

طراحی و ساخت سامانه سنجش فراصوتی و بررسی عوامل مؤثر در اندازه‌گیری

شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی

حسن ذکی دیزجی، سعید مینایی*، تیمور توکلی هشتجین و منیژه مختاری دیزجی**

* نگارنده مسئول، نشانی: تهران، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۳۳۶-۱۴۱۵۵، تلفن: ۴۴۱۹۶۵۲۴ (۰۲۱)، پیام‌نگار: sminaee@gmail.com

** به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری؛ دانشیار؛ استاد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس؛ و دانشیار گروه فیزیک پزشکی دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت مقاله: ۸۷/۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۱/۵

چکیده

استفاده از فن فراصوت در ارزیابی و فراوری مواد غذایی سابقه‌ای دیرینه دارد اما در مورد محصولات کشاورزی روند تکمیلی را سپری می‌کند. آزمون فراصوتی، یکی از روش‌های آزمون غیر مخرب است که در ارزیابی محصولات کشاورزی روندی رو به گسترش دارد. برای آزمون محصولات کشاورزی به روش فراصوت عبوری، به‌طور معمول از دو شاخص فراصوت استفاده می‌شود: یکی سرعت امواج و دیگری میزان تضعیف. اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی مواد بیولوژیک به‌دلیل ویژگی‌های پیچیده ساختاری آنها مشکل است. بنابراین، اولین مرحله در ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی، طراحی و ساخت سامانه فراصوتی مناسبی است که بتواند شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی را اندازه‌گیری کند. در این پژوهش، ابتدا سامانه اندازه‌گیر فراصوتی طراحی و ساخته شد که اساس کار آن، پردازش سیگنال‌های عبوری از محصولات کشاورزی است. در ادامه و در آزمایش‌هایی، اثر عوامل مؤثر در اندازه‌گیری شامل ماده واسط، پوشش‌گیری موج، نیروی تماسی، ضخامت نمونه‌ها، و لایه تأخیر بر سیگنال دریافتی بررسی شد. بخش‌های اصلی سامانه عبارت‌اند از: تپ‌ساز/ تپ‌گیر، تراگذرهای فرستنده و گیرنده، برنامه کنترل، رایانه، و سامانه جمع‌آوری داده‌ها. سامانه با پردازش سیگنال‌ها به‌صورت نیمه خودکار، ویژگی‌های سرعت و میزان تضعیف سیگنال را تعیین می‌کند. برای اجرای این آزمایش‌ها، نمونه‌هایی از بافت چند محصول کشاورزی شامل سیب، سیب‌زمینی، هویج، خیار، شلبل، به، و موز تهیه شد. طول نمونه‌ها با توجه به نوع محصول از ۵ تا ۱۲۰ میلی‌متر متغیر بود. نتایج نشان داد که با استفاده از امواج غیر پیوسته (تپی) با بسامد ۴۰ کیلوهرتز و توان نسبتاً کم، می‌توان امواج فراصوت را از بیشتر محصولات کشاورزی عبور داد. با در نظر گرفتن ماده واسط، ضخامت مناسب نمونه، و نیروی تماسی کم (۵ نیوتن)، سامانه فراصوتی با دقت خوب، سرعت کمتر از ۱ ثانیه و نیمه خودکار، میزان تضعیف و سرعت امواج عبوری از نمونه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. پوشش‌گیری سیگنال موجب افزایش دقت در اندازه‌گیری شاخص سرعت امواج شد. بررسی طیف بسامدی سیگنال‌ها نشان داد که برای جلوگیری از جابه‌جایی بسامدی بهتر است ضخامت نمونه‌ها یکسان باشد.

واژه‌های کلیدی

آزمون غیر مخرب، امواج تپی، سرعت امواج و کیفیت سنجی، ضریب تضعیف

مقدمه

صنایع با تأخیر شروع شده است. در صنعت، توسعه و

علم صوت سابقه‌ای دیرینه دارد ولی کاربرد علمی و پیشرفت آزمون غیر مخرب فراصوتی نسبت به سایر

عملی آن در کشاورزی و صنایع غذایی نسبت به سایر آزمون‌های غیر مخرب کند بوده است؛ بیشترین کاربرد



یکی کمبودن میزان نفوذ امواج فراصوتی و دیگری بالا بودن، میزان تضعیف امواج در مقایسه با سایر مواد. میزراچ و همکاران (Mizrach *et al.*, 1989) با بهره‌گیری از مطالعات انجام شده و اشراف به مشکلات مذکور، دو سامانه فراصوتی را بر اساس روش عبوری و تپ پژواک راه‌اندازی کردند که سامانه عبوری نتایج بهتری داشت. این محققان نشان دادند که با افزایش توان و استفاده از امواج با بسامد کم (کمتر از ۱۰۰ کیلوهرتز) می‌توان بر دو مشکل فوق تا حدودی غالب شد (Mizrach *et al.*, 1989). این سامانه طی سال‌های بعد در چندین مرحله ارتقا داده شد (Mizrach *et al.*, 1996; Bechar *et al.*, 2005). ویژگی اصلی سامانه ارتقا داده شده این است که توانایی کاوش به عمق چند میلی‌متر از سطح نمونه‌ها را دارد اما اطلاعاتی از داخل میوه به دست نمی‌دهد. کاوش از درون نمونه تا حدود عمق ۹ سانتی‌متری گزارش شده است (Cheng & Haugh, 1994). در بیشتر سامانه‌های اندازه‌گیری، تراگذرهای فرستنده و گیرنده در یک راستا قرار دارند. اما روش‌هایی برای رفع این محدودیت ارائه شده است که در آنها، تراگذرهای فرستنده و گیرنده نسبت به هم زاویه دارند (Mizrach *et al.*, 1996) یا از جذب امواج با به‌کارگیری تراگذری با ساختار متفاوت استفاده می‌شود (Gaete-Garretón *et al.*, 2005). در روش‌های مرسوم آزمون فراصوت، شاخص‌ها عبارت‌اند از: ضریب انعکاس، ضریب شکست، میزان تضعیف، سرعت امواج، جابه‌جایی 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

