

بررسی سنجش کیفیت میوه‌ی انار با آزمایش پوست آن به روش فراصوت عبوری

حسن ذکی دیزجی^{۱*}، سعید مینایی^۲، تیمور توکلی هاشجین^۳ و منیژه مختاری دیزجی^۴

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه شهید چمران اهواز،

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس

۴- استاد گروه فیزیک پزشکی دانشگاه تربیت مدرس

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۳۰	<p>پایش کیفیت محصولات کشاورزی مانند میوه‌ها و سبزی‌ها نقش اساسی در تجارت رقابتی و کشاورزی مدرن دارد. کاهش کیفیت انار در اثر اختلال فیزیولوژیکی به صورت پلاسیدگی و نرم شدن پوست ظاهر می‌گردد. در این مقاله کیفیت میوه انار در چهار سطح کیفی تعریف شده (نارس، رسیده، بیش‌رس و فاسد) با روش فراصوت عبوری و نیز روش بارگذاری نفوذی (مگنس-تیلور) ارزیابی شد. نمونه‌هایی از کل میوه‌ی انار، برشهای ۱ الی ۲ سانتی‌متری و پوست آن برای آزمایش تهیه شدند. نتایج بررسی سیگنالهای ارسالی و دریافتی نشان داد که به دلیل ناهمگونی بافت میوه‌ی انار، امواج به شدت تضعیف می‌شوند و پراکندگی داده‌ها زیاد است. ولی بخش همگون میوه یعنی پوست انار پاسخی بهتر و بدون پراکندگی ارائه می‌کند. نتایج آزمایش‌های اولیه نشان داد که میزان تضعیف امواج در نمونه‌های انار نسبت به سایر محصولات کشاورزی بالاتر بوده و سرعت عبور امواج کمتر از هوا و برخی محصولات کشاورزی و غذایی است. از میان شاخص‌های فراصوتی، دامنه‌ی تغییرات سرعت عبور امواج بیشتر بود و این شاخص برای سنجش کیفیت انار بکار گرفته شد. نتایج تحلیل داده‌ها حاکی از آن است که رابطه خوبی بین شاخص فراصوتی، سرعت عبور امواج و شاخص سفتی وجود دارد و روند تغییرات این شاخص‌ها نسبت به سطوح کیفی، یکسان است. مدل‌های آماری با ضریب همبستگی ۰/۸۳ برای تخمین عوامل مبین کیفیت میوه استخراج شد. بررسی تحلیل رگرسیونی نشان داد که می‌توان از شاخص‌های فراصوتی پوست انار برای بازرسی کیفیت انار با روش فراصوت استفاده کرد.</p>

* عهده‌دار مکاتبات

E-mail: hzakid@scu.ac.ir

مقدمه

دانستن کیفیت محصولات کشاورزی نه تنها از دیدگاه صادرات و منافع مصرف کنندگان داخلی اهمیت دارد، بلکه کمک بسیاری در کنترل و کاهش ضایعات پس از برداشت می‌نماید. در ایران تحقیقاتی در مورد به کارگیری امواج صوتی برای ارزیابی غیر مخرب کیفیت محصولات کشاورزی صورت گرفته، لیکن هیچ گزارشی درباره‌ی کیفیت سنجی فراصوتی محصولات کشاورزی منتشر نشده است. کیفیت سنجی غیر تهاجمی و غیر مخرب موضوع جدیدی در عملیات پس از برداشت است که به کمک آن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با روش‌های غیر مخرب به کیفیت ربط داده می‌شود. انتظار می‌رود که بتوان از تغییرات شاخص‌های فراصوتی محصول‌های کشاورزی با کیفیت گوناگون در درجه‌بندی، جداسازی و سایر عملیات پس از برداشت استفاده کرد.

انار خوراکی با نام علمی پونیکا گرانانوم^۱ به صورت درخت یا درختچه، جزو میوه‌های بومی ایران و مناطق مجاور آن (مناطق نیمه گرمسیری) می‌باشد. ایران بزرگ‌ترین تولید کننده و صادر کننده‌ی انار در جهان است (۱۰) و در تولید آن رقیب جدی ندارد. اما اغلب محصولات غذایی جدید استحصالی از انار توسعه صنعتی نیافته‌اند (۱۳). به دلیل بومی بودن و استفاده‌ی سنتی از آن، نسبت به سایر محصولات کشاورزی تحقیقات کمی در مورد انار شده است. شاید بهره‌گیری اندک از این گیاه و میوه‌ی آن در کشورهای اروپایی و آمریکایی دلیل اصلی کمی مطالعات و پژوهش‌ها است (۵). پژوهش‌هایی در مورد تغییر ویژگی‌های کیفی (۱۷) و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی انار (۴) در طول دوره انبارداری یا رسیدگی انجام شده است. انبارداری محصولات زراعی به مدت طولانی به منظور نگهداری، تکمیل دوره‌ی رسیدگی و توزیع برای فروش باعث

کاهش کیفیت محصول به صورت تغییر شرایط اولیه رطوبت و تازگی آنها می‌شود (۷). کاهش کیفیت انار در انبارداری طول مدت و یا انبارداری در دمای پایین‌تر از ۵ °C به صورت کاهش رطوبت، قهوه‌ای شدن (۲۵)، ایجاد فرورفتگی سطحی، افزایش قابلیت فاسد شدن آن در اثر عوامل شیمیایی است (۹). اختلال فیزیولوژیکی^۲ در طول مدت انبارداری، منجر به کاهش ارزش اقتصادی آن می‌شود. به طور معمول از روش‌های مکانیکی مانند آزمون‌های نفوذ (آزمایش مگس-تیلور، نیرو-جایجایی، برش چند تیغه‌ای کرامر و غیره) و روش چگالی^۳ برای اندازه‌گیری سفتی استفاده می‌شود که اغلب آنها مکانیکی، مخرب و زمان بر می‌باشند (۲).

در طی سال‌های اخیر در دنیا توجه بسیاری از پژوهشگران به تعیین کیفیت محصولات کشاورزی با روش‌های غیر مخربی معطوف شده است که محور اصلی تحقیقات پس از برداشت میوه‌ها و محصولات زراعی شده‌اند و حجم تحقیقات در این زمینه به صورت نمای رو به افزایش است (۶). هرچند تعاریف گسترده و متفاوتی از کیفیت محصولات کشاورزی ارائه می‌شود، اما به طور خلاصه می‌توان آن را "میزان تناسب و خوب بودن یک محصول برای استفاده خاص" تعریف کرد (۱). به کارگیری تکنیک فراصوت در تشخیص خواص محصولات کشاورزی مانند میوه‌ها و سبزی‌ها، فن‌آوری جدیدی است، اما اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی با مشکلاتی همراه بوده است (۲۰). در روش فراصوت میزان تغییر شاخص‌های فراصوتی مانند سرعت عبور امواج، کاهش انرژی یا دامنه، میزان انعکاس امواج و غیره در گذر یا انعکاس از مواد به کیفیت و یا چگونگی مواد ارتباط داده می‌شود.

