (N)
3.178 ^{**}	3	میزان رطوبت Moisture content	
0.045 ^{ns}	3	سرعت بارگذاری × میزان رطوبت Loading speed × Moisture content	
0.169	32	خطا Error	
0.287 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری Loading speed	تغییر شکل Shape deformation (mm)
5.142 ^{**}	3	میزان رطوبت Moisture content	
0.156 ^{ns}	3	سرعت بارگذاری × میزان رطوبت Loading speed × Moisture content	
0.558	32	خطا Error	
0.281 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری Loading speed	انرژی شکست Rupture energy (mJ)
0.530 ^{**}	3	میزان رطوبت Moisture content	
0.105 ^{ns}	3	سرعت بارگذاری × میزان رطوبت Loading speed × Moisture content	
0.027	32	خطا Error	
15.581 ^{**}	1	سرعت بارگذاری Loading speed	چقرمگی Toughness (J/cm ³)
64.567 ^{**}	3	میزان رطوبت Moisture content	
5.425 [*]	3	سرعت بارگذاری × میزان رطوبت Loading speed × Moisture content	
1.291	32	خطا Error	

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح ۵ درصد و ۱ درصد و ns عدم معنی داری را نشان می دهد

*, ** and ns show significant difference at probability of %5, %1 and no significant difference, respectively

$$R^2 = 0.97$$

$$F_T = 0.4378M_C^2 + 2.3663M_C + 3.8863$$

(۴)

همین روند افزایشی به ازای کاهش محتوای رطوبتی برای نیروی شکست میوه زرشک (بومی کرج) توسط فتح الله زاده و همکاران نیز گزارش گردیده است (Fathollahzadeh and Rajabipour, 2008).

گردید. تغییر شکل میوه زرشک بومی کرج نیز به ازای کاهش میزان رطوبت از ۸۹/۲۳ به ۵۹/۱۱ درصد (پایه تر) از ۲/۰۱ به ۱/۳۴ میلی متر کاهش می یابد (Fathollahzadeh and Rajabipour, 2008).

$$R^2 = 0.94 \quad (۶)$$

$$D = 0.4405M_c^2 + -1.8337M_c + 3.7400$$

همانطور که نتایج تجزیه واریانس داده‌های جدول ۲ نشان می دهد در مورد چقرمگی می توان اثر متقابل محتوای رطوبتی و سرعت بارگذاری را در سطح احتمال ۵ درصد و اثرات اصلی آنها را در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار دانست و برای مشاهده بهتر این موضوع میانگین داده‌ها در سرعت‌های بارگذاری ۲ و ۱۰ میلی متر بر دقیقه و چهار گروه رطوبتی تعریف شده که قبلا به آن اشاره شده است در جدول ۴ گردآوری شده است.

چقرمگی میوه زرشک در محدوده رطوبتی ۷ تا ۷۶ درصد (پایه تر) از ۴/۲۹۷ به ۸/۲۲۰ ژول بر سانتی متر مکعب تغییر یافت. این در حالی است که در گزارش فتح الله زاده و رجبی پور این مقدار برای زرشک گونه کرج ۱/۱۴۹ تا ۰/۱۰۵ ژول بر سانتی متر مکعب به دست آمده است (Fathollahzadeh and Rajabipour, 2008)، که این اختلاف می تواند نشان دهنده اختلاف ناشی از اندازه و جنس بافت دو میوه مذکور باشد.

اما با توجه به اینکه چقرمگی از دو عنصر یعنی حجم متوسط میوه و انرژی شکست میوه در رطوبت مورد نظر تشکیل یافته و از آنجا که عنصر حجم تنها به محتوای رطوبتی وابسته است و انرژی شکست هم هیچ وابستگی به سرعت بارگذاری ندارد، وابستگی چقرمگی به عنوان ترکیبی از این دو عامل به سرعت بارگذاری، دور از ذهن می نماید و جا دارد تحقیقات بیشتری بر روی آن انجام پذیرد.

