

Design, Fabrication and Test of Integrated Acoustic-Vibration Fruit Texture Analyzer

ZAHED FATHIZADEH¹, MOHAMMAD ABOONJAMI^{*1}, SEYED REZA HASSAN-BEYGI¹

1. Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: Sep. 3, 2019- Revised: Feb. 9, 2020- Accepted: Feb. 10, 2020)

ABSTRACT

Using the acoustic response analysis is one of the non-destructive methods to determine the texture quality and firmness of fruits such as apples, pears, peaches and other crops such as watermelon, melon and cantaloupe. In this study, a portable device designed and fabricated which has a pendulum to apply the computer-controlled impact to the sample, to investigate the non-destructive quality of apple fruit based on firmness. When pendulum hits the sample, both the acoustic and vibration sensors simultaneously receive the impact signals and after transferring to the computer, the fast Fourier transform will calculate their dominant frequency. The sample firmness index is calculated from the dominant frequency and weight. The dominant frequencies and firmness indices obtained by this device for apple fruit were correlated more than 92% and 93% with puncture firmness and elasticity module respectively, and were significant at 1% level. Experimental results showed that the vibration signals have better results for estimation of elasticity modulus (more than 96 % accuracy) and acoustic signals to estimate the firmness (accuracy of more than 95 %).

Keywords: Acoustic firmness test, Non-destructive test, Apple storage

طراحی، ساخت و آزمون دستگاه بافت سنج تلفیقی صوتی-ارتعاشی میوه‌ها

زاهد فتحی زاده^۱، محمد ابونجمی^{۱*}، سیدرضا حسن بیگی^۱

۱. گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۱۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱

چکیده

یکی از روش‌های غیرمخرب تعیین کیفیت بافت و سفتی میوه‌هایی مانند سیب، گلابی، هلو و محصولات جالیزی مانند هندوانه، خربزه و طالبی، استفاده از روش تحلیل پاسخ صوتی می‌باشد. در این پژوهش به منظور بررسی کیفیت غیرمخرب میوه سیب بر اساس سفتی، دستگاهی قابل حمل طراحی و ساخته شد که دارای یک آونگ برای اعمال ضربه قابل کنترل با رایانه به نمونه مورد آزمون می‌باشد. در هنگام وارد کردن ضربه دو حسگر صوتی و ارتعاشی همزمان سیگنال‌های ضربه را دریافت نموده و پس از انتقال به رایانه، با تبدیل فوریه سریع، بسامد غالب آنها بدست می‌آید. شاخص سفتی محصول از بسامد غالب و وزن میوه محاسبه می‌شود. بسامدهای غالب و شاخص‌های سفتی بدست آمده از این دستگاه برای میوه سیب با سفتی پانچ و ضریب کشسانی بدست آمده با روش مخرب به ترتیب بیش از ۹۲٪ و ۹۳٪ همبستگی داشته و در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که سیگنال‌های ارتعاشی برای تخمین ضریب کشسانی (دقت بیش از ۹۶٪) و سیگنال‌های صوتی برای تخمین سفتی بافت (دقت بیش از ۹۵٪) نتایج بهتری حاصل می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: سفتی سنج صوتی، آزمون غیرمخرب، انبارمانی سیب

مقدمه

یکی از شاخص‌های کلیدی ارزیابی بافت میوه‌ها سنجش میزان سفتی آن است. سنجش سفتی میوه‌ها در کنار سایر شاخص‌های کیفی مانند میزان قند، میزان نشاسته، محتوای جامد محلول و اسیدیته، یک روش ارزان و سریع برای سنجش کیفیت بافت آنها است. سفتی بافت محصولات کشاورزی باعث افزایش بازار پسندهی آنها می‌شود (Chen and Opara, 2013; Fathizadeh *et al.*, 2020). همچنین از میزان سفتی میوه در کنار روش‌های دیگر مانند اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، می‌توان به عنوان شاخصی برای میزان عمر انبارمانی استفاده کرد (Massah *et al.*, 2017). از آزمون سفتی می‌توان برای تعیین میزان رسیدگی میوه‌ها نیز استفاده کرد، هر چند تعیین رسیدگی به روش‌های دیگری نیز امکان‌پذیر است (Haiati *et al.*, 2018). آزمون سفتی به روش‌های مختلفی از جمله استفاده از دستگاه نفوذ سنج، آزمون پانچ و سفتی سنجی صوتی انجام می‌شود. در روش‌های نفوذسنجی میزان نیروی لازم برای نفوذ سنج^۱ دستگاه در عمق مشخص تعیین می‌شود و در روش آزمون پانچ نمودار زمان نیرو برای نفوذ سنج دستگاه در میوه رسم و نیروی بیشینه در نمودار به عنوان شاخص سفتی تعیین می‌شود. هر دوی این روش‌ها مخرب هستند و نمونه

پس از آزمایش تخریب شده و غیرقابل استفاده می‌شود. در روش‌های غیرمخرب، نمونه‌ها بدون تخریب کیفیت سنجی می‌شوند و می‌توان از آنها در خطوط درجه بندی برخط^۲ محصولات کشاورزی استفاده کرد. روش صوتی-ارتعاشی در کنار سایر روش‌های غیرمخرب مانند روش‌های نوری (Ahmadkhani *et al.*, 2015) یکی از روش‌های پرکاربرد و کم‌هزینه است. در ۳۰ سال اخیر روش‌های مبتنی بر پاسخ صوتی در مقالات زیادی معرفی و توضیح داده شده است.