در مورد بررسی کیفیت میوه‌ها و سبزی‌ها، پژوهشگران سامانه‌هایی با بسامد کم و دامنه‌ی تحریک بسیار قوی را پیشنهاد کرده‌اند و شاخص‌های فراصوتی

2- Physiological disorder
3- Specific gravity

1- Punica granatum L

و در فضای باز آزمایشگاه نگهداری می‌شدند. فواصل زمانی نگهداری نمونه‌ها برای سطوح نیم پلاسیده و پلاسیده در آزمایشگاه، حدود یک ماه بود. برای هر آزمایش ابتدا حجم میوه با روش جابجایی آب و وزن آن به وسیله ترازوی رقمی با دقت 0.01 g اندازه‌گیری شد؛ سپس آزمون نفوذ سنجی برای تعیین سفتی و در ادامه برای تعیین شاخص‌های فراصوتی پوست انار، آزمایش فراصوت انجام گرفت. با استفاده از ابزار برش ساخته شده، نمونه‌هایی به ضخامت 1 cm جهت آزمایش فراصوتی بخش داخلی انار تهیه شدند. همچنین ضخامت نمونه‌های تهیه شده از پوست انار (قرصی شکل به قطر 25 mm برابر با قطر تراگذرها) برای آزمایش فراصوت حدود 3 mm بود.

اندازه‌گیری سفتی

اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی پس از اندازه‌گیری ویژگی مکانیکی و سفتی انجام گرفت. تغییرات عامل سفتی در میوه‌ها و سبزی‌ها شاخص مکانیکی خوبی برای بیان وضعیت نمونه است (۱ و ۶). به منظور تعیین عامل سفتی، آزمون مکانیکی پانچ^۱ با شاخص استاندارد سفتی مگنس-تیلور^۲ بر روی نمونه انار کامل انجام پذیرفت. این آزمایش با استفاده از دستگاه آزمون مواد^۳، و ابزار بارگذاری مگنس-تیلور با نوک محدب به قطر 8 mm اجرا شد. ابزار بارگذاری مگنس-تیلور تا عمق 8 mm و با سرعت 10 mm.min^{-1} از دو نقطه‌ی مخالف هم در راستای قطر عرضی میوه انار نفوذ داده شد. با توجه به منحنی‌های "نیرو-تغییر شکل" بیشه مقدار نیرو تا عمق 8 mm به عنوان سفتی در نظر گرفته شد. محاسبه‌ی ضریب کشسانی با به کارگیری رابطه‌ی ۱ امکان‌پذیر است (۲۲).

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

که در آن:

1- Punch

2- Magness-Taylor

3- Hounsfield, H50 K-S, England

برخی محصولات زراعی مانند سیب‌زمینی (۸ و ۱۵) آوآکادو (۱۲ و ۲۴)، انبه (۱۴)، گوجه فرنگی (۱۸) سیب، هلو و گلابی (۱۶) و غیره را تعیین کردند (۲۱). همچنین در این پژوهش‌ها، روش‌ها و سامانه‌هایی با ویژگی‌های مختلفی برای کیفیت سنجی ارائه شده است، به طوری که محققانی گزارش داده‌اند که در سامانه‌های فراصوتی برای سنجش کیفیت از بسامد زیاد (0.5 MHz) و توان نسبتاً زیاد استفاده کرده‌اند (۱۶). در مورد اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی و تعیین کیفیت محصولات زراعی، در اکثر تحقیقات از سامانه‌هایی استفاده شده است که بر اساس روش عبوری کار می‌کنند (۱۹). اما در برخی پژوهش‌ها روش تپ-پژواک هم به کار برده شده است (۱۴). برخلاف تعداد مطالعات و پژوهش‌های انجام یافته در مورد به کارگیری روش فراصوت در کیفیت سنجی فراصوتی محصولات کشاورزی، کاربردهای تجاری کمی در این زمینه توسعه یافته است (۲).

در مقاله‌ی حاضر ضمن تعیین شاخص‌های فراصوتی بخش‌های مختلف میوه‌ی انار شامل بافت (بخش داخلی) و پوست، قابلیت به کارگیری فن فراصوت در کیفیت سنجی میوه‌ی انار بررسی می‌شود. در ادامه پژوهش، کیفیت سنجی انار با آزمون بارگذاری نفوذی و آزمون فراصوت عبوری انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها و روش آزمایش

بیست و پنج عدد میوه‌ی انار (نارس: پنج و رسیده: بیست عدد)، رقم ملس ساوه از باغات انار موسسه‌ی تحقیقات انار ساوه در سال ۱۳۸۶ دست چین گردید و بی‌درنگ به آزمایشگاه کنترل و سیستم‌های اندازه‌گیری انتقال داده شد. نمونه‌های نارس در نیمه‌ی دوم شهریورماه و نمونه‌های رسیده، در نیمه‌ی دوم مهرماه برداشت شده بودند. برای دسترسی به چهار سطح کیفی تعریف شده یعنی نارس، تازه و رسیده، بیش رس یا نیم پلاسیده و پلاسیده یا فاسد، نمونه‌ها درون کیسه‌ی نایلونی

ذکی دیزجی و همکاران: بررسی سنجش کیفیت میوه‌ی انار...

$E =$ ضریب کشسانی (MPa)	$\rho =$ جرم حجمی نمونه (kg.m^{-3})
$F =$ مقاومت نفوذی یا سفتی (N)	یکی دیگر از شاخص‌هایی که در حوزه‌ی زمان قابل
$D =$ جابجایی (mm)	استخراج از سیگنال‌ها است، مجذور ریشه‌ی دوم
$a =$ شعاع میله (mm)	(RMS) ^۳ است. در سیگنال‌های رقمی این شاخص طبق
$l =$ ضریب پواسون (بی بعد)	رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود (۱۵).

$$V_{rms} = \sqrt{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N V_{(t)}^2(t_k)} \quad (۵)$$

در این رابطه:

$$V_{(t)} = \text{دامنه‌ی سیگنال در لحظه‌ی } t \text{ (mV)}$$

$$t_k = \text{زمان } t_k \text{ (s)}$$

$$V_{rms} = \text{مجذور ریشه‌ی دوم سیگنال دریافتی (mV)}$$

k و $N =$ عدد ثابت

در این پژوهش، سامانه‌ی فراصوتی "کیفیت سنج فراصوتی" (UQS)^۴ و با برنامه‌ی رایانه‌ای تدوین شده (UQSS)^۵ برای ارسال امواج به نمونه و دریافت آن به کار گرفته شد (۲۷). بسامد مرکزی تراگذرهای فرستنده و گیرنده [تراگذر فرستنده باند باریک و گیرنده‌ی باند پهن] یکسان و محدود‌دهی دقیق آن 40 ± 1 kHz بود. در پژوهشی ویزگیها، اجزای متشکله و نحوه‌ی کارکرد سامانه‌ی بیان شده است (۲۶). شکل ۱ نحوه‌ی اندازه‌گیری زمان پرواز (TOF) و دامنه‌ی امواج ارسالی و دریافتی را نشان می‌دهد. محاسبه‌ی سرعت امواج به صورت خودکار و محاسبه‌ی ضریب تضعیف با اندازه‌گیری دامنه‌ی سیگنال و غیر خودکار انجام گرفت. نخست ضخامت نمونه به وسیله کولیس با دقت $0.2/0$ میلی‌متر اندازه‌گیری و به نرم افزار داده شد؛ سپس زمان گذر امواج از ضخامت نمونه (زمان پرواز) به میکروثانیه توسط نرم‌افزار سامانه اندازه‌گیری و همزمان سرعت امواج، محاسبه، نمایش و به فهرست آزمایش اضافه گردید. این عمل برای هر نمونه ۳۰ بار تکرار شد.

اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوت

سرعت عبور پرتو فراصوت از نمونه و ضریب تضعیف آن مهم‌ترین شاخص‌های فراصوتی در روش عبوری و در حوزه‌ی زمان و میرایی هستند. این شاخص‌ها با استفاده از روابط ۲ و ۳ قابل محاسبه می‌باشند (۲۳).

$$c = \frac{L}{TOF} \quad (۲)$$

$$\alpha_{dB} = -\frac{1}{L} \cdot 20 \log\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (۳)$$

که در آنها:

$$c = \text{سرعت امواج فراصوت (ms}^{-1}\text{)}$$

$$L = \text{ضخامت نمونه (m)}$$

$$TOF = \text{زمان پرواز (s)}$$

$$\alpha = \text{ضریب تضعیف (dBmm}^{-1}\text{)}$$

$$A = \text{دامنه‌ی سیگنال دریافتی (mV)}$$

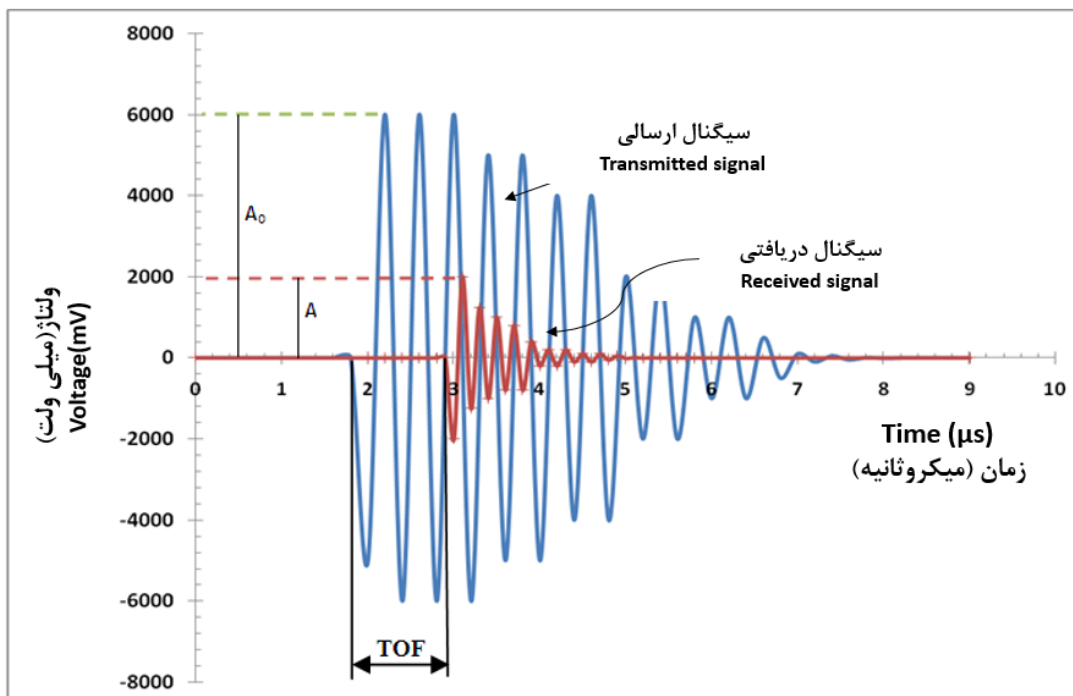
$$A_0 = \text{دامنه‌ی سیگنال ارسالی (mV)}$$

سرعت انتشار امواج بستگی به خواص کشسانی و جرم حجمی ماده‌ای دارد که در آن منتشر می‌شوند؛ اما تغییرات جرم حجمی برای هر ماده‌ای کمتر از تغییرات ضریب کشسانی است، پس سرعت فراصوت را می‌توان بر اساس ضریب کشسانی مواد به دست آورد (۱۱). با توجه به رابطه‌ی ۴ می‌توان سرعت عبور امواج طولی^۲ را با داشتن ضریب کشسانی یا مدول برشی، جرم حجمی و ضریب پواسون محاسبه کرد (۲۳).

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{(1-2\mu)(1+\mu)\rho}} \quad (۴)$$

3- The root mean square
4- Ultrasonic "Qualimeter" System
5- Ultrasonic "Qualimeter" System software
6- 400ET/R250 and 400EP250, China

1- Time of Flight
2- Pressure/ Compression/ Longitudinal wave



شکل (۱) نحوه‌ی اندازه‌گیری زمان پرواز و دامنه‌ی امواج تحریک و دریافتی
Figure (1) Metering methods of TOF and excited and received amplitude

تدوین شده توسط نرم افزار متلب^۲ با نام "نرم افزار سامانه‌ی کیفیت سنج فراصوتی" (UQSS) و نیز نرم افزار TNM استفاده شد. نرم افزارهای آماری SPSS 14 و Excel 2007 برای تجزیه‌ی واریانس داده‌ها (ANOVA)، مقایسه‌ی میانگین داده‌ها (به روش توکی^۳) و مدل سازی آماری به کار گرفته شدند. به منظور یکسان سازی و کاهش تعداد داده‌ها برای انجام تجزیه‌ی و تحلیل آماری از نرم افزار آنسکراملر^۴ استفاده شد.

شماتیک سامانه و نحوه‌ی قرار گرفتن نمونه در بین کاوشگرها در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به توانایی، سرعت نمونه برداری زیاد و دقت بالای نرم افزار TNM، نوسان‌نمای رقمی رایانه‌ای^۱، از این نرم افزار برای محاسبه دامنه‌ی سیگنال و بازبینی سیگنال‌ها استفاده شد. با توجه به نتایج پژوهش انجام یافته در مورد تاثیر عوامل اندازه گیری (۲۶)، آزمایش با شرایط زیر انجام گرفت: موج پوشگری شده، نیروی ۵N برای تماس نمونه با تراگذر، ژل فراصوت به عنوان ماده‌ی واسط، لایه تاخیر به ضخامت حدود ۹ mm از جنس پلی کربنات، و بهره‌ی حدود ۷۰۰۰ انجام شد.

