

طراحی، ساخت و آزمایش متمرکزکننده نمایی به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های

فراصوتی محصولات کشاورزی

رسول معمار دستجردی^{۱*}، سعید مینایی^۲ و محمد هادی خوش تقاضا^۳

۱- استادیار گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه منابع طبیعی و کشاورزی رامین، rasoul.memar@gmail.com

۲ و ۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده:

آزمون فراصوتی یکی از روش‌هایی است که از آن می‌توان برای ارزیابی کیفیت محصول‌های کشاورزی استفاده کرد. تراگذرهای مورد استفاده در آزمون‌های غیر مخرب فراصوتی، صنعتی هستند و از آنجایی که محصول‌های کشاورزی تضعیف‌کننده‌ی 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 محصول‌های کشاورزی ارائه شد. بررسی‌های اولیه نشان داد که می‌توان با استفاده از رویکردهای 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 به طور معنی‌داری تغییر کرد که مطلوب نیست. بنابراین می‌توان گفت که تراگذر دارای هورن برای انجام آزمون‌های فراصوتی مناسب‌تر است.

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



مقدمه

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 به صورت نمایی رو به افزایش است (Butz et al., 2005). روش فراصوتی روشی است که به طور 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 پزشکی و صنعت، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های میوه مناسب نیستند چون میوه‌ها داری بافتی غیر همگن بوده و همچنین تضعیف کننده بسیار قوی امواج با بسامد بالا هستند. آزمون فراصوت در محدوده‌ی بسامدی 20 kHz تا 100 MHz صورت می‌گیرد. تحقیقات نشان می‌دهد محدوده‌ی 20 kHz تا 1 MHz محدوده‌ای مناسب برای مواد کشاورزی می‌باشد (Sarker and Wolfe, 1983; Mizrach et al., 1989, 1999, 2000; Kim et al., 2009).

نخستین تلاش‌ها در دهه ۱۹۸۰ در این زمینه انجام گرفت که 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 (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 میوه ی آووکادو استفاده کردند (Mizrach et al., 1989). بر اساس گزارش‌های ذکی و همکاران، مشخص شد که برای اندازه‌گیری ویژگی‌های بسیاری از میوه‌ها نیاز به برش زدن آن‌ها می‌باشد (ذکی و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین باید تراگذرهای نوع صنعتی موجود به گونه‌ای تغییر داده شود که قابلیت استفاده برای میوه‌ها به صورت 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. هورن یا متمرکزکننده واسط بین تراگذر و جسم مورد نظر است (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

نظری تحقیق

به طور 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، به محاسبات دقیق پارامتری معادله دیفرانسیلی حاکم بر هورن پرداخته می‌-



شود. 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 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 به عنوان روشی مناسب انتخاب گردید، سپس هورن نمایی با روش نظری طراحی شده و مودهای طولی آن با روش اجزای محدود استخراج شد. همچنین پس از ساخت، آزمونی روی محصولات با کاوشگر^۱های دارای هورن و بدون هورن به منظور مقایسه آن‌ها در اندازه‌گیری زمان پرواز و سرعت امواج عبوری، انجام شد.

انتخاب روش اجزای محدود

برای اطمینان از درستی تحلیل‌ها در مورد شکل مودهای ارتعاشی، آنالیز مودال روی هورن ساخته شده توسط زاو 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 30 mm و قطر انتهایی 15 mm و طول 150 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 یاد شده 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 0.33 .

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، شبکه بندی، 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 به کار برده شد. همچنین حل‌گر *Block Lanczos* مورد استفاده قرار گرفت.

تحلیل با مدل‌سازی سه بعدی

نتایج حاصل از آنالیز مودال در شکل ۱ نشان داده شده است.