همچنین میزان انرژی شکست در دامنه رطوبتی ۷۰ تا ۷۶ درصد بیشترین مقدار خود یعنی برابر ۰/۹۲۱ میلی ژول را نشان داده و در رطوبت ۴۵ تا ۵۰ درصد کمترین مقدار خود را به میزان ۰/۳۶۰ میلی ژول دارا بود. چقرمگی نیز کمترین میزان را در رطوبت ۴۵ تا ۵۰ درصد (بر پایه تر) و بیشترین میزان را در رطوبت ۷ تا ۱۰ درصد (بر پایه تر) از خود نشان داد که بر طبق نتایج تحقیقی که در مورد زرشک کرج انجام شده این مقدار از ۱/۱۴۹ به ۰/۱۰۵ ژول بر سانتی متر مکعب همراه با کاهش رطوبت کاهش می یابد (Fathollahzadeh and Rajabipour, 2008). دلیل این اختلاف را می توان بدین وجه توجیه کرد که نرخ کاهش حجم به نرخ کاهش انرژی در مورد زرشک خراسان بیشتر بوده و در مورد زرشک کرج کمتر و این سبب می شود که چقرمگی زرشک بومی خراسان بر خلاف زرشک بومی کرج با افزایش محتوای رطوبتی، کاهش یابد.

معادله ۵ به عنوان بهترین رابطه بین متوسط چقرمگی (p) سرعت‌های بارگذاری ۲ و ۱۰ میلی متر بر دقیقه با میزان رطوبت (M_c) زرشک بدست آمد.

$$R^2 = 1.00 \quad (۵)$$

$$P = -1.2427M_c^3 + 9.8135M_c^2 - 22.9300M_c + 18.6560$$

انرژی شکست میوه زرشک با کاهش میزان رطوبت از ۷۶ به ۷ درصد (پایه تر)، از ۰/۹۲۱ به ۰/۶۶۱ میلی ژول و به صورت غیر خطی تغییر یافت (جدول ۳).

کاهش میزان رطوبت میوه زرشک از ۷۶ به ۷ درصد (پایه تر) باعث کاهش میزان تغییر شکل شکست از ۳/۳۸۷ به ۲/۴۱۳ میلی متر شد که کمترین میزان را در رطوبت ۲۵ تا ۳۰ درصد بر پایه تر به میزان ۱/۶۳۶ میلی متر داشت. این کاهش نسبی به معنی قابلیت انعطاف و شکل پذیری کمتر بافت در رطوبت های کم نسبت به رطوبت های زیاد، است. در همین راستا، رابطه ۶ با میزان مناسب R² به عنوان رابطه تغییر شکل (D) با میزان رطوبت (M_c) زرشک ارائه

جدول ۳. مقایسه میانگین های نیرو و انرژی شکست و تغییر شکل در نقطه شکست زرشک در رطوبتهای مختلف

Table 3. Comparison of mean rupture force, energy and deformation at rupture point of Berberis in various moisture contents

7-10	25-30	45-50	70-76	محتوای رطوبت Moisture content
2.413 ± 0.254 ^b	1.636 ± 1.251 ^a	2.402 ± 0.554 ^b	3.387 ± 0.355 ^c	تغییر شکل Shape deformation (mm)
0.661 ± 0.116 ^b	0.607 ± 0.278 ^{ab}	0.360 ± 0.177 ^a	0.921 ± 0.182 ^{ab}	انرژی Energy (mJ)
2.679 ± 2.215 ^b	0.790 ± 0.180 ^a	0.842 ± 0.330 ^a	1.387 ± 0.498 ^a	نیرو Force (N)

حروف لاتین مشابه در هر ردیف نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد است
The same letters in rows and columns show no significant difference at probability of %5

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های چقرمگی میوه زرشک (ژول بر سانتی متر مکعب) در رطوبت و جهت‌های مختلف بارگذاری
Table 4. Comparison of mean toughness of Berberis (J/cm³) in various moisture contents and force orientations
 سرعت بارگذاری (Loading speed) mm/min

