کیفیت سنج فراصوتی برای محصولات کشاورزی (۲۴)

حسن ذکی دیزجی[۱] ، سعید مینایی[۲] ، تیمور توکلی هشتجین[۳] ، منیژه مختاری دیزجی[۴] ، علیرضا منتظر[۵]

چکیده

آزمون فراصوتی یکی از روشهای آزمون غیر مخرب است که در زمینه‌ی کیفیت سنجی محصولات کشاورزی در حال توسعه می‌باشد. تبیین کیفیت محصولات و چگونگی ندازه‌گیری آن در کشاورزی پیشرفته اهمیت وافری دارد. استفاده از فراصوت در ارزیابی فرآوری مواد غذایی سابقه‌ای دیرینه دارد اما در مورد محصولات کشاورزی روند تکمیلی را سپری می‌کند. 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 محصول ربط داده می‌شود. برای آزمون محصولات کشاورزی به روش فراصوت عبوری به طور معمول از دو شاخص فراصوت، یعنی سرعت امواج و میزان تضعیف استفاده می‌شود. در این پژوهش، بتدا امانه‌ی کیفیت سنج فراصوتی طراحی و ساخته شد که اساس کار آن، پردازش سیگنال های عبوری از محصولات کشاورزی است. قسمتهای اصلی آن عبارتند از تپ از/ تپ‌گیر ساخته شده، کاوشگرهای فرستنده و گیرنده، نامه‌ی کنترل، رایانه، و سامانه جمع‌آوری اده‌ها. سامانه با پردازش سیگنال ها به صورت نیمه خودکار ویژگی‌های سرعت و میزان تضعیف را تعیین می‌کند. در ادامه آزمایشات، اثر مـ ده‌ی واسط، نیروی تماسی، ضخامت نمونه‌ها و لایه‌ی تاخیر بر سیگنال دریافتی رسی شد. آزمایش ها با نمونه‌های تهیه شده از بافت برخی محصولات کشاورزی اجرا شد. طول نمونه‌ها با توجه به نوع محصولات کشاورزی از ۵ تا ۱۲۰ میلی متر متغیر بود. نتایج نشان داد که با استفاده از امواج غیر پیوسته(تپی) با بسامد ۴۰kHz و توان نسبتاً کم، می‌توان امواج فراصوت را از بیشتر محصولات کشاورزی عبور داد. با در نظر گرفتن ماده‌ی واسط، ضخامت مناسب نمونه و نیروی تماسی کم، سامانه کیفیت‌سنج فراصوتی با دقت خوب، سرعت مناسب و نیمه خودکار، میزان تضعیف و سرعت امواج عبوری از نمونه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند.

کلیدواژه: آزمون غیر مخرب، فراصوت، محصولات کشاورزی و کیفیت سنجی

۱- دانشجوی دکترای مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، پست الکترونیک: zakih@modares.ac.ir
۲- دانشیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استاد گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۴- دانشیار گروه فیزیک پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس
۵- مربی گروه الکترونیک، دانشگاه شهید رجایی

مقدمه

علی رغم اینکه علم صوت سابقه‌ای دیرینه دارد ولی کاربرد عملی و علمی از آن در کشاورزی و صنایع غذایی دیر شروع شده است. در صنعت، توسعه و پیشرفت آزمون غیرمخرب فراصوت نسبت به سایر آزمونهای غیر مخرب کند بوده است. بیشترین کاربرد آن در پزشکی، بررسی جوش و صنعت هوا فضا است. اما بکارگیری این فن‌آوری در کشاورزی و صنایع مربوط به آن نسبت به سایر رشته‌ها محدودتر بوده است. علت اصلی آن در ویژگی‌های منحصر به فرد و پیچیده‌ی مواد کشاورزی است. بکارگیری امواج فراصوت در تشخیص خواص محصولات کشاورزی مانند میوه‌ها و سبزیجات، فن‌آوری جدیدی است. در روش فراصوت میزان تغییر ویژگیهای 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. دانستن کیفیت محصولات کشاورزی نه تنها از دیدگاه صادرات و نیز منافع مصرف کنندگان داخلی اهمیت دارد، بلکه کمک بسیاری در کنترل و کاهش ضایعات پس از برداشت می‌نماید. هرچند تعاریف گسترده و متفاوتی از کیفیت محصولات کشاورزی ارائه می‌شود(ذکی دیزجی و همکاران، ۱۳۸۶)، اما به طور خلاصه می‌توان آن را "میزان تناسب و خوب بودن یک محصول برای استفاده خاص" تعریف کرد(Abbott, 1999). تعریف کیفیت، بیشتر از دیدگاه گروه مصرف کنندگان و تولیدکنندگان مد نظر است(Shewfelt, 1999) . در طی سالهای اخیر در دنیا توجه بسیاری از پژوهشگران به تعیین کیفیت محصولات کشاورزی با روشهای غیر مخرب معطوف شده است که محور اصلی تحقیقات پس از برداشت میوه‌ها و محصولات زراعی شده‌اند و حجم تحقیقات در این زمینه به صورت نمایی رو به افزایش است (Butz *et al.,* 2005). در ایران تحقیقاتی در مورد بکارگیری امواج صوتی برای ارزیابی غیر مخرب کیفیت محصولات کشاورزی صورت گرفته، لیکن هیچ گزارشی درباره‌ی کیفیت سنجی محصولات کشاورزی منتشر نشده است.

