

## کیفیت سنجی میوه گلابی رقم شاه‌میوه به صورت غیرمخرب با استفاده از امواج فراصوتی

رسول معمار دستجردی<sup>۱\*</sup> - سعید مینایی<sup>۲</sup> - محمد هادی خوش تقاضا<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۱۴

### چکیده

تکنیک‌های فراصوتی به آن سرعتی که برای بررسی کیفیت مواد غذایی، به کار گرفته شده، در تعیین کیفیت میوه‌ها گسترش نیافته است. در این تحقیق برای کیفیت سنجی میوه‌ی گلابی رقم شاه‌میوه از سامانه فراصوتی استفاده شد که بخش‌های اصلی آن عبارت بودند از تپ‌ساز/ تپ‌گیر، تراگذرهای فرستنده و گیرنده دارای هورن نمایی (۷۵ kHz)، برنامه‌ی کنترل، رایانه و سامانه‌ی جمع‌آوری داده‌ها. برای کیفیت‌سنجی، از میان ویژگی‌های مکانیکی (آزمون‌های مخرب)، شاخص سفتی، میزان مواد جامد محلول، میزان اسیدیت، ضریب کشسانی، pH و درصد ماده‌ی خشک و از میان شاخص‌های فراصوتی (آزمون غیرمخرب)، سرعت امواج فراصوت و ضریب تضعیف مورد بررسی قرار گرفتند. سطوح کیفی گلابی عبارت بودند از نارس، رسیده و بیش‌رس. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که اثر سطوح کیفی نمونه بر تمام عوامل وابسته به غیر از میزان مواد جامد محلول و میزان ماده خشک در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است و سفتی بافت به‌عنوان مهم‌ترین شاخص در تعیین بلوغ تجاری میوه گلابی رقم شاه‌میوه انتخاب شد. همچنین مشخص شد که اثر سطوح کیفی بر سرعت امواج فراصوت و ضریب تضعیف در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است. بررسی رابطه‌ی بین سفتی و ضریب کشسانی با خواص فراصوتی نشان داد که، رابطه‌ی خطی بین سفتی و سرعت امواج فراصوت وجود دارد و با افزایش میزان سفتی میوه، سرعت امواج افزایش می‌یابد ( $R^2 = 0/81$ ). همچنین مشاهده شد که رابطه‌ی منفی بین سفتی و ضریب تضعیف وجود دارد ( $R^2 = 0/895$ ) و با افزایش میزان رسیدگی یعنی کاهش سفتی، ضریب تضعیف به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. رابطه‌ی نمایی خوبی بین ضریب کشسانی با سرعت امواج فراصوت ( $R^2 = 0/86$ ) و ضریب تضعیف ( $R^2 = 0/835$ ) به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آزمون غیرمخرب، سفتی، فراصوت، کیفیت سنجی، میوه‌ی گلابی

### مقدمه

تشخیص می‌دهند ولی استفاده از روش‌های قابل اطمینان برای ارزیابی کیفی میوه، ضروری به‌نظر می‌رسد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری خواص کیفی به‌صورت غیرمخرب پیشنهاد شده است که بیشتر آن‌ها روش‌های صوتی هستند (Duprat et al., 1997; Schotte et al., 1999). با وجود این‌که روش صوتی روشی غیرمخرب، سریع و دقیق است ولی در عمل زیاد مورد استفاده قرار نگرفته است. روش دیگر، روش فراصوتی است که به‌طور وسیعی در تحقیقات پزشکی و مواد مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است اما تحقیقات راجع به استفاده از آن برای تعیین رسیدگی و کیفیت محصولات کشاورزی بسیار اندک می‌باشد (Hedric et al., 2005). این آزمون به‌عنوان روشی غیرمخرب برای اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی مواد بسیار مفید است. از مزایای مهم این روش علاوه بر مزایای روش صوتی، خودکار بودن و قابلیت استفاده به‌صورت روی خط را می‌توان نام برد.

اخیراً پژوهش در مورد استفاده از تکنیک فراصوت برای تعیین

تعاریف گسترده و متفاوتی از کیفیت محصولات کشاورزی ارائه می‌شود، اما به‌طور خلاصه می‌توان آن را "میزان تناسب و خوب بودن یک محصول برای استفاده خاص" تعریف کرد (Abbott, 1999). تعریف کیفیت، بیشتر از دیدگاه گروه مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان مد نظر است (Shewfelt and Bruckner, 2000). برای مثال در میوه سیب خصوصیات کیفی اولیه به‌نظر می‌رسد ظاهر و طعم میوه باشد ولی خصوصیات نظیر تردی، سفتی، داشتن لک و غیره نیز تعیین‌کننده کیفیت سیب هستند. خرده فروش‌ها به‌خوبی میوه‌ی باکیفیت را از میوه‌ی بی‌کیفیت با اصطلاحاتی نظیر بی‌آب، نرم و غیره

۱- استادیار گروه ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان  
۲ و ۳- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران  
\* - نویسنده مسئول  
(Email: rasoul.memar@gmail.com)

فراصوتی (ضریب تضعیف و سرعت امواج فراصوت) و اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی با استفاده از امواج فراصوتی بدون تخریب میوه می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

