

طراحی، ساخت و آزمایش متمرکزکننده نمایی به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی محصولات کشاورزی

رسول معمار دستجردی^۱ - سعید مینایی^{۲*} - محمدهادی خوش تقاضا^۳

تاریخ دریافت: ۹۰/۸/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱/۲۸

چکیده

آزمون فراصوتی یکی از روش‌هایی است که از آن می‌توان برای ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی استفاده کرد. تراگذرهای مورد استفاده در آزمون‌های غیر مخرب فراصوتی، صنعتی هستند و از آنجایی که محصولات کشاورزی تضعیف کننده‌ی شدید امواج فراصوتی می‌باشند، نمی‌توان از این تراگذرها در کشاورزی استفاده کرد و باید تغییراتی در آن‌ها ایجاد نمود. این کار با استفاده از هورن یا متمرکزکننده انجام می‌گیرد که وظیفه‌ی آن تمرکز انرژی در سطح کوچک و در فاصله‌ی معینی از تراگذر است. در این مقاله طراحی هورن نمایی با دو روش نظری و رایانه‌ای انجام شد و سپس ساخت و آزمایش آن برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی محصولات کشاورزی ارائه شد. بررسی‌های اولیه نشان داد که می‌توان با استفاده از روش رایانه‌ای هورن‌های بسیار پیچیده را با دقت بالایی طراحی کرد. در تحلیل تأثیر تعداد المان‌ها بر بسامد طبیعی هورن معلوم شد که در تعداد المان‌های کم، تحلیل با خطا همراه است و تا جایی که بسامد طبیعی هورن تقریباً ثابت شود باید تعداد المان‌ها را زیاد کرد که در این تحقیق تعداد المان لازم ۳۰۰ در نظر گرفته شد. همچنین مقایسه بین روش نظری و رایانه‌ای نشان داد که روش رایانه‌ای خطای بسیار کمی (کمتر از یک درصد) دارد و نیاز به حل معادلات بسیار پیچیده ندارد. طبق بررسی‌های آماری، اثر ضخامت محصول (سیب‌زمینی و هویج) بر سرعت امواج فراصوتی در کاوشگر دارای هورن معنی‌دار نبود. در حالی که در کاوشگر بدون هورن با تغییر ضخامت نمونه، سرعت به‌طور معنی‌داری تغییر کرد که مطلوب نیست. بنابراین می‌توان گفت که تراگذر دارای هورن برای انجام آزمون‌های فراصوتی مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: آزمون غیرمخرب، طراحی رایانه‌ای، فراصوت، هورن نمایی

مقدمه

پزشکی و صنعت، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های میوه مناسب نیستند؛ چون میوه‌ها دارای بافتی غیر همگن بوده و همچنین تضعیف کننده بسیار قوی امواج با بسامد بالا هستند. افزون بر آن اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوت در بسامدهای کم بسیار مشکل است. از این رو در برخی تحقیقات نیاز به برش میوه به‌طور یکنواخت برای تماس آن با سطح تراگذر^۴ است (Zaki Dizaji *et al.*, 2009). آزمون فراصوت در محدوده‌ی بسامدی ۲۰ kHz تا ۱۰۰ MHz صورت می‌گیرد. برای آزمون فلزات از بسامد ۵۰۰ kHz تا ۲۰ MHz استفاده می‌شود که این بازه برای محصولات کشاورزی مناسب نیست. تحقیقات نشان می‌دهد محدوده‌ی ۲۰ kHz تا ۱ MHz محدود‌ای مناسب برای مواد کشاورزی می‌باشد (Sarker and Wolfe, 1983; Mizrach *et al.*, 1989; Kim *et al.*, 2004).

نخستین تلاش‌ها در دهه ۱۹۸۰ در این زمینه انجام گرفت که

در طی سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران جهان به تعیین کیفیت محصولات کشاورزی با روش‌های غیرمخرب معطوف شده است که محور اصلی تحقیقات پس از برداشت میوه‌ها و محصولات زراعی شده و حجم تحقیقات در این زمینه به‌صورت نمایی رو به‌افزایش است (Butz *et al.*, 2005). روش فراصوتی روشی است که به‌طور وسیعی در تحقیقات پزشکی و مواد مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است، اما پژوهش در زمینه بکارگیری آن برای تعیین رسیدگی و کیفیت محصولات کشاورزی بسیار اندک می‌باشد (Hedric *et al.*, 2005). بسیاری از تراگذرهای فراصوتی موفق در

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیاران گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران
* - نویسنده مسئول: (Email: minae@modares.ac.ir)

مدل‌های با هندسه پیچیده را امکان‌پذیر می‌سازد که با استفاده از روش حل دقیق غالباً غیر ممکن است. روش تجربی در طراحی هورن هنگامی به کار می‌رود که دستگاه فراصوت مورد استفاده قابلیت تنظیم و تولید بسامدها و توان‌های مختلف را داشته باشد. بسامد ارتعاش از آنالیز مودال و با استفاده از روش‌های لیزری و شتاب‌سنج قابل اندازه‌گیری است. مهم‌ترین مطلب در طراحی هورن، تعیین مود ارتعاشی (طولی، خمشی و پیچشی) است که هورن می‌خواهد در آن ارتعاش کند. افزون بر آن، بسامد طبیعی، اندازه بزرگترین قطر، طول، جنس و شکل پروفیل نیز باید در طراحی هورن در نظر گرفته شود. برای ارزیابی پارامترهای فراصوتی در روش عبوری مودهای طولی هورن مهم می‌باشند (Jullian, 1965). در حقیقت مود طولی هورن باید با بسامد مرکزی تراگذر یکسان باشد تا بتوان پس از نصب روی تراگذر موج فراصوتی را از خود عبور دهد. در این پژوهش ابتدا روش تحلیل المان محدود به‌عنوان روشی مناسب انتخاب گردید، سپس هورن نمایی با روش نظری طراحی شده و مودهای طولی آن با روش اجزاء محدود استخراج شد. همچنین پس از ساخت، آزمونی روی محصولات با کاوشگرهای دارای هورن و بدون هورن به‌منظور مقایسه آن‌ها در اندازه‌گیری زمان پرواز و سرعت امواج عبوری، انجام شد.