آزمون غیرمخرب فراصوتی در پزشکی، بررسی جوش و صنعت هوا فضا است. اما به‌کارگیری این فناوری در کشاورزی و صنایع مربوط به آن نسبت به سایر رشته‌ها محدودتر بوده است. علت اصلی آن در ویژگی‌های منحصر به فرد و پیچیده مواد کشاورزی است.

به‌کارگیری امواج فراصوت در تشخیص خواص محصولات کشاورزی مانند میوه‌ها و سبزی‌ها، فناوری جدیدی است و حجم تحقیقات در این زمینه رو به افزایش است (Butz *et al.*, 2005). اما اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی با مشکلاتی همراه بوده است (Mizrach *et al.*, 1989). در روش فراصوت، میزان تغییر شاخص‌های فراصوتی مانند سرعت عبور امواج، کاهش انرژی یا دامنه، میزان انعکاس امواج و غیره در گذر یا انعکاس از مواد، به کیفیت یا چگونگی مواد ارتباط داده می‌شود (Sarkar & Wolfe 1983; Abbott, 1999). بنابراین، در ارزیابی یا سنجش محصولات کشاورزی، اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی و به تبع آن ساخت سامانه اندازه‌گیر شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی در اولویت است.

گسترده‌گی پژوهش‌ها در کاربرد امواج فراصوت در کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی، نسبت به سایر روش‌ها مانند طیف‌سنجی مادون قرمز (NIRS) یا ماشین بینایی (MV)، بسیار کمتر است (Butz *et al.*, 2005)؛ در اینجا به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود. در بیشتر پژوهش‌های قبل از دهه ۹۰ اشاره به این موضوع بوده است که دو مشکل اساسی در کاربرد امواج فراصوت در محصولات کشاورزی وجود دارد (Porteous *et al.*, 1981; Sarkar & Wolfe, 1983).

سیبزمینی (Mizrach *et al.*, 1989; Jivanuwong, 1998) و آووکادو (Mizrach *et al.*, 1994; Self *et al.*, 1994) گزارش شده است. تحقیقی حکایت از توانایی نامشخص روش‌های فراصوتی در بررسی سرمازدگی گوجه‌فرنگی دارد (Verlinden *et al.*, 2004). در پژوهشی دیگر، توانایی روش فراصوت در پایش رسیدگی گوجه‌فرنگی بیان شده است، ولی پراکندگی نامشخصی در بعضی داده‌های آزمایش مشاهده می‌شود (Mizrach, 2007). شاید علت این نتایج متفاوت در نوع سامانه‌ها و تفاوت در عوامل مؤثر در اندازه‌گیری فراصوتی باشد. عوامل مؤثر در اندازه‌گیری عبارت‌اند از بسامد، نیروی تماسی، ماده واسط، ضخامت نمونه، لایه تأخیر، و غیره. ضریب تضعیف مواد بیولوژیک در محدوده بسامد ۱-۵/۰ مگاهرتز، بسیار زیاد گزارش شده است (Sarkar & Wolfe, 1983). محققان دیگر، محدوده بسامد ۱۰۰-۲۰ کیلوهرتز را برای محصولات کشاورزی پیشنهاد کردند (Mizrach *et al.*, 1989). بررسی‌های جدیدتر نشان می‌دهد که ضخامت نمونه و نیروی تماسی بر ضریب تضعیف اثر دارد (Kim *et al.*, 2004). مقدار نیروی تماسی تراگذر با نمونه باید طوری باشد که تماس کامل بین نمونه و سطح تراگذر برقرار شود (Self *et al.*, 1994). در پژوهشی، از وزن تراگذرها برای کنترل تماس نمونه و سطح تراگذر استفاده شد که برابر ۴/۲۳ نیوتن بود (Mizrach *et al.*, 1999). طبق بررسی‌ها، دستگاه فراصوتی کشاورزی به‌صورت تجاری در سطح جهان وجود ندارد.

تا آنجا که بررسی‌ها نشان می‌دهد در ایران سامانه‌ای با توانایی اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی محصولات

پژوهش‌ها، شاخص میزان تضعیف امواج عبوری برای بررسی ویژگی‌های کیفی ترجیح داده شده است (Mizrach *et al.*, 1994) و در بعضی دیگر به کارآمد بودن شاخص سرعت امواج اشاره شده است (Self *et al.*, 1994). در این پژوهش‌ها بیشتر نمونه‌های آزمایشی عبارت بودند از سیب، سیبزمینی، و آووکادو.