هر چند گستردگی پژوهش‌ها در مورد کاربرد امواج فراصوت در کیفیت سنجی محصولات کشاورزی نسبت به سایر روشها مانند طیف‌سنجی مادون قرمز (NIRS) بسیار کمتر است، لیکن به برخی پژوهش‌های انجام یافته در جهان اشاره می‌شود. بیشتر پژوهشها قبل از دهه‌ی ۹۰ اشاره داشتند که دو مشکل اساسی در کاربرد امواج فراصوت در محصولات کشاورزی وجود دارد(Porteous etal, 1981 and Sarkar and Wolfe, 1983): میزان نفوذ امواج فراصوتی بسیار کم است و میزان تضعیف امواج در مقایسه با سایر مواد بسیار زیاد است. میزراک و همکاران در سال ۱۹۸۹ با بهره‌گیری از مطالعات انجام شده و اشراف به مشکلات مذکور، دو سامانه‌ی فراصوتی بر اساس روش عبوری و تپ پژواک راه‌اندازی کردند که سامانه عبوری نتایج بهتری داشت. ایشان نشان دادند که با افزایش توان و استفاده از امواج با فرکانس کم می‌توان بر دو مشکل فوق تا حدودی غالب شد(Mizrach *et al.,* 1989). این سامانه طی سالهای بعد در چندین مرحله ارتقاء داده شد (Mizrach et al., 1996 and 2005). ویژگی اصلی سامانه‌ی مذکور این است که توانایی کاوش به عمق چند میلی متر از سطح نمونه ها را دارد اما اطلاعاتی از داخل میوه به دست نمی‌دهد. کاوش از درون نمونه تا حدود عمق ۹ سانتی‌متری گزارش شده است (Cheng and Haugh, 1994). در بیشتر سامانه‌های اندازه‌گیری، کاوشگرهای فرستنده و گیرنده در یک راستا قرار دارند. اما روشهایی برای رفع این محدودیت ارائه شده است که در آن، کاوشگر فرستنده و گیرنده نسبت به هم زاویه‌دار قرار گرفته‌اند (Mizrach et al., 1996 and Gaete-Garretón, *et al.,* 2005). در روشهای مرسوم آزمون فراصوت، شاخص‌های فراصوت عبارتند از: ضریب انعکاس، ضریب شکست، میزان تضعیف، سرعت امواج، جابجایی بسامد و غیره. برای آزمون فراصوتی محصولات کشاورزی به روش عبوری معمولاً از دو شاخص، تغییرات سرعت و میزان تضعیف امواج عبوری استفاده می‌شود. در بعضی پژوهشها شاخص میزان تضعیف امواج عبوری برای بررسی ویژگی‌های کیفی ترجیح داده شده است(Mizrach *et al.,* 1994) و در بعضی دیگر به کارامد بودن شاخص سرعت امواج اشاره شده است (Self *et al.,* 1994). در این پژوهش‌ها بیشتر نمونه‌های مورد آزمایش، سیب، سیب زمینی و آواکادو بودند.

کاربردهای فراصوت در صنعت غذا بسیار گسترده بوده و در دو نوع متفاوت تقسیم بندی شده است: کاربردهایی با شدت کم (بسامد بیش از ۱۰۰kHz و یا توان فراصوت کمتر از ۱Wcm^{-2}) و شدت زیاد (بسامد در محدوده ۲۰-۱۰۰kHz و یا توان فراصوت بین ۱۰ الی ۱۰۰ Wcm^{-2}). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد غذایی در بکارگیری امواج فراصوت با کاربردهای شدت کم تغییر نمی‌یابند و در کاربردهای فراصوت با شدت زیاد اغلب خواص مواد غذایی به طور همیشگی تغییر می‌یابد(Prakash and Ramana, 2003). اما در مورد بررسی کیفیت میوه‌ها و سبزیجات، پژوهشگران سامانه‌هایی با بسامد کم و دامنه‌ی تحریک

بسیار قوی را پیشنهاد کرده‌اند(Mizrach *et al.*, 1989)، همچنین پژوهشهایی با بسامد زیاد (0.5 MHz) و توان نسبتاً زیاد هم گزارش شده است (Kim, *et al.*, 2004).

بنابراین وجود سامانه‌ای که بتواند کیفیت میوه‌جات و سبزیجات ندازه‌گیری کند راه را برای مطالعه و پژوهش‌های بیشتر هموار خواهد نمود. در این مقاله ابتدا به معرفی امانه‌ی فراصوتی تحت عنوان "کیفیت سنج فراصوتی" پ اخته می‌شود که این سامانه با توجه به پژوهشهای انجام یافته، برای بررسی خصوصیات کیفی محصولات کشاورزی طراحی و ساخته شده است. واسنجی امانه بعد از طراحی و بهینه‌سازی آن انجام شد و در ادامه نمونه‌های آماده شده مورد آزمایش قرار گرفتند.

واد و روشها

تعیین ویژگی‌های فراصوت

بکارگیری امواج فراصوتی برای کیفیت‌سنجی، نیازمند دانستن و یا ندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی محصولات کشاورزی است. با توجه به روشهای اندازه‌گیری، ویژگی‌های فراصوتی مورد اندازه‌گیری متفاوت ست. مهمترین پارامتر مورد انـ ازه‌گیـری در حـوزه‌ی زمان و میرایی، سرعت امواج و نوسانات سیگنال‌های عبوری/انعکاسی و ارسالی در بسامد و دازه‌ی پرتو داده شـده اسـت. ایـن دو خاصیت مهم را به طور خلاصه، سرعت امواج فراصوتی و ضریب تضعیف یا میرایی می‌نامندکه کاربردهای اخص آنها در توصـیف و ردیابی عیب، چگالی، خواص کشسانی و مکانیکی است(جدول ۱).

- ..... سرعت امواج فراصوت(V) در محصولات کشاورزی: در واقع سرعت عبوری امواج فراصوت است که به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد بستگی دارد. به دلیل ناهمگن و ناهمسان‌گرد بودن اغلب محصولات کشاورزی، تعیین سرعت امواج فراصوتی به صورت تحلیلی بسیار مشکل است.

$$V \propto f(\rho, \nu, E, ...) \qquad (۱)$$

اما در عمل از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود (Gaonkar, 1995 ; Rose, 2004).

$$V^2 = E / \rho \qquad (۲)$$

در اینجا E، ضریب کشسانی و ρ، جرم حجمی ماده می باشد. ضریب کشسانی به حالت فیزیکی مواد و نـوع مـوج بـستگی دارد. از آنجا که تغییرات جرم حجمی برای هر ماده‌ای کمتر از تغییرات ضریب کشسانی است، پس سرعت فراصوت را می‌توان بـر اسـاس ضریب کشسانی مواد بدست آورد. ضریب کشسانی مواد کشاورزی با استفاده از روابـط هرتـز و آزمـایش بارگـذاری محـوری قابـل محاسبه است (Stroshine and Haman, 1994; Mohsenin, 1978).

سرعت امواج فراصوت از طریق اندازه‌گیری طول موج فراصوت در بسامد مشخص و یا از طریق زمان مورد نیـاز بـرای عبـور مـوج فراصوت از ضخامت مشخص مواد قابل تعیین است:

$$V = L / t \qquad (۳) \qquad V = \lambda . f \qquad (۴)$$

که در آن

λ= طول موج (m)؛ f= بسامد (s^{-1})؛ L= ضخامت ماده (m) و t= زمان (s).