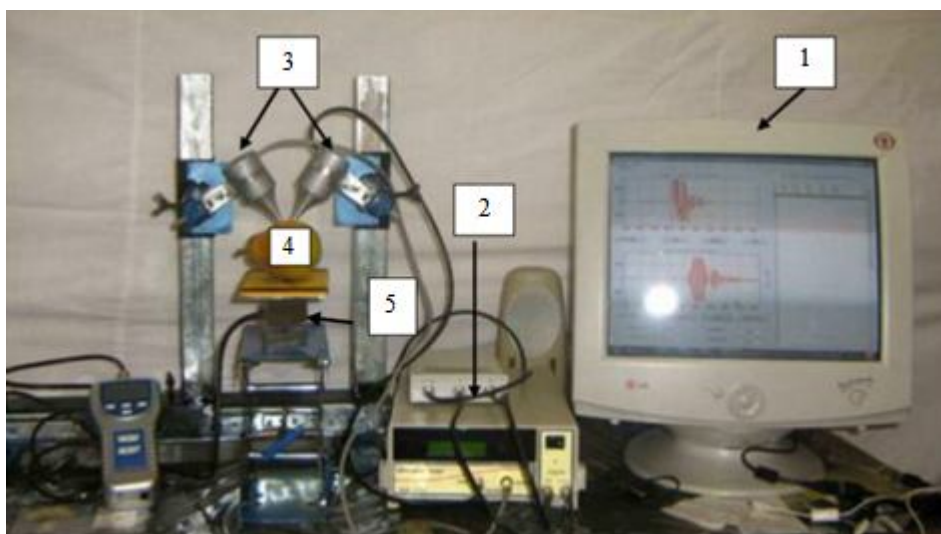
این تحقیق به منظور بررسی اثر سفتی، pH، اسیدیته، میزان مواد جامد محلول، میزان ماده‌ی خشک و خواص فراصوتی (سرعت امواج فراصوت و ضریب تضعیف) بر میزان رسیدگی میوه گلابی رقم شاه‌میوه در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تیمار (نارس، رسیده و بیش‌رس) در ۱۰ تکرار انجام گرفت. گلابی‌ها بر اساس ویژگی‌های ظاهری مشابه (رنگ، نرمی و داشتن لک) با اندازه تقریباً یکسان از بازار تهیه و فوراً به آزمایشگاه سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل دانشگاه تربیت مدرس انتقال داده شد. سپس هر نمونه از دو موقعیت تحت آزمون غیر مخرب فراصوتی قرار گرفت و سرعت امواج فراصوتی و ضریب تضعیف آن استخراج شد. بعد از آزمون غیر مخرب، آزمون بارگذاری مخرب نفوذی انجام گرفت و میزان سفتی هر کدام از میوه‌ها تعیین شد.

### سامانه کیفیت‌سنج فراصوتی

سامانه‌ی کیفیت‌سنج فراصوتی ساخته شده برای این تحقیق، مطابق شکل ۱ شامل: مولد سیگنال (تپ‌ساز)، دریافت‌کننده‌ی سیگنال (تپ‌گیر)، تراگذرها با متمرکزکننده‌ی نمایی<sup>۲</sup>، نوسان‌نما (اسیلوسکوپ)، رایانه، نگهدارنده‌ی میوه و نیروسنج می‌باشد. سامانه نگهدارنده‌ی کاوش‌گرها و میوه به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شد که امکان حرکت افقی برای تنظیم فاصله‌ی میان کاوش‌گرها و اعمال نیروی تماسی کافی به میوه، حرکت عمودی برای قرارگیری کاوش‌گرها در موقعیت مورد نظر روی میوه، حرکت دورانی برای تنظیم زاویه‌ی میان کاوش‌گرهای فرستنده و گیرنده و اندازه‌گیری میزان نیروی وارده به میوه را فراهم می‌ساخت. از یک جفت تراگذر ۷۵ kHz به‌عنوان فرستنده و گیرنده امواج فراصوتی استفاده شد. برای تمرکز انرژی امواج فراصوتی در جلوی تراگذرها یک جفت متمرکزکننده‌ی نمایی آلومینیومی قرار داده شد که امکان انجام آزمون غیر مخرب را فراهم می‌ساخت (Meamar Dastjerdi et al., 2012).

پارامترهای مختلف کیفی محصولات آغاز شده است. تجهیزات و روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری برخی تغییرات فیزیکی-شیمیایی، بیوشیمیایی و مکانیکی محصولات با استفاده از آزمون‌های غیر مخرب فراصوت، در مراحل قبل و پس از برداشت، گسترش یافته است. این مراحل شامل، رشد و رسیدگی (انبه و آووکادو) (Mizrach et al., 1999; Gaete-Garretton et al., 2005; Chivers et al., 1995)، انبارداری در شرایط مختلف (آووکادو) (Flitsanov et al., 2000; Mizrach et al., 2000) و عمر قفسه‌ای<sup>۱</sup> (سیب و آووکادو) (Mizrach and Flitsanov, 1999; Kim et al., 2009) است. در اکثر آزمون‌های غیر مخرب فراصوتی از روش آزمون عبوری استفاده شده است. در تحقیقاتی که اخیراً در ایران انجام گرفت، ذکی و همکاران (۲۰۰۹) خصوصیات فراصوتی میوه‌ی انار را روی نمونه‌های پوست میوه انجام دادند. نتایج آنان نشان داد که در میان شاخص‌های فراصوت، برای اجرای آزمایش کیفیت سنجی انار، بهترین شاخص، سرعت امواج عبوری است. در تحقیق دیگری که در ایران روی هلو انجام شد، محققین رابطه‌ی بین ضریب تضعیف و سرعت امواج فراصوتی با خصوصیات مکانیکی میوه هلو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که رابطه خوبی بین ضریب تضعیف و سرعت امواج فراصوت با سفتی، میزان pH و اسیدیته وجود دارد (Abolghasemi et al., 2009). البته در تحقیقاتی که تاکنون در ایران برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی میوه‌های مختلف انجام گرفته، با توجه به تجهیزات موجود، میوه قبل از انجام آزمایش‌های فراصوتی تخریب (گرفتن پوست یا جدا کردن بخش از بافت) می‌شد که آزمون فراصوتی را به آزمونی مخرب تبدیل می‌کرد.

صادرات میوه‌ی گلابی نیز مانند بسیاری از محصولات کشاورزی هنوز با مشکلات متعددی در زمینه مسائل مربوط به حمل و نقل محصول، مقررات دست و پاگیر اداری، آشنا نبودن باغداران و صادرکنندگان با روش‌های علمی مواجه است که می‌تواند صدمات زیادی به صادرات این محصول وارد کند. کیفیت میوه گلابی با اندازه‌گیری ویژگی‌های بیرونی و درونی تعیین می‌گردد. ویژگی‌های بیرونی نظیر شکل، جرم و رنگ را می‌توان به آسانی اندازه گرفت ولی ویژگی‌های درونی مانند سفتی، میزان مواد جامد محلول و میزان اسیدیته و تعیین وجود یا عدم وجود معایب درونی، امری مشکل است. در این پژوهش، بررسی کیفیت گلابی رقم شاه‌میوه در سه حالت نارس، رسیده و بیش‌رس به‌صورت غیرمخرب (میوه کامل و دست نخورده) با استفاده از امواج فراصوتی و آزمون‌های مخرب مورد بررسی قرار گرفت. هدف کلی از این پژوهش بررسی رابطه‌ی بین ویژگی‌های مکانیکی میوه (سفتی، ضریب کشسانی، میزان مواد جامد محلول، pH، میزان ماده خشک و میزان اسیدیته) و ویژگی‌های