برای نخستین بار در سال ۱۹۷۲ میلادی رفتار تشدید میوه‌ها در زمان تحریک صوتی بررسی و رابطه‌ای برای شاخص سفتی میوه‌های شبه‌کروی توسط کوک معرفی شد (Cooke, 1972). پس از آن در سال ۱۹۹۰ از روش ارتعاش صوتی برای تعیین سفتی میوه سیب استفاده شد (Armstrong *et al.*, 1990). در دهه ۱۹۹۰ مقالات زیادی در رابطه با تعیین خواص محصولات کشاورزی مانند سیب، گوجه‌فرنگی، شلیل، کیوی، آلو و زردآلو با روش‌های صوتی منتشر شد (Abbott *et al.*, 1992; Abbott and Massie, 1998; J. Abbott, 1994; H. Chen, 1993; H. Chen *et al.*, 1992; Duprat *et al.*, 1997; Huarng *et al.*, 1993; Muramatsu *et al.*, 1996a, 1996b; Schotte *et al.*, 1999). تحقیقات در زمینه استفاده از روش‌های صوتی و ارتعاشی برای

* نویسنده مسئول: abonajmi@ut.ac.ir

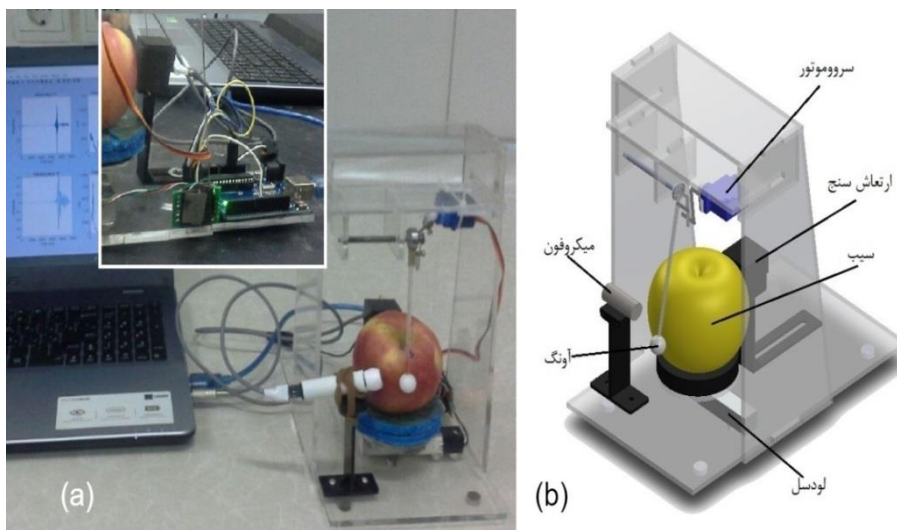
بنابراین طراحی و ساخت یک دستگاه خودکار که با دقت مناسب همه مراحل آزمایش را انجام داده، ضروری به نظر می رسد. هدف از این پژوهش طراحی یک دستگاه قابل حمل و خودکار است که علاوه بر انجام خودکار مراحل مختلف آزمایش، از دقت و سرعت بالایی برای ضبط و پردازش سیگنال های صوتی و ارتعاشی برخوردار باشد. در دستگاه طراحی شده موضوع این پژوهش، تحریک توسط ضربه آونگ و دریافت سیگنال توسط دو حسگر صوتی و ارتعاشی به صورت همزمان انجام می شود. مراحل تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و پردازش سیگنال که شامل برش سیگنال ها، تبدیل فوریه و محاسبه شاخص سفتی می شود همگی توسط رایانه رومیزی قابل حمل انجام می شود. این دستگاه قابل حمل بوده و نیازی به منبع تغذیه ندارد و تنها با اتصال به یک رایانه همه مراحل آزمایش انجام می پذیرد.

مواد و روش ها

دستگاه سفتی سنج

دستگاه سفتی سنج ساخته شده، که ابتدا در نرم افزار Solidworks طراحی شده، در شکل (۱) نشان داده شده است. چارچوب دستگاه از جنس ورق اکریلیک شفاف با ضخامت 4 mm و پایه های نگهدارنده میکروفون و ارتعاش سنج از ورق اکریلیک به ضخامت 2 mm ساخته شده است.

تعیین و اندازه گیری خواص محصولات کشاورزی پس از آن هم ادامه داشت و تحقیقات بر روی محصولاتی مانند خربزه (Saadtinia et al., 2012, 2015) و هندوانه (Janati and Heidari, 2018)، انبه، (2014)، گلابی، هلو، انار (Aboonajmi et al., 2015; Karimi and Aboonajmi, 2018). برای اجرای آزمایش های روش پاسخ صوتی باید یک سیگنال صوتی از نمونه منتشر شود تا مورد تحلیل قرار گیرد، این سیگنال صوتی با یکی از روش های تحریک نمونه مانند ضربه زدن یا اعمال سیگنال های خاص به نمونه صورت می گیرد. سیگنال تولید شده توسط حسگر مناسب دریافت و پس از تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال، پردازش لازم بر روی آن صورت می گیرد. برای پیاده سازی سامانه سفتی سنجی صوتی تاکنون دستگاه هایی طراحی شده اند که عموماً بصورت دستی راه اندازی شده و بخش های ضربه زن، ضبط و پردازش سیگنال جداگانه در کنارهم قرار داده شده سپس سیگنال های ضبط شده توسط کاربر برش داده و آماده پردازش می شوند (Lashgari et al., 2017; Khoshnam et al., 2009; Hassan-Beygi, 2015). این شیوه آزمایش علاوه بر زمانبر بودن، قابلیت تکرار پذیری پایینی دارد و با توجه به اجتناب ناپذیر بودن خطای انسانی در مراحل مختلف آزمایش، از دقت پایینی نیز برخوردار است.



شکل ۱- مدل دستگاه سفتی سنج تلفیقی صوتی-ارتعاشی a. نمای روبرو و کناری دستگاه متصل به رایانه b. مدل سه بعدی دستگاه

بخش های مختلف دستگاه

دستگاه ساخته شده شامل بخش های زیر است:
چارچوب یا قاب دستگاه: این بخش توسط نرم افزار

دستگاه مزبور مجهز به یک برد آردوینو است که همه قسمت های الکترونیکی (میکروفون، ارتعاش سنج، لودسل و سروموتور) را تغذیه می کند و خود نیز توسط رایانه تغذیه می شود.

بر سطح میوه است استفاده می شود) که به واسطه پایه نگهدارنده ای که از جنس اکریلیک به ضخامت 2 mm برای آن طراحی شده بر روی قاب دستگاه نصب شده است.