متوسط Average	10	2	محتوای رطوبتی Moisture content, (%w.b.)
4.297	4.422 ± 0.827 ^b	4.172 ± 0.951 ^b	70-76
2.109	2.286 ± 1.443 ^a	1.932 ± 0.530 ^a	45-50
4.364	6.068 ± 0.667 ^c	2.660 ± 1.383 ^{ab}	25-30
8.220	8.732 ± 1.052 ^c	7.708 ± 1.705 ^c	7-10

حروف لاتین مشابه در هر سطر و ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد است

The same letters in rows and columns show no significant difference at probability of %5

رطوبت‌های مختلف است. سرعت حد میوه زرشک، مشابه دیگر محصولات کشاورزی با کاهش محتوای رطوبتی کاهش می‌یابد (جدول ۸) و این میزان از ۹ متر بر ثانیه در رطوبت ۷۰ تا ۷۶ درصد به ۴/۵ متر بر ثانیه در محتوای رطوبتی بین ۷ و ۱۰ درصد می‌رسد و در این مسیر روند کاملاً نزولی و شبه خطی را طی می‌کند که با ضریب رگرسیون ۰/۹۸، شیب و عرض از مبدا خط مذکور به ترتیب برابر است با ۱/۴۸ و ۳/۱۰ که روندی مشابه دیگر محصولات کشاورزی را نشان می‌دهد، به عنوان مثال نیمکار و چاتوپادهایی به ازای کاهش محتوای رطوبتی نخود سبز از ۱۶/۶۵ درصد به ۸/۳۶ درصد، این مقدار را ۱/۰۸۷۵ تا ۰/۱۰۴ متر بر ثانیه گزارش کرده اند (Nimkar and Chattopadhyay, 2002).

نتیجه گیری

محتوای رطوبتی مهمترین عامه تغییر خواص مکانیکی میوه زرشک به حساب می‌آید. جهت بارگذاری بر میزان پارامترهای مکانیکی به جز انرژی شکست تأثیر دارد. به علاوه چقرمگی متأثر از اثر متقابل محتوای رطوبتی و سرعت بارگذاری است. رطوبت مابین ۲۵ تا ۳۰ درصد (پایه تر) کمترین مقادیر نیرو و تغییر شکل متناظر شکست را به همراه دارد و رطوبت بین ۴۵ تا ۵۰ درصد بر پایه تر نیز کمترین میزان انرژی شکست را دربردارد با توجه به این مطلب به نظر می‌آید در رطوبت بین ۳۰ تا ۴۵ درصد (پایه تر) بافت میوه مقاومت مکانیکی کمتری نسبت به دیگر رطوبت‌ها دارد. سرعت حد میوه زرشک با افزایش میزان رطوبت، افزایش می‌یابد.

بررسی اثر جهت بارگذاری و سرعت بارگذاری بر پارامترهای

مکانیکی فشار در حالت زرشک تازه

آنچه از جدول (۵) می‌توان نتیجه گرفت آن است که به جز در میزان تغییر شکل و نیروی شکست در بقیه موارد که شامل انرژی و چقرمگی می‌باشد، جهت بارگذاری تأثیر معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد نداشته است. مشاهدات (جدول ۶) نشان داد که در حالت عمودی نیروی کمتری نسبت به حالت افقی برای شکست میوه باید صرف شود و از طرف دیگر تغییر شکل در حالت افقی کمتر از حالت عمودی می‌باشد. با توجه به این مطالب به نظر می‌رسد که انرژی مورد نیاز برای شکستن میوه که برابر مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر شکل است نمی‌بایست تغییرات چندانی را از خود نشان دهد که نتایج آنرا تایید می‌کند بدین معنا که هیچ ارتباط معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد بین میانگین انرژی شکست در دو جهت عمودی و افقی نبود. در مورد بسیاری از میوه‌ها نتایج متفاوتی گزارش شده است به طور مثال در میوه زیتون روغنی تازه اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد بین نیروی ۹۴/۴۵ نیوتنی شکست در حالت عمودی و نیروی ۵۷/۳۸ نیوتنی شکست در حالت افقی به چشم می‌خورد و نیرو در حالت عمودی بیشتر از نیروی افقی وارد بر میوه است (Kılıçkan and Güner, 2008). این رفتار ممکن است بدلیل متفاوت بودن بافت میوه زیتون بدلیل دارا بودن هسته (دو جنس متفاوت) در مقایسه با بافت میوه زرشک (جنس یکسان) باشد.