^۱ Probe

طولی (kHz) Longitudinal	پیچشی (kHz) Torsional	خمشی (kHz) Flexural
17.517	11.641	4.314
33.741	21.429	10.713
	31.380	18.919
	41.553	28.168
		37.991

	Longitudinal (kHz)	Torsional (kHz)	Flexural (kHz)
	17.7	11.7	4.01
			10.5
هورن نمایی	34.8	21.9	18.7
Exponential horn		32.4	28.2
		42.9	37
			48
هورن مخروطی	18.1	12.1	4.60
Conical horn		22.1	19.1
		32.6	28.8
		43.1	38.3
			49.1

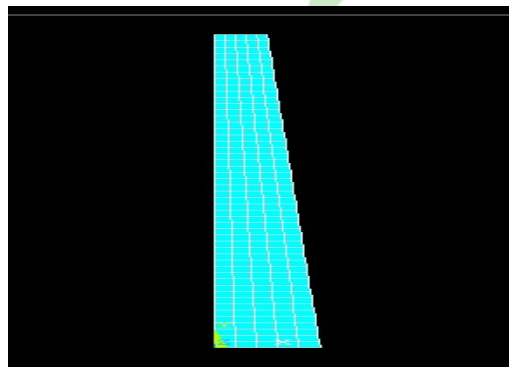
ب) الف

الف) ب

شکل ۱- فرکانس‌های طبیعی هورن مخروطی برای مودهای ارتعاشی مختلف، (الف) ژاو و همکاران، (ب) اجزای محدود مقایسات انجام شده با نتایج ژاو و همکاران مشخص کرد که اولین مود طولی هورن مخروطی به صورت آزمایشگاهی $18/1 kHz$ بوده و با استفاده از روش المان محدود $17/517 kHz$ به دست 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 $6/1$ 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. این روش فقط می‌توان مودهای متقارن (طولی) را استخراج کرد. نتایج حاصل نشان داد که اولین مود طولی $17/52 kHz$ و دومین مود طولی $33/769 kHz$ است. با توجه به شکل ۱ اولین مود طولی هورن مخروطی توسط ژاو و همکاران $18/1 kHz$ گزارش داده شده است 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.



شکل ۲- مش بندی هورن مخروطی با المان $Plane42$ (مخروط از دوران سطح فوق حول محور عمودی حاصل می‌شود)

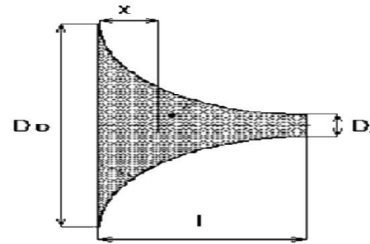


طراحی نظری هورن نمایی

برای هورن نمایی ناحیه تغییرات به صورت زیر است:

$$A_x = A_0 e^{-2\beta x} \quad (1)$$

که در آن A_0 ، A_x ، x و β به ترتیب سطح مقطع هورن به فاصله 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).



شکل ۳- طرحواره هورن نمایی

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

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

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

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 β از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

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

طول هورن l بر اساس نیم موج مقدار n برای n برابر یا تمام موج مقدار n برابر با دو از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$l = \frac{n}{2} \cdot \lambda \quad (8)$$

برای هورن نمایی مقدار l برابر است با:

$$l = \frac{nC}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi} \right)^2} \quad (9)$$

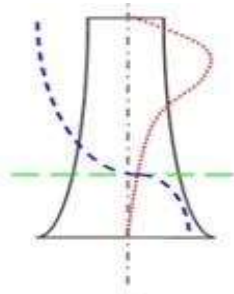
موقعیت گره ارتعاشی x_0 عبارت است از:

$$u = 0 \Rightarrow x_0 = \frac{l}{\pi} \arccot \left(\frac{1}{\pi} \ln N \right) \quad (10)$$

معادله‌ی دامنه تنش در طول هورن مطابق رابطه‌ی ۱۱ می‌باشد:

$$\sigma = -Eu e^{\beta x} \left(\frac{\beta^2 v_l}{\omega} + \frac{\omega}{v_l} \right) \sin \frac{\omega x}{v_l} \quad (11)$$

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



دامنه ارتعاش (vibrational amplitude) تنش (Stress) موقعیت نود (Node position)

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

محاسبه ابعاد هورن طراحی شده برای تراگذر

هنگامی که یک موج از محیط یخ محیط دیگر می رود، مقداری از آن گذر می کند، مقداری بازتابیده می شود و مقداری نیز جذب می گردد. ارتباط میان موج اولیه و موج برگشتی از معادله ۱۲ به دست می آید (Subramanian, 2006).

$$E_r = E_i \left[\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right]^2 \quad (12)$$

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 سرعت فراصوت در محیط اول و دوم می باشد.