برد آردوینو (Arduino) : این برد برای اتصال و تبادل اطلاعات با رایانه و تامین جریان برق مناسب برای میکروفون، شتاب سنج، سروموتور و لودسل استفاده می شود. همچنین زمانبندی عمل سروموتور با رایانه برای دریافت به موقع سیگنال را انجام می دهد.

رایانه: از کارت صوتی رایانه به عنوان مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) استفاده می شود و سیگنال های آنالوگ صوتی و ارتعاشی به عنوان دو کانال ورودی به کارت صوتی وارد شده و به صورت دیجیتال در می آیند، این داده های دیجیتال توسط نرم افزار متلب (Matlab) مورد پردازش قرار می گیرند. همچنین برد آردوینو توسط رابط USB به رایانه متصل می شود.

تشریح و روش کار دستگاه

بخش های مختلف دستگاه سفتی سنج مطابق شکل ۲) با هم در ارتباط هستند. همانطور که در شکل می بینیم در دستگاه سفتی سنج ساخته شده، از سه حسگر استفاده شده که میکروفون و شتاب سنج برای دریافت سیگنال های ناشی از ضربه آونگ و حسگر سوم یعنی لودسل برای اندازه گیری وزن نمونه بکار می رود.

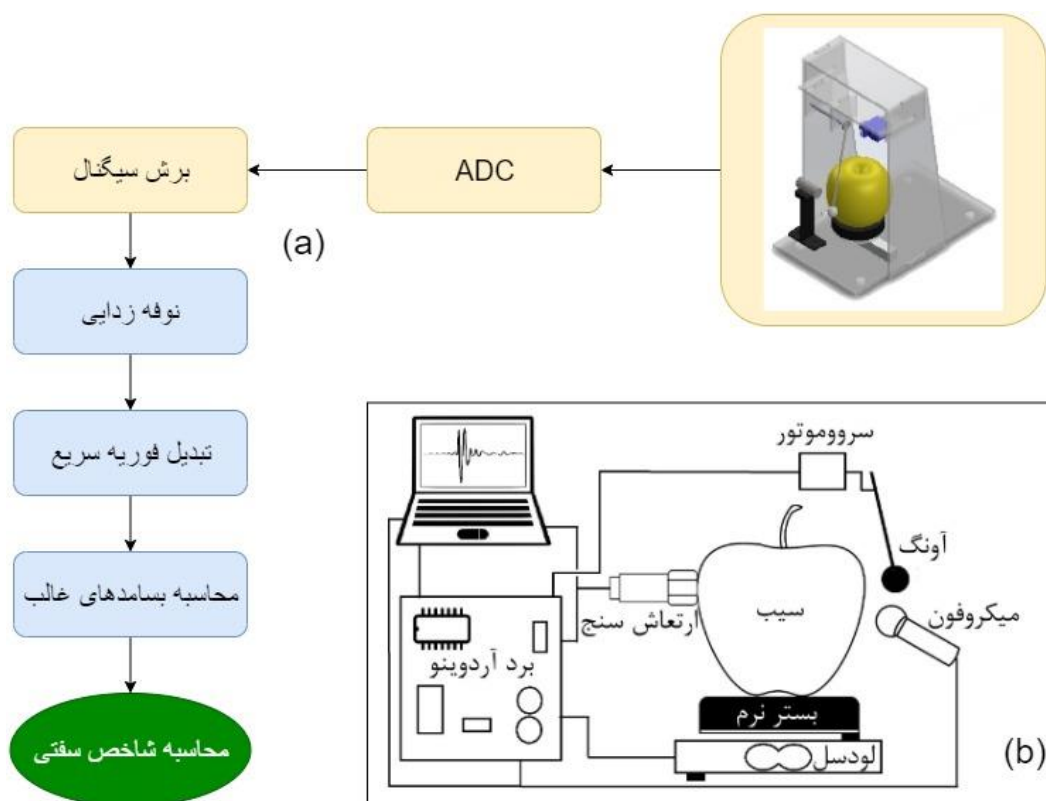
Solidworks طراحی شده و توسط برش لیزری از ورق اکریلیک به ضخامت 4 mm ساخته شده است.

مکانیزم ضربه زن و آونگ: میله آن از جنس لوله پلاستیکی توخالی سخت و سبک و گوی آن به وزن 2 g از جنس پلاستیک طراحی شده است. در محور چرخش آونگ از بلبرینگ مینیاتوری استفاده شده و برای بلند کردن آونگ از مکانیزم خاصی استفاده می شود که با استفاده از سروموتور و مکانیزم مزبور آونگ تا زاویه معینی بلند شده و رها می شود. کل مکانیزم ضربه زن به همراه آونگ و سروموتور بر روی یک صفحه با قابلیت تنظیم افقی قرار گرفته است. سرو موتور توان قرارگیری و توقف در زاویه دلخواه را دارد.

لودسل : لودسل از نوع میله ای مدل YZC-133 5 kg و با ظرفیت 1 kg است. که با فاصله 3 mm از سطح پایینی نصب شده و بر روی آن بستر قرارگیری سیب که از جنس فوم نرم است به واسطه یک ورق با فاصله 3 mm نصب شده است.

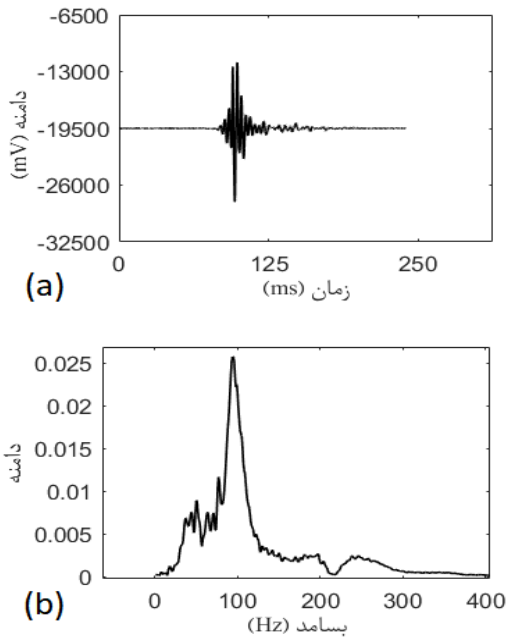
میکروفون: این بخش از نوع میکروفون خازنی مدل CZN 15E است که به واسطه پایه نگهدارنده ای که از جنس اکریلیک به ضخامت 2 mm برای آن طراحی شده بر روی قاب دستگاه نصب شده است.