کاربردهای فراصوت در صنعت غذا بسیار گسترده و در دو نوع متفاوت تقسیم‌بندی شده است: یکی کاربردهایی با شدت کم (بسامد بیش از ۱۰۰ کیلوهرتز و یا توان فراصوت کمتر از ۱ وات بر سانتی‌متر مربع) و دیگری کاربردهایی با شدت زیاد (بسامد در محدوده ۱۰۰-۲۰ کیلوهرتز و یا توان فراصوت بین ۱۰ تا ۱۰۰ وات بر سانتی‌متر مربع). در به‌کارگیری امواج فراصوت با کاربردهای شدت کم ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد غذایی تغییر نمی‌یابند اما در کاربردهای فراصوت با شدت زیاد اغلب خواص مواد غذایی به‌طور همیشه تغییر می‌یابد (Prakash & Ramana, 2003). در بررسی کیفیت میوه‌ها و سبزی‌ها، پژوهشگران سامانه‌هایی با بسامد کم و دامنه تحریک قوی پیشنهاد کرده‌اند (Mizrach *et al.*, 1989)؛ در پژوهش‌هایی دیگر، سامانه‌هایی با بسامد زیاد (۵/۰ مگاهرتز) و توان نسبتاً زیاد هم گزارش شده است (Kim *et al.*, 2004). سامانه‌هایی با توان تحریک کم، ۲۲/۰ وات، نیز گزارش شده است (Jivanuwong, 1998).

برخلاف مطالعات و پژوهش‌های انجام یافته در مورد استفاده از فن فراصوت در کیفیت‌سنجی فراصوتی محصولات کشاورزی، کاربردهای کمی توسعه یافته است (Abbott *et al.*, 1997) حتی در برخی پژوهش‌ها نتایج متفاوت در شاخص‌های فراصوتی میوه‌ها و سبزی‌ها مانند

آنها در توصیف و ردیابی عیب، چگالی، خواص کشسانی، و مکانیکی است (Subramanian, 2006).

سرعت عبور امواج فراصوت (V)

به دلیل ناهمگن^۴ و ناهمسان گرد^۵ بودن اغلب محصولات کشاورزی، تعیین سرعت عبور امواج به صورت تحلیلی بسیار مشکل است. سرعت عبور امواج فراصوت در محصولات کشاورزی به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد مانند جرم حجمی (ρ)، ضریب کشسانی (E)، ضریب پواسون (μ) و غیره بستگی دارد. عوامل مؤثر دیگر در میزان سرعت عبور امواج طبق رابطه ۱ عبارت‌اند از نوع موج (طولی^۶، عرضی^۷، سطحی، و صفحه‌ای) و شرایط محیطی (Gaonkar, 1995; Rose, 2004).

$$V \propto (E, \rho, \mu, \dots) \quad (1)$$

در آزمون‌های فراصوتی، سرعت عبور امواج فراصوت با اندازه‌گیری طول موج فراصوت در بسامد مشخص می‌شود یا با اندازه‌گیری زمان مورد نیاز برای عبور موج فراصوت (یا زمان پرواز^۸ (TOF)) از ضخامت مشخص مواد قابل تعیین است:

$$V = \frac{L}{TOF} \quad (2)$$

$$V = \lambda f \quad (3)$$

که در آن: λ = طول موج (متر)؛ f = بسامد (هرتز)؛ L = ضخامت ماده (متر)؛ و TOF = زمان پرواز (ثانیه) است.

ضریب تضعیف امواج فراصوت (α)

دامنه امواج فراصوت در گذر از مواد کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر، موج تضعیف یا میرا می‌شود. علت اصلی

کشاورزی وجود ندارد. بنابراین وجود سامانه‌ای که بتواند شاخص‌های فراصوتی میوه‌ها و سبزی‌ها را به درستی اندازه‌گیری کند، راه را برای پژوهش‌های بیشتر هموار خواهد کرد. در ایران تحقیقاتی در مورد به‌کارگیری امواج صوتی^۱ برای ارزیابی غیر مخرب کیفیت محصولات کشاورزی صورت گرفته، درباره اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی^۲ گزارشی منتشر نشده است. در این مقاله با بهره‌گیری از پژوهش‌های پیشین، ابتدا سامانه اندازه‌گیر شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی طراحی و ساخته می‌شود و بعد از واسنجی و اعتبارسنجی سامانه، عوامل مؤثر در اندازه‌گیری شاخص‌ها شامل ماده واسط، پوششگیری موج، نیروی تماسی، ضخامت نمونه‌ها، و لایه تأخیر^۳ بررسی خواهد شد. برای آزمایش و نیز بررسی توانایی سامانه، نمونه‌های مختلفی از میوه‌ها و سبزی‌ها (نمونه کامل و بریده) تهیه شد.

مواد و روش‌ها

تعیین شاخص‌های فراصوت

به‌کارگیری امواج فراصوتی برای کیفیت‌سنجی، نیازمند دانستن یا اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های فراصوتی محصول مورد نظر است. با توجه به روش‌های اندازه‌گیری، ویژگی‌های فراصوتی مورد اندازه‌گیری متفاوت است. مهم‌ترین پارامتر مورد اندازه‌گیری در حوزه زمان و میرایی، سرعت امواج و نوسانات سیگنال‌های عبوری/انعکاسی و ارسال در بسامد و اندازه پرتو داده شده است. این دو پارامتر مهم را به‌طور خلاصه، سرعت امواج فراصوتی و ضریب تضعیف یا میرایی می‌نامند که کاربردهای اخص

1- Sonic

2- Ultrasonic

3- Delay Line

4- Nonhomogeneous or Heterogeneous

5- Anisotropic

6- Pressure/ Compression/ Longitudinal/ Dilatational Wave

7- Transverse or Shear Wave

8- Time of Flight

که در آن: $N = \text{طول میدان یا منطقه نزدیک (متر)}$ ؛ و $\Delta = \text{قطر تراگذر (متر)}$ است.