سرعت حد

نتایج تجزیه واریانس سرعت حد (جدول ۷) نشان دهنده وجود یک اختلاف معنی دار در سطح ۰/۰۱ بین میانگین سرعت حد در

جدول ۵. تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل جهت و سرعت بارگذاری بر روی پارامترهای مکانیکی میوه تازه زرشک

Table 5. The variance analysis of main and interaction effects of force orientation and loading speed rate on mechanical parameters of fresh Berberis fruit

میانگین مربعات Mean squares	درجه آزادی Degree of freedom	متغیر Variable	خواص مکانیکی Mechanical properties
0.148 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری Loading speed	نیروی شکست Rupture force (N)
6.938 ^{**}	1	جهت بارگذاری Force orientation	
0.125 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری × جهت بارگذاری Loading speed × Force orientation	
0.576	16	خطا Error	
0.047 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری Loading speed	تغییر شکل Shape deformation (mm)
0.290 ^{**}	1	جهت بارگذاری Force orientation	
0.028 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری × جهت بارگذاری Loading speed × Force orientation	
0.024	16	خطا Error	
0.000 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری Loading speed	انرژی شکست Rupture energy (mJ)
0.012 ^{ns}	1	جهت بارگذاری Force orientation	
0.001 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری × جهت بارگذاری Loading speed × Force orientation	
0.003	16	خطا Error	
0.017 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری Loading speed	چقرمگی Toughness (J/cm ³)
6.306 ^{ns}	1	جهت بارگذاری Force orientation	
0.609 ^{ns}	1	سرعت بارگذاری × جهت بارگذاری Loading speed × Force orientation	
0.524	16	خطا Error	

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد و ns عدم معنی داری را نشان می دهد
*, ** and ns show significant difference at probability of %5, %1 and no significant difference, respectively

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های خواص مکانیکی میوه تازه زرشک در سرعت و جهت‌های مختلف بارگذاری
Table 6. Comparison of mean mechanical properties of fresh Berberis fruit at various loading speed rate and orientations

جهت عمودی Vertical direction	جهت افقی Horizontal direction	خواص مکانیکی Mechanical properties
0.503 ± 0.120 ^a	1.387 ± 0.498 ^b	نیروی شکست (نیوتن) Rupture force (N)
5.368 ± 0.111 ^b	3.387 ± 0.355 ^a	تغییر شکل (میلی متر) Shape deformation (mm)
1.035 ± 0.274 ^a	0.921 ± 0.182 ^a	انرژی شکست (نیوتن) Rupture energy (N)
4.278 ± 1.142 ^a	4.849 ± 1.018 ^a	چقرمگی (ژول بر سانتیمتر مکعب) Toughness (J/cm ³)

حروف لاتین مشابه در ردیف‌ها نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد است
Values with the same letters show no significant difference at probability of %5
جدول ۷. نتایج تجزیه واریانس سرعت حد میوه زرشک در رطوبت‌های مختلف

Table 7. The variance analysis of terminal velocity of Berberis in various moisture contents

میانگین مربعات Mean squares	درجه آزادی Degree of freedom	متغیر Variable
47.985 **	3	محتوای رطوبتی Moisture content
0.691	48	خطا Error

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد و ns عدم معنی داری را نشان می دهد
*, ** and ns show significant difference at probability of %5, %1 and no significant difference, respectively

جدول ۸. مقایسه میانگین سرعت حد در محتوای رطوبتی مختلف

Table 8. Comparison of mean terminal velocity of Berberis fruit at various moisture contents