ارتعاش سنج: این بخش از نوع شتاب سنج سه محوری مدل ADXL 335 است (در این دستگاه فقط یک محور آن که عمود



شکل ۲- a. روندنمای مراحل آزمایش و پردازش سیگنال b. طرحواره بخش های دستگاه سفتی سنج تلفیقی صوتی-ارتعاشی

انجام آزمایشات انتخاب شدند.



شکل ۳- یک نمونه از شکل سیگنال دریافتی که توسط متلب رسم شده است. a. سیگنال حوزه زمان b. سیگنال حوزه بسامد

آزمون پانچ و آزمون فشار

آزمون پانچ توسط دستگاه چند منظوره ساخته شده در گروه فنی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران انجام شد. در این آزمون یک میله استوانه ای سر تخت با قطر 8 mm با سرعت پیشروی 25 mm/min و سرعت نمونه برداری 20 sample/second به میوه سیب نفوذ می کند و نمودار نیرو-زمان (مطابق شکل ۴) برای آن رسم می شود. حداکثر نیروی نفوذ که در نقطه گسیختگی^۱ رخ می دهد در هر آزمون به عنوان شاخص سفتی نمونه مورد آزمایش در نظر گرفته می شود.



شکل ۴- نمودار نمونه نیرو-زمان در آزمون پانچ و فشار، نمایش نقاط گسیختگی، بیوبلد و نقطه عطف منحنی

میکروفون و شتاب سنج به عنوان دو کانال ورودی به کارت صوتی رایانه متصل هستند، کارت صوتی به عنوان یک ADC عمل می کند. کنترل و راه اندازی دستگاه سفتی سنج توسط کدهای نوشته شده برای برد آردوینو و کد متلب که در رایانه موجود است، انجام می شود. این کدها طوری نوشته شده اند که با اجرای کد متلب، ارتباط بین متلب و آردوینو برقرار می شود. ابتدا نمونه توزین شده و وزن آن در متغیری ذخیره می شود سپس سروموتور آونگ را بلند می کند و پس از رهاسازی آن خاموش می شود تا صدای آن نویز ایجاد نکند، لحظاتی پیش از اصابت ضربه، نرم افزار متلب با کارت صوتی رایانه ارتباط برقرار می کند و سیگنالهای دو حسگر صوتی و ارتعاشی را دریافت و در متغیرهایی ذخیره می کند. پس از پایان دریافت سیگنال سروموتور به زاویه اولیه برمی گردد و آماده ضربه بعدی می شود. سیگنال های دریافت شده در متلب به صورت آنی توسط تبدیل فوریه سریع به حوزه بسامد برده می شوند تا بسامد های غالب آنها بدست آید. در نهایت مطابق شکل ۳) سیگنال های حوزه زمان و بسامد برای هر دو حسگر رسم شده و کل داده ها در قالب خاصی ذخیره می شوند. کل عملیات ذکر شده در این بخش فقط با اجرای کد متلب و به ترتیب و با زمان بندی تعیین شده انجام می شود. در این مرحله کار دستگاه برای یک آزمایش تمام شده و اطلاعات ذخیره شده قابلیت بکارگیری در سایر مراحل تحقیق را دارند. این دستگاه برای آزمون محصولاتی با قطر و ارتفاع حداکثر ۸ سانتی متر و وزن حداکثر ۱ کیلوگرم مناسب است.

آزمایش های انجام شده

میزان سفتی محصولات کشاورزی از جمله سیب در طول زمان نگهداری پس از برداشت به تدریج کاهش می یابد، تغییرات سفتی این محصولات آهنگ نسبتاً مشخصی دارد و با افزایش دمای نگهداری، کاهش سفتی محصول شدیدتر می شود. بنابراین برای بررسی کارکرد صحیح دستگاه سفتی سنج تلفیقی، یک سری آزمون توسط این دستگاه بر روی میوه سیب رقم گالا در طول زمان نگهداری انجام شد و بلافاصله پس از هر آزمایش آزمون سفتی سنجی به روش پانچ (Puncture test) انجام شد تا نتایج آزمایشهای سفتی سنجی تلفیقی با آزمون پانچ به عنوان مرجع مقایسه شود. این آزمایشات در طول ۹ هفته و هر هفته یکبار بر روی دو گروه سیب که در دو دمای ۲۰ و صفر درجه سلسیوس نگهداری شده بودند انجام شد. هر هفته ۱۰ نمونه از هر گروه برای

^۱ - Rupture Point

باشد. هر یک از قله ها نمایانگر یکی از بسامد های تشدید بوده و در این تحقیق بسامدی که بالاترین دامنه را دارد به عنوان بسامد غالب هر سیگنال در نظر گرفته شده است.

(برای محصولات شبه کرووی مانند سیب و هلو است. این آزمایشات بر روی هر نمونه در چهار نقطه با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم و بر روی خط استوای میوه انجام شد و پس از تعیین بسامد غالب، میانگین چهار بسامد بدست آمده برای هر حسگر محاسبه شده و در (قرار داده شد.

$$FI = f^2 m^{2/3} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه f بسامد غالب و m جرم نمونه است. پس از انجام آزمایش های پانچ و فشار و آزمایش صوتی و ارتعاشی با دستگاه سفتی سنج، برای هر نمونه ۶ ویژگی شامل شاخص سفتی پانچ، ضریب کشسانی، بسامد غالب صوتی، بسامد غالب ارتعاشی، شاخص سفتی صوتی و شاخص سفتی ارتعاشی محاسبه شد.