انتخاب روش اجزاء محدود

برای اطمینان از درستی تحلیل‌ها در مورد شکل مودهای ارتعاشی، آنالیز مودال روی هورن ساخته شده توسط ژاو و همکاران انجام گرفت. این پژوهشگران برای یافتن مودهای ارتعاشی، از روش تجربی استفاده کردند (Zhou et al., 2002). آنها از هورن مخروطی با قطر ابتدایی ۳۰ mm و قطر انتهایی ۱۵ mm و طول ۱۵۰ mm در تحقیقشان استفاده کردند. هورن مورد نظر بعد از مدل‌سازی، مش‌بندی شده و آنالیز مودال روی آن انجام گرفت. جنس هورن مطابق با مرجع یادشده، فولاد در نظر گرفته شد. ثابت‌های ماده عبارتند از: چگالی $\rho = 7880 \text{ kgm}^{-3}$ ، مدول الاستیسیته $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ و ضریب پواسون ۰/۳۳.

برای تحلیل مودال در این قسمت از نرم‌افزار المان محدود ANSYS12 استفاده شد. در هر تحلیل FEM، مراحل انتخاب المان، مدل‌سازی هندسی، تعریف خواص ماده، شبکه‌بندی، شرایط مرزی، انتخاب نوع تحلیل و انتخاب حل‌گر انجام می‌گیرد. برای پیدا کردن مودهای طولی می‌توان از مدل‌های دو بعدی و سه بعدی استفاده کرد که در پژوهش حاضر، هر دو مورد بررسی قرار گرفت. از المان SOLID 92 با شکل TETRA برای تحلیل مودال مدل سه بعدی و المان PLANE42 برای مدل دو بعدی به‌کار برده شد. همچنین حل‌گر Block Lanczos مورد استفاده قرار گرفت ANSYS User's

مشکلاتی در نفوذ امواج فراصوت در میوه و سبزی‌ها را آشکار ساخت (Porteous et al., 1981; Upchurch et al., 1987). در تحقیقات دیگری نشان داده شد که چنانچه از بسامدهای در محدوده‌ی نیم تا یک مگاهرتز برای سیب‌زمینی و سیب استفاده شود، تضعیف بسیار زیادی رخ می‌دهد (Sarker and Wolfe, 1983). میزراک و همکاران در سال ۱۹۸۹ ابزاری فراصوت با بسامد کم و توان بالا ساختند و از آن برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوت (ضریب تضعیف و سرعت امواج فراصوت) بخشی از بافت میوه‌ی آووکادو استفاده کردند (Mizrach et al., 1989). بر اساس گزارش‌های ذکی دیزجی و همکاران، مشخص شد که برای اندازه‌گیری ویژگی‌های بسیاری از میوه‌ها نیاز به‌برش زدن آن‌ها می‌باشد (Zaki Dizaji et al., 2009). بنابراین باید تراگذرهای نوع صنعتی موجود به‌گونه‌ای تغییر داده شود که قابلیت استفاده برای میوه‌ها به‌صورت غیرمخرب را داشته باشند.

واگرایی پرتو فراصوت باعث کاهش شدت صوت (انرژی بر واحد زمان) می‌گردد. همچنین با افزایش فاصله تراگذر، واگرایی پرتو افزایش می‌یابد. در حقیقت واگرایی باعث کاهش شدت پرتوهای انتقالی و انعکاسی می‌گردد. پرتو فراصوت را می‌توان متمرکز ساخت. این کار با تمرکز انرژی در سطح کوچک و در فاصله‌ی معینی از تراگذر انجام می‌گیرد. پرتو متمرکز شده در مقایسه با پرتو متمرکز نشده، قدرت تشخیصی بالاتری دارد. هورن یا متمرکزکننده، واسط بین تراگذر و جسم مورد نظر است. هورن‌ها در صنعت برای ماشین‌کاری با فراصوت به‌کار می‌روند و وظیفه‌ی آن‌ها افزایش دامنه‌ی ارتعاشات ابزار و تطابق مرتعش‌کننده با بار صوتی است. در پزشکی نیز از متمرکز ساختن برای بهبود تفکیک‌پذیری جانبی تراگذر استفاده می‌شود. این کار با استفاده از عدسی‌های صوتی میسر می‌گردد که کاری شبیه به‌عدسی‌های نوری انجام می‌دهند. عدسی‌های صوتی از پلی استیرن، نایلون یا آلومینیوم ساخته می‌شوند و در جلوی کریستال پیزوالکتریک نصب می‌گردند (Hedrick et al., 2005). در این مقاله طراحی هورن نمایی، ساخت و آزمایش آن برای اندازه‌گیری خواص فراصوتی محصولات کشاورزی مورد بحث قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

تحقیق نظری

به‌طور کلی برای طراحی هورن، سه روش حل تحلیلی دقیق، حل عددی و روش تجربی وجود دارد (Graham et al., 1999). در حل دقیق همانطور که از نام آن پیداست، به‌محاسبه‌ی دقیق پارامتری معادله دیفرانسیلی حاکم بر هورن پرداخته می‌شود. در حالی که در روش عددی، حل تقریبی و عددی این مسائل مورد نظر است. روش اجزاء محدود نیز یکی از روش‌های حل عددی می‌باشد که تحلیل

(Guide).

تحلیل با مدل‌سازی سه بعدی

نتایج حاصل از آنالیز مودال در شکل ۱ نشان داده شده است. مقایسات انجام شده با نتایج ژاو و همکاران مشخص کرد که اولین مود طولی هورن مخروطی به‌صورت آزمایشگاهی ۱۸/۱ kHz بوده و با استفاده از روش المان محدود ۱۷/۵۱۷ kHz به‌دست آمد. می‌توان گفت، تطابق خوبی میان روند داده‌های تحلیل شده با استفاده از روش اجزای محدود با نتایج تجربی آن‌ها وجود دارد و حداکثر خطا ۶/۱ درصد است و تحلیل از لحاظ مود قابل اطمینان است.