جدول ۱- تقسیم بندی جامع اندازه‌گیریهای فراصوت

نوع اندازه‌گیری	پارامترهای مورد اندازه‌گیری	کاربردها
حوزه‌ی زمان	TOF[1] و سرعت امواج طولی، برشی و سطحی	چگالی، ضخامت، ردیابی عیب، خواص کشسانی و مکانیکی، تفکیک فاصله، ناهمسنگردی[2]، تحلیل ابعاد و مجاورت، رباتها، کنترل از راه دور و غیره.
حوزه‌ی میرایی	نوسانات سیگنال‌های عبوری/انعکاسی و ارسالی در بسامد و اندازه‌ی پرتو داده ده	توصیف عیب، ساختمان میکروسکپی درونی و سطحی، تفکیک فاصله و غیره.
حوزه‌ی بسامد	بسامد وابسته به میرایی فراصوت و طیف بینی فراصوتی	ساختمان میکروسکپی، دازه ذرات، نسبتهای مرز بلورها، تخلخل، توصیف سطح، تحلیل فاز و غیره.
حوزه‌ی تصویر	نقشه‌برداری بر اساس TOF، سرعت و میرایی (C-Scane و سایر روشها)	تصویر برداری درونی و سطحی عیوب، ساختمان میکروسکپی، چگالی، خواص مکانیکی، سرعت، تصویر برداری دو و سه بعدی واقعی و غیره.

□ ..... ضریب تضعیف امواج فراصوت: دامنه امواج فراصوت در گذر از مواد کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر موج تضعیف یا میرا می‌شود. علت اصلی آن جذب و پخش امواج می‌باشد. در جذب امواج، موج مکانیکی در نهایت به گرما تبدیل می‌شود. پخش امواج در مواد ناهمگن مهم است که به علت وجود ذرات، جاهای توخالی و شکاف، صورت می‌گیرد. ضریب تضعیف مواد (α) با واحد نپر بر متر (Npm^{-1}) تعریف می‌شود و از هر یک از روابط زیر قابل محاسبه است(Rose, 2004).

$$A = A_{\circ} e^{-aL} \Rightarrow a_{NP} = \frac{-1}{L} \ln\left(\frac{A}{A_{\circ}}\right) \quad (۵) \qquad I = I_{\circ} e^{-2aL} \Rightarrow a_{NP} = \frac{-1}{2L} \ln\left(\frac{I}{I_{\circ}}\right) \quad (۶)$$

در این رابطه‌ها A و $A_{\circ}$ به ترتیب دامنه‌ی موج گیرنده و فرستنده بر واحد (mV)، I و $I_{\circ}$ به ترتیب شدت موج گیرنده و فرستنده بر حسب (wm^{-2}) یا دسی بل (dB) است. گاهی اوقات واحد ضریب تضعیف را دسی بل بر متر (dBm^{-1}) تعریف می‌کنند که در آن صورت ۱Np=۸/۶۸۶dB است(Gaonkar, 1995). در این حالت رابطه‌های ۵ و ۶ به این صورت نوشته می‌شوند (Cartz, 1998):

$$a_{dB} = \frac{-20}{L} \log\left(\frac{A}{A_{\circ}}\right) \quad (۷) \qquad a_{dB} = \frac{-20}{2L} \log\left(\frac{I}{I_{\circ}}\right) \quad (۸)$$

شکل پرتو و نیز شدت موج فراصوتی در راستای طولی پرتو ، به قطر تراگذر و طول موج بستگی دارد(Cartz, 1998). در نزدیکی تراگذر[3]، اعوجاج زیادی وجود دارد که به آن منطقه‌ی نزدیک یا فرنل[4] گفته می‌شود. طول این منطقه از رابطه‌ی ۹ بدست می‌آید.

$$N = \frac{\Delta^2}{4\lambda} = \frac{\Delta^2 f}{4V} \quad (۹)$$

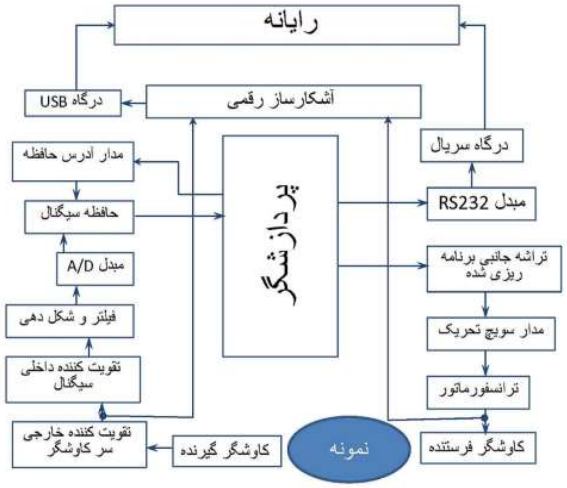
که در آن N= طول میدان یا منطقه‌ی نزدیک (m) و Δ = قطر تراگذر (m).

سامانه‌ی کیفیت سنج فراصوتی

یکی از کاربردهای فراصوت، آزمایش بافت سبزی‌ها و میوه‌ها است. برای بدست آوردن تغییرات سرعت و میرایی امواج از دو روش مرسوم روش تپ بازتاب(انعکاسی)[5] و روشهای عبوری[6] استفاده می‌شود. با افزایش بسامد امواج، میزان میرایی اد می‌شود و از طرفی در روش تپ بازتاب، بکارگیری بسامد تحریک کم (کمتر از ۱۰۰kHz) برای آشکارسازی آسیب‌ها تقریباً غیر ممکن است. در حالت کلی در موادی که تضعیف کننده‌ی قوی امواج هستند از روش تپ بازتاب استفاده نمی‌شود. بنابرین برای کیفیت‌سنجی

[1] - Times-of-Fligh
[2] - Anisotropy
[3] - Transducer
[4] - Fresnel
[5] - pulse echo method
[6] - Through transmission method

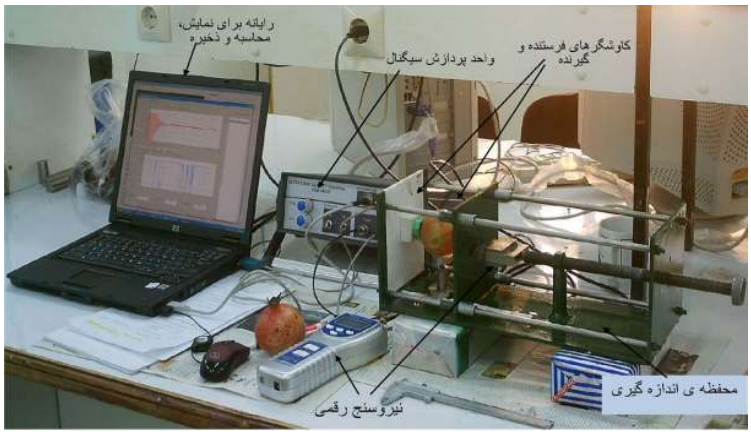
محصولات کشاورزی، سامانه‌ای نیاز است که بر اساس روش عبوری کار کند، توانش تا حدی زیاد و بسامد کاریش در محدوده ۲۰–۱۰۰kHz باشد، و نیز امواج ارسالی به صورت تپی باشد نه پیوسته. به علت تپی بودن امواج ارسالی، می‌توان از امواج پر توان (با شدت بالا) استفاده کرد. زیرا مدت زمان موج دهی نمونه به میزان چند میکرو ثانیه است و خطری برای نمونه ندارد. نمودار روندنمای کلی سامانه در شکل شماره ۱ آورده شده است. سخت افزار امانه‌ی ندازه‌گیری فراصوتی شامل است بر: مولد سیگنال (تپ از)، دریافت‌کننده(تپ گیر)، کاوشگرها، نوسان نما، رایانه و محفظه‌ی ندازه‌گیری. در ساخت سامانه، واحدهای مولد و دریافت‌کننده‌ی سیگنال و نیز آشکارساز رقمی و پردازشگر سیگنال در واحدی به نام واحد پردازش سیگنال جا داده شد. آشکارساز رقمی (TNM-Ds20060) در قسمت پشت واحد پردازش قرار دارد که با درگاه USB به رایانه متصل است. کنترل چگونگی کارکرد واحد پردازش به وسیله‌ی آشکارساز رقمی و نرم‌افزار آن انجام می‌گیرد. برای اندازه‌گیری و کنترل نیروی تماس نمونه و کاوشگرها از نیروسنج رقمی (Lutron, FG-5100, Taiwan) بکار گرفته شد. شکل ۲ سامانه توسعه داده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- بلوک دیاگرام کلی سـ مانه