شکل ۱ - سامانه اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی میوه؛ (۱) رایانه، (۲) فرستنده و گیرنده امواج فراصوت، (۳) تراگذر و هورن، (۴) گلابی، (۵) نیروسنج

Fig.1. Ultrasonic system for measurement of fruit properties; (1) Computer, (2) Ultrasonic pulser- receiver, (3) Transducer and horn, (4) Pear, (5) Load cell

$$v = \frac{L}{\text{TOF}} \quad (2)$$

v: سرعت امواج فراصوت در میوه ( $\text{m s}^{-1}$ )

L: ضخامت میوه (mm)

TOF: زمان پرواز امواج فراصوت ( $\text{m s}^{-1}$ ) (Rose, 2004)

رابطه (۲) در برنامه‌ی کنترل سامانه قرار داده شده و اندازه‌گیری سرعت به‌صورت خودکار با وارد کردن ضخامت نمونه یا فاصله میان کاوش‌گرها انجام می‌گیرد. برنامه کنترل سامانه با پردازش سیگنال‌های ارسالی و دریافتی و ایجاد موج مربعی، لبه بالارونده در سیگنال ارسالی و دریافتی را یافته و با تفاضل این دو از یکدیگر، زمان پرواز را با دقت یک میکروثانیه تعیین و با وارد کردن ضخامت، سرعت انتشار امواج را محاسبه کرده و نمایش می‌دهد.

برای محاسبه ضریب تضعیف از رابطه‌ی (۳) استفاده شد (Cartz, 1995).

$$A = A_0 e^{-aL} \quad (3)$$

A و  $A_0$ : به ترتیب دامنه‌ی سیگنال فراصوت در شروع و پایان مسیر انتشار (V)

a: ضریب تضعیف ( $\text{dB mm}^{-1}$ )

L: ضخامت نمونه (mm)

با توجه به این که زاویه، فاصله و نیروی اعمالی روی اندازه‌گیری سرعت و ضریب تضعیف مؤثرند، این ۳ پارامتر در طول آزمایش‌ها ثابت انتخاب شد. آزمایش‌های انجام شده به‌منظور ارزیابی سامانه فراصوتی ساخته شده، نشان داد که بهترین زاویه بین کاوش‌گرها ۶۰

### اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی

در آزمون‌های فراصوتی، سرعت صوت در مواد مختلف معمولاً برحسب  $\text{m s}^{-1}$  بیان می‌شود. امواج فراصوتی در جامدات و مایعات با سرعت نسبتاً بالایی منتشر می‌گردند ولی در گازها سرعت انتشار آن‌ها کم و میزان استهلاکشان بسیار زیاد است و تقریباً بلافاصله پس از ورود به یک محیط گازی از بین می‌روند (Hedrick et al., 2005; Schmerr and Lester, 1998). سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی به‌صورت تئوری ( $C_L$ ) مطابق با رابطه‌ی (۱) برابر است با:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{1-\mu^2}} \quad (1)$$

$C_L$ : سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی ( $\text{m s}^{-1}$ )

E: ضریب کشسانی<sup>۱</sup> (MPa)

$\rho$ : چگالی ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\mu$ : ضریب پواسون<sup>۲</sup> (Schmerr and Lester, 1998)

برای اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت مطابق با رابطه‌ی (۲) نیاز به استخراج زمان پرواز (TOF) می‌باشد. زمان پرواز، زمانی است که پالس فراصوت از یک طرف میوه به طرف دیگر آن انتقال می‌یابد و برای محاسبه آن از نمودار شکل موج در حوزه زمان استفاده می‌گردد.

1- Elastic coefficient

2- Poisson's ratio

3- Time Of Flight

به‌گونه‌ای درون مایع معلق شد که با دیواره‌ی ظرف تماس نداشته باشد و وزن قرائت شد. میزان آب جابه‌جا شده برابر با حجم نمونه است. البته وزن آب جابه‌جا شده (به سانتی‌متر مکعب) نیز برابر با حجم نمونه است، زیرا چگالی آب تقریباً برابر با  $1 \text{ g cm}^{-3}$  است.



شکل ۲- روش غوطه‌وری برای تعیین چگالی

Fig.2. Immersion method to determine the density

برای اندازه‌گیری درصد ماده‌ی خشک میوه از روش خشک کردن در آون و رابطه‌ی (۵) استفاده گردید.

$$\text{درصد ماده خشک} = \frac{\text{وزن خشک نمونه}}{\text{وزن تازه (اولیه) نمونه}} \times 100 \quad (5)$$

## نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح کیفی گلابی شاه‌میوه روی ویژگی‌های کیفی مخرب و غیرمخرب در جدول ۱ نشان داده شده است.

### ویژگی‌های مکانیکی

بررسی نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطح رسیدگی میوه روی سفتی بافت میوه در سطح  $0/01$  معنی‌دار است (جدول ۱). براساس نتایج مقایسه میانگین اثر سطح رسیدگی روی میزان سفتی بافت، میوه نارس با میانگین  $34/65$  نیوتن در بالاترین سطح (گروه a) و رسیده با میانگین  $2/3$  نیوتن کمترین میزان سفتی (گروه c) را دارد (شکل ۳).

درجه، فاصله بین آن‌ها  $10$  میلی‌متر و حداکثر میزان نیرو برای جلوگیری از فرورفتن نوک کاوش‌گر در میوه  $4$  نیوتن است.

### اندازه‌گیری میزان سفتی میوه و تعیین ضریب کشسانی

به‌منظور تعیین سفتی نمونه‌ها، آزمون فروسنجی میوه با شاخص استاندارد سفتی مگنس-تیلور<sup>۱</sup> اجرا شد. برای انجام این آزمایش از ماشین آزمون مواد ساخت شرکت سنتام ایران مدل STM-20 استفاده شد. در آزمون سفتی بافت، هر میوه به دو نیم تقسیم شده و مقداری از پوست روی هر نمونه توسط چاقو برداشته شده و نمونه برای آزمون آماده می‌گردید. در این آزمایش میله‌ی مگنس-تیلور با نوک محدب به قطر  $8$  میلی‌متر به کار برده شد. از آنجایی که این آزمون مخرب است، قبل از هر آزمون، آزمون‌های غیر مخرب (تعیین خواص فیزیکی مانند قطر، وزن و حجم نمونه و خواص فراصوتی) انجام گرفت. سرعت بارگذاری در این آزمون  $100 \text{ mm min}^{-1}$  بوده و میزان جابه‌جایی پروب  $8 \text{ mm}$  بود (Paz et al., 2009). نیروسنج مورد استفاده  $100 \text{ N}$  می‌باشد.