مدل‌سازی دو بعدی

برای مدل‌سازی دو بعدی همانطور که در شکل ۲ آمده است، مخروط مورد استفاده توسط ژاو و همکاران با استفاده از المان Plane42 مش‌بندی شد و سپس آنالیز مودال انجام گرفت. در این روش فقط می‌توان مودهای متقارن (طولی) را استخراج کرد. نتایج حاصل نشان داد که اولین مود طولی ۱۷/۵۲ kHz و دومین مود

طولی ۳۳/۷۶۹ kHz است. با توجه به شکل ۱ اولین مود طولی هورن مخروطی توسط ژاو و همکاران ۱۸/۱ kHz گزارش داده شده‌است که نشان می‌دهد، استفاده از این روش نیز در مقایسه با روش تجربی خطای کمی دارد و در مقایسه با مدل سه بعدی میزان محاسبات آن نیز کمتر است. با توجه به این که برای طراحی هورن مخصوص میوه نیاز به مود طولی است، در طراحی هورن مورد نظر از این روش استفاده شد.

طراحی نظری هورن نمایی

برای هورن نمایی ناحیه تغییرات به‌صورت زیر است:

$$A_x = A_0 e^{-\beta x} \quad (1)$$

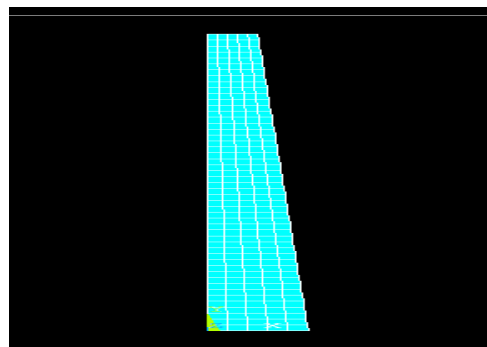
که در آن، A_0 ، A_x ، β و x به ترتیب سطح مقطع هورن به‌فاصله‌ی x از سطح مقطع بزرگ، سطح مقطع بزرگ، فاصله‌ی مقطع مورد نظر از مقطع بزرگ در طول هورن و ثابت مخروطی شدن است. شکل ۳ نشان دهنده‌ی یک هورن نمایی است (Markov, 1966).

طولی (kHz) Longitudinal	پیچشی (kHz) Torsional	خمشی (kHz) Flexural	طولی (kHz) Longitudinal	پیچشی (kHz) Torsional	خمشی (kHz) Flexural
17.517	11.641	4.314	17.7	11.7	4.01
33.741	21.429	10.713	34.8	21.9	10.5
				32.4	18.7
				42.9	28.2
	31.380	18.919		37	48
	41.553	28.168	18.1	12.1	4.60
	37.991	37.991		22.1	11.2
				32.6	19.1
				43.1	28.8
					38.3
					49.1

ب) ب

الف) ا

شکل ۱- فرکانس‌های طبیعی هورن مخروطی برای مودهای ارتعاشی مختلف، (الف) ژاو و همکاران، (ب) اجزاء محدود (پژوهش حاضر)
Fig. 1. Conical horn Resonance frequencies for different vibrational modes, (a) Zhoe *et al.*, 2002, (b) finite element (This study)



شکل ۲- مش بندی هورن مخروطی با المان Plane42 (مخروط از دوران سطح فوق حول محور عمودی حاصل می‌شود).
Fig. 2. Conical horn meshing with Plane42 (The cone is formed by rotation of this area around the vertical axis.)

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\ln N}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}} \right) \quad (6)$$

طول هورن l بر اساس نیم موج مقدار n برابر با یک یا تمام موج مقدار n برابر با دو از رابطه‌ی (۷) به دست می‌آید:

$$l = \frac{n}{2} \lambda \quad (7)$$

برای هورن نمایی مقدار l برابر است با:

$$l = \frac{nC}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi} \right)^2} \quad (8)$$

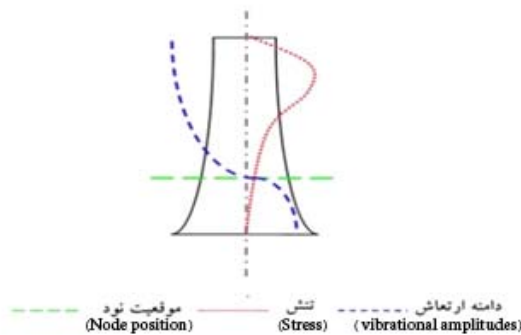
موقعیت گره ارتعاشی x_0 عبارت است از:

$$u = 0 \Rightarrow x_0 = \frac{l}{\pi} \text{arc cot} \left(\frac{1}{\pi} \ln N \right) \quad (9)$$

معادله‌ی دامنه تنش در طول هورن مطابق رابطه‌ی (۱۱) می‌باشد:

$$\sigma = -Eu_0 e^{\beta x} \left(\frac{\beta^2 v_l}{\omega} + \frac{\omega}{v_l} \right) \sin \frac{\omega x}{v_l} \quad (10)$$

شکل ۴ تغییرات دامنه‌ی ارتعاش، دامنه‌ی تنش و موقعیت گره ارتعاشی در طول هورن با مقطع دایره‌ای به طول l را نشان می‌دهد.



شکل ۴- موقعیت گره، پروفیل تنش، و دامنه ارتعاش در هورن نمایی

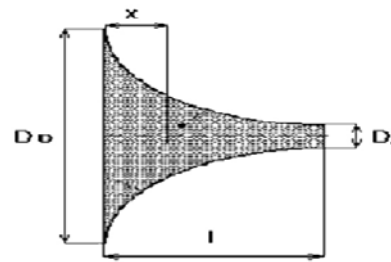
Fig. 4. Node position, stress profile, and vibrational amplitudes in the exponential horn

محاسبه ابعاد هورن طراحی شده برای تراگذر

هنگامی که یک موج از محیطی به محیط دیگر می‌رود، مقداری از آن گذر می‌کند، مقداری بازتابیده می‌شود و مقداری نیز جذب می‌گردد. ارتباط میان موج اولیه و موج برگشتی از معادله‌ی (۱۱) به دست می‌آید (Subramanian, 2006).

$$E_r = E_i \left[\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right]^2 \quad (11)$$

در اینجا، E_r ، انرژی پرتو برگشتی، E_i ، انرژی پرتو اولیه، ρ_1 و ρ_2 به ترتیب چگالی محیط اول و دوم و c_1 و c_2 به ترتیب