نتایج و بحث

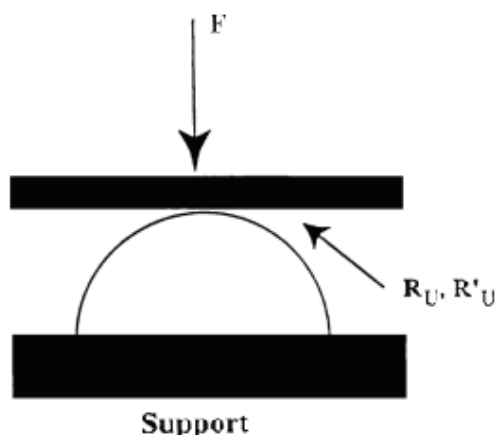
روند تغییرات خواص مختلف سیب

شاخص های سفتی که که با استفاده از دستگاه سفتی سنج تلفیقی و به کمک رابطه (۲) بدست آمده بود با شاخص سفتی آزمایش پانچ و نتایج آزمایش فشار (ضریب کشسانی) مقایسه شد و نتایج بسیار خوبی بدست آمد. شکل (۶) تا شکل (۱۱) روند تغییرات یاد شده را برای سفتی پانچ، ضریب کشسانی، بسامد های طبیعی غالب و شاخص سفتی صوتی و ارتعاشی نشان می دهد. سفتی سیب در طول دوره انبارمانی کاهش پیدا می کند، کاهش سفتی همزمان با کاهش سایر خصوصیات میوه مانند جرم و ضریب کشسانی صورت می گیرد. روند کاهش سفتی و سایر خصوصیات در دمای ۲۰ درجه سلسیوس نسبت به صفر درجه سریعتر است. همچنین آهنگ کاهش سفتی و سایر ویژگی ها به مرور زمان کاهش می یابد به همین دلیل رگرسیون توانی برای رسم نمودار انتخاب شده که ضریب تبیین بالاتری نسبت به رگرسیون خطی دارد. از میان ویژگیهای صوتی و ارتعاشی استخراج شده شاخص سفتی صوتی بیشترین ضریب تبیین را داراست که برای دمای صفر و ۲۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۹۳٪/۵۴ و ۹۸٪/۵۵ است و این شاخص بیشترین شدت تغییرات را هم به خود اختصاص داده زیرا کمترین مقدار توان x در رابطه نمودار رگرسیونی را دارد (۰/۴۹۵- و ۰/۷۳۵- به ترتیب برای تعیین ۲۰ درجه سلسیوس). بنابراین شاخص سفتی صوتی برای تعیین سفتی میوه سیب دقت و حساسیت بالاتری نسبت به بسامد صوتی

آزمون پانچ بر روی هر نمونه در دو نقطه بر روی خط استوای سیب در دو سمت مقابل هم انجام شد و میانگین نیروی بیشینه آنها به عنوان شاخص سفتی پانچ در نظر گرفته شد. علاوه بر آزمون پانچ، آزمون فشار هم برای تعیین ضریب کشسانی میوه سیب انجام گرفت تا این ویژگی هم با نتایج آزمایش صوتی و ارتعاشی مقایسه شود. آزمون فشار مطابق با روش ارائه شده در استاندارد انجمن مهندسان آمریکا انجام شد (ASAE Standards, 2008). نمونه های سیب به صورت نصف شده آماده و سپس مطابق شکل (۵) توسط صفحه دستگاه تحت فشار قرار داده شدند. صفحه پایین ثابت و صفحه بالایی با سرعت پیشروی ثابت 25 mm/min و سرعت نمونه برداری از نیروی مقاومت نمونه 20 sample/second به طرف پایین حرکت می کند. نقطه عطف (PI) نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده و برای محاسبه ضریب کشسانی مورد استفاده قرار می گیرد. ضریب کشسانی از بدست می آید.

$$E = \frac{0.338K_u^{3/2} F(1-v^2)}{D^{3/2}} \left(\frac{1}{R_u} + \frac{1}{R'_u} \right)^{1/2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

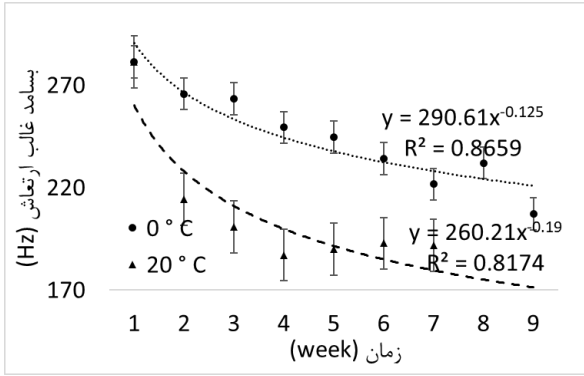
در این رابطه D جابجایی، R و R' شعاع انحنا در نقطه تماس، v ضریب پواسون، F نیرو و K یک عدد ثابت است که از روی رابطه و جدول موجود در استاندارد بدست می آید. نیرو و جابجایی در نقطه عطف نمودار (جایی که جهت انحنای نمودار عوض می شود) بدست می آیند.



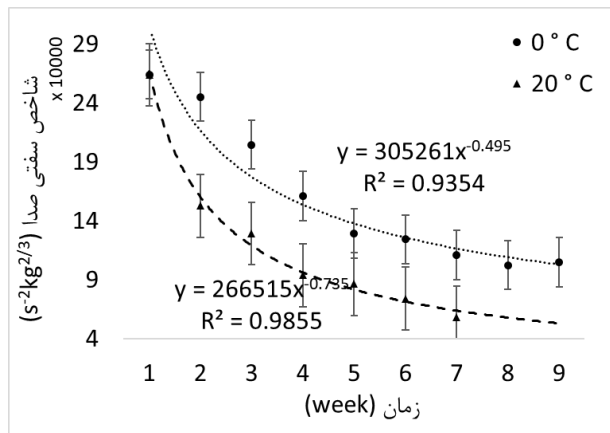
شکل ۵ - آزمون فشار برای تعیین ضریب کشسانی (ASAE Standards, 2008)