تحلیل داده‌ها

همان گونه که اشاره شد، برای پردازش سیگنال‌ها و اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی از برنامه‌ی رایانه‌ای

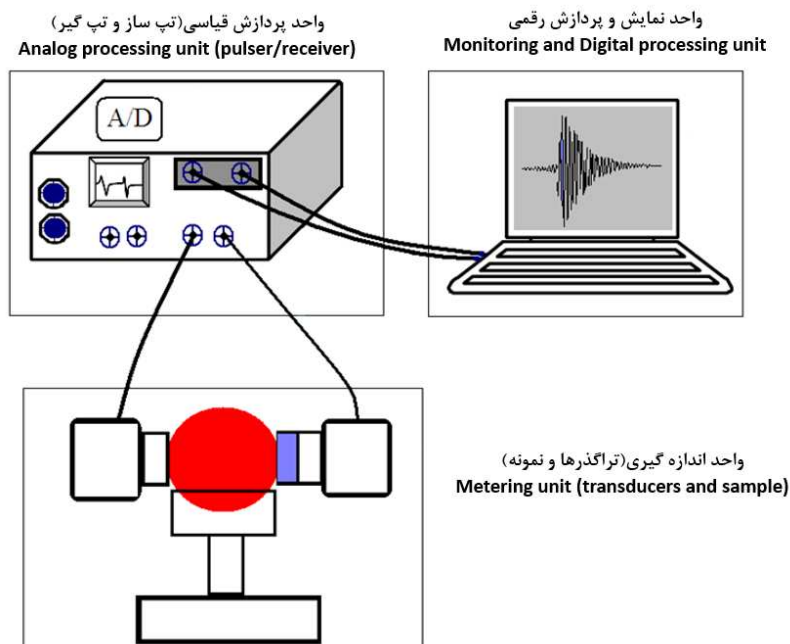
2- MATLAB 2006a

3- Tukey

4- The Unscrambler S, V 9.7

1- TNM Co, Ds20060, Korea

ذکی دیزجی و همکاران: بررسی سنجش کیفیت میوه‌ی انار...



شکل (۲) شماتیک سامانه‌ی کیفیت سنج فراصوتی
Figure (2) Schematic structure of ultrasonic qualimeter system

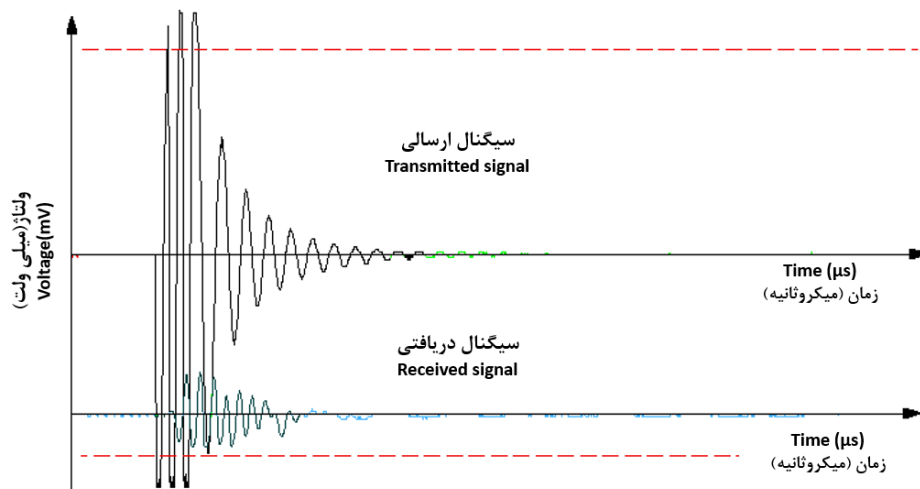
داد که میزان ضریب تضعیف پوست انار در مقایسه با سایر محصولات کشاورزی مانند سیب زمینی (0.75 dBmm^{-1}) زیاد است (۱۵). با توجه به جدول ۱ محدوده تغییرات ضریب تضعیف پوست انار ($1/1-4/4 \text{ dBmm}^{-1}$) تقریباً شبیه به پوست پرتغال ($1/3-4/3 \text{ dBmm}^{-1}$) است (۷).

دلیل انتخاب دو سطح کیفی رسیده و فاسد، تعیین محدوده‌ی تغییرات شاخص‌های فراصوتی است. تغییرات کیفی درون میوه در مراحل قبل و بعد از برداشت بر پوست آن نیز اثر می‌گذارد (۲۵). علت میرایی زیاد پوست آن است که پوست انار خلل و فرج زیادی دارد (۳) و شبیه به اسفنج است. این خلل و فرج به مثابه‌ی تله برای امواج فراصوتی عمل کرده و آنها را میرا می‌کند. در میان شاخص‌های فراصوتی پوست انار، میزان تغییر سرعت عبور امواج بیش از سایر شاخص‌ها است. مطابق جدول ۱ تغییرات سرعت عبور امواج از پوست انار وابسته به وضع کیفی میوه در محدوده‌ی 60 m.s^{-1} است.

نتایج و بحث

تعیین شاخص‌های فراصوتی بافت و پوست انار
به منظور بررسی اثر بافت میوه بر شاخص‌های فراصوتی و تعیین حدود تغییرات آن آزمایش‌هایی روی قسمت‌های مختلف میوه‌ی انار انجام گرفت. همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل غیرهمگن و غیرمتجانس بودن بافت انار، امواج دریافتی از بافت درونی بسیار ضعیف بود. بررسی سیگنال‌های دریافتی از نمونه‌های پریده شده (قطعات ۱ الی ۲ سانتی متری) از بافت انار نشان داد که ناهمگنی بافت (به علت وجود پرده‌های درون نمونه و نحوه‌ی قرارگیری دانه‌ها) باعث میرایی امواج و تغییرات شدید شاخص‌های فراصوتی می‌شود. شکل ۳ نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافتی و ارسالی آزمایش بافت انار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دامنه‌ی سیگنال دریافتی نسبت به سیگنال ارسالی بسیار کمتر و سریع میرا شده است.