شکل ۳- طرحواره هورن نمایی

Fig. 3. Schematic of exponential horn

بر اساس معادله‌ی حاکم بر میله‌های غیر یکنواخت می‌توان نوشت (Merkulov, 1957):

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \frac{du}{dx} + k^2 u = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dA}{dx} = -2\beta A_0 \exp(-2\beta x) = -2\beta A$$

حل کلی معادله‌ی بالا با در نظر گرفتن شرایط مرزی به صورت

زیر است:

$$u = u_0 \left(\cos \frac{\omega x}{v_l} - \beta \frac{v}{\omega} \sin \frac{\omega x}{v_l} \right) e^{\beta x} \quad (3)$$

که در آن:

$$v_l = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\beta^2 c^2}{\omega^2}}} \quad (4)$$

در رابطه ۴:

c : سرعت صوت در ماده‌ی بینهایت

v_l : سرعت معادل انتشار صوت در هورن

وبستر در بررسی معادلات هورن نمایی به این نتیجه رسید که هنگامی که تغییر سطح مقطع ناگهانی نباشد انرژی صوتی به سمت تراگذر منعکس نشده و در سر هورن متمرکز می‌شود ولی اگر تغییر سطح مقطع ناگهانی باشد موج‌های فراصوتی به سمت تراگذر بر می‌گردند و باعث افت انرژی (افزایش دمای تراگذر) و در نتیجه کاهش سرعت ارتعاش سر هورن می‌گردد (Webster, 1919). بنابراین در طراحی هورن باید از تغییر ناگهانی سطح جلوگیری به عمل

آید و رابطه $\beta < \frac{\omega}{c}$ باید برای ضریب مخروطی شدن برقرار باشد.

ضریب تقویت هورن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N = \sqrt{\frac{A_0}{A_1}} \quad (5)$$

اگر مقدار ضریب تقویت (N)، بسامد ارتعاشات (f)، و سرعت صوت در ماده (c) معلوم باشد، آنگاه از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید:

یک جفت تراگذر ۷۵ kHz در حالت بدون هورن و دارای هورن به‌عنوان فرستنده و گیرنده امواج فراصوت استفاده شد. کاوشگرها روی سامانه نگهدارنده‌ای سوار شدند که به آن‌ها امکان حرکت افقی، عمودی و زاویه‌دار را می‌داد (شکل ۶). داده‌های خروجی با برنامه نوشته شده در محیط MATLAB 2008 تحلیل و پارامترهای سرعت و زمان عبور سیگنال از محیط (زمان پرواز) استخراج شد. در آزمایش نخست هورن‌ها در محیط هوا روبروی یکدیگر قرار داده شدند و شکل سیگنال‌ها بررسی شد. همچنین آزمایش دیگری به‌منظور بررسی اثر ضخامت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ میلی‌متر) بر سرعت امواج فراصوت و زمان پرواز در دو محیط سیب‌زمینی و هویج در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار انجام گرفت. برای بررسی رابطه‌ی بین زمان پرواز و ضخامت از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. این آزمایش برای دو نوع تراگذر دارای هورن و بدون هورن به‌طور جداگانه انجام شد.

از سیگنال‌های ارسالی و دریافتی به‌منظور استخراج زمان پرواز و از رابطه‌ی (۱۲) برای محاسبه سرعت استفاده گردید:

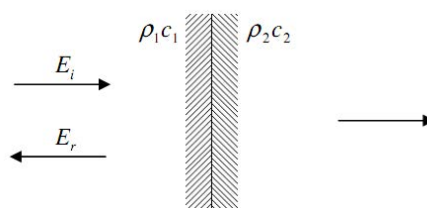
$$v = \frac{L}{TOF} \quad (12)$$

که در آن، v ، سرعت امواج فراصوت در میوه ($m \cdot s^{-1}$)، L ، ضخامت میوه (mm) و TOF ، زمان پرواز امواج فراصوت (ms) می‌باشند (Rose, 2004).

نتایج و بحث

برای اطمینان از اینکه هورن طراحی شده در بسامد مرکزی ۷۵ kHz دارای مود طولی است، از نرم‌افزار ANSYS12 کمک گرفته شد. همان‌گونه که گفته شد به‌دلیل شکل متقارن هورن، مدل‌سازی دو بعدی مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی تأثیر تعداد المان بر جواب‌ها تعداد المان‌ها از ۵ تا ۶۰۰ انتخاب شد و با هریک از آن‌ها آنالیز انجام گرفت (شکل ۷). همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با افزایش تعداد المان‌ها از ۳۰۰ به‌بالا تغییر چندانی در مود طولی مشاهده نمی‌شود. بنابراین تحلیل‌های بعدی برای کاهش حجم محاسبات با تعداد المان ۳۰۰ اجرا شد.

سرعت فراصوت در محیط اول و دوم می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- بازگشت موج با تغییر محیط

Fig. 5. Wave return with medium change

برای انجام آزمایشات از تراگذر با بسامد مرکزی ۷۵ kHz ساخت شرکت Airmar استفاده شد. قطر ابتدایی هورن یعنی جایی که به‌تراگذر وصل می‌شود، بایستی از قطر تراگذر، بزرگتر و یا با آن مساوی باشد تا هوا با انتهای تراگذر در تماس نباشد. زیرا در همان قسمتی که هوا با تراگذر در تماس است تمام موج باز می‌گردد و انرژی فراصوتی تبدیل به‌گرما شده و هدر می‌رود. از طرفی قطر بزرگ هورن باید کمتر یا مساوی با $\frac{\lambda}{4}$ باشد تا ارتعاشات جانبی زیاد نشود (Markov, 1966). با توجه به‌اینکه تراگذر انتخابی دارای قطر ۳۸ mm است، قطر اولیه هورن باید از آن بزرگتر باشد. بنابراین بزرگترین قطر هورن ۴۰ mm در نظر گرفته شد. همچنین برای تماس بهتر هورن با میوه، قطر کوچک هورن ۵ mm در نظر گرفته شد. جنس متمرکزکننده از آلومینیوم در نظر گرفته شد که ویژگی‌های آن در جدول ۱ آمده است.