سفتی سنجی صوتی-ارتعاشی

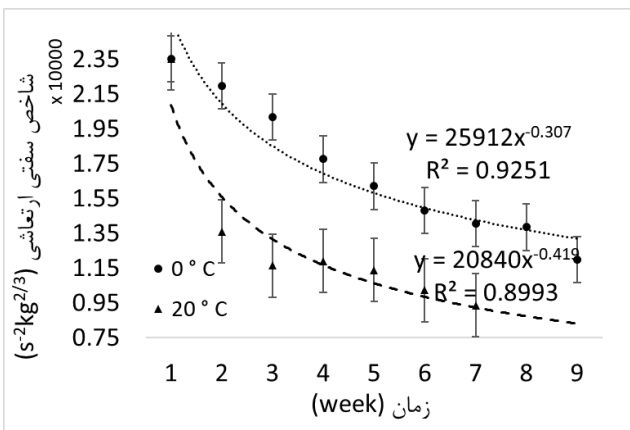
آزمایش های سفتی سنجی صوتی-ارتعاشی به صورتی که در بخش روش کار دستگاه توضیح داده شده، انجام شد. در هر آزمایش، بسامد غالب از طیف بسامدی بدست آمده و طبق **Error! Reference source not found.** (Firmness Index) FI بدست آمد (Cooke, 1972). مطابق شکل (۳) طیف بسامدی هر سیگنال ممکن است دارای چندین قله



شکل ۹- روند تغییرات بسامد طبیعی غالب ارتعاشی میوه سیب در دوره انبارمانی در دمای ۰ و ۲۰ درجه سلسیوس



شکل ۱۰- روند تغییرات شاخص سفتی صوتی میوه سیب در دوره انبارمانی در دمای ۰ و ۲۰ درجه سلسیوس

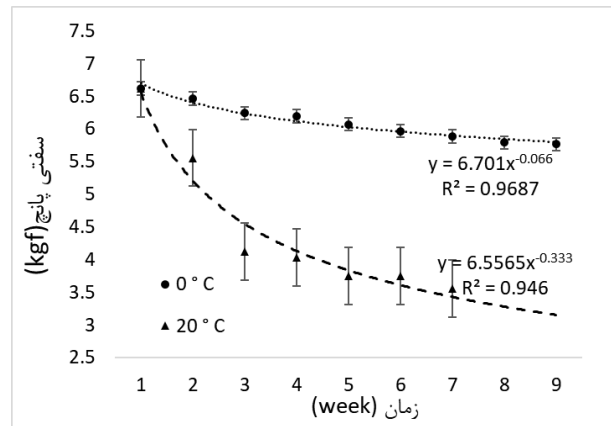


شکل ۱۱- روند تغییرات شاخص سفتی ارتعاشی میوه سیب در دوره انبارمانی در دمای ۰ و ۲۰ درجه سلسیوس

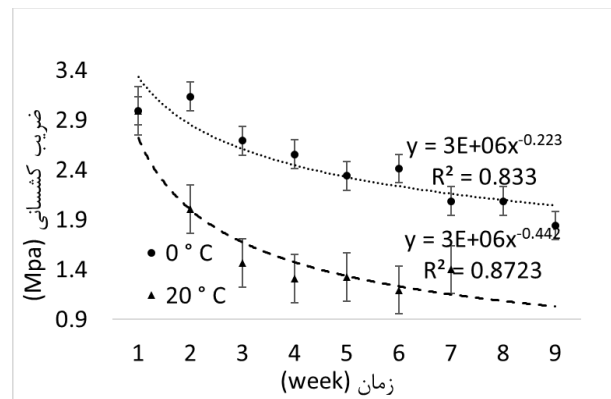
دمای ۲۰ درجه سلسیوس پس از ۶ هفته کاملاً شل شده، و قابلیت انجام آزمایش را نداشتند.

همبستگی بسامد های غالب و شاخص ها با سفتی پانچ نتایج بدست آمده از ارزیابی دستگاه نشان داد که شاخص سفتی بدست آمده از سیگنال صوتی و ارتعاشی برای سیب های نگهداری

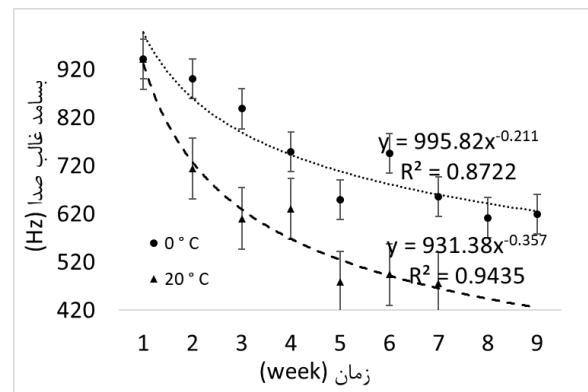
و ارتعاشی و شاخص سفتی ارتعاشی دارد.



شکل ۶- روند تغییرات سفتی میوه سیب در دوره انبارمانی در دمای ۰ و ۲۰ درجه سلسیوس (آزمون پانچ)



شکل ۷- روند تغییرات ضریب کشسانی میوه سیب در دوره انبارمانی در دمای ۰ و ۲۰ درجه سلسیوس (آزمون فشار)



شکل ۸- روند تغییرات بسامد طبیعی غالب صوتی میوه سیب در دوره انبارمانی در دمای ۰ و ۲۰ درجه سلسیوس

همانطور که در شکل های بالا دیده می شود میزان خطا در نمودارهای مربوط به دمای ۲۰ درجه سلسیوس بیشتر است. این میزان بالای خطا به دلیل تغییرات شدیدتر خواص سیب از جمله سفتی و ضریب کشسانی در این دما نسبت به دمای صفر درجه سلسیوس است. به طوری که سیب های نگهداری شده در

بدان معناست که سیگنال های صوتی نسبت به سیگنال های ارتعاشی بهتر می توانند میزان سفتی سیب را تخمین بزنند. نتایج همبستگی میان بسامد های تشدید غالب و شاخص سفتی صوتی و ارتعاشی با شاخص سفتی پانچ برای دو گروه مورد آزمایش مطابق جدول (۱) است.

همبستگی بسامد های غالب و شاخص ها با ضریب کشسانی

ضریب همبستگی میان بسامد ها و شاخص های سفتی با ضریب کشسانی مطابق جدول (۲) همگی بالای ۹۳٪ بوده و در سطح بسیار خوبی معنی دار هستند اگر سیب یک جسم الاستیک فرض شود این همبستگی بالا قابل درک است زیرا کشسان بودن اجسام موجب می شود که اجسام در شرایط تحریک، با بسامد خاصی (بسامد طبیعی) نوسان کنند.