برای انجام آزمایشات از تراگذر با بسامد مرکزی 75 kHz ساخت شرکت *Airmar* استفاده شد. قطر ابتدایی هورن یعنی جایی که به تراگذر وصل می شود، 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 می گردد و انرژی فراصوتی تبدیل به گرما شده و هدر می رود. از طرفی قطر بزرگ هورن باید کمتر یا مساوی با $\frac{\lambda}{4}$ باشد تا ارتعاشات جانبی زیاد نشود (Markov, A., 1966). با توجه به اینکه تراگذر انتخابی دارای قطر 38 میلی متر است، قطر اولیه هورن باید از آن بزرگتر باشد. بنابراین بزرگترین قطر هورن 40 mm در نظر گرفته شد. همچنین برای تماس بهتر هورن با میوه قطر کوچک هورن 5 mm در نظر گرفته شد. جنس متمرکزکننده از آلومینیوم در نظر گرفته شد که ویژگی های آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات ماده استفاده شده برای ساخت هورن

جنس	$\lambda(m)$	$c (ms^{-1})$	$\rho(kgm^{-3})$	$E(Pa)$
آلومینیوم	0.275	5133.594	2770	7.3×10^{10}

با استفاده از روابط ۱، ۶، ۷ و ۱۰ خواهیم داشت:



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

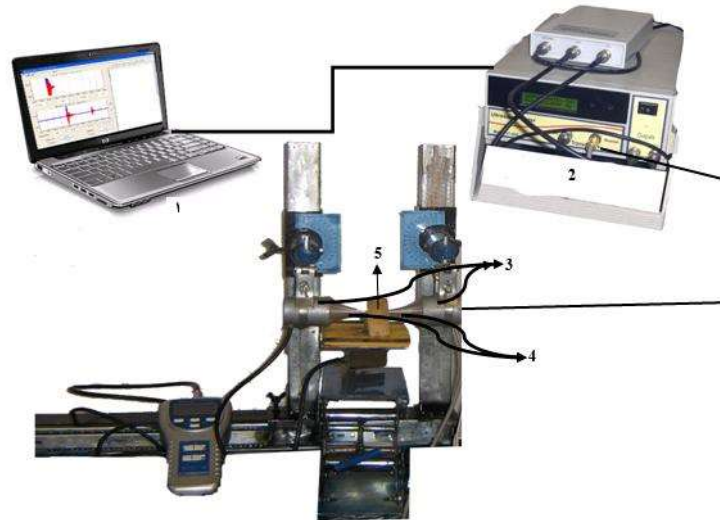
$$\beta = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\ln N}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}} \right) \Rightarrow \beta = \frac{2\pi \times 75000}{5134} \left(\frac{\ln 8}{\sqrt{\pi^2 + (\ln 8)^2}} \right) = 50.6617$$

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

$$A_x = A_0 e^{-2\beta x} \Rightarrow A_x = 125.66 \times 10^{-5} e^{-101.32x}$$

تجهیزات و آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا دستگاه فرستنده و گیرنده امواج فراصوتی در دانشگاه تربیت مدرس تهران (سال ۱۳۹۰) ساخته شد. از یک جفت تراگذر ۷۵ kHz در حالت بدون هورن و دارای هورن به عنوان فرستنده و گیرنده امواج فراصوت استفاده شد. کاوشگرها روی ساز و کار نگهدارنده‌ای سوار شدند که به آنها امکان حرکت افقی، عمودی و زاویه دار را می‌داد (شکل ۵).



شکل ۵- سامانه اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی میوه (۱- رایانه، ۲- فرستنده و گیرنده امواج فراصوت،

۳- تراگذر، ۴- هورن، ۵- سیب زمینی)

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 به منظور بررسی اثر ضخامت (۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر) بر سرعت امواج فراصوت و زمان پرواز^۱ 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 به طور جداگانه انجام شد.