با استفاده از روابط (۱)، (۵)، (۶) و (۸) خواهیم داشت:

$$N = \frac{40}{5} = 8$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\ln N}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}} \right) = \beta = \frac{2\pi \times 75000}{5134} \left(\frac{\ln 8}{\sqrt{\pi^2 + (\ln 8)^2}} \right) = 50.6617$$

$$l = \frac{\pi c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi} \right)^2} = \frac{5134}{2 \times 75000} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln 8}{\pi} \right)^2} = 0.0411$$

$$A_x = A_0 e^{-2\beta x} \Rightarrow A_x = 125.66 \times 10^{-2} e^{-101.32x}$$

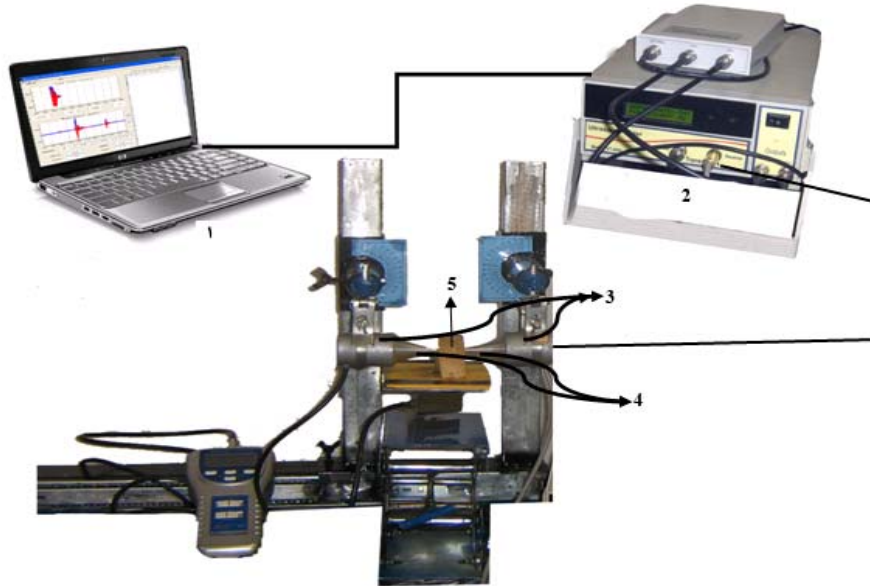
تجهیزات و آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا دستگاه فرستنده و گیرنده امواج فراصوتی در دانشگاه تربیت مدرس تهران (سال ۱۳۹۰) ساخته شد. از

جدول ۱- مشخصات ماده استفاده شده برای ساخت هورن

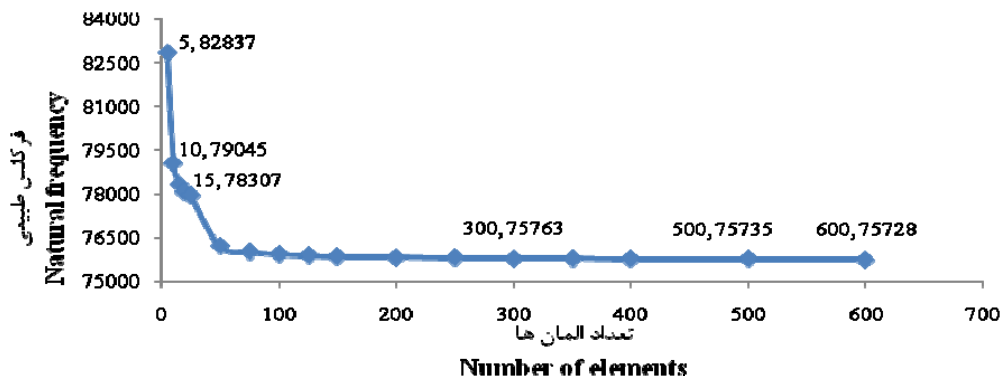
Table 1. Properties of the material used for fabricating the horn				
E (Pa)	ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	c ($m \cdot s^{-1}$)	λ (m)	جنس (Material)
7.3×10^{10}	2770	5133.594	0.275	آلومینیوم (Aluminum)

۱- زمان پرواز، زمانی است که پالس فراصوت از یک طرف میوه به طرف دیگر آن انتقال می‌یابد.



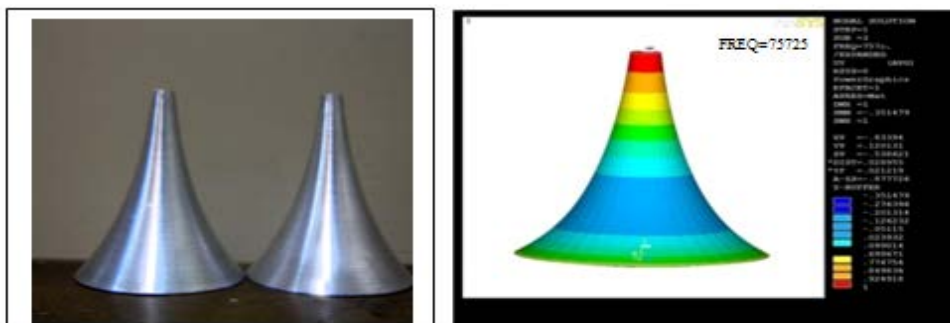
شکل ۶- سامانه اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی میوه (۱- رایانه، ۲- فرستنده و گیرنده امواج فراصوت، ۳- تراگذر، ۴- هورن، ۵- سیب زمینی)

Fig. 6. Ultrasonic system for measurement of fruit properties (1- Computer, 2- Ultrasonic pulser- receiver, 3- Transducer, 4- Horn, 5- Potato)



شکل ۷- تأثیر تعداد المان بر بسامد طبیعی هورن

Fig. 7. Effect of number of elements on the natural frequency of the horn



ب (b)

الف (a)

شکل ۸- (الف) مود طولی هورن نمایی، (ب) هورن ساخته شده

Fig. 8. (a) Longitudinal mode of the exponential horn, (b) The actual machined horn

یعنی در این حالت تمام موج بر می‌گردد و هیچ موجی وارد هوا نمی‌شود. با قرار دادن محیطی چگال (مانند هویج بین کاوشگرها سیگنال دریافتی به‌خوبی قابل مشاهده بود (شکل ۹).