در آزمایش اولیه مشخص شد که در میان کاوشگرهای kHz ۲۵ ،۳۲ و ۴۰، کاوشگر ۴۰kHz – کاوشگر فرستنده (400ET/R250) و گیرنده (400EP250)- از نوع تماس خشک[1] و با کریستال سرامیکی(PZT) نتایج بهتری دارد. به عبارت دیگر بسامد مرکزی هر دو کاوشگر فرستنده و گیرنده یکسان و محدوده‌ی دقیق آن kHz ۱٪ ±۴۱ است. سیگنالهای الکتریکی دریافتی از کاوشگر، در محدوده kHz ۵۰–۲۰ توسط تقویت کننده‌های کم پارازیت، چندین طبقه تقویت می‌شود. سیگنال تقویت شده، توســـط مدار جداساز یکسو شده، دمدوله، پوش گرفته و تقویت می‌شود. به علت پارازیت زیاد و نیز برای کاهش تاثیر اغتشاشات کابل‌های ارتباطی و مدارهای الکترونیکی سامانه بر روی سیگنال، اولین طبقه تقویت، خارجی است و تقویت کننده در پشت کریستال کاوشگر گیرنده قرار گرفته است. امکان تغییر بسامد تحریک (از ۲۰ الی kHz ۵۰) و بهره‌ی تقویت سیگنال (از ۵۰۰۰ الی ۷۰۰۰) از روی پانل واحد پردازش میسر است. جدول ۲ برخی مشخصات فنی سامانه‌ی کیفیت‌سنج فراصوتی را نشان می‌دهد.

[1] - Dry contact



شکل ۲- سامانه کیفیت سنج فراصوتی و کاربرد آن در محیط آزمایشگاه

روش کار سامانه

سامانه ساخته شده برای اندازه‌گیری غیر مخرب ویژگیهای محصولات کشاورزی، به ویژه میوه‌جات و سبزیجات به کار برده می‌شود. امانه فراصوت، خصوصیات بافت محصول را بصورت زمان عبور امواج فراصوت و دامنه سیگنال دریافتی یا مقدار سرعت فراصوت و تضعیف امواج در میوه، با تماس کاوشگرهایی در دو طرف میوه اندازه می‌گیرد. به دلیل انرژی مشخص صادره از کاوشگر و نیز تپی بودن سیگنال، تغییری در کیفیت بافت میوه بوجود نمی‌آید. کاوشگر فرستنده، امواج فراصوت تپی[1] ارسال می‌کند و کاوشگر گیرنده امواج عبوری و حاوی اطلاعات از بافت میوه را دریافت می‌کند. واحد پردازش، زمان بین ارسال تا دریافت امواج را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین امانه تو نایی ندازه‌گیری دامنه و طیف بسامدی[2] امواج تحریک و امواج دریافتی را دارد.

کل مدارهای الکترونیک انه به تعدادی بلوک تقسیم می‌شود. پردازشگر درون واحد پردازش، پس از دریافت فرمان از سوی رایانه، به اشه‌ی جانبی فرمان می‌دهد تا با تحریک یک سوئیچ الکترونیکی ، امواج فراصوتی تولید شود. امواج فراصوتی از کاوشگر فرستنده خارج می‌شود و پس از عبور از میوه، به کاوشگر گیرنده برخورد می‌کند. اولین تقویت سیگنال دریافتی توسط تقویت کننده خارجی انجام می‌شود. سیگنال دریافتی پس از تقویت و شکل‌دهی(پوش‌گیری)، توسط یک مبدل A/D، رقمی شده و در یک حافظه سیگنال ذخیره می‌شود. پردازشگر آنرا از طریق درگاه سریال به رایانه منتقل می‌کند.

سامانه توسط یک برنامه‌ی ایانه‌ای کنترل می‌شود که با نرم افزار Matlab 2006a تدوین گشته است. برنامه‌ی پس از نمایش سیگنال و انجام محاسبات روی سیگنال، ویژگی‌های فراصوتی را به صورت نمودار و رقم نشان می‌دهد. ویژگی‌های عملکردی سامانه بصورت دامنه ولتاژ تحریک و تعداد تپ تحریک و روش دریافت سیگنال، توسط نرم افزار، قابل انتخاب و تنظیم و اعمال به سامانه می‌باشد. آشکارساز رقمی و نرم‌افزار آن (TNM) توسط برنامه‌ی رایانه‌ای تدوین شده (UQSS)[3] روشن و خاموش می‌شود.

آماده سازی نمونه ها

تمامی میوه‌ها و سبزیجات از میدان تره‌بار تهیه شدند. از میوه و سبزی دست نخورده و نیز نمونه‌های بریده شده از بافت آنها برای آزمایش استفاده شد. برای تهیه‌ی نمونه‌هایی با ضخامت دلخواه، ابزار برش خاصی بکارگرفته شد. ضخامت نمونه‌ها با توجه به نوع میوه و سبزی از ۱ الی ۱۲cm تغییر می‌کرد. برای مشخص شدن توانایی سامانه در اندازه‌گیری خواص فراصوت میوه‌جات، آزمایشهای اولیه‌ای متفاوتی طرح‌ریزی شد. نمونه‌های مورد آزمایش میوه‌ی شلیل، میوه سالم و رسیده، هسته‌ی ترکدار و نیمه ف سد

[1] - Pulse
[2] - Frequency spectrum
[3] - Ultrasonic "Qualimeter" System softwere

بود. نمونه‌هایی از سیب‌زمینی و بافت خوراکی موز با ضخامت‌های متفاوت تهیه شده و با گذشت زمان، تغییرات ویژگی‌های فراصوتی ثبت می‌شد. برای حصول بیش رسیدگی یا فاسد شدن نمونه‌ای در شرایط دمایی و رطوبتی آزمایشگاه، نمونه در داخل کیسه‌های نایلونی نگهداری می‌شد.