سامانه فراصوتی ساخته شده

یکی از کاربردهای فراصوت در کشاورزی مدرن، آزمایش بافت سبزی‌ها و میوه‌هاست. برای به‌دست آوردن شاخص‌های فراصوتی، از دو روش ارزیابی مرسوم یکی روش تپ- بازتاب (انعکاسی)^۳ و دیگری روش‌های عبوری^۴ استفاده می‌شود. با افزایش بسامد امواج، میزان میرایی زیاد می‌شود و از طرفی در روش تپ- بازتاب، به‌کارگیری بسامد تحریک کم (کمتر از ۱۰۰ کیلوهرتز) برای آشکارسازی آسیب‌ها تقریباً ناممکن است. در حالت کلی، در موادی که تضعیف‌کننده قوی امواج هستند از روش تپ بازتاب استفاده نمی‌شود. بنابراین برای اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی، به سامانه‌ای نیاز است که بر اساس روش عبوری کار کند، توانش تا حدی زیاد، و بسامد کاریش در محدوده ۱۰۰-۲۰ کیلوهرتز باشد، ضمن آنکه امواج ارسالی نیز به‌صورت تپی باشند نه پیوسته. به‌دلیل آنکه امکان نفوذ آب به درون محصولات کشاورزی وجود دارد، بهتر است از آزمون تماسی استفاده شود. به‌علت تپی بودن امواج ارسالی و تأثیر کم آن بر مواد، می‌توان از امواج پر توان (با شدت بالا) استفاده کرد زیرا مدت زمان موج‌دهی نمونه در حد چند میکرو ثانیه است و خطری برای نمونه ندارد (Hedrick et al., 2005). بر این اساس، سامانه مناسب محصولات کشاورزی مطابق نمودار روندنمای شکل ۱ طراحی شد.

این میرایی، جذب و پخش امواج است. در جذب امواج، موج مکانیکی در نهایت به گرما تبدیل می‌شود. ذرات، فضاها و توخالی و شکاف در مواد ناهمگن هر یک به نوعی موج را پخش می‌کند و این تمایز با اهمیت است. ضریب تضعیف مواد با واحد نپر بر متر (Npm^{-1}) یا دسی بل بر متر (dBm^{-1}) تعریف می‌شود که $1 \text{ Np} = 8.686 \text{ dB}$ است. محاسبه ضریب تضعیف می‌تواند بر اساس دامنه یا شدت باشد که ضریب تضعیف دامنه (a_A) دو برابر ضریب تضعیف شدت (a_I) است (Cartz, 1998). اما محاسبه ضریب تضعیف دامنه آسان‌تر است.

$$a_{dB_A} = \frac{-20}{L} \log\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (4)$$

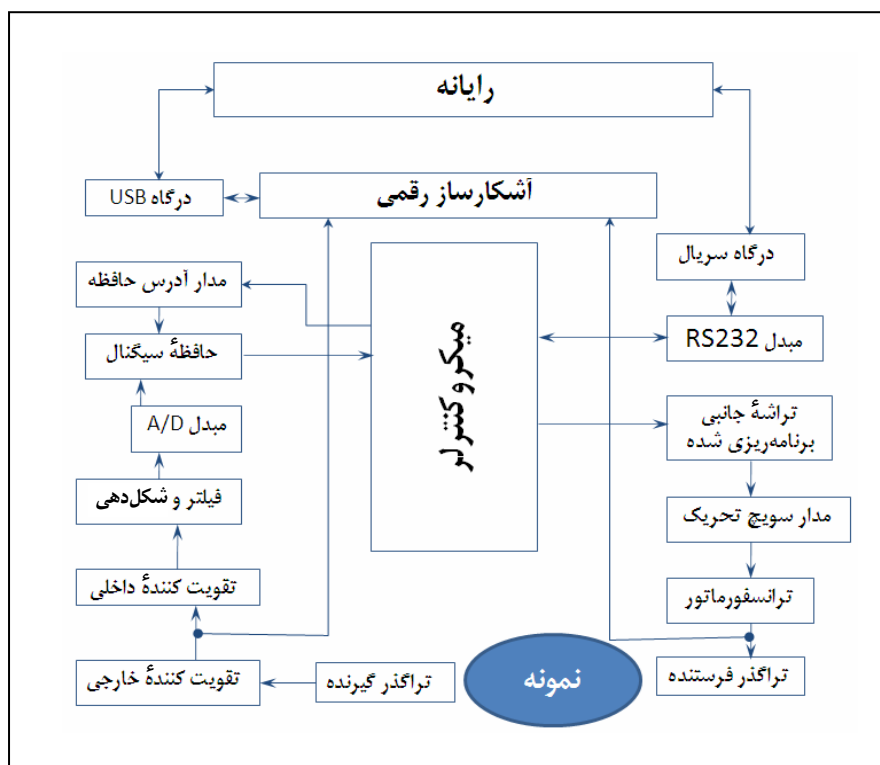
$$a_{dB_I} = \frac{-20}{2L} \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (5)$$

در این دو رابطه، A و A_0 به ترتیب دامنه موج گیرنده و موج فرستنده (میلی‌ولت)؛ و I و I_0 به ترتیب شدت موج گیرنده و فرستنده (Wm^{-2} یا دسی بل dB) است. شکل پرتو و نیز شدت موج فراصوتی در راستای طولی پرتو، به قطر تراگذر و طول موج بستگی دارد (Cartz, 1998). در نزدیکی تراگذر، اعوجاج زیادی وجود دارد که به آن میدان یا منطقه نزدیک یا فرنل^۱ گفته می‌شود. طول این منطقه از رابطه ۶ به‌دست می‌آید. منطقه دور یا فرانیهوفر^۲ بعد از منطقه نزدیک شروع می‌شود.