آزمون دوم: بررسی اثر ضخامت بر سرعت امواج فراصوت

و زمان پرواز در حالت دارای هورن و بدون هورن

مطابق رابطه‌ی ۱۳، انتظار آن است که با تغییر ضخامت نمونه، سرعت امواج فراصوت در محیط تغییر نکند ولی زمان پرواز افزایش یابد. نتایج نشان داد که در کاوشگر دارای هورن بین ضخامت‌های مختلف از نظر سرعت امواج فراصوتی در دو محیط سیب‌زمینی و هویج اختلاف غیرمعنی‌دار ($P < 0.01$) بود (شکل ۱۰ و جدول ۳). همچنین مشخص شد که در کاوشگر دارای هورن برای هر دو محصول با افزایش ضخامت، زمان پرواز به‌طور خطی افزایش می‌یابد و همبستگی خوبی ($R^2 = 0.996$) بین ضخامت نمونه و زمان پرواز وجود دارد. این یافته‌ها با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی خوبی داشت. محققین طی آزمایش‌هایی روی سیب، هلو و سیب زمینی دریافتند که با افزایش ضخامت نمونه، زمان پرواز به‌طور خطی افزایش یافته و سرعت امواج تغییر چندانی نمی‌کند (Kim et al., 2004, Zaki Dizaji et al., 2009).

پس از انجام آنالیز مشخص شد که نخستین مود طولی هورن طراحی شده $75/6 \text{ kHz}$ است که خطای حدود $0/8$ درصد را نشان می‌دهد (شکل‌های ۷ و ۸). در حقیقت می‌توان گفت این روش، روشی مناسب برای هورن‌های با شکل پیچیده است و با استفاده از آن می‌توان انواع مودهای هورن را استخراج نمود که کاربردهای مختلفی دارند. بعد از طراحی، هورن مورد نظر ساخته و با استفاده از چسب روی تراگذر نصب و نتایج آن با حالت بدون هورن مقایسه شد (شکل ۸).

آزمون نخست: بررسی تراگذر بدون هورن و دارای هورن

در محیط هوا

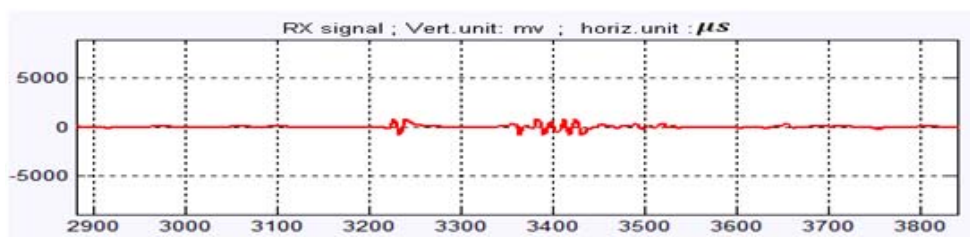
در این آزمون هورن‌های فرستنده و گیرنده در هوا روبروی یکدیگر قرار داده شدند. مشخص شد که سیگنال بسیار ضعیفی از هوا عبور می‌کند و با افزایش فاصله (تا 2 mm) سیگنالی مشاهده نشد. علت این امر اختلاف چگالی و سرعت امواج فراصوتی در آلومینیوم و هوا می‌باشد (جدول ۲). همانطور که پیش‌تر گفته شد با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) نسبت انرژی‌های رفتی و برگشتی به‌دست می‌آید.

$$E_r = E_i \left[\frac{2770 \times 5134 - 334 \times 1.285}{2770 \times 5134 + 334 \times 1.285} \right]^2 \Rightarrow \frac{E_r}{E_i} \cong 1$$

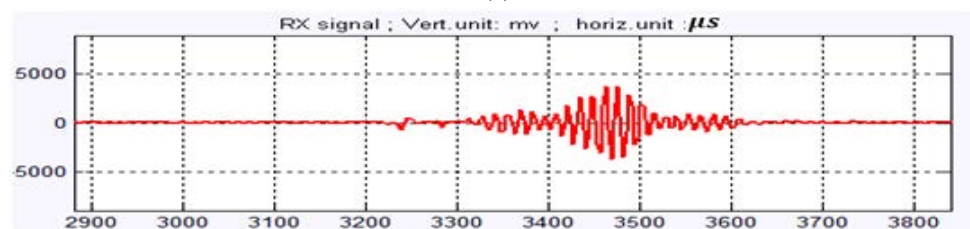
جدول ۲- خصوصیات فراصوتی آلومینیوم و هوا

Table 2. Ultrasonic properties of air and aluminum

چگالی (kg m^{-3}) (Density)	سرعت امواج فراصوت (m s^{-1}) (Velocity of ultrasonic wave)	محیط (Medium)
2770	5134	آلومینیوم (Aluminum)
1.285	334	هوا (Air)



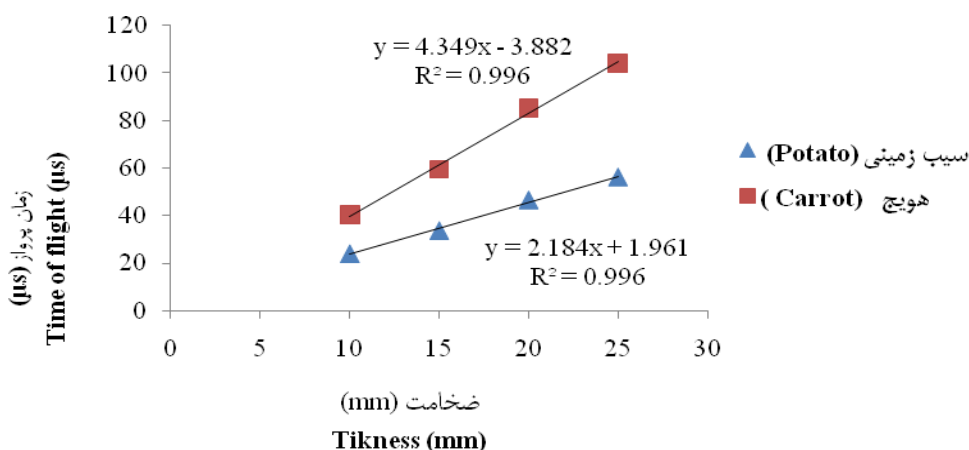
(a) الف



(b) ب

شکل ۹- سیگنال‌های عبور کرده از محیط (الف) هوا، (ب) هویج

Fig. 9. Signals transmitted through (a) Air, (b) Carrot sample



شکل ۱۰- رابطه بین ضخامت و زمان پرواز در تراگذر دارای هورن

Fig. 10. Relationship between sample thickness and time of flight using transducer with horn