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



از سیگنال‌های ارسالی و دریافتی به منظور استخراج زمان پرواز و از رابطه‌ی ۱۳ برای محاسبه سرعت استفاده گردید:

۷

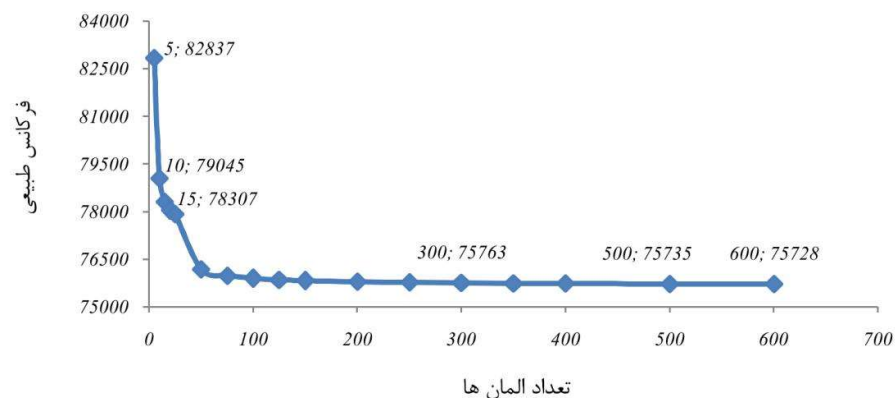
(۱۳)

که در آن، v ، سرعت امواج فراصوت در میوه (ms^{-1})، L ، ضخامت میوه (mm) و TOF ، زمان پرواز امواج فراصوت (ms) می-

باشند (Rose, 2004).

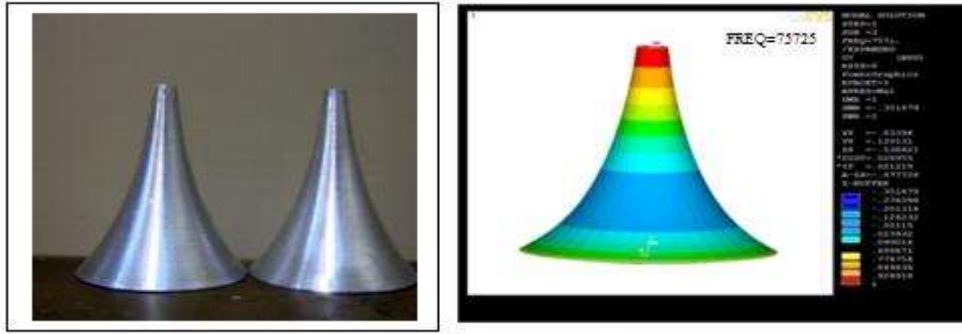
نتایج و بحث

برای اطمینان از اینکه هورن طراحی شده در بسامد مرکزی 75 kHz دارای مود طولی است، از نرم افزار *ANSYS12* کمک گرفته شد. همان‌گونه که گفته شد به دلیل 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 ۶). همانطور که در شکل نشان داده شده است با افزایش تعداد المان‌ها از ۳۰۰ به بالا تغییر چندانی در مود طولی مشاهده نمی‌شود. بنابراین تحلیل‌های بعدی برای کاهش حجم محاسبات با تعداد المان ۳۰۰ اجرا شد. 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 ۶ و ۷). 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).



شکل ۶- تأثیر تعداد المان بر بسامد طبیعی هورن

¹ Time Of Flight



ب (b)

الف (a)

شکل ۷- (الف) مود طولی هورن نمایی، (ب) هورن ساخته شده

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 ۲ میلی‌متر) 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 رابطه ۱۲ نسبت انرژی‌های رفتی و برگشتی به دست می‌آید.