ضریب کشسانی با به‌کارگیری رابطه‌ی (۴) محاسبه شد (Mohsenin, 1978).

$$E = \frac{F(1-\mu^2)}{D \cdot 2r} \quad (4)$$

E: ضریب کشسانی (MPa)

F: نیروی مقاومت نفوذی یا سفتی (N)

D: جابه‌جایی (mm)

r: شعاع میله (mm)

$\mu$ : ضریب پواسون (بی بعد)

ضریب پواسون گلابی بر اساس داده‌های ASAE،  $0/49$  در نظر گرفته شد (ASAE, 2002).

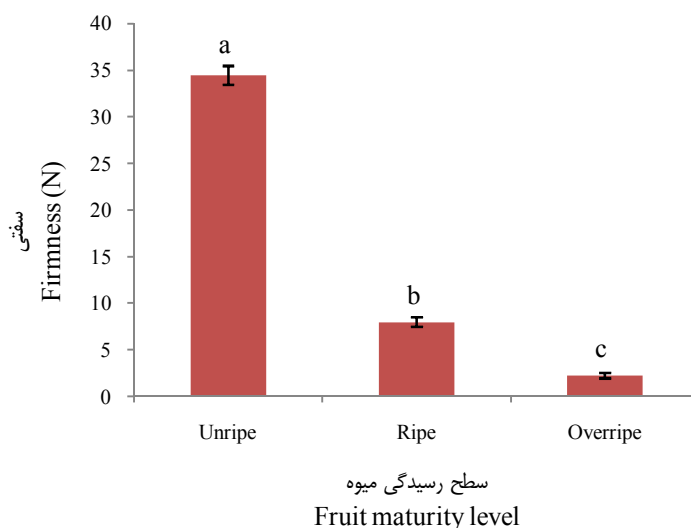
### اندازه‌گیری سایر خواص کیفی

برای به‌دست آوردن میزان مواد جامد محلول از دستگاه رفاکتومتر ساخت شرکت ATAGO ژاپن مدل dr-a1 استفاده شد. اندازه‌گیری pH و میزان اسیدیته با استفاده از دستگاه pH meter مدل Metrohm ساخت کشور سوئیس انجام شد. چگالی میوه گلابی با استفاده از روش غوطه‌وری اندازه‌گیری شد. در این روش ابتدا جرم نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال (AND GF-600 ساخت ژاپن) با دقت اندازه‌گیری  $\pm 0/003 \text{ g}$  و قدرت تشخیص  $0/001 \text{ g}$  (۱ میلی‌گرم) اندازه‌گیری گردید. حجم نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس اندازه‌گیری شد (شکل ۲). برای این منظور، ظرف محتوی آب روی ترازو قرار داده شده و ترازو صفر گردید. سپس میوه

## جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح کیفی گلابی شاه‌میوه بر روی ویژگی‌های کیفی مخرب و غیرمخرب

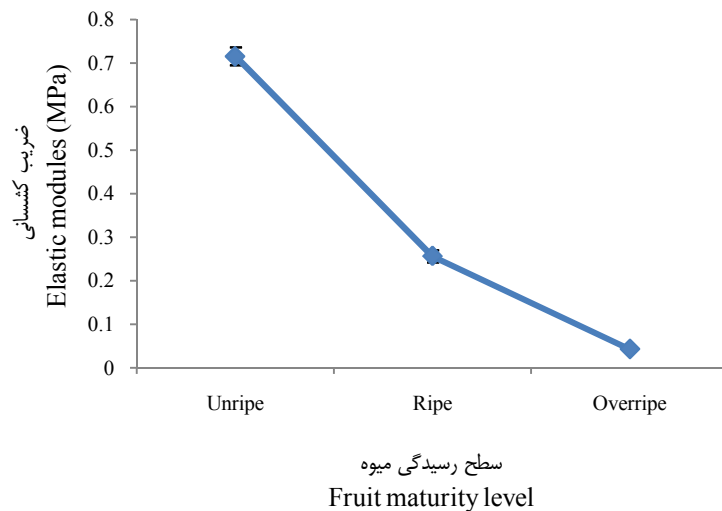
Table 1- Analysis of variance of the destructive and non-destructive quality parameters of pear fruit

منبع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square
سفتی Firmness	بین گروه‌ها (Between groups) 2	2946.087**
	درون گروه‌ها (Within groups) 27	4.420
ضریب کشسانی Modulus of elasticity	Between groups 2	1.182**
	Within groups 27	0.002
سرعت امواج فراصوت محاسبه‌ای Calculated ultrasonic wave velocity	Between groups 2	17729.222**
	Within groups 27	23.471
میزان مواد جامد محلول Total soluble solids	Between groups 2	0.021 <sup>ns</sup>
	Within groups 27	0.876
pH	Between groups 2	0.378**
	Within groups 27	0.066
میزان اسیدیتته Acidity content	Between groups 2	0.107**
	Within groups 27	0.002
میزان مواد خشک Total dry matters	Between groups 2	3.259 <sup>ns</sup>
	Within groups 27	3.515
سرعت امواج فراصوت عبوری Measured ultrasonic wave velocity	Between groups 2	27169.327**
	Within groups 27	387.319
ضریب تضعیف Ultrasonic wave attenuation	Between groups 2	2.841**
	Within groups 27	0.025

\* معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، <sup>ns</sup> غیر معنی‌دار\* Significant at 1% of probability levels, <sup>ns</sup> Non. Significant

شکل ۳- تغییرات سفتی در سطوح کیفی گلابی رقم شاه‌میوه

Fig.3. Effect of fruit maturity level on firmness



شکل ۴- تغییرات ضریب کشسانی در سطوح کیفی گلابی رقم شاه‌میوه  
 Fig.4. Effect of maturity level on pear fruit elasticity modulus

عنوان شاخصی کیفی جهت تعیین بلوغ میوه استفاده نشده است.