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس اثر ضخامت بر سرعت امواج فراصوت و زمان پرواز در حالت دارای هورن

Table 3. Anova table for the effect of thickness on ultrasonic velocity and time of flight in transducer with horn

(Mean of squares) میانگین مربعات				منابع تغییرات (Source of variation)
هویج (Carrot)		سیب زمینی (Potato)		
زمان پرواز (Time of flight)	سرعت امواج فراصوتی (Ultrasonic velocity)	زمان پرواز (Time of flight)	سرعت امواج فراصوتی (Ultrasonic velocity)	
33329.385**	11.335 ^{ns}	1058.83**	274.448 ^{ns}	بین گروه‌ها (Between groups)
0.296	6.722	0.584	100.265	داخل گروه‌ها (Within groups)

ns و **، به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

ns and **, non-significant and significant at 0.01 level, respectively

با توجه به این آزمایش می‌توان گفت حتی در آزمون‌های مخرب فراصوتی که برای عبور سیگنال از محصول نیاز به برش آن و تهیه نمونه می‌باشد، تراگذر دارای هورن بسیار مناسب‌تر است، چون علاوه بر سطح مقطع کمتر که امکان تهیه نمونه‌های بسیار کوچک و با قطر ۵mm را می‌دهد، ویژگی‌های فراصوتی را با دقت بیشتری اندازه‌گیری می‌کند. در تراگذر بدون هورن تهیه نمونه‌ها با قطر زیاد (برای مثال ۴۰mm در این تحقیق) و بافت یکسان از محصول ساده نیست، مانند هویج که در مرکز دارای بافت خشبی است و جداسازی سیگنال عبوری از قسمت گوشتی و مرکز مشکل است. ولی در تراگذر دارای هورن در هر نقطه از محصول می‌توان آزمون فراصوتی را انجام داد.

در کاوشگر بدون هورن، نتایج حاکی از اختلاف معنی‌دار ($P < 0.01$) بین ضخامت‌های مختلف از نظر سرعت امواج فراصوت بود (جدول ۴). در نتیجه به جای آن که سرعت تقریباً ثابت بماند، مطابق شکل ۱۱ با افزایش ضخامت، سرعت روند صعودی داشت. از طرفی با تغییر ضخامت، تغییرات زمان پرواز نیز مطلوب نبود. یعنی در همه نمونه‌ها مطابق انتظار با افزایش ضخامت نمونه، زمان افزایش نیافت (شکل ۱۲). در حقیقت در نمونه‌های کم ضخامت، استفاده از تراگذر بدون هورن همراه با خطا بوده و پراکندگی داده‌ها زیاد است، که علت آن اغتشاشات امواج منتشره در جلوی تراگذر فرستنده (ناحیه مرده درون ناحیه‌ی نزدیک) است. می‌توان گفت هورن مانند یک لایه تأخیرانداز عمل نموده و اغتشاشات را فیلتر کرده است (Mizrach et al., 1989).

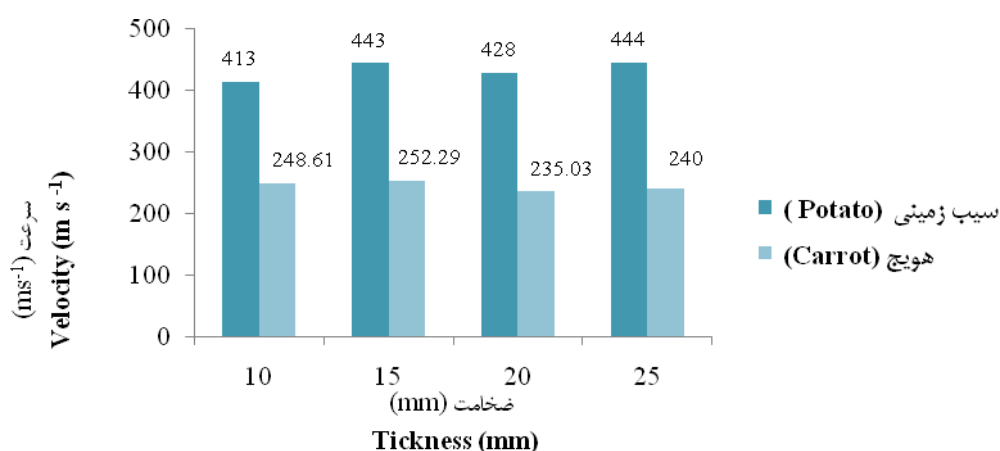
جدول ۴- تجزیه واریانس اثر ضخامت بر سرعت امواج فراصوت و زمان پرواز در حالت بدون هورن

Table 4. Anova table for the effect of thickness on ultrasonic velocity and time of flight in transducer without horn
(Mean of squares) میانگین مربعات

هویج (Carrot)		سیب زمینی (Potato)		منابع تغییرات (Source of variation)
زمان پرواز (Time of flight)	سرعت امواج فراصوتی (Ultrasonic velocity)	زمان پرواز (Time of flight)	سرعت امواج فراصوتی (Ultrasonic velocity)	
86.104**	22718.204**	275.29**	23878.24**	بین گروه‌ها (Between groups)
0.71	2.662	0.278	518.24	داخل گروه‌ها (Within groups)