جدول ۲: مشخصات فنی سامانه‌ی کیفیت‌سنج فراصوتی میوه‌جات

کاوشگر							
تعداد کاوشگر	محدوده بسامد کاری	زاویه پرتو	دمای کار	ولتاژ تحریک سر کاوشگر	توان موج	تعداد تپ	روش کار درد
دوعدد (فرستنده و گیرنده)	۲۰-۵۰ KHz	۱۰ درجه	۰-۶۰ °C	<۶۰۰ V	<۰/۳ W	دو موج مربعی شکل	تحریک مبدل – تقویت امواج دریافتی
واحد پردازش							
تغذیه	توان مصرفی	سرعت نمونه برداری	سرعت پاسخ	ارتباط کامپیوتری		دقت محاسبه سرعت	نوع موج
۲۲۰ ولت AC	۵ وات	۱/۲ MHz	حدود یک ثانیه	RS232 دوطرفه- baud=115200		کمتر از $1\ ms^{-1}$	طولی یا تراکمی (P)
آشکار ساز رقمی رایانه‌ای							
مدل	سرعت نمونه‌برداری	دقت		ارتباط کامپیوتری	کنترل دستگاه		پهنای باند
Ds20060	۲۰ MHz	عمودی ۳٪، افقی ۰/۱٪		درگاه USB	نرم افزار سامانه و نرم افزار TNM		۱۵MHz

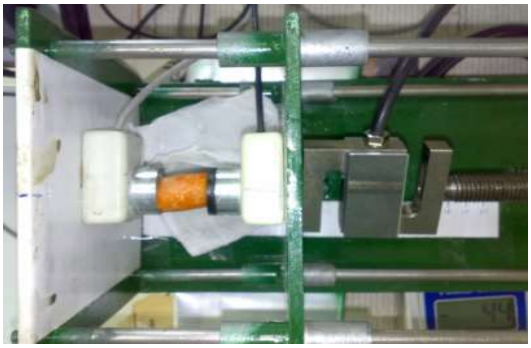
روش آزمایش

قبل از شروع آزمایش‌ها، سامانه برای سرعت هوا واسنجی شد. برای این منظور سرعت موج در هوا در فواصل مختلف بین کاوشگرها، اندازه‌گیری و تصحیحات لازم بر روی سخت‌افزار و نرم‌افزار سامانه انجام شد. با استفاده از بطه‌ی ۹ طول میدان نزدیک[1] برای هوا ۱۸/۵۸mm و برای پلی کربنات حدود ۲/۳۴ mm محاسبه شد. به منظور انتقال امواج به نمونه و گذر از میدان نزدیک، صفحه‌ای به ضخامت حدود ۹ mm در جلوی تراگذر فرستنده نصب شد. البته آزمایشهایی برای بررسی اثر این صفحه بر روی اندازه‌گیری انجام شد. برای ندازه‌گیری سرعت امواج از رابطه‌ی ۳ و برای محاسبه‌ی ضریب تضعیف از ابطه‌ی ۷ استفاده شد. محاسبه‌ی سرعت امواج به صورت خودکار و محاسبه‌ی ضریب تضعیف با ازه‌گیری دامنه‌ی سیگنال و غیر خودکار انجام می‌گیرد. نخست ضخامت نمونه با کولیس با دقت ۰/۰۱ ازه‌گیری و به نرم افزار داده می‌شود. سپس زمان گذر امواج از ضخامت نمونه به میکروثانیه توسط نرم‌افزار سامانه اندازه‌گیری می‌شود و همزمان سرعت امواج، محاسبه، نمایش و به لیست آزمایش اضافه می‌گردد. این عمل برای هر نمونه ۳۰ بار تکرار می‌شود. نحوه‌ی قرار گرفتن نمونه در بین کاوشگرها در شکل ۳ آورده شد است. از برنامه‌ی FFT برای محاسبه دامنه‌ی سیگنال تحریک و دریافتی استفاده می‌شود که با نرم افزار Matlab 2006a نوشته شده است. با داشتن دامنه‌ی سیگنال، می‌توان ضریب میرایی را از رابطه‌ی ۷ محاسبه نمود. البته با توجه به توانایی، سرعت نمونه‌برداری زیاد و دقت بالای نرم‌افزار TNM (آشکارساز رقمی رایانه‌ای)، از این نرم‌افزار نیز برای محاسبه دامنه‌ی سیگنال و بازبینی سیگنال‌ها استفاده شد. در ادامه تاثیر پوشگیری موج، نیروی تماس نمونه با کاوشگر، نوع ماده‌ی واسط بر میزان تغییر سرعت امواج بررسی شد. این آزمایش‌ها با انواع نمونه‌ها انجام پذیرفت.

مقدار نیروی تماسی کاوشگر با نمونه باید طوری باشد که تماس کامل بین نمونه و سطح کاوشگر برقرار شود (Self *et al.*, 1994). بنابرین سطوح نیروی تماسی N ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ در نظر گرفته شد که این مقادیر در حین آزمایش به میزان N ۱± تغییر می‌یافتند. در برخی مطالعات از گریس به عنوان ماده‌ی واسط[2] استفاده شده است (Mizrach *et al.*, 1989). اما در این

[1] -Near field or zone
[2] -Couplant

پژوهش برای جلوگیری از کثیف شدن نمونه و کاوشگر و نیز امکان استفاده از نمونه‌ها برای آزمایش‌های بعدی، از ژل روانکار فراصوت[1] و یا آب خود نمونه استفاده شد.



شکل ۳ – نحوه‌قرارگیری نمونه بین کاوشگر فرستنده و گیرنده، مونه‌ی هویج، ضخامت ۲٤/٦ mm و نیروی تماسی ٥ N.