#### شاخص‌های فراصوتی

بررسی نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های شاخص‌های فراصوتی (جدول ۱) نشان داد که اثر سطح کیفی میوه روی سرعت امواج فراصوت عبوری از میوه و ضریب تضعیف در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است.

میانگین سرعت امواج فراصوتی در میوه‌ی نارس حدود  $201 \text{ m s}^{-1}$  می‌باشد که به حدود  $100 \text{ m s}^{-1}$  در میوه‌ی بیش‌رس کاهش یافته است. همچنین میانگین ضریب تضعیف در میوه نارس حدود  $1/14 \text{ dB mm}^{-1}$  می‌باشد که در میوه بیش‌رس به  $1/14 \text{ dB mm}^{-1}$  رسیده است. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است با افزایش میزان رسیدگی میوه سرعت امواج فراصوتی افزایش و ضریب تضعیف کاهش می‌یابد. همچنین آزمون FFT<sup>۱</sup> (تبدیل حوزه زمان به بسامد) انجام شده روی سیگنال‌ها در شکل ۷ آورده شده است که در آن تغییر دامنه سیگنال‌ها نشان داده شده است. این نتایج منطبق با تحقیقات سایر محققان در این زمینه می‌باشد (Kim *et al.*, 2009; Zaki Dizaji *et al.*, 2009). همان‌طور که در رابطه (۴) (ارتباط بین سرعت و ضریب کشسانی) نشان داده شده است با توجه به اینکه چگالی در سه حالت کیفیت تغییر چندانی نکرده است، کاهش سرعت امواج فراصوت ناشی از کاهش ضریب کشسانی است که در اثر نرم‌شدن بافت به‌وجود آمده است. همچنین هوا تضعیف‌کننده شدید امواج فراصوتی است و میزان هوای بین سلولی با تغییر شرایط

بر اساس این نتیجه، سفتی بافت میوه شاخص مهمی در تعیین بلوغ تجاری میوه گلابی رقم شاه‌میوه است. این نتیجه منطبق با نتایج تحقیقات پیشین در رابطه با اهمیت سفتی بافت میوه در تعیین بلوغ تجاری میوه گلابی است. با پیشرفت رسیدگی، بلوغ و پیری میوه و فعالیت آنزیم‌های فیدرولیزکننده و تأثیر آن‌ها روی پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی، انسجام دیواره سلولی از بین رفته و سبب کاهش سفتی بافت میوه می‌شود و از این طریق زمینه مساعد را برای بروز انواع نابسامانی‌های فیزیولوژیکی به‌ویژه قهوه‌ای شدن داخلی و حمله عوامل بیماری‌زا به‌خصوص قارچ‌ها را فراهم می‌آورد (Chen *et al.*, 2006; Galvis-Sanchez *et al.*, 2004; Hernandez-Sanchez *et al.*, 2007; Pinto *et al.*, 2001). مطابق شکل ۴ ضریب کشسانی نیز با افزایش میزان رسیدگی کاهش می‌یابد. بر اساس رابطه (۴) کاهش ضریب کشسانی در حقیقت بیانگر کاهش سفتی و افزایش میزان جابه‌جایی است.

بررسی نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطح کیفی میوه روی درصد مواد جامد محلول معنی‌دار نیست (جدول ۱). در حقیقت تغییرات شاخص مواد جامد محلول بطئی و کند است و به‌همین دلیل درصد مواد جامد محلول به‌عنوان شاخص معتبری برای تعیین بلوغ تجاری میوه گلابی استفاده نمی‌شود. اگرچه تحقیقات پینتو و همکاران (۲۰۱۱) روی گلابی نشان داد که این متغیر و روند تغییرات آن به‌علاوه دو شاخص سفتی و میزان اسیدیته میوه به‌عنوان شاخص‌های تعیین بلوغ تجاری میوه می‌توانند به‌طور غیرمستقیم در تعیین میزان حساسیت میوه گلابی به قهوه‌ای شدن نقش داشته باشند. از طرفی اثر سطح کیفی میوه روی درصد ماده خشک نیز غیرمعنی‌دار است. میزان این متغیر در سه حالت کیفیت تقریباً ثابت است. در هیچ یک از مقالات مورد بررسی از درصد ماده خشک به

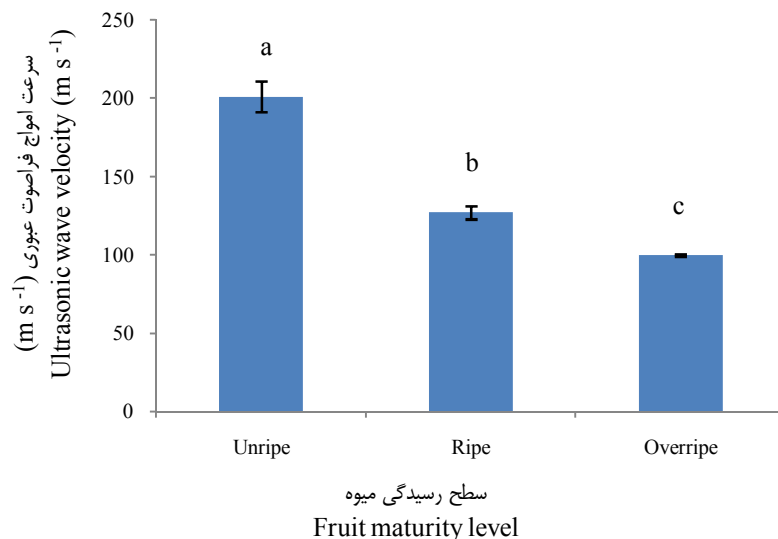
1- Fast fourier transform

بین عامل مخرب یعنی سفتی بافت میوه و پارامترهای غیرمخرب می‌توان کیفیت میوه گلابی را به صورت غیر مخرب و با استفاده از امواج فراصوتی پیش‌بینی کرد. شکل ۸ رابطه‌ی بین متغیر مکانیکی یعنی سفتی بافت میوه و سرعت امواج فراصوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است رابطه‌ی خطی بین سفتی و سرعت امواج فراصوتی وجود دارد و با افزایش میزان سفتی میوه، سرعت امواج فراصوتی افزایش می‌یابد ( $R^2 = 0/81$ ).