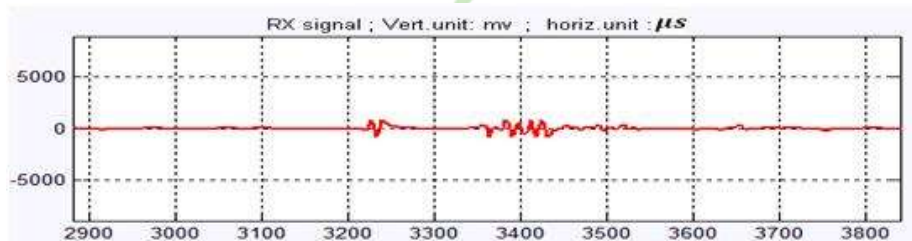
$$E_r = E_i \left[\frac{2770 \times 5134 - 334 \times 1.285}{2770 \times 5134 + 334 \times 1.285} \right]^2 \Rightarrow \frac{E_r}{E_i} \cong 1$$

جدول ۲- خصوصیات فراصوتی آلومینیوم و هوا

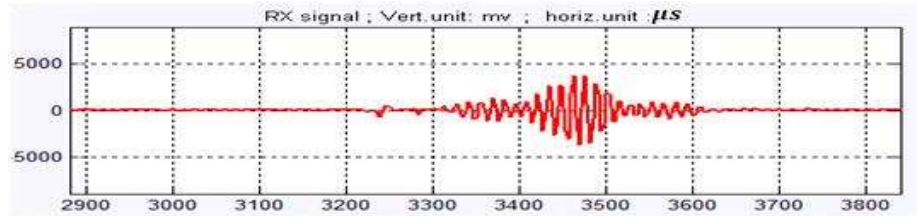
چگالی (kgm^{-3})	سرعت امواج فراصوت (ms^{-1})	محیط
2770	5134	آلومینیوم (Aluminum)
1.285	334	هوا (Air)

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 به خوبی قابل مشاهده بود (شکل ۸).



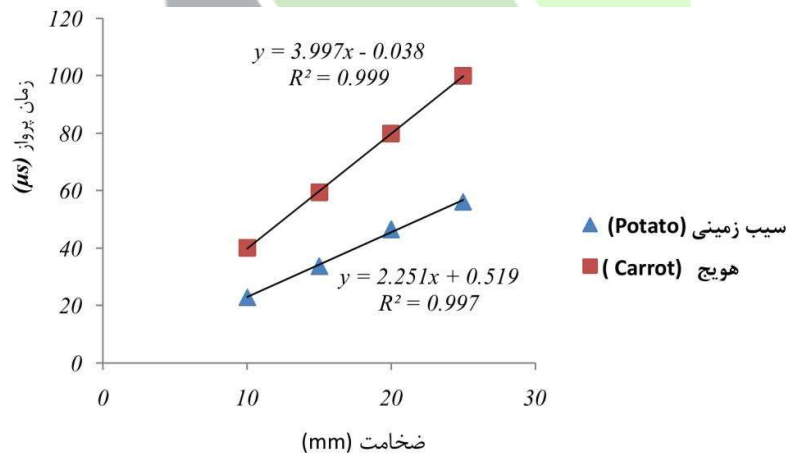
الف (a)



ب (b)

شکل ۸- سیگنال‌های عبور کرده از محیط (الف) هوا، (ب) هویج

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 ۹ و جدول ۳). همچنین مشخص شد که در کاوشگر دارای هورن برای هر دو محصول با افزایش ضخامت زمان پرواز، به طور 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 سیب‌زمینی دریافتند که با افزایش ضخامت نمونه، زمان پرواز به طور خطی افزایش یافته و سرعت امواج تغییر چندانی نمی‌کند (Kim et al., 2009; Zaki et al., 2009).



شکل ۹- رابطه بین ضخامت و زمان پرواز در تراگذر دارای هورن



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

میانگین مربعات				منابع تغییرات
هویج		سیب زمینی		
زمان پرواز	سرعت امواج فراصوتی	زمان پرواز	سرعت امواج فراصوتی	
33329.385**	11.335 ^{ns}	1058.83**	274.448 ^{ns}	بین گروه‌ها
0.296	6.722	0.584	100.265	داخل گروه‌ها