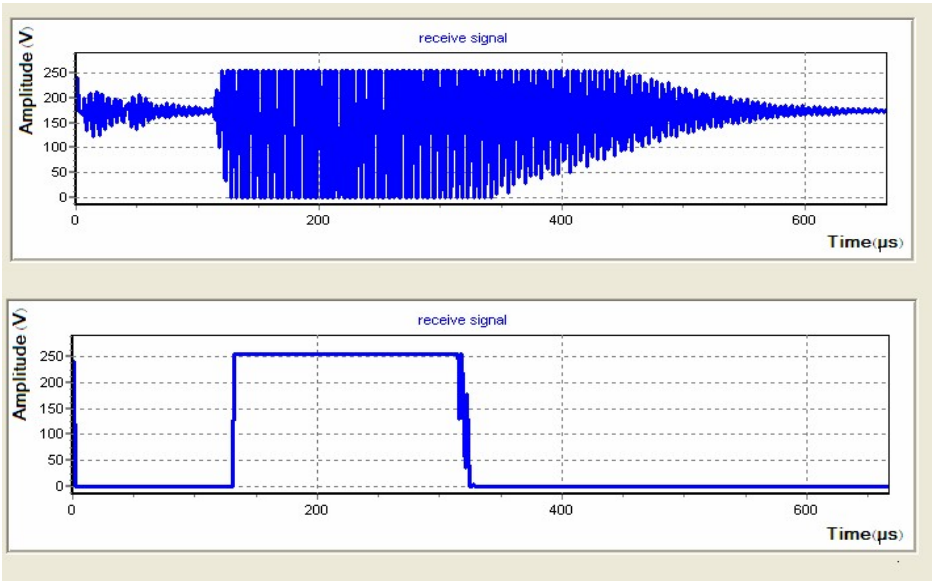
بحث و نتایج

قبل از شروع آزمایش‌ها، سامانه برای هوا واسنجی شد. واسنجی شامل دو مرحله است. مرحله‌ی اول مربوط به تنظیم زمان گذر صحیح یا زمان پرواز (TOF) و مرحله‌ی دوم واسنجی مربوط به بررسی شکل پرتو و طیف بسامدی سیگنال است. با داشتن تصحیح کننده‌ی زمان پرواز، تصحیحات و تغییرات لازم بر روی برنامه کنترلی سامانه انجام شد. برای واسنجی دامنه و شکل سیگنال از صافی‌های مختلفی استفاده شد. اعمال صافی بر روی سیگنالها هم سخت‌افزاری و هم نرم افزاری انجام گرفت.

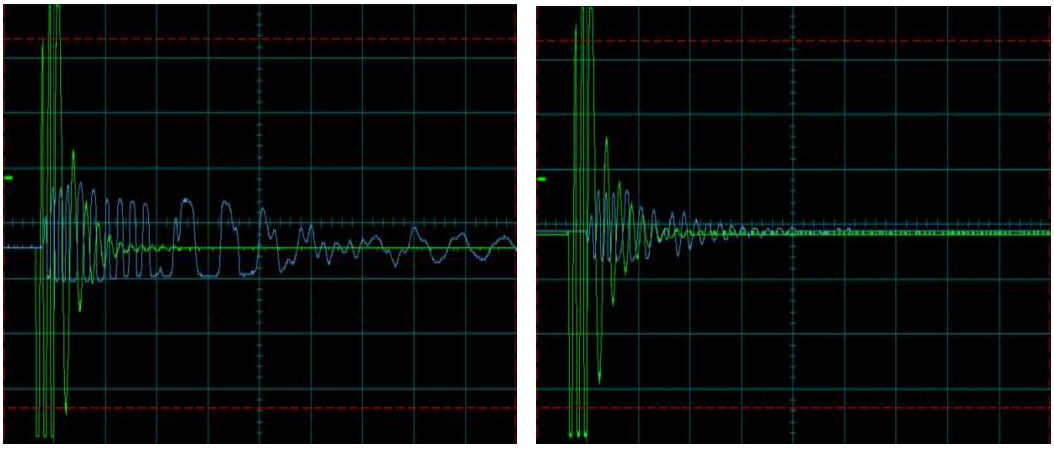
پوشگیری سیگنال عمل اندازه‌گیری را آسان، و تا حدی دقت اندازه‌گیری را بیشتر می‌کند. البته قبل از پوشگیری، سیگنال یکسو می‌شود. آزمایش نشان داد که مقدار سرعت امواج محاسبه شده توسط نرم‌افزار در حالت پوش کمی بیش از سیگنال بدون پوش است (جدول ۳). علت آن عدم دقت زیاد در اندازه‌گیری مدت زمان بین سیگنال تحریک و دریافتی است که این زمان بسیار کوتاه و در حد چند میکرو ثانیه است. در حالت بدون پوش، جلوی سیگنال دریافتی به دلایل مختلف آشفته و نویزدار است که کار اندازه‌گیری را مشکل می‌کند (شکل ۴). امه‌ی آزمایش‌ها با سیگنال پوشگیری شده انجام شد.

به طور کلی بکارگیری ماده واسط برای انتقال امواج و تطابق امپدانس بین دو ماده نیاز است. اما برای آزمایش محصولات کشاورزی آبدار به دلیل وجود آب نیازی به ماده واسط خارجی نیست. اما به دلیل اثر نوع ماده‌ی واسط بر سیگنال دریافتی، استفاده از یک نوع ماده واسط ترجیح داده می‌شود. همچنین آب میوه‌ی حاصل از نمونه‌ی تحت آزمایش، گرانروی پایینی دارد. بنابرین از ژل فراصوت به عنوان ماده‌ی واسط استفاده شد. اثر ماده‌ی واسط بر مقدار سرعت امواج ناچیز است (جدول ۳) اما بر دامنه‌ی سیگنال اثر کاهشی داشت، همانطور که قرار دادن لایه‌ی تاخیر بین نمونه و تراگذر فرستنده، دامنه‌ی سیگنال را کمی کاهش می‌داد (شکل ۵). چنانچه ذکر شد، برای انجام عمل ازه‌گیری در میدان دور[2] از یک صفحه‌ی پلی کربنات به عنوان لایه تاخیر به ضخامت حدود ۹ mm ستفاده شد. در حالت بدون لایه‌ی تاخیر[3] و نمونه‌ی کم ضخامت، سیگنال دریافتی با هارمونیک و اعوجاج خاصی همراه است. در این حالت میزان پراکندگی داده‌های حاصل هم زیاد است (جدول ۳). علت این پدیده مربوط به اغتشاشات منطقه‌ی نزدیک و نسبت کم ضخامت نمونه به طول موج است. در نخستین بررسی اثر نیروی تماسی بر سیگنال دریافتی مشخص شد که با افزایش نیروی تماسی، دامنه سیگنال(V_{pp})، قویتر و زمان گذر سیگنال کمی کمتر می‌شود. این اتفاق چنین تفسیر می‌شود که با افزایش سطح تماس کاوشگر با نمونه، عمل جفت شدن[4] و انتقال امواج بهبود می‌یابد.

[1] - Lubricating gel
[2] -Far or Fraunhofer zone
[3] - Delay line
[4] -Coupling



شکل ٤ – اثر پوشگیری بر شکل سیگنال(نمونه‌ی هوا). بالا: سیگنال دریافتی بدون پوش، پایین: سیگنال دریافتی با پوش



شکل ٥ – اثر ضخامت نمونه و لایه‌ی تاخیر بر شکل سیگنال(نمونه‌ی سیب زمینی). راست: ضخامت نمونه mm ۳۷/۸ و با لایه‌ی تاخیر، چپ: ضخامت نمونه mm ۲۰/٦ و بدون لایه‌ی تاخیر(محور افقی، زمان به ms و محور عمودی، دامنه به mV).