$$N = \frac{\Delta^2}{4\lambda} = \frac{\Delta^2 f}{4V} \quad (6)$$

1- Fresnel/ Near Field or Zone
3- Pulse Echo Method

2- Far or Fraunhofer Field or Zone
4- Through-Transmission Method



شکل ۱- نمودار روندنمای سامانه فراصوتی

نرم افزارهای سامانه در چندین مرحله بهینه سازی و سرانجام کل سامانه مطابق شکل ۲ ساخته شد. در آزمایش های اولیه، مشخص شد که در میان تراگذرهای ۲۵، ۳۲ و ۴۰ کیلوهرتز، تراگذر ۴۰ کیلوهرتز [تراگذر فرستنده باند باریک و گیرنده باند پهن (400ET/R250 and 400EP250, China)] از نوع تماس خشک^۱ و با کریستال سرامیکی نتایج بهتری دارد. به عبارت دیگر بسامد مرکزی تراگذرهای فرستنده و گیرنده یکسان و محدوده دقیق آن 40 ± 1 کیلوهرتز است. سیگنال های الکتریکی دریافتی از تراگذر، در محدوده ۵۰-۲۰ کیلوهرتز با تقویت کننده های کم پارازیت، چندین طبقه تقویت می شوند. سیگنال توس مدار جداساز به ترتیب یکسو^۲، دمدوله^۳، پوش گرفته^۴ و دوباره تقویت^۵ می شود. به علت وجود پارازیت و نیز

سخت افزار سامانه اندازه گیری فراصوتی مشتمل است بر: مولد سیگنال (تپ ساز)، دریافت کننده سیگنال (تپ گیر)، تراگذرها، نوسان نما (اسیلوسکوپ)، رایانه، و محفظه اندازه گیری. در مرحله ساخت سامانه، واحدهای تپ ساز و تپ گیر، نوسان نمای رقمی و پردازشگر سیگنال در واحدی به نام واحد پردازش سیگنال جا داده می شوند. نوسان نمای رقمی (TNM Co, Ds20060, Korea) در قسمت پشت واحد پردازش قرار دارد که با درگاه USB به رایانه متصل است. چگونگی کارکرد واحد پردازش، با نوسان نمای رقمی و نرم افزار آن کنترل می شود. برای اندازه گیری و تنظیم نیروی تماس بین نمونه و تراگذرها، نیروسنج رقمی (Lutron, FG-5100, Taiwan) قابل اتصال به رایانه به کار گرفته شد. واحد پردازش سیگنال به همراه

1- Dry Contact
4- Enveloping

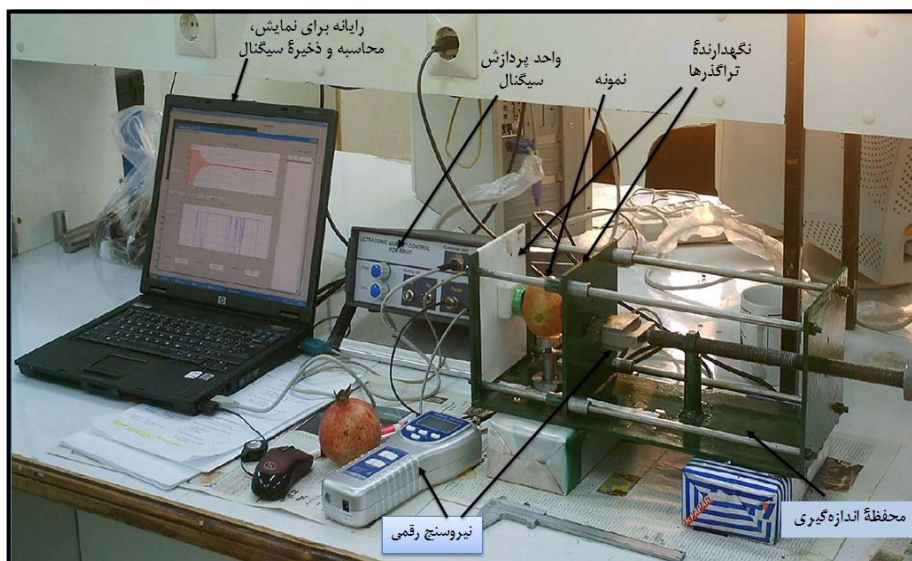
2- Rectification
5- Amplification

3- Demodulation

طراحی و ساخت سامانه سنجش فراصوتی و بررسی عوامل مؤثر...

گرفته است. امکان تغییر بسامد تحریک (از ۲۰ تا ۵۰ کیلوهرتز) و بهره تقویت سیگنال (از ۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰) از روی پانل واحد پردازش میسر است.