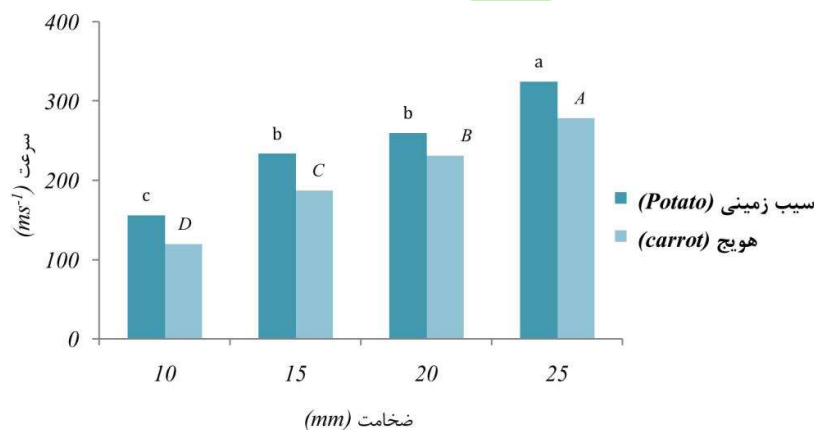
^{ns} و **، به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

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 ۱۰ 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 ۱۱). 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).

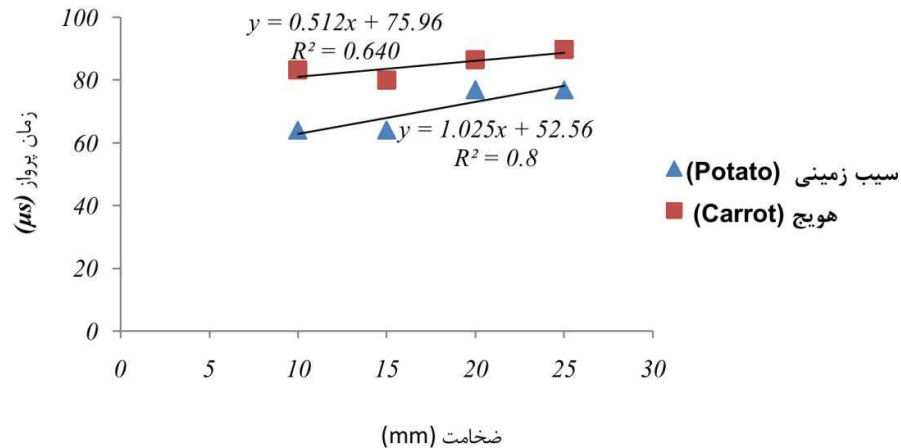
جدول ۴- جدول تجزیه واریانس اثر ضخامت بر سرعت امواج فراصوت و زمان پرواز در حالت بدون هورن

میانگین مربعات				منابع تغییرات
هویج		سیب زمینی		
زمان پرواز	سرعت امواج فراصوتی	زمان پرواز	سرعت امواج فراصوتی	
86.104**	22718.204**	275.29**	23878.24**	بین گروه‌ها
0.71	2.662	0.278	518.24	داخل گروه‌ها

** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱



شکل ۱۰- سرعت امواج عبوری در ضخامت‌های مختلف در حالت بدون هورن



شکل ۱۱- رابطه بین ضخامت و زمان پرواز در تراگذر بدون هورن

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 5mm را می‌دهد، ویژگی‌های فراصوتی را با دقت بیشتری اندازه‌گیری می‌کند. در تراگذر بدون هورن تهیه نمونه‌ها با قطر زیاد (برای مثال 40mm در این تحقیق) و بافت یکسان از محصول ساده نیست، مانند هویج که در مرکز داری 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.

نتیجه‌گیری کلی

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 300 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 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.