با توجه به جدول ۴ تغییرات سرعت امواج و دامنه‌ی سیگنال دریافتی متاثر از نیروی تماسی، از قاعده خاصی پیروی نمی‌کنند. در این رابطه دو مساله، آسیب ندیدن و تماس کافی بین کاوشگر و نمونه مطرح است. وجود هر گونه حباب هوا بین کاوشگر و نمونه باعث اخلال در اندازه‌گیری خواهد شد. این امر در آزمایش نمونه‌ی خیار مشاهده شد که نیروی تماسی N ۱ بود. از جانب دیگر نیروی تماسی زیاد برای اندازه‌گیری نمونه‌های نرم مثل میوه‌ی موز به دلیل آسیب رساندن به نمونه و عدم دقت کافی در اندازه‌گیری مناسب نیست. بنابرین با مدنظر قرار دان موارد تماس کافی و عدم نیاز به نیروی تماسی بالا و احتمال آسیب، نیروی تماسی N ۵ برای آزمایشات بعدی ترجیح داده می‌شود.

جدول ۵ میانگین ویژگی‌های فراصوتی چندین میوه و سبزی را نشان می‌دهد. سرعت امواج در اکثر نمونه‌ها کمتر از سرعت هوا است. اما در نمونه‌هایی که بافت فیبری داشته و یا رطوبت زیادی دارند، سرعت امواج زیادتر ست. این با برخی نتایج پژوهش‌های قبلی انطباق دارد. اما نتایج متفاوتی نیز گزارش شده است. بطوری که برای نمونه‌ی سیب زمینی در پژوهشی سرعت موج ۳۸۰ (Mizrach *et al.*, 1989) و در تحقیقی دیگر حدود ms^{-1} ۷۰۰ گزارش شده است (Jivanuwong, 1998). علت تفاوت را باید در سامانه‌های آنها جستجو کرد. اگر تغییرات ویژگی‌های فراصوتی بیانگر تغییر کیفیت میوه فرض شود، می‌توان با

اندازه‌گیری این خواص، در مورد کیفیت مواد قضاوت کرد. به طوری که با کاهش تازگی و چروکیده شدن سیب زمینی، سرعت امواج عبوری کاهش قابل توجهی دارد. آزمایش با نمونه‌های مختلف نشان داد که سامانه توانایی اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی نمونه‌ی بافت اکثر میوه‌جات وسبزیجات را دارد، اما چنین اندازه‌گیری برای نمونه‌های با بافت غیر همگن مانند خیار که دارای دانه است، کمی با مشکل همراه است.

جدول ۳: تغییرات سرعت امواج عبوری متاثر از پوشگیری و ماده‌ی واسط

نمونه‌ی آزمایشی	سرعت امواج عبوری(m/s)	
	موج پوشگیری شده	موج بدون پوش
شلیل (میوه‌ی کامل)	۲۰۷/۹۶ (۵/۶۰)	۱۹۳/۱۳ (۶/۴۹)
شلیل (نمونه‌ی بریده)	۱۸۸/۳۵ (۱۶/۴۸)	۱۴۰/۶۲ (۱۰/۲۲)
	سرعت امواج عبوری(m/s)	
	با ماده واسط	بدون ماده واسط
بافت میوه به	۲۴۶/۰۹(۲۳/۸۳)	۲۵۵/۹۳(۲۷/۲۳)

جدول ٤: اثر نیروی تماسی بر ویژگی‌های فراصوتی ونه‌های تهیه شده

	تغییر ضخامت (mm)	نیروی تماسی (N)	سرعت امواج عبوری(ms^{-1})	ضریب تضعیف ($dBmm^{-1}$)	بیشینه ولتاژ یا V_{pp} (mV)
هویج	۳۰	۵	۴۱۸/۳۹(۲۷/۵۶)	۰/۴۵۲۴	۱۵۲۱
	۲۹/۷	۱۰	۴۳۸/۷۳(۳۴/۷۴)	۰/۴۶۲۳	۱۵۲۲
	۲۹/۶	۱۵	۴۴۳/۰۹(۳۴/۰۴)	۰/۴۶۵۶	۱۵۲۱
خیار بیش رسیده	۲۰/۳	۵	۱۳۵/۴۴(۴/۹۶)	۰/۶۶۹۵	۱۳۹۱
	۲۰	۱۰	۱۳۴/۳۸(۴/۷۳)	۰/۶۶۰۳	۱۴۳۵
	۱۹/۶	۱۵	۱۳۸/۰۷(۴/۱۴)	۰/۷۱۰۰	۱۳۰۵
	۱۵/۵	۵	۱۳۲/۰۷(۶/۱۰)	۰/۸۲۰۳	۱۶۰۹
	۱۵/۲	۱۰	۱۳۷/۸۸ (۵/۳۰)	۰/۸۴۸۸	۱۵۶۵
	۱۵/۱	۱۵	۱۴۶/۱۶(۷/۰۳)	۰/۸۵۰۱	۱۶۹۶

*عدد داخل پارانتز میران انحراف معیار می اشد.

** به علت پراکندگی زیاد، داده ها در نیروی تماسی ۱ آورده نشده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به چگونگی طراحی و ساخت سامانه‌ی فراصوتی اشاره شد که با بهره‌گیری از مطالعات و تحقیقات قبلی، دارای قابلیتهایی منحصر به فرد است. اصول کارکرد سامانه بکارگیری امواج فراصوت برای تشخیص میزان قابلیت عبور امواج فراصوت از محصولات کشاورزی است. بررسی نشان می‌دهد که برای نفوذ هر چه بهتر امواج به درون نمونه‌ها، از کاوشگرهایی با بسامد ۴۰ kHz، ماده واسط مناسب و نیروی تماسی در حدود ۵ N، استفاده شود. عمل پوشگیری یکنواختی ازه‌گیری را بهبود می‌بخشد. با توجه به مشخصات فنی سامانه، برای تعیین ویژگی‌های فراصوتی محصولات کشاورزی باید از امواج فراصو ی با بسامد کم و توان تحریک نسبتاً زیاد استفاده کرد. علی رغم اینکه تشخیص کیفیت میوه با استفاده از روش‌های غیر مخرب به دلیل غیرمتناجس و غیر همگی بودن بافت و وجود دانه مشکل است، اما آزمایش با امانه‌ی فراصوتی ساخته شده نشان داد که سامانه توانایی خوبی در اندازه‌گیری کیفیت دارد. نتایج نشان داد که این سامانه، قابلیت اندازه‌گیری سرعت و میزان تضعیف اکثر میوه‌ها را دارد. سرعت امواج عبوری اکثر محصولات کشاورزی کمتر از سرعت هوا است. با چروکیده شدن نمونه‌ها و از دست دادن رطوبت سرعت امواج، افزایش و ضریب تضعیف، کاهش می ابد.