برای کاهش تأثیر اغتشاشات کابل‌های ارتباطی و مدارهای الکترونیکی سامانه بر سیگنال، اولین طبقه تقویت، خارجی است و تقویت‌کننده در پشت کریستال تراگذر گیرنده قرار



شکل ۲- سامانه فراصوتی ساخته شده حین آزمایش نمونه سیب زمینی

تعیین زمان عبور امواج و دامنه سیگنال دریافتی با تماس تراگذرهایی در دو طرف میوه اندازه می‌گیرد. با وارد کردن ضخامت نمونه به سامانه، شاخص‌های فراصوتی یعنی سرعت امواج عبوری از میوه و ضریب تضعیف آن محاسبه و نمایش داده می‌شوند. واحد پردازش، زمان بین ارسال تا دریافت امواج (زمان پرواز) را اندازه‌گیری می‌کند. سامانه، همچنین توانایی اندازه‌گیری دامنه و طیف بسامدی^۲ امواج تحریک و امواج دریافتی را دارد. برای تشریح سامانه، کل مدارهای الکترونیک به تعدادی مجموعه تقسیم می‌شود (شکل ۱). روش کار سامانه به این صورت است که پردازشگر درون واحد پردازش، پس از دریافت فرمان از رایانه، به تراشه جانبی

روش کار سامانه

سامانه فراصوتی، تحت عنوان "کیفیت‌سنج فراصوتی"^۱ (UQS)، برای اندازه‌گیری غیر مخرب ویژگی‌های محصولات کشاورزی و به ویژه میوه‌ها و سبزی‌ها ساخته شده است. سامانه، بر اساس آزمون تماسی و روش ارزیابی عبوری کار می‌کند. در فن فراصوت، به‌طور کلی نمونه بافت تهیه می‌شود (Cheng & Haugh, 1994; Kim *et al.*, 2004) یا کل میوه تحت آزمایش قرار می‌گیرد (Mizrach *et al.*, 1996; Hurng *et al.*, 2007). اما این سامانه، قابلیت آزمایش بافت تهیه شده و نیز نمونه کامل برخی میوه‌ها و سبزی‌ها را دارد. سامانه فراصوت، ویژگی‌های بافت محصول را با

1- Ultrasonic "Qualimeter" System

2- Frequency Spectrum

وظیفه کنترل کلی سامانه، ارتباط با نرم افزار (TNM)، محاسبه سرعت و ضریب میرایی، محاسبه و نمایش طیف بسامدی سیگنال‌ها، و غیره را بر عهده دارند. کنترل کننده اصلی سامانه، برنامه کنترلی (UQSS) است. این برنامه پس از نمایش سیگنال و اجرای محاسبات روی سیگنال، ویژگی‌های فراصوتی مانند سرعت امواج و طیف بسامدی را به صورت نمودار و رقم نشان می‌دهد. ویژگی‌های عملکردی سامانه به صورت دامنه ولتاژ تحریک و تعداد تپ تحریک و روش دریافت سیگنال (سیگنال پوشگیری شده یا بدون پوش)، توسط نرم افزار، قابل انتخاب و تنظیم و اعمال به سامانه است.

مزیت اصلی سامانه حاضر نسبت به نمونه‌های خارجی عبارت است از: پوشگیری موج، اندازه‌گیری زمان پرواز به صورت نرم افزاری، محاسبه خودکار شاخص سرعت. ویژگی‌های قابل ذکر دیگر این سامانه، پایین بودن هزینه ساخت و بومی بودن آن است.

فرمان می‌دهد تا با تحریک یک سوئیچ الکترونیکی، امواج فراصوتی به صورت تپی^۱ تولید شود. امواج فراصوتی از تراگذر فرستنده خارج می‌شود و پس از عبور از میوه و گرفتن اطلاعات از بافت آن، به تراگذر گیرنده برخورد می‌کند. سیگنال دریافتی پس از تقویت و شکل‌دهی، به کمک یک مبدل A/D رقمی و در یک حافظه سیگنال ذخیره می‌شود. سپس پردازشگر آن را از طریق درگاه سریال به رایانه منتقل می‌کند. همزمان با آن، سیگنال دریافتی به نوسان‌نمای رقمی ارسال می‌شود و از طریق درگاه USB به رایانه انتقال می‌یابد. برخی از مشخصات فنی سامانه در جدول ۱ آمده است.

برای کنترل، نمایش، محاسبه، و پردازش سیگنال از دو برنامه تدوین شده با نرم افزار Matlab 2006a و یک نرم افزار (TNM) استفاده می‌شود. برنامه‌های تدوین شده با نرم افزار Matlab 2006a عبارت‌اند از برنامه کنترل سامانه^۲ (UQSS) و برنامه پردازش سیگنال. این برنامه‌ها