رسیدگی میوه تغییر کرده و با رسیده‌تر شدن میوه، میزان آن افزایش می‌یابد. تغییر ضریب تضعیف نیز ناشی از تغییر هوای بین سلولی است که با رسیده‌تر شدن میوه، افزایش می‌یابد (Camarena and Martinez-Mora, 2006).

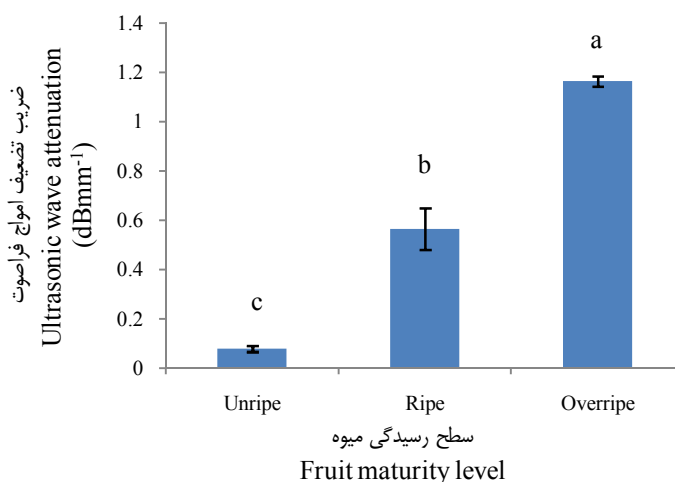
### ارتباط بین خواص مکانیکی و خواص فراصوتی

از آنجایی که با تغییر سطح کیفی میوه، سفتی بافت میوه، سرعت امواج فراصوت و ضریب تضعیف تغییر می‌کنند، با بررسی همبستگی



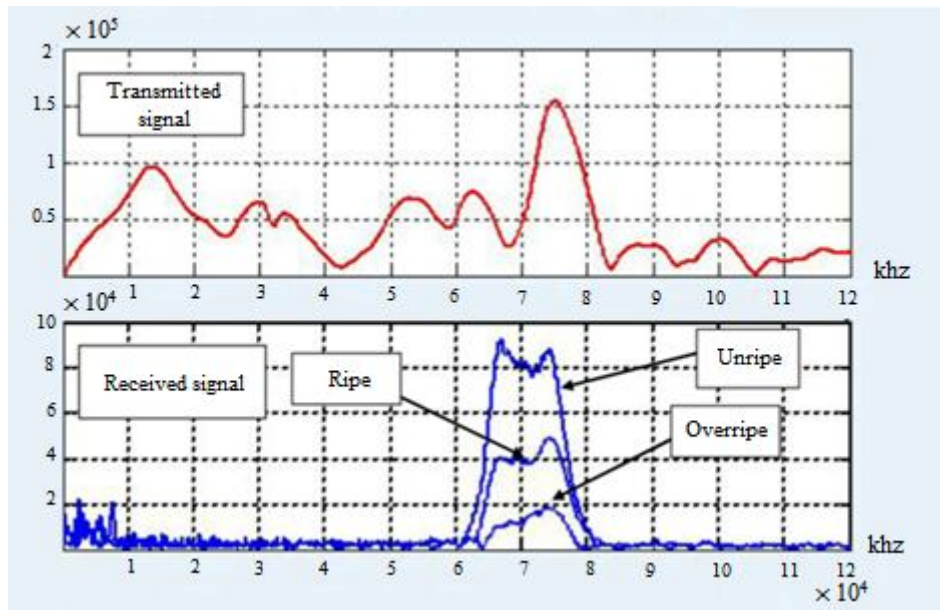
شکل ۵- تغییرات سرعت امواج فراصوت عبوری در سطوح کیفی گلابی رقم شاه‌میوه

Fig.5. Effect of maturity level on ultrasonic wave velocity

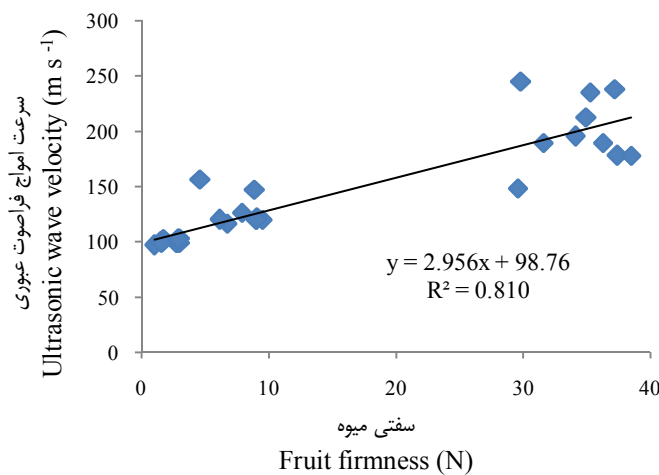


شکل ۶- تغییرات ضریب تضعیف در سطوح کیفی گلابی رقم شاه‌میوه

Fig.6. Effect of maturity level on ultrasonic wave attenuation



شکل ۷- آزمون FFT روی سیگنال‌ها در شرایط کیفی مختلف  
**Fig.7.** FFT results of typical transmitted and received signals of pear fruit

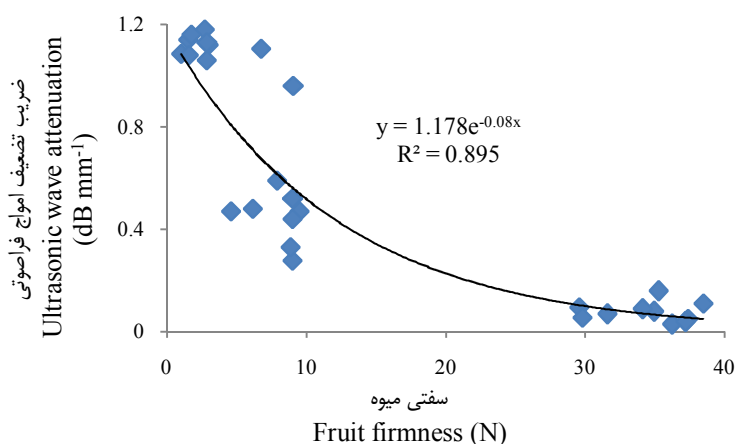


شکل ۸- رابطه‌ی بین سفتی و سرعت امواج فراصوتی در گلابی شاه‌میوه در شرایط کیفی مختلف  
**Fig.8.** Relationship between firmness and ultrasonic wave velocity in pear fruit (ShahMiveh)

فراصوت ( $R^2=0/۸۶$ ) و ضریب کشسانی با ضریب تضعیف ( $R^2=0/۸۳۵$ ) وجود دارد. مطابق شکل‌ها و همان‌گونه که براساس رابطه (۴) انتظار می‌رفت با افزایش ضریب کشسانی، سرعت امواج فراصوتی افزایش یافته است. همچنین با افزایش ضریب کشسانی، ضریب تضعیف به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد که با نتایج سایر محققین مطابقت دارد (Kim *et al.*, 2009).