جدول ۵: ویژگی‌های فراصوتی برخی محصولات کشاورزی

نمونه‌ی آزمایشی	نیروی تماسی (N)	سرعت امواج عبوری(m/s)
هوا (در دما و رطوبت آزمایشگاه)	-	۳۳۲
گوشت میوه‌ی موز	۵	۸۳/۷۰ (۳/۸۵)
سیب زمینی تازه	۵	۷۱۶/۲۱ (۱۰۱/۷۵)
سیب زمینی پلاسیده	۵	۲۸۰/۲۷ (۱۷/۴۶)
سیب تازه	۵	۱۸۳/۷۵ (۱۲/۶۷)
سیب نیمه فاسد	۵	۱۱۴/۹۵ (۱۴/۸۱)
هویج(در راستای طولی)	۵	۴۱۸/۳۹(۲۷/۵۶)

عدد داخل پارانتز میران انحراف معیار می‌باشد.

منابع

۱. ذکی دیزجی، ح.، محمدنیکبخت، ع.، مینایی س. و توکلی هشتجین، ت. (۱۳۸۶). بررسی روشهای غیر مخرب در اندازه‌گیری کیفیت محصولات کشاورزی با تاکید بر روش فراصوت. هفدهمین همایش صنایع غذایی ایران. ارومیه.

2. Abbott, J.A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. Postharvest Biology and Technology, 15: 207-225.
3. Bechar A.; Mizrach A., Barreiro P., Landahl S. (2005). Determination of Mealiness in Apples using Ultrasonic Measurements, Biosystems Engineering, 91 (3), 329–334.
4. 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.
5. Cheng. Y. and C.G. Haugh. 1994. Detecting Hollow Heart in Potatoes Using Ultrasound. Transactions of the ASAE, 37(1): 217-222.
6. Gaonkar, A.G. (1995). Food Processing Recent Developments. Elsevier Science. Amsterdam, Netherlands. Pp 315.
7. Kim KB, Jung HM, Kim MS, Kim GS (2004).Evaluation of fruit firmness by ultrasonic measurement. Advances In Nondestructive Evaluation, PT 1-3 Key Engineering Materials 270-273: 1049-1054, Part 1-3.
8. 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.
9. Mizrach, A., Galili, N., Rosenhouse, G.. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. Transactions of the ASAE. 1989, 32(6): 2053–2058.
10. Mizrach, A. Galili, N. Teitel D. C. and Rosenhouse, G. (1994b). Ultrasonic evaluation of some ripening parameters of autumn and winter-grown 'Galia' melons. Scientia Horticulturae 56(4): 291-297.
11. Mizrach, A., Schmilovitch, Z., Avidan, B. (2006).Maturity Measurements of Olive Fruits using Acoustic and Compression Methods. CIGR, World Congress, Agricultural Engineering for a Better World, berlin, Germany.
12. Gaete-Garretón, L., Yolanda Vargas-Hernndez, Y., Cristian León-Vidal, C. and Alex Pettorino-Besnier, A. (2005) A novel noninvasive ultrasonic method to assess avocado ripening. Journal of Food Science. 70(3): E187-E191.
13. Mohsenin, N.N. (1978). Physical properties of Plant and Animal Materials. 1st edn. Gordon and Breach, New York, USA.
14. Prakash, M.N.K. and Ramana, K.V.R. (2003). Ultrasound and its application in the food industry, Journal of Food Science and Technology 40 (6): 563-570.
15. Porteous, R.I., Muir, A.Y. and Wastie, R.L. (1981). The identification of diseases and defects in potato tubers from measurements optical spectral reflectance. Journal of agricultural Engineering Research. 26: 151-160.
16. Raj, B., Rajendran, V. and Palanichamy, P. (2007). Science and Technology of Ultrasonics. Alpha Science International Ltd. Pangbourne, U.K. Printed in India. Pp 375.
17. Rose, J.L. (2004). Ultrasonic Waves in Solid Media. Cambridge university press. Cambridge. UK. Pp 454.
18. Sarkar, N. and Wolfe, R.R. (1983). Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. Transactions of the ASAE. 26(2): 624-629.

19. 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.
20. Shewfelt, R.L., (1999). 'What is quality? Postharvest Biology and Technology 15(3): 197-200.
21. Stroshine, R. and Haman, D. (1994). Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products. 1st edn. West lafayette, Indiana, USA.

AN ULTRSONIC INVESTIGATION OF AGRICULTURAL PRODUCT QUALITY

Zaki Dizaji, H., *[1] Minaei, S.,[2] Tavakkoli Hashtjin T.,[3] Mokhtari, M.[4] and Montazer, A.[5]

ABSTRCT

One of the nondestructive testing (NDT) methods is ultrasonic testing (UT), which is still under development in field of quality determination of agricultural products. Determination of Product quality (QD) and its measurement has very important in modern agricultural investigation. UT used to utilize in food processing evaluation but in agricultural product is on study stage. Non invasive/destructive QD is a novel subject in postharvest process in which measured parameters by (NDT) methods is correlated to quality parameters of agricultural product. Review shows that through transmission method is better than other methods in UT for investigation of agricultural product. The main parameters in through transmission method are wave velocity and attenuation. In this research, first an ultrasonic system is designed and developed what the base of that is on received signal conditioning through agricultural product. The ultrasonic "qualimeter" system consists of fabricated pulser/receiver units with ultrasonic transducers, control software, laptop and data acquisition system. The system semi automatically determined two important ultrasonic parameters that is wave velocity and attenuation coefficient by proper signal processing. Then effect of couplant type, contact force, enveloping, delay line, and sample thickness were investigated on received signal. Results demonstrated that the ultrasonic "qualimeter" system semi automatically, suitable response speed, and good accuracy measured ultrasonic parameters using couplant, enveloped signal, low contact force and suitable sample thickness. The ultrasonic wave is transmitted through the most agricultural product using pulse signal with 40 kHz excited frequency and partly low power.

Keyword; nondestructive testing (NDT), ultrasonic, agricultural product, qualimeter

[1] - PhD Student, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, I. R. Iran. P. O. Box: 14115-336, Fax: +98-21-44196524, Email: zakih@modares.ac.ir;
[2] - Associate professor, Agricultural Machinery Eng. Dept., Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Sminaee@gmail.com
[3] - Full professor, Agricultural Machinery Eng. Dept., Tarbiat Modares University
[4] - Associate professor, Faculty of medical physics, Tarbiat Modares University
[5] - Scientific remember, Faculty of Engineering, Shahid Rajaee University