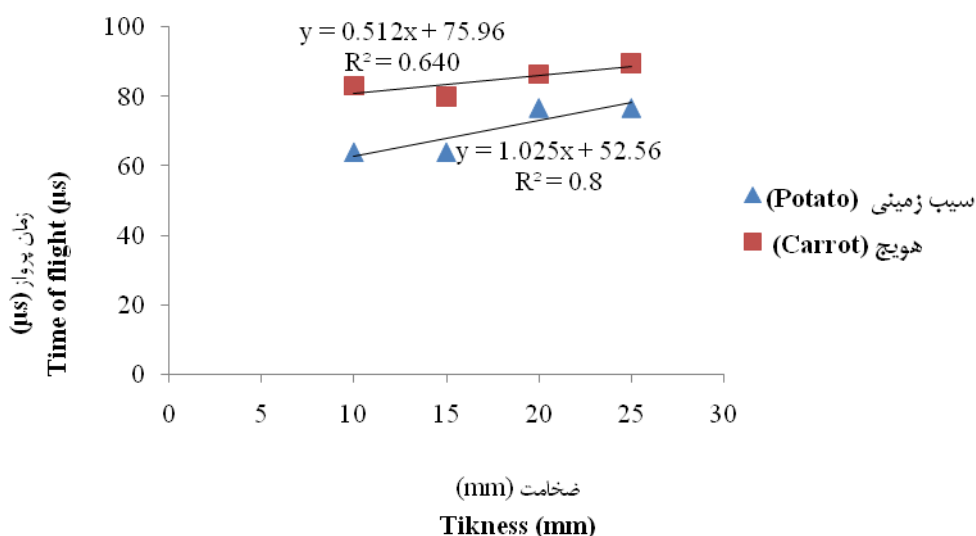
** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

** , significant at 0.01 level



شکل ۱۱- سرعت امواج عبوری در ضخامت‌های مختلف در حالت بدون هورن

Fig. 13. Effect of sample thickness on signal velocity using transducer without horn



شکل ۱۲- رابطه بین ضخامت و زمان پرواز در تراگذر بدون هورن

Fig. 12. Relationship between sample thickness and time of flight using transducer without horn

نتیجه‌گیری کلی

داد که در کاوش‌گر دارای هورن بین ضخامت‌های مختلف از نظر سرعت امواج فراصوتی در دو محیط سیب‌زمینی و هویج اختلاف غیرمعنی‌دار ($P < 0.01$) و در کاوشگر بدون هورن این اختلاف معنی‌دار می‌باشد. به عبارت دیگر در کاوش‌گر دارای هورن در ضخامت‌های مختلف سرعت امواج ثابت است در حالی که در کاوشگر بدون هورن با تغییر ضخامت نمونه، سرعت تغییر می‌کند که مطلوب نیست. بنابراین می‌توان گفت تراگذر دارای هورن برای انجام آزمون‌های فراصوتی مناسب‌تر است.

با توجه به تحقیق انجام شده مشخص شد که با استفاده از روش رایانه‌ای می‌توان هورن‌های بسیار پیچیده را با دقت بالایی طراحی کرد. در تحلیل تأثیر تعداد المان بر بسامد طبیعی معلوم شد که در تعداد کم المان، تحلیل با خطا همراه است و تا جایی که بسامد طبیعی هورن تقریباً ثابت شود باید تعداد المان را زیاد کرد که در این تحقیق تعداد المان لازم ۳۰۰ بود. همچنین مقایسه بین روش نظری و رایانه‌ای نشان داد که روش رایانه‌ای خطای بسیار کمی (کمتر از یک درصد) داشته و نیاز به حل معادلات بسیار پیچیده ندارد. نتایج نشان

منابع

1. Butz, P., C. Hofmann, and B. Tauscher. 2005. Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. *Journal of Food Science*. 70 (9): 131-141.
2. Graham, G., J. N. Petzing, and M. Lucas. 1999. Modal analysis of ultrasonic block horns by ESPI. *Ultrasonics*, 37(2): 149-157.
3. Hedrick, R., L. Hykes, and E. Strachman. 2005. *Ultrasound physics and instrumentation*. Fourth edition. Elsevier Mosby.
4. Jullian, R. 1965. *Ultrasonic engineering*, John Willy and Sons inc, USA.
5. Kim, K. B., H. M. Jung, M. S. Kim, and G. S. Kim. 2004. Evaluation of fruit firmness by ultrasonic measurement. *Advances in Nondestructive Evaluation*, Pt 1-3. Key Engineering Materials, 270-273. Trans Tech Publications Ltd., Zurich-Uetikon. 1049-1054.
6. Markov, A. 1966. *Ultrasonic machining of intractable materials*. Iliffe Books Ltd.
7. Merkulov, L. G. 1957. Design of Ultrasonic Concentrations, *Soviet Physical Acoustics*, 3: 230-238
8. Mizrach, A., U. Flitsanov, M. Akerman, and G. Zauberman. 2000. Monitoring avocado softening in low-temperature storage using ultrasonic measurements. *Comput. Electron. Agric.* 26: 199-207.
9. Mizrach, A., U., Flitsanov, R. El-Batsri, and C. Degani. 1999. Determination of avocado maturity by ultrasonic attenuation measurements. *Sci. Hortic.* 80:73-180.
10. Mizrach, A., N., Galili, G., Rosenhouse. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Trans. ASAE* 32: 2053-2058.
11. Porteous, R. L., A. Y. Muir, R. L. Wastie. 1981. The identification of diseases and defect in potato tubers from measurements of spectral reflectance. *J. Agric. Eng. Res.* 26: 151-160.
12. Rose, J. L. 2004. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge university press. Cambridge. K.454.
13. Sarker, N., and R. R. Wolfe. 1983. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Trans. ASAE* 26: 624-629.
14. Subramanian, C.V. 2006. *Practical Ultrasonic*, Alpha science international Ltd, Oxford, UK.
15. Upchurch, B. L., G. E. Miles, R. L. Strohshine, E. S. Furgason, F. H. Emerson. 1987. Ultrasonic measurement for detecting apple bruises. *Trans. ASAE* 30:803-809.
16. Webster, A. G. 1919. Acoustical impedance, and the theory of horns and of the phonograph, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 5 (1919), pp. 275-282; reprinted in *J. Audio Engineering Soc.*, 25(1977): 24-28.
17. Zaki Dizaji, H., S. Minaei, M. Mokhtary, and T. Tavakkoli Hashtjin. 2009. Development of an ultrasonic device for investigation of agricultural product quality. 6th International Postharvest Symposium. Antalya. Turkey.
18. Zhou G. P, Y. H, and B. F. Zhang Zhang. 2002. The complex-mode vibration of ultrasonic vibration systems. *Ultrasonics* 40: 907-911.