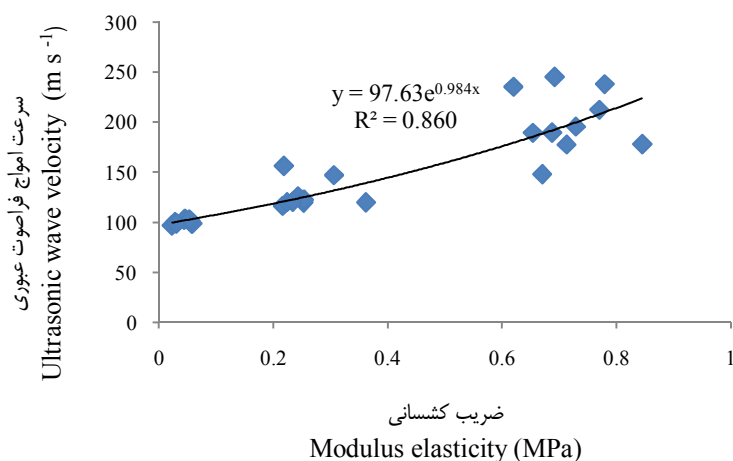
در شکل ۹ رابطه بین ضریب تضعیف و سفتی نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که همبستگی منفی بین سفتی و ضریب تضعیف وجود دارد ( $R^2=0/۸۹۵$ ) و با افزایش میزان رسیدگی یعنی کاهش سفتی، ضریب تضعیف به‌صورت نمایی افزایش یافت. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رابطه‌ی بین پارامترهای فراصوتی (سرعت امواج فراصوتی و ضریب تضعیف) و ضریب کشسانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است، در هر دو نمودار مناسب‌ترین مدل آماری بر اساس ضریب همبستگی، مدل نمایی است و همبستگی خوبی بین ضریب کشسانی با سرعت امواج





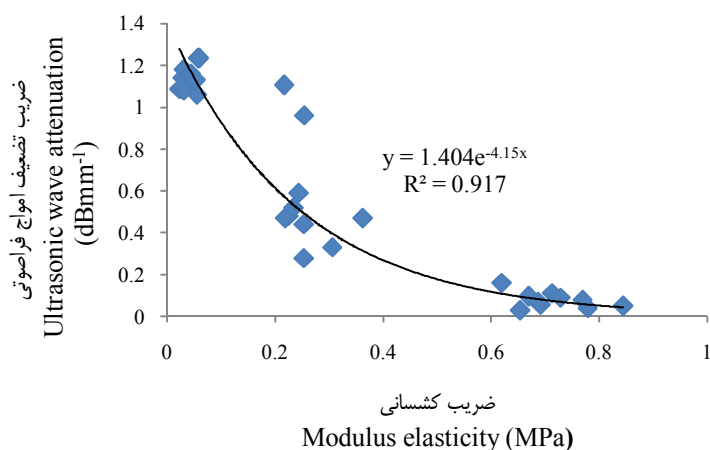
شکل ۹- رابطه‌ی بین سفتی و ضرب تضعیف در گلابی شاه‌میوه در شرایط کیفی مختلف

Fig.9. Relationship between firmness and ultrasonic wave attenuation in pear fruit (ShahMiveh)



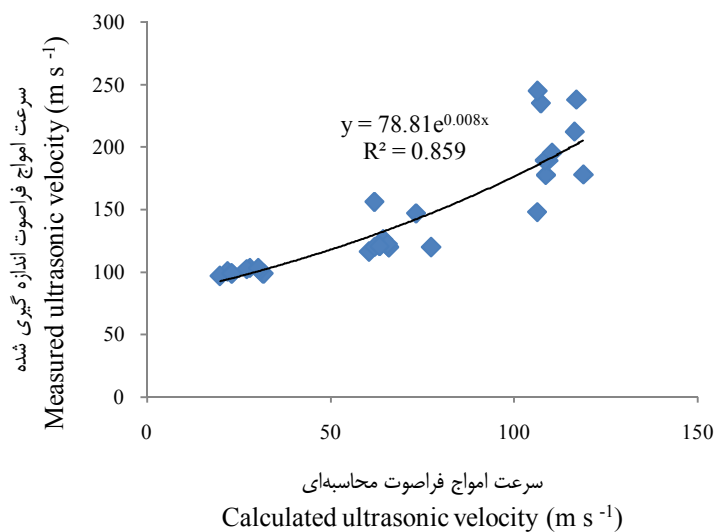
شکل ۱۰- رابطه‌ی بین ضریب کشسانی و سرعت امواج فراصوتی در میوه‌ی گلابی رقم شاه‌میوه در شرایط کیفی مختلف

Fig.10. Relationship between modulus elasticity and ultrasonic wave velocity in pear fruit (ShahMiveh)



شکل ۱۱- رابطه‌ی بین ضریب کشسانی و سرعت امواج فراصوتی در میوه‌ی گلابی رقم شاه‌میوه در شرایط کیفی مختلف

Fig.11. Relationship between modulus elasticity and ultrasonic wave attenuation in pear fruit (ShahMiveh)



**شکل ۱۲-** ارتباط بین سرعت امواج فراصوت محاسبه‌ای و سرعت اندازه‌گیری شده  
**Fig.12.** Relationship between measured and calculated velocity of ultrasonic waves

فراصوتی و سفتی وجود دارد و از سرعت امواج فراصوتی می‌توان برای تعیین میزان سفتی استفاده کرد. همچنین مشخص شد که بین ضریب تضعیف و سفتی همبستگی منفی وجود دارد و با افزایش میزان رسیدگی یعنی کاهش سفتی، ضریب تضعیف به‌صورت نمایی افزایش یافت.