جدول ۱- مشخصات فنی سامانه کیفیت‌سنج فراصوتی میوه‌جات

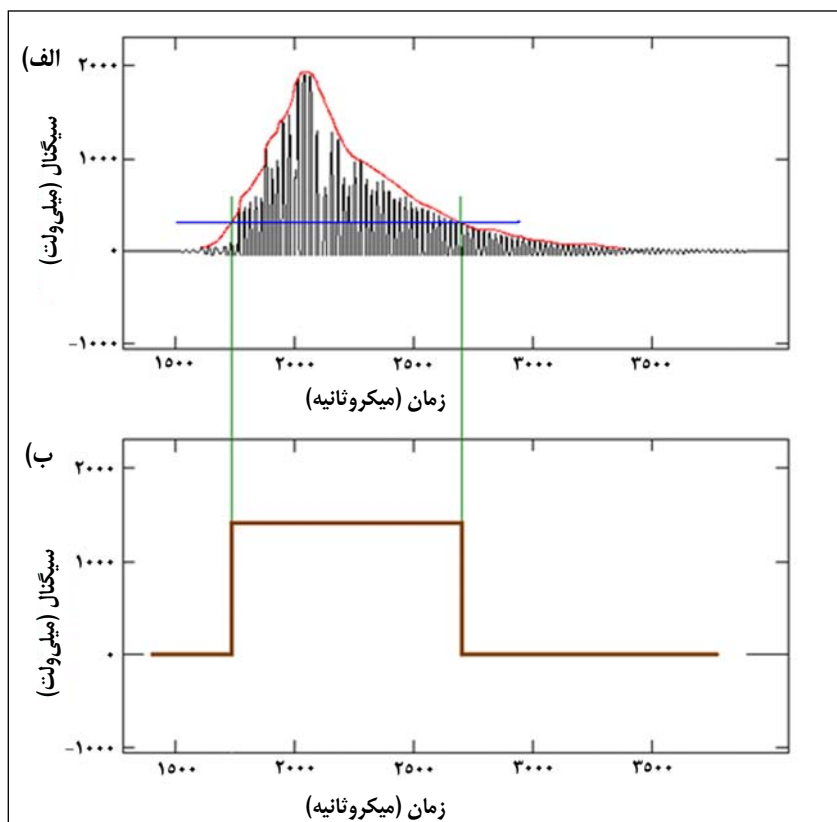
تراگذر						
تعداد تراگذر	محدوده بسامد کاری	زاویه پرتو	دمای کار	ولتاژ تحریک سر تراگذر	تعداد نوسان در تپ	روش کارکرد
دو عدد (فرستنده و گیرنده)	۵۰-۲۰ کیلوهرتز	۱۰ درجه	۶۰-۰ سانتی‌گراد	۸۰۰ ولت	سه موج مربعی شکل	تحریک مبدل تقویت امواج دریافتی
واحد پردازش						
تغذیه	توان مصرفی	سرعت نمونه‌برداری	سرعت پاسخ	ارتباط کامپیوتری	دقت محاسبه سرعت	نوع موج
۲۲۰ ولت AC	۵ وات	۱/۲ مگاهرتز	حدود یک ثانیه	RS232 دوطرفه - baud=115200	کمتر از ۱ متر بر ثانیه	طولی یا تراکمی (P)
آشکار ساز رقمی رایانه‌ای						
مدل	سرعت نمونه‌برداری	دقت	ارتباط کامپیوتری	کنترل دستگاه	پهنای باند	
Ds20060	۲۰ مگاهرتز	عمودی ۳ درصد، افقی ۰/۱ درصد	درگاه USB	نرم افزار سامانه و نرم افزار TNM	۱۵ مگاهرتز	

واسنجی و اعتبارسنجی سامانه

پیش از آغاز آزمایش‌ها، سامانه برای هوا واسنجی شد. واسنجی شامل دو مرحله است. مرحله نخست تنظیم زمان گذر صحیح یا زمان پرواز (TOF) و مرحله دوم واسنجی شکل پرتو و طیف بسامدی سیگنال است. برای به دست آوردن زمان پرواز صحیح، آزمایشی اجرا شد که در آن ارسال و دریافت سیگنال برای هوا در فواصل مشخص تراگذر انجام می‌گیرد. با جایگذاری مشخصات تراگذر (قطر و بسامد) و سرعت امواج در هوا در رابطه ۶، طول میدان نزدیک برای هوا ۱۸/۵۸ میلی‌متر محاسبه شد. بنابراین، فاصله بین دو تراگذر از ۲۰ تا ۱۶۵ سانتی‌متر با گام حرکتی ۵ سانتی‌متر تعیین شد. با مقایسه سرعت‌های محاسبه شده با برنامه کنترلی در فواصل مختلف بین تراگذرها و سرعت امواج در هوا (۳۳۲ متر بر ثانیه)، زمان پرواز دقیق به دست آمد. با داشتن مقدار تصحیح کننده زمان پرواز، تصحیحات و تغییرات لازم روی برنامه کنترلی سامانه انجام شد. بعد از واسنجی و در اعتبارسنجی سامانه، میزان خطا در اندازه‌گیری سرعت امواج تعیین شد. میانگین سرعت عبور امواج از هوا برابر ۳۳۲/۳۴ متر بر ثانیه با انحراف معیار ۳/۲۴ در ۲۲ تکرار به دست آمد. به عبارت دیگر، میزان خطایی برابر با ۰/۶ درصد در اندازه‌گیری سرعت عبور امواج از هوا وجود دارد. بیشتر مشخصات پرتو ارسالی/دریافتی هر تراگذری به نوع کریستال و چگونگی ساخت تراگذر وابسته است

(Cartz, 1998). وجود پارازیت‌های متعدد، شکل سیگنال‌ها و طیف بسامدی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. سیگنال پارازیت‌دار اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی را دشوار می‌کند و حتی باعث ایجاد اشتباه در نتایج می‌شود. برای واسنجی دامنه و شکل سیگنال، صافی‌های مختلفی به کار گرفته شد. اعمال صافی روی سیگنال‌ها هم سخت‌افزاری و هم نرم‌افزاری انجام گرفت. برای حذف طیف‌های ناشی از محیط و نیز پارازیت‌های جلو سیگنال گیرنده، صافی‌هایی در سخت افزار واحد تپ‌ساز و تپ‌گیر تعبیه شد. برای رفع پارازیت‌های اطراف بسامد اصلی و نرم شدن سیگنال^۱، صافی نوارگذر یا باندگذر^۲ با روش اکویی ریپل^۳ از نوع FIR و صافی نیم قوسی با استفاده از نرم افزار Matlab طراحی شد. نتیجه اعمال این صافی‌ها، حذف پارازیت‌ها و کاهش اشکال در اندازه‌گیری TOF و دامنه سیگنال بود.