جدول ۱ شاخص‌های فراصوتی پوست انار را در دو سطح کیفی رسیده و فاسد و بافت میوه‌ی انار را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل سیگنال‌های دریافتی از پوست انار نشان



شکل (۳) نمونه سیگنالهای ارسالی و دریافتی برای بافت انار
Figure (3) Sample of transmitted and received signals of pomegranate tissue

جدول (۱) تغییرات شاخص‌های فراصوتی اجزای میوهی انار

Table (1) Variation of ultrasonic indices in pomegranate tissue parts

$(mV) V_{RMS}$	ضریب تضعیف $(dBmm^{-1})$ Attenuation coefficient $(dBmm^{-1})$	سرعت امواج عبوری (ms^{-1}) Transmitted wave velocity (ms^{-1})	میانگین (انحراف معیار) Mean (S.D.)	بافت داخلی (Inner tissue)
518.25(12.48)	1.05(0.001)	190.9(10.56)	بیشینه - کمینه (Max. - Min.)	پوست میوهی رسیده (Ripe fruit peel)
534-509	1.06-1.05	204.8-183.69	میانگین (انحراف معیار) Mean (S.D.)	
406.67(3.21)	3.11(0.005)	300.37(23.58)	بیشینه - کمینه (Max. - Min.)	پوست میوهی فاسد (Decayed fruit peel)
409-403	3.12-3.11	458.3-210.7	میانگین (انحراف معیار) Mean (S.D.)	
449.4(13.52)	4.39(0.004)	60.84(17.44)	بیشینه - کمینه (Max. - Min.)	
472-436	4.45-4.37	81.21-39.77		

بعضی پژوهش‌ها شاخص میزان تضعیف امواج عبوری برای بررسی ویژگی‌های کیفی ترجیح داده شده است (۱۷) و در بعضی دیگر به کارآمد بودن شاخص سرعت امواج اشاره گردیده است (۲۴) در برخی پژوهش‌ها از

انتخاب شاخص فراصوتی مناسب برای کیفیت سنجی

به منظور کیفیت سنجی انار باید شاخص فراصوتی مناسبی انتخاب شود. بررسی منابع نشان می‌دهد که در

گوجه‌فرنگی (۱۸) و آوآکادو (۱۹) همخوانی دارد و دلیل آن نرم شدن پوست میوه با گذشت زمان انبارداری است؛ اما تحذب و تقعر منحنی سفتی - زمان انبارداری (یا کیفیت) برای محصولات مختلف طبق پژوهش‌های پیشین، متفاوت است. شکل تغییرات منحنی سفتی پوست انار مشابه میوه آوآکادو (۱۹) و برعکس گوجه‌فرنگی (۱۸) می‌باشد. بر اساس رابطه‌ی ۱، کاهش ضریب کشسانی بیانگر کاهش سفتی و یا افزایش جابه‌جایی است. بنابراین تغییرات مشابه ضریب کشسانی و سفتی دور از انتظار نیست.

نتایج آزمون مقایسه میانگین نشان داد که میانگین عوامل جابجایی و سفتی متأثر از سطح کیفی فاسد، متفاوت از سایر سطوح کیفی است و در دو کلاس جداگانه قرار گرفته‌اند. این نتایج نشانگر آن است که در سطح کیفی فاسد، پوست انار بسیار نرم شده و موجب جابه‌جایی زیاد و میزان سفتی اندک شده است.

طبق جدول ۲ مشاهده می‌شود که سرعت امواج در میوه‌ی نارس حدود 290 ms^{-1} می‌باشد که به حدود 1 ms^{-1} در ۶۳ در میوه فاسد کاهش یافته است. به عبارت دیگر میزان تغییرات سرعت امواج فراصوت انار وابسته به شرایط کیفی برابر با 1 ms^{-1} ۲۳۰ می‌باشد. این مقدار برای هویج ۱۶۰ (۱۹)، پوست پرتغال ۱۱۰ (۷) و آوآکادو ۲۰۰ (۲۰) سیب زمینی 444 ms^{-1} (۱۵) است.

با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که روند تغییرات شاخص سرعت عبور امواج از پوست انار تقریباً مشابه تغییرات سفتی است؛ لذا می‌توان بیان کرد که مدل خوبی بین سفتی و سرعت عبوری امواج ایجاد کرد (شکل ۶) که در میان مدل‌های آماری، مدل چند جمله‌ای درجه دوم توانایی خوبی برای تخمین سفتی دارد. این امر در مورد سرعت عبوری امواج نیز صحت دارد (جدول ۴).

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که مقدار انحراف معیار سرعت امواج فراصوت (محاسبه‌ای و اندازه‌گیری شده) نسبت به سایر پارامترها، اندکی زیاد است.

هر دو شاخص استفاده شده است (۱۶ و ۱۵). علاوه بر نوع سامانه‌ی فراصوتی، به نظر می‌رسد که نمونه و شرایط آن هم تأثیر متفاوتی بر شاخص‌های فراصوتی دارد. در مورد انار مشاهده می‌شود که در میان شاخص‌های سرعت عبور امواج، ضریب تضعیف و RMS، میزان تغییرات سرعت عبور امواج نسبت به شرایط نمونه بیشتر است؛ همچنین در آزمایشی مشخص شد که تأثیرپذیری این شاخص نسبت به ضخامت نمونه کمتر از سایر شاخص‌ها است (۲۶)، هر چند انحراف معیار داده‌های سرعت عبور امواج بیشتر از سایر شاخص‌ها است. نتیجه می‌شود که برای انجام کیفیت سنجی انار به وسیله‌ی آزمایش پوست آن، شاخص سرعت امواج عبوری، شاخص مناسب‌تری نسبت به سایر شاخص‌های فراصوتی می‌باشد.

کیفیت سنجی انار

جدول ۲ میانگین، میزان انحراف معیار، کمینه و بیشینه‌ی متغیرهای وابسته را نشان می‌دهد. نتایج تجزیه‌ی واریانس داده‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که اثر سطوح کیفی بر تمامی عوامل وابسته در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است. عوامل به دست آمده از آزمون ماگنس تیلور شامل جابه‌جایی، سفتی و ضریب کشسانی است. از میان ویژگی‌های مکانیکی، عامل سفتی به عنوان شاخص کیفی آزمایش نفوذی و سرعت عبور امواج به عنوان شاخص کیفی روش فراصوت عبوری مطرح است. لازم به ذکر است که جرم حجمی میوه در سطح کیفی نارس و فاسد به ترتیب برابر با 966 kg.m^{-3} و 950 kg.m^{-3} بود. در دو سطح کیفی رسیده و بیش رس، جرم حجمی میوه‌ها تقریباً یکسان و برابر با 975 kg.m^{-3} بود. مشاهده می‌شود که تغییرات جرم حجمی نسبت به تغییرات کیفی، بسیار کم است. ضریب پواسون پوست انار 0.497 تقریباً برابر با ضریب پواسون سیب زمینی فرض شد (۲۲).

با بررسی اولیه‌ی داده‌ها مشخص می‌شود که با کاهش تازگی، سفتی کاهش می‌یابد (شکل ۴). این امر با یافته‌های پیشین در مورد سایر محصولات کشاورزی مانند

جدول (۲) میانگین شاخص‌های آماری آزمایش کیفیت سنجی انار

Table (2) Mean and standard deviation values of statistical indices in pomegranate quality metering

سرعت محاسبه‌ای امواج* (ms ⁻¹) Calculated wave velocity (ms ⁻¹)	سرعت امواج عبوری (ms ⁻¹) Transmitted wave velocity (ms ⁻¹)	ضریب کشسانی (MPa) Elastic coefficient (MPa)	سفتی (N) Firmness (N)	جابجایی (mm) Displacement (mm)	شاخص‌های آماری statistical indices	سطح کیفی (Quality level)
237.56(10.67)	290.89(19.64)	0.975(0.084)	70.84(10.05)	6.82(0.64)	میانگین (انحراف معیار) Mean (S.D.)	نارس (Unripe)
253.58-215.22	350.2-270.9	1.11-0.8	87.1-57.3	8-6.28	بیشینه - کمینه Max - Min	
237.87(21.28)	268.23(21.21)	0.99(0.17)	69.77(18.14)	6.58(1.06)	میانگین (انحراف معیار) Mean (S.D.)	رسیده (Ripe)
262.56-192.64	294.85-229.13	1.2-0.65	95.13-40.5	8-4.64	بیشینه - کمینه Max - Min	
219.35(24.37)	209.67(21.45)	0.84(0.18)	62.88(16.54)	6.94(0.54)	میانگین (انحراف معیار) Mean (S.D.)	بیش رسیده (Overripe)
257.89-190.2	231.67-162.39	1.16-0.63	94.3-44.5	7.84-6.28	بیشینه - کمینه Max - Min	
124.12(17.31)	63.4(19.79)	0.27(0.07)	22.6(6.13)	8(0)	میانگین (انحراف معیار) Mean (S.D.)	فاسد (Decayed)
146.63-98.54	88-38.03	0.36-0.16	31-14	8-8	بیشینه - کمینه Max - Min	

* با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده است.

نیز دخیل است (شکل ۷). در هنگام آزمایش مشاهده شد که در میوه‌های تازه، کشیدگی پوست بیشتر می‌باشد. از سوی دیگر در سطح فاسد، پوست انار خیلی نرم شده و نقطه گسیختگی مشخصی نداشت.

شدت کاهش سرعت امواج فراصوت در مرحله پس از برداشت (سطوح کیفی بیش رس و فاسد) بیشتر از مرحله‌ی پیش از برداشت (سطوح کیفی نارس و رسیده) است. شکل ۶ رابطه‌ی بین متغیر مکانیکی یعنی سفتی و شاخص فراصوت یعنی سرعت عبور امواج را نشان می‌دهد. پژوهش‌های پیشین بر وجود ارتباط قوی بین خواص مکانیکی و شاخص‌های فراصوتی اشاره داشتند (۱۹) اما همان‌طور که پیشتر بیان شد نوع شاخص فراصوت (سرعت امواج عبوری، ضریب تضعیف، نسبت انرژی و ...) وابسته به محصول کشاورزی متفاوت است.

این مطلب به معنی پراکندگی داده‌های سرعت عبوری امواج است. از سوی دیگر اختلاف بین سرعت امواج فراصوت محاسبه شده از رابطه ۴ با سرعت عبوری امواج اندازه‌گیری شده در سطح کیفی نارس و فاسد، بیشتر از سطوح کیفی رسیده و بیش رس است (شکل ۷).

علت این پدیده را می‌توان به این صورت بیان کرد که تغییرات شاخص‌های فراصوتی در انارهای دارای سطح کیفی یکسان، مربوط به تغییرات ویژگی‌های مکانیکی آن مانند سفتی است (طبق رابطه ۴). توضیح این که در بخش‌هایی که پوست انار که روی دانه قرار گرفته است، کمی سفت‌تر از پوست قسمت‌های بی‌دانه است. شاید این امر یکی از دلایل پراکندگی داده‌ها در نمونه‌ها دارای سطح کیفی یکسان باشد. همین مطلب در مورد تفاوت سرعت امواج محاسبه‌ای و اندازه‌گیری شده

ذکی دیزجی و همکاران: بررسی سنجش کیفیت میوه‌ی انار...

جدول (۳) نتایج تجزیه‌ی واریانس ANOVA

Table (3) Variance analysis of variables based on the result of ANOVA

F	میانگین مربعات (Mean squares)	درجه‌ی آزادی (Freedom degree)	مجموع مربعات Sum of (squares)	عوامل وابسته (Dependent parameters)
248.237**	104700.81	3	314102.4	بین گروه‌ها (Between groups)
	421.778	36	15184.01	درون گروه‌ها (Within groups)
		39	319284.4	مجموع (Total)
9.287**	3.937	3	11.811	بین گروه‌ها (Between groups)
	0.424	36	15.285	درون گروه‌ها (Within groups)
		39	27.068	مجموع (Total)
28.261**	5238.517	3	16715.55	بین گروه‌ها (Between groups)
	185.362	36	6673.033	درون گروه‌ها (Within groups)
		39	22388.58	مجموع (Total)
64.318**	1.171	3	3.514	بین گروه‌ها (Between groups)
	0.018	36	0.656	درون گروه‌ها (Within groups)
		39	4.169	مجموع (Total)
86.133**	29628.133	3	88884.7	بین گروه‌ها (Between groups)
	343.981	36	12383.3	درون گروه‌ها (Within groups)
		39	101268	مجموع (Total)

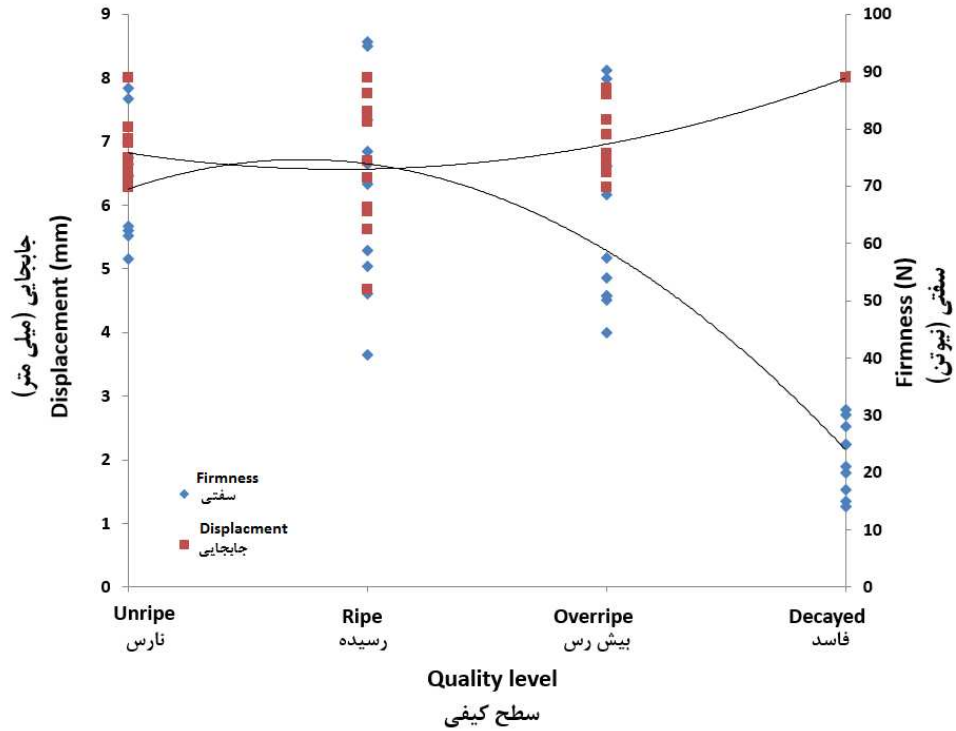
** معنی دار در سطح ۰/۰۱

$$y = mx^n \quad (۷)$$

که در آن x ، متغیر مستقل، y ، متغیر وابسته و n ، m و p ضرایب ثابت مدل (در مدل نمایی n توان متغیر است) می‌باشند (جدول ۴).

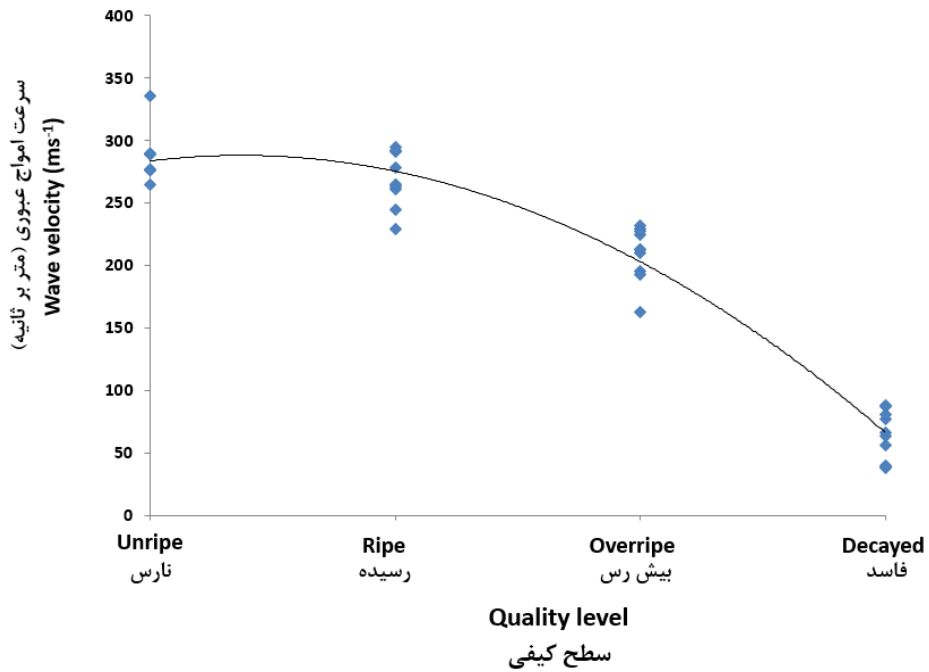
در این پژوهش مناسب‌ترین مدل آماری بر اساس ضریب همستگی بین سفتی و سرعت امواج عبوری، مدل‌های چند جمله‌ای درجه دو و توانی بود. رابطه ریاضی مدل رگرسیونی درجه ۲ و توانی به ترتیب به صورت رابطه‌های ۶ و ۷ است. مقادیر ضرایب مدل‌ها در جدول ۴ آمده است.

$$y = mx^2 + nx + p \quad (۶)$$



شکل (۴) تغییرات سفتی و جابجایی میوه انار در سطوح کیفی مختلف

Figure (4) Firmness and displacement mean value versus quality levels of pomegranate sample



شکل (۵) تغییرات سرعت عبور امواج پوست انار در سطوح کیفی مختلف

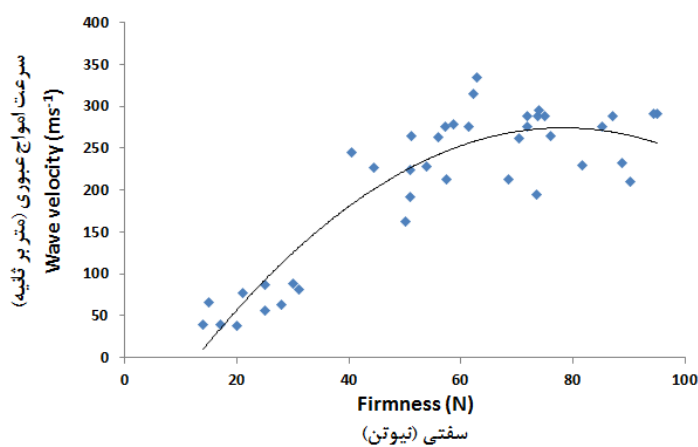
Figure (5) Average wave velocity through pomegranate peel versus quality levels

ذکی دیزجی و همکاران: بررسی سنجش کیفیت میوه‌ی انار...

جدول (۴) مشخصات مدل‌های رگرسیونی

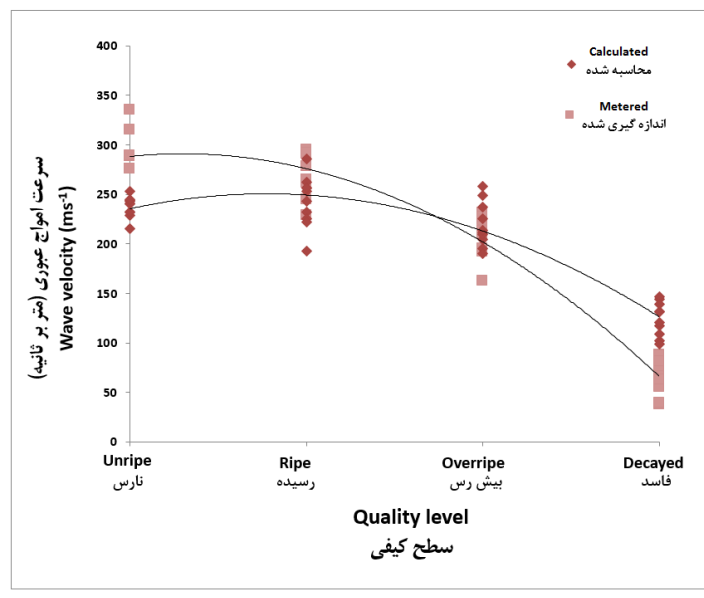
Table (4) Characteristics of regression models

R ²	p	n	m	نوع مدل Model type	x	y
0.949	227.3	88.31	- 32.17	درجه دو (Quadratic)	سطوح کیفی (quality levels)	سرعت امواج عبوری (Transmitted wave velocity) (velocity)
0.716	1.491	69.05	- 16.27	درجه دو توانی (Quadratic Power)	سطوح کیفی (quality levels)	سفتی (Firmness)
0.833	-	1.117	2.231		سفتی (Firmness)	سرعت امواج عبوری (Transmitted wave velocity) (velocity)
0.834	- 118.3	10.03	-0.64	درجه دو (Quadratic)	سفتی (Firmness)	سرعت امواج عبوری (Transmitted wave velocity) (velocity)



شکل (۶) ارتباط بین متغیرهای سفتی و سرعت امواج عبوری

Figure (6) Relationship between average wave velocity and firmness values



شکل (۷) تغییرات میانگین مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده‌ی سرعت عبور امواج

Figure (7) Relationship between average of calculated and metered wave velocity values

هرچند به منظور دستیابی به نتایج بهتر، آزمایش‌های بیشتری مورد نیاز است. به منظور کاربردی کردن این روش، تراگذرهای سامانه باید طوری اصلاح شوند که بتوانند پوست انار را روی میوه مورد آزمایش قرار دهند.

توصیه و پیشنهاد

پیشنهاد می‌شود که برای بالا بردن دقت اندازه‌گیری، بسامد کاری افزایش یابد. در اکثر منابع خارجی از بسامدهای زیر ۱۰۰ kHz استفاده شده است. با توجه به ضخامت کم پوست انار بهتر است بسامد بالاتر نیز بررسی شود؛ همچنین از متمرکز کننده‌های فراصوتی برای پایش سطحی استفاده گردد.

سپاس‌گزاری

از آقای مهندس طباطبایی رئیس ایستگاه تحقیقات کشاورزی ساوه برای در اختیار گذاردن نمونه‌های انار و از آقای دکتر مهدی سعادت‌مند برای یاری در برنامه‌نویسی تشکر می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با به کارگیری تکنیک فراصوت عبوری، چگونگی سنجش کیفیت میوه‌ی انار با آزمایش پوست آن بررسی شد.

بررسی محدوده‌ی تغییرات شاخص‌های فراصوتی میوه‌ی انار نشان داد که سرعت عبور امواج شاخص مناسبی برای ارزیابی کیفیت میوه‌ی انار است. سرعت عبور امواج از پوست میوه‌ی انار از حدود ۳۰۰ در شرایط کیفی نارس به 60 ms^{-1} در حالت فاسد، کاهش می‌یابد. از میان ویژگی‌های مکانیکی، عامل سفتی به عنوان شاخص کیفی آزمایش نفوذی و سرعت عبور امواج به عنوان شاخص کیفی روش فراصوت عبوری انتخاب شد. رابطه‌ی خوبی بین شاخص فراصوتی یعنی سرعت عبور امواج و شاخص مکانیکی یعنی سفتی وجود دارد. با تغییر کیفیت میوه، روند تغییرات شاخص‌های فراصوتی و مکانیکی تقریباً یکسان است. بنابراین می‌توان از شاخص فراصوتی پوست انار (سرعت امواج عبوری) برای تخمین سفتی و به تبع آن بازرسی کیفیت انار استفاده کرد؛

منابع

1. Abbott, J.A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15: 207-225.
2. Abbott, J.A., Lu, R., Upchurch, B.L., and Stroshine, R.L. 1997. Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables. *Horticulture Review*, 20: 1-120.
3. Alkahtani, H. A. 1992. Intercultivar differences in quality and postharvest life of pomegranate influenced by partial drying. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117: 100-104.
4. Al-Maiman S. A., and Ahmad D. 2002. Changes in physical and chemical properties during pomegranate (*Punica granatum L.*) fruit maturation. *Food Chemistry*, 76(4): 437-441.
5. Anonymous, 2002. Fruits and vegetables –pomegranate – storage in cooling room. Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). No. 6409 (in Persian).

6. Butz, P., Hofmann, C., and Tauscher, B. 2005. Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable quality analysis. *Journal of Food Science*, 70(9): 131-141.
7. Camarena, F., and Martinez-Mora, J.A. 2006. Potential of ultrasound to evaluate turgidity and hydration of the orange peel. *Journal of Food Engineering*, 75: 503–507.
8. Cheng, Y., and Haugh, C.G. 1994. Detecting Hollow Heart in Potatoes Using Ultrasound. *Transactions of the ASAE*, 37(1): 217-222.
9. Elyatem, S.M. and Kader A.A. 1984. Post-harvest physiology and storage behaviour of pomegranate fruits. *Scientia Horticulturae*, 24(3-4): 287-298.
10. FAO. 2005. Food and Agricultural Organization, <http://www.fao.org/es/ess/top/country>.
11. Gaonkar, A.G. 1995. Food processing recent developments. Elsevier Science. Amsterdam, Netherlands. PP 315.
12. Garretón, L.G., Hernández, Y.V., Vidal, C.L., and Besnier, A.P. 2005. A Novel noninvasive ultrasonic method to assess avocado ripening. *Journal of Food Science*, 70(3): 187-191.
13. Gosili, A., Ghasemkhani, S., and Mousapoor, S. 2006. Packing direction for pomegranate export. Trade Promotion Organization of Iran, cultivation and promotion office for packing affair (in Persian).
14. Hurng, H.Y., Lu, F.M., and Ay, C. 2007. Evaluating and modeling physiological tissue texture of mango immersed in water by using ultrasonics. *International Agricultural Engineering Journal*, 16(1-2): 1-13.
15. Jivanuwong, S. 1998. Nondestructive detection of hollow heart in potatoes using ultrasonics. M.Sc. Thesis in Biological Systems Engineering. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
16. Kim, K.B., Jung, H.M., Kim, M.S., Kim, G.S. 2004. Evaluation of fruit firmness by ultrasonic measurement. *Key Engineering Materials*. 270(273): 1049-1054.
17. María, I., Gil, M.I., Sánchez, R. Marín J.G. and Artés, F. 1996. Quality changes in pomegranates during ripening and cold storage. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A*, 22(6): 481-485.
18. Mizrach, A. 2007. Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. *Postharvest Biology and Technology*, 46: 271–274.
19. Mizrach, A. 2008. Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre and postharvest processes. *Postharvest Biology and Technology*, 48(3): 315-330
20. Mizrach, A., Galili, N., and Rosenhouse, G. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Transactions of the ASAE*. 32(6): 2053–2058.

21. Mizrach, A., Schmilovitch, Z., and Avidan, B. 2006. Maturity measurements of olive fruits using acoustic and compression methods. CIGR, World Congress, Agricultural Engineering for a Better World, Berlin, Germany.
22. Mohsenin, N.N. 1978. Physical properties of the plant and animal materials. 1st end. Gordon and Breach, New York, N. Y.
23. Rose, J.L. 2004. Ultrasonic waves in solid media. Cambridge university press. Cambridge. UK. Pp 454.
24. Self, G.K., Ordozgoiti, E., Povey, M.J.W., and Wainwright H. 1994 Ultrasonic evaluation of ripening avocado flesh. Postharvest Biology and Technology, 4: 111-116.
25. You-lin, Z., and Run-pang Z. 2008. Study on the mechanism of browning of pomegranate (*Punica granatum* L. cv. Ganesh) peel in different storage conditions. Agricultural Sciences in China, 7(1): 65-73.
26. Zaki Dizaji, H., Minaei, S., Tavakkoli Hashjin, T., and M. Mokhtari. 2009a. Development of an Ultrasonic System and Evaluation of Effective. Journal of Agricultural Engineering Research, 10 (1): 27-48. (in Persian with English abstract).
27. Zaki Dizaji, H., Minaei, S., Mokhtary, M., and Tavakkoli Hashtjin T. 2009b. Development of an ultrasonic device for investigation of agricultural product quality. 6th International Postharvest Symposium. Antalya. Turkey.