با بررسی همبستگی بین ضریب کشسانی و پارامترهای غیرمخرب مشخص شد، مناسب‌ترین مدل آماری بر اساس ضریب همبستگی، مدل نمایی بوده و همبستگی خوبی بین ضریب کشسانی با سرعت امواج فراصوت ( $R^2=0/۸۶$ ) و ضریب کشسانی با ضریب تضعیف ( $R^2=0/۸۳۵$ ) به‌دست آمد.

نتایج نشان داد که سرعت امواج فراصوتی به‌دست آمده در آزمایش از سرعت امواج فراصوتی محاسبه‌شده با روابط تئوری، بزرگ‌تر است و همبستگی خوبی بین این دو پارامتر وجود داشت.

شکل ۱۲ ارتباط بین سرعت امواج فراصوت عبوری و محاسبه‌ای (بر اساس رابطه‌ی (۱)) را نشان می‌دهد. بهترین رابطه بین این دو پارامتر، رابطه نمایی است ( $R^2=0/۸۶$ ). مشاهده می‌شود که سرعت امواج عبوری نسبت به سرعت امواج محاسبه‌ای بیشتر است که علت این امر می‌تواند ساختار پیچیده محصول باشد. یعنی علاوه بر پارامترهای موجود در رابطه‌ی (۴) عوامل دیگری نیز مؤثرند که نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

### نتیجه‌گیری

آزمون غیر مخرب فراصوتی نشان داد که با افزایش میزان رسیدگی میوه سرعت امواج فراصوتی افزایش و ضریب تضعیف کاهش یافت.

با بررسی همبستگی بین عامل مخرب یعنی سفتی و پارامترهای غیرمخرب مشخص شد که رابطه‌ای خطی بین سرعت امواج

### منابع

- Abbott, J. A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 15: 207-225.
- Abolghasemi, R., B. Emadi, M. H. Aghkhani, and S. H. Beiraghi Toosi. 2009. Determination of peach maturity using ultrasonic waves. *Journal of Food Science and Technology Research* 5: 63-74.
- ASAE, Standards. 2002. American Society of Agricultural Engineers, S 352-2.
- Camarena, F., and J. A. Martinez-Mora. 2006. Potential of ultrasound to evaluate turgidity and hydration of the orange peel. *Journal of Food Engineering* 75: 503-507.
- Cartz, L. 1995. Non destructive testing, radiography, ultrasonic's, liquid Penetrate, magnetic particle, eddy current. ASM International. USA. pp 229.

6. Chen, H. C., X. D. Chen, and Q. P. Lu. 2006. BP-ANN application to the model establishment of determination wheat protein using near infrared spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series*, 48: 29-35.
7. Chivers, R. C., H. Russell, and L.W. Anson. 1995. Ultrasonic studies of preserved peaches. *Ultrasonics* 33: 75-77.
8. Duprat, F., M. Grotte, E. Pietri, and D. Loonis. 1997. The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66: 251-259.
9. Flitsanov, U., A. Mizrach, A. Liberzon, M. Akerman, and G. Zauberman. 2000. Measurement of avocado softening at various temperatures using ultrasound. *Postharvest Biology and Technology* 20: 279-286.
10. Gaete-Garretton, L., Y. Vargas-Hernandez, C. Leon-Vidal, and A. Pettorino-Besnier. 2005. A novel noninvasive ultrasonic method to assess avocado ripening. *Journal of Food Science* 70: 187-191.
11. Galvis-Sanchez, A. C., S. C. Fonseca, A. M. M. B. Morais, and F. X. Malcata. 2004. Effects of preharvest, harvest and postharvest factors on the quality of pear (cv. Rocha) stored under controlled atmosphere conditions. *Journal of Food Engineering* 64: 161-172.
12. Hedrick, W. H., D. L. Heykes, and D. E. Starchman. 2005. *Ultrasound physics and instrumentation*. 4<sup>th</sup> Edition, Elsevier Mosby, Philadelphia, USA. pp 445.
13. Hernandez-Sanchez, N., B. P. Hills, P. Barreiro, and N. Marigheto. 2007. An NMR study on internal browning in pears. *Postharvest Biology and Technology* 44: 260-270.
14. Kim, K. B., S. Lee, M. S. Kim, and B. K. Cho. 2009. Determination of apple firmness by nondestructive ultrasonic measurement. *Postharvest Biology and Technology* 52: 44-48.
15. Meamar Dastjerdi, R., S. Minaei, and M. H. Khoshtaghaza. 2012. Design, fabrication and testing of exponential horn for measuring ultrasonic attributes of agricultural products. *Journal of Agricultural Machinery* 2: 74-83. (In Farsi).
16. Mizrach, A., U. Flitsanov, R. El-Batsri, and C. Degani. 1999. Determination of avocado maturity by ultrasonic attenuation measurements. *Scientia Horticulturae* 80: 173-180.
17. Mizrach, A., U. Flitsanov, M. Akerman, and G. Zauberman. 2000. Monitoring avocado softening in low-temperature storage using ultrasonic measurements. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 199-207.
18. Mohsenin, N. N. 1978. *Physical properties of plant and animal materials*. 1<sup>st</sup> ed. Gordon and Breach, New York, USA.
19. Paz, P., M. T. Sanchez, D. Perez-Martin, J. Emilio, and A. Garrido-Varo. 2009. Instantaneous quantitative and qualitative assessment of pear quality using near infrared spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture* 69: 24-32.
20. Pinto, E., I. Lentheric, J. Puy, and C. Larrigaudiere. 2001. Relationship between quality parameters and internal disorders in pear by means of multivariate analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 4: 95-108.
21. Rose, J. L. 2004. *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge university press. Cambridge. UK. pp 454.
22. Schmerr, Jr., and W. Lester. 1998. *Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation, a modeling approach*. 2<sup>th</sup> Edition, Plenum Press, New York and London.
23. Schotte, S., N. D. Belie, and J. D. Baerdemaeker. 1999. Acoustic impulse-response technique for evaluation and modeling of firmness of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology* 17: 105-115.
24. Shewfelt, R. L., and B. Bruckner. 2000. *Fruit and vegetables quality: an integrated view*. Technomic Publication, Lancaster, Pansylvania.
25. Zaki Dizaji, H., S. Minaei, M. Mokhtary, and T. Tavakkoli Hashjin. 2009. Development of an ultrasonic device for investigation of agricultural product quality. 6<sup>th</sup> International Postharvest Symposium. Antalya. Turkey.