اعوجاج جلو سیگنال دریافتی موجب کاهش دقت در اندازه‌گیری TOF می‌شود. بنابراین بعد از یکسوسازی سیگنال، به وسیله مدار پوشگیر، پوش سیگنال دریافتی گرفته شد (شکل ۳). بیان ساده پوشگیری عبارت است از برآزش منحنی پوششی روی سیگنال. پس از پوشگیری، مدار مقایسه‌گر سیگنال پوش را به سیگنال مربعی تبدیل می‌کند. شکل ۳، چگونگی پوشگیری سیگنال و تبدیل آن به سیگنال مربعی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳- پردازش سیگنال دریافتی برای تسهیل اندازه‌گیری زمان پرواز. الف) شمای پوشش‌گیری سیگنال یکسو شده، ب) تبدیل سیگنال پوش به سیگنال مربعی

آماده‌سازی نمونه‌ها

فواصل مشخص بین آنها برای برش عرضی نمونه‌ها بود. ضخامت نمونه‌ها از ۵ تا ۱۲۰ میلی‌متر متغیر بود. برای مشخص شدن توانایی سامانه در اندازه‌گیری خواص فراصوت و بررسی اثر عوامل مؤثر در اندازه‌گیری آزمایش‌هایی با میوه‌ها و سبزی‌های مختلف طرح‌ریزی شد. هفت نوع میوه و سبزی با بافت‌های متفاوت انتخاب شدند از این قرار: سیب قرمز لبنانی، سیب‌زمینی، هویج، شلیل، موز، به، و خیار. همه میوه‌ها و سبزی‌ها سالم، رسیده، و بی‌عیب بودند. هسته میوه‌های شلیل مورد آزمایش، سالم یا ترکدار بود. آزمایش با نمونه کامل شلیل و سیب‌زمینی و بافت برش خورده سایر محصولات اجرا شد.

به منظور بررسی عملکرد دستگاه در آزمایش محصول‌های کشاورزی، سامانه با چند محصول مختلف با بافت‌های متفاوت ارزیابی شد. تمامی میوه‌ها و سبزی‌ها از میدان میوه و تره‌بار تهران (پاییز ۱۳۸۶) تهیه شدند. برای بررسی عوامل مؤثر در اندازه‌گیری و نیز بررسی توانایی سامانه، از میوه و سبزی دست نخورده (شلیل، سیب‌زمینی) و نیز از بافت نمونه‌های بریده شده (سیب، خیار، به، موز، و غیره) برای آزمایش استفاده شد. برای تهیه نمونه‌هایی با ضخامت دلخواه، ابزار برش خاصی به‌کارگرفته شد. ابزار برش شامل استوانه‌ای تیز با قطر ۳۰ میلی‌متر برای برش طولی و کاردهایی برنده با

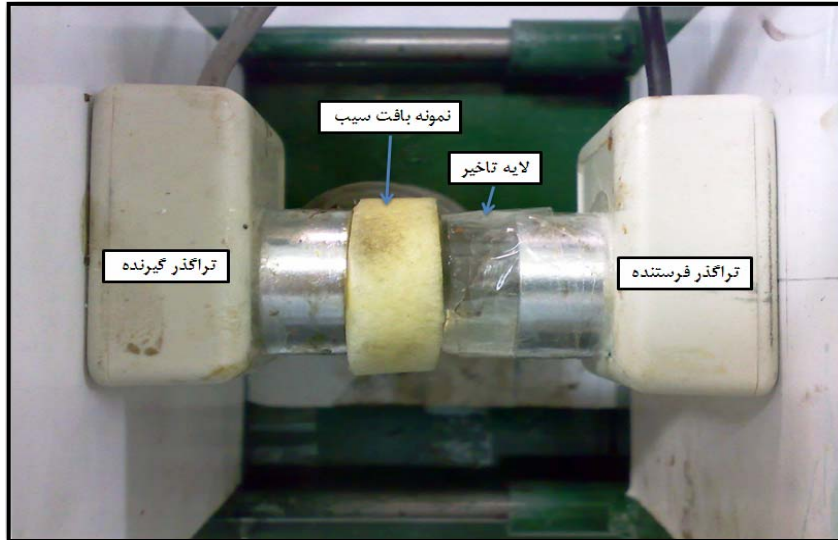
تعیین عوامل مؤثر بر آزمایش فراصوت

میدان نزدیک تراگذر تعیین می‌شود.

روش آزمایش

تمامی آزمایش‌ها در دما و رطوبت آزمایشگاه (دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۰ درصد)، در پاییز ۱۳۸۶ و در آزمایشگاه "سامانه‌های اندازه‌گیری و کنترل" دانشگاه تربیت مدرس اجرا شد. برای اندازه‌گیری سرعت امواج از رابطه ۲ و برای محاسبه ضریب تضعیف از رابطه ۴ استفاده شد. محاسبه سرعت امواج به صورت خودکار و محاسبه ضریب تضعیف با اندازه‌گیری دامنه سیگنال و غیر خودکار انجام گرفت. نخست، ضخامت نمونه با کولیس رقمی (Mitutoyo, Japan) با ریزبینی ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و به نرم افزار داده شد. سپس زمان پرواز امواج از ضخامت نمونه بر حسب میکروثانیه با نرم‌افزار سامانه اندازه‌گیری شد و همزمان سرعت امواج، محاسبه، نمایش و به لیست آزمایش اضافه شد. از منوی نرم افزار UQSS، اندازه‌گیری زمان پرواز (TOF) با سیگنال پوشگیری شده یا غیر پوش امکان‌پذیر است. اندازه‌گیری برای هر نمونه ۳۰ بار تکرار شد. نحوه قرار گرفتن نمونه