منابع

- ۱- ذکی دیزجی، ح.، مینایی س.، توکلی هشتجین، ت.، مختاری دیزجی، م. (۱۳۸۸). طراحی و ساخت سامانه‌ی سنجش فراصوتی و بررسی عوامل موثر در اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. جلد ۱۰، شماره ۱، ص ۲۷-۴۸.
- 2- Butz, P. Hofmann, C. and Tauscher, B. (2005). Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. *Journal of Food Science* 70: 131-141.
- 3- Graham, G., Petzing, J.N., Lucas, M., (1999). Modal analysis of ultrasonic block horns by ESPI. *Ultrasonics* 37: 149-157
- 4- Hedrick, R., Hykes, L. and Strachman, E., 2005. *Ultrasound physics and instrumentation*. Fourth edition. Elsevier Mosby.
- 5- Jullian.R., 1965. *ultrasonic engineering*. John willy and Sons inc, USA.
- 6- Kim, K.B., Lee, S, Kim, M.S., Cho, B.K. 2009. Determination of apple firmness by non destructive ultrasonic measurement. *Postharvest Biology and Technology* 52: 44-48.
- 7- Markov, A. 1966. *Ultrasonic machining of intractable materials*. Iliffe Books Ltd.
- 8- Merkulov, L.G., 1957. Design of ultrasonic concentrations. *Soviet Physical Acoustics* 3: 230-238
- 9- Mizrach, A., Flitsanov, U., Akerman, M., Zauberman, G., 2000. Monitoring avocado softening in low-temperature storage using ultrasonic measurements. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 199-207.
- 1- Mizrach, A., Flitsanov, U., El-Batsri, R., Degani, C., 1999. Determination of avocado maturity by ultrasonic attenuation measurements. *Scientia Horticulturae* 80: 173-180.
- 10- Mizrach, A., Galili, N., Rosenhouse, G., 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Transaction of the ASAE* 32: 2053-2058.
- 11- Porteous, R.L., Muir, A.Y., Wastie, R.L., 1981. The identification of diseases and defect in potato tubers from measurements of spectral reflectance. *Journal of Agricultural Engineering Research* 26: 151-160
- 12- Rose, J.L. (2004). *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge university press. Cambridge. UK. Pp 454.
- 13- Sarker, N., Wolfe, R.R., 1983. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Transaction of the ASAE* 26: 624-629.
- 14- Subramanian, C.V., 2006. *Practical Ultrasonic*. Alpha science international Ltd, Oxford, UK.
- 15- Upchurch, B.L., Miles, G.E., Stroshine, R.L., Furgason, E.S., Emerson, F.H., 1987. Ultrasonic measurement for detecting apple bruises. *Transaction of the ASAE* 30: 803-809
- 16- Webster. A.G., 1919. Acoustical impedance, and the theory of horns and of the phonograph. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 5: 275-282
- 17- Zhou GP, Zhang YH, Zhang BF. 2002. The complex-mode vibration of ultrasonic vibration systems. *Ultrasonics* 40: 907-911.

Design, fabrication and testing of exponential horn for measuring ultrasonic attributes of agricultural products

Rasoul Meamar Dastjerdi^{1} Saeed Minaee² and Mohammad Hadi Khoshtaghaza³*

1- Assistant professor, Department of Mechanics of Agricultural Machinery, Ramin University of Agricultural Sciences and Natural Resource (rasoul.memar@gmail.com)

2, 3- Associate Professors, Department of Agricultural Machinery Engineering, Tarbiat Modares University

Abstract:

Non-destructive ultrasonic testing is one of the methods utilized to evaluate quality of agricultural products. Transducers used in this method are made for basically industrial applications. Since ultrasonic attenuation of wave's in agricultural products is very high, industrial transducers cannot be used in agriculture and need to modify. This is done with horns that concentrate energy on a small area at a certain distance from the transducer. In this paper, an exponential horn was designed, fabricated and tested using theoretical and computer-aided methods. Results showed that highly sophisticated horns can be designed using computer-aided method with a high accuracy. Analysis of the number of elements on natural frequency of horn proved that analysis was not precise at the low number of elements. Therefore, the number of elements should be increased when natural frequency of horn is almost fixed. The minimum number of elements was obtained to be 300. A comparison of theoretical and computer-aided methods showed a desirable performance of the computer-aided method with an error less than 1% without solving very complicated equations. Based on statistical analysis of the data, the effect of product thickness (potato and carrot) on the velocity of ultrasonic waves in the horned probe was not significant. Whereas for the unhorned probe, velocity changed significantly with sample thickness which is not desirable. Therefore, horned probe is more suitable for nondestructive ultrasonic tests than the unhorned probe.

Key words: Ultrasound, exponential horn, non destructive test, computer design