شده در دمای صفر درجه سلسیوس به ترتیب ۹۷/۴٪ و ۹۸/۶٪ (معنی دار در سطح ۰,۰۰۱) و برای سیب های نگهداری شده در دمای ۲۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۹۶٪ و ۹۲/۶٪ (معنی دار در سطح ۰,۰۱) با سفتی پانچ همبستگی داشتند. همبستگی میان بسامد های غالب با سفتی پانچ نیز مقادیر بسیار بالایی را نشان می دهد ضریب همبستگی شاخص های سفتی به طور متوسط ۱/۵۳ درصد از ضریب همبستگی بسامد های غالب بیشتر است. این تفاوت دلیل ارائه رابطه شاخص سفتی توسط کوک است که با ارائه رابطه (۲) و دخیل کردن جرم نمونه در آن، دقت سفتی سنجی به روش بسامد های غالب را افزایش داده است. نتیجه دیگری که از بررسی جدول (۱) بدست می آید این است که میانگین ضرایب همبستگی مربوط به بسامد های غالب و شاخص های سفتی سیگنال صوتی (۹۵/۴٪ و ۹۶/۷٪) مقادیر بالاتری نسبت به سیگنال های ارتعاشی (۹۳/۸۵٪ و ۹۵/۶٪) دارند این

جدول ۱- ضریب همبستگی میان شاخص سفتی آزمون پانچ با بسامد های غالب و شاخص سفتی صوتی و ارتعاشی

شاخص سفتی ارتعاش		شاخص سفتی صدا		بسامد غالب ارتعاش		بسامد غالب صدا		
۲۰°C	۰°C	۲۰°C	۰°C	۲۰°C	۰°C	۲۰°C	۰°C	دمای نگهداری
۰/۹۲۶**	۰/۹۸۶*	۰/۹۶۰**	۰/۹۷۴*	۰/۹۲۷**	۰/۹۵۰*	۰/۹۶۱**	۰/۹۴۷*	سفتی پانچ
	۰/۹۵۶		۰/۹۶۷		۰/۹۳۸۵		۰/۹۵۴	میانگین ضریب همبستگی

* $P < 0.01$, ** $P < 0.001$

جدول ۲- ضریب همبستگی میان ضریب کشسانی با بسامد های غالب و شاخص سفتی صوتی و ارتعاشی

شاخص سفتی ارتعاش		شاخص سفتی صدا		بسامد غالب ارتعاش		بسامد غالب صدا		
۲۰°C	۰°C	۲۰°C	۰°C	۲۰°C	۰°C	۲۰°C	۰°C	دمای نگهداری
۰/۹۶۱*	۰/۹۶۴*	۰/۹۶۲*	۰/۹۴۵*	۰/۹۸۱*	۰/۹۴۰*	۰/۹۳۶**	۰/۹۵۰*	ضریب کشسانی
	۰/۹۶۲۵		۰/۹۵۳۵		۰/۹۶۰۵		۰/۹۴۳	میانگین ضریب همبستگی

* $P < 0.01$, ** $P < 0.001$

آزمایش ها تبدیل کند. نتایج این پژوهش در مقایسه با سایر روش های تعیین سفتی، مانند روش تصویربرداری چند طیفی^۱ (Liu *et al.*, 2009) (ضریب همبستگی ۸۸٪ با سفتی پانچ) و روش تصاویر نقطه ای دینامیکی^۲ (Minaei *et al.*, 2015) (ضریب همبستگی ۸۳٪ با سفتی پانچ) از دقت بالاتری برخوردار است، همچنین مقادیر ضریب همبستگی بدست آمده توسط این دستگاه به نسبت کارهای مشابه قبلی که از روش صوتی استفاده کرده اند بیشتر است (Bayati *et al.*, 2013) (ضریب همبستگی ۸۶/۵٪ با سفتی پانچ).

سرعت انجام آزمایش

محاسبه شاخص سفتی توسط این دستگاه با سرعت بالایی انجام

با بررسی دقیق تر جدول (۲) واضح است که میانگین ضرایب همبستگی بسامد های غالب سیگنال ارتعاشی و شاخص های سفتی آنها (۹۶/۰۵٪ و ۹۶/۲۵٪)، مقادیر بالاتری نسبت به سیگنال های صوتی (۹۴/۰۳٪ و ۹۵/۳۵٪) دارند و این نتیجه حاکی از آن است که سیگنال های ارتعاشی بهتر از سیگنال های صوتی می توانند ضریب کشسانی را تخمین بزنند.

سایر روش های سفتی سنجی سیب

با بررسی نتایج بدست آمده از این پژوهش روشن است که دقت بالای این دستگاه در کنار قیمت تمام شده و هزینه پایین آزمایش ها در مقایسه با سایر روش های سفتی سنجی میوه ها، می تواند آن را به یک انتخاب مناسب و کم هزینه با سرعت بالای انجام

^۱-Biospeckle imaging

^۲-Multispectral imaging

مخرب بودن، فابل حمل بودن، سبک و کم حجم بودن، سرعت کارکرد بالا و هزینه پایین ساخت، در کنار دقت بالای تخمین سفتی می تواند انتخاب خوبی برای کارهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی باشد. داده های دو حسگر صوتی و ارتعاشی قابلیت ترکیب و تلفیق را دارند و می توان از آنها شاخص های ترکیبی نیز بدست آورد و از روش های ترکیب داده ها (Data Fusion) برای کاهش عدم قطعیت نتایج استفاده کرد. این دستگاه علاوه بر میوه سیب که در آزمایشات استفاده شده امکان استفاده برای کیفیت سنجی محصولات دیگر مانند هلو، شلیل، گوجه فرنگی، انبه، آووکادو و تخم مرغ را دارد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت های مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران ایران به شماره ۹۶۰۱۳۰۴۲ انجام شده است، نویسندگان این مقاله صمیمانه از حمایت های آن صندوق سپاسگزاری می کنند.