7-10	25-30	45-50	70-76	محتوای رطوبتی Moisture content, (%w.b.)
4.5 ± 0.6 ^a	6.2 ± 1.4 ^b	7.3 ± 0.2 ^c	9.0 ± 0.6 ^d	سرعت حد Terminal velocity, (ms ⁻¹)

حروف لاتین غیرمشابه نشان دهنده وجود تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد است
Values with different letters are significantly different at probability of %1

منابع

- 1- Aghbashlo, M., M.H. Kianmehr, and S.R. Hassan-Beygi. 2008. Specific Heat and Thermal Conductivity of Berberis Fruit (*Berberis vulgaris*). *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 3: 330-336.
- 2- ASAE. 1998. ASAE Standards 368.4 DEC00 Compression test of food material of convex shape. American Society of Agricultural Engineering.
- 3- Çalışır, S., and C. Aydın. 2004. Some physico-mechanic properties of cherry laurel (*Prunus lauracerusus L.*) fruits. *Journal of Food Engineering* 65: 145-150
- 4- Chaji, H. 1999. Design and make process of suitable berberis's dryer. Faculty of Agriculture. Tabriz University. (In Farsi).
- 5- Fathollahzadeh, H., and A. Rajabipour. 2008. Some mechanical properties of barberry. *International journal Agrophysics* 22: 299-302.
- 6- Filabi, A., and S. Khaghani. 2008. Possibility, opportunities and challenges of Berberis product by the novel technique. Internal Agricultural Engineering Conference: Red Gold Conference. South Khorasan, Iran. (In Farsi)
- 7- Guillermina, P., N. Dupont, C. Le Morvana, J. M. Le Quere, C. Langlais, and J.C. Mauget. 2006. Rheological and technological properties of two cider apple cultivars. *LWT-Food science and Technology* 39: 995-1000.
- 8- Haciseferoğulları, H., İ. Gezer, M. M. Özcan, B. M. Asma. 2007. Post harvest chemical and physical-mechanical prop of some apricot varieties cultivated in Turkey *Journal of Food Engineering* 79: 364-373.
- 9- Kafı, M., and A. Balandari. 2002. Berberis Production and Processing. Ferdowsi University of Mashhad Publication. Iran. (In Farsi).
- 10- Kashaninejad, M., and L.G. Tabil. 2009. Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. *Journal of Food Engineering* 90: 104-109
- 11- Katsiferis, T., N. Zogzas and V. T. Karathanos. 2008. Mechanical properties and structure of unripe oranges during processing of "spoon sweets" *Journal of Food Engineering* 89: 149-155.
- 12- Kılıçkan, A., and M. Güner. 2008. Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea L.*) under compression loading. *Journal of Food Engineering* 87:222-228.
- 13- Lewis, R., A. Yoxall, M.B. Marshall, and L.A. Canty. 2008. Characterizing pressure and bruising in apple fruit. *Wear* 264: 37-46.

- 14- Nimkar, P. M., and P. K. Chattopadhyay. 2002. Airflow Resistance of Green Gram. *Biosystems Engineering* 82: 407–414.
- 15- Pasini L., L. Ragni, A.D. Rombol, A. Berardinelli, A. Guarnieri, and B. Marangoni. 2004. Influence of the Fertilization System on the Mechanical Damage of Apples. *Biosystems Engineering* 88: 441-452.
- 16- Ragni, L., and A. Berardinelli. 2001. Mechanical Behavior of Apples, Damage during Sorting and Packaging. *Journal of agricultural Engineering Research* 78: 273-279.
- 17- Razavi, M. A., and R. Akbari. 2006. *Biophysical Properties of Agricultural and Food Materials*. Ferdowsi university of Mashhad publication. Iran. (In Farsi).
- 18- Vursavuş, K., and F. Özgüven. 2004. Mechanical behavior of apricot pit under
- 19- compression loading. *Journal of Food Engineering* 65: 255-261.