REFERENCES

- Abbott, J., Affeldt, H. A., Liljedahl, L. A. (1992). Firmness measurement of stored Delicious' apples by sensory methods, Magness-Taylor, and sonic transmission. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(4), 590–595. Retrieved from <http://journal.ashspublications.org/content/117/4/590.short>
- Abbott, Judith A., Massie, D. R. (1998). Nondestructive Sonic Measurement of Kiwifruit Firmness. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. <https://doi.org/10.1080/01140671.1996.9513947>
- Abbott, Judith A. (1994). Firmness Measurement of Freshly Harvested ' Delicious ' Apples by Sensory Methods , Sonic Transmission , Magness-Taylor , and Compression. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(3), 510–515.
- Aboonajmi, M., Jahangiri, M., Hassan-Beygi, S. R. (2015). A Review on Application of Acoustic Analysis in Quality Evaluation of Agro-food Products. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 3175–3188. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12444>
- Ahmadkhani, S., Mahmoudi, A., Mollazade, K., Ghaffari, H. (2015). Prediction of firmness in peach fruit by means of laser light backscattering imaging system. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 3(46), 229–234.
- Armstrong, P., Zapp, H. R., Brown, G. K. (1990). Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination. *Transactions of the ASAE*, 33(August), 1353–1359.
- ASAE Standards. Compression test of food materials of convex shape, S368.3 S368.4 DEC2000 American Society of Agricultural Engineering § (2008).
- Bayati, M. R., Rajabipour, A., Mobli, H., Eyvani, A., Badii, F. (2013). Storability evaluation of Golab apple with acoustic and penetration methods. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1), 188–200.
- Chen, H. (1993). Analysis of the acoustic impulse resonance of apples for nondestructive estimation of fruit quality. *Dissertationes de Agricultura (Belgium)*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BE9400257>
- Chen, H., De Baerdemaeker, J., Vervaeke, F. (1992). Acoustic impulse response of apples for monitoring texture changes after harvest. In *Proc. Int. Conf. Agr. Eng.*
- Chen, L., Opara, U. L. (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review. *Food Research International*, 51(2), 823–835. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.046>
- Cooke, J. R. (1972). An Interpretation of the Resonant Behavior of Intact Fruits and Vegetables. *Transactions of the ASAE*, 15(6), 1075–1080. <https://doi.org/10.13031/2013.38074>
- Duprat, F., Grotte, M., Pietri, E., Loonis, D. (1997). The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 66(4), 251–259. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0143>
- Fathizadeh, Z., Aboonajmi, M., Hassan Beygi, S. R. (2020). Nondestructive firmness prediction of apple fruit using acoustic vibration response. *Scientia Horticulturae*, 262(November 2019), 109073. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109073>

- Haiati, A., Raofat, M. H., Kamgar, S., Jahani, F. (2018). Feasibility of using electrical capacitance for determining the fruit ripeness of apple. *iranian journal of biosystem engineering*, 49(2), 195–203. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.218246.6648>
- Hassan-Beygi, S. R., S. M. Ghaebi, and A. Arabhosseini. 2009. Some physico-mechanical properties of apricot fruit, pit and kernel of Ordubad variety. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, Vol XI, Manuscript 1459.
- Huang, L., Chen, P., Upadhyaya, S. (1993). Determination of Acoustic Vibration Modes in Apples. *Transactions of the ASAE*, 36(5), 1423. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.28481>
- Janati, S., Heidari, M. (2018). Analysis of the the impact response of pomegranate fruit to determine its maturity stage. *Innovative Food Technologies*. <https://doi.org/10.22104/jift.2018.2712.1646>
- Karimi, R., Aboonajmi, M. (2019). Nondestructive investigating firmness of tuber agricultural products during storage using sound and compression tests. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 6(7), 52–60.
- Khoshnam, F, Bidgoly Hassan Beygi, S. ., Namjoo, M., Doroozi, M. (2015). The effect of acoustic system variables on sound signals of Melon varieties. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1), 126-139
- Khoshnam, F, Mobli, H., Hassan-Beygi, S. R., Rajabipour, A., Rafiee, S., Eyvani, A. (2012). Melon Ripeness Detection using Non-Destructive Acoustic Impulse Response. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 13(3), 89–102.
- Khoshnam, Farhad, Namjoo, M., Golbakhshi, H. (2015). Acoustic Testing for Melon Fruit Ripeness Evaluation during Different Stages of Ripening. *Agriculturae Conspectus Scientifi Cus*, 80(4), 197–204.
- Lashgari, M., Maleki, A., Amiriparian, J. (2017). Application of acoustic impulse response in discrimination of apple storage time using neural network. *International Food Research Journal*, 24(3), 1075–1080.
- Liu, M., Wumao, D., Lin, H. (2009). The study of non-destructive measurement apple's firmness and soluble solid content using multispectral imaging. *IFIP International Federation for Information Processing*, 294, 1077–1086. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0211-5-34>
- Massah, J., Hajiheydari, F., Derafshi, M. H. (2017). Application of Electrical Resistance in Nondestructive Postharvest Quality Evaluation of Apple Fruit. *J. Agr. Sci. Tech*, 19, 1031–1039.
- Minaei, S., Jamshidi, B., Arefi, A. (2015). Non-destructive prediction of apple firmness during storage based on dynamic speckle patterns.
- Muramatsu, N., Sakurai, N., Yamamoto, R., Nevins, D. J. (1996a). Nondestructive acoustic measurement of firmness for nectarines, apricots, plums, and tomatoes. *HortScience*, 31(7), 1199–1202.
- Muramatsu, N., Sakurai, N., Yamamoto, R., Nevins, D. J. (1996b). Nondestructive acoustic measurement of firmness for nectarines, apricots, plums, and tomatoes. *HortScience*, 31(7), 1199–1202.
- Saadinia, M., Emadi, B., Sadrnia, H. (2014). Evaluation of watermelon ripening using sound analysis of impacts. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(2), 296–304.
- Schotte, S., De Belie, N., De Baerdemaeker, J. (1999). Acoustic impulse-response technique for evaluation and modelling of firmness of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 17(2), 105–115. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(99\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(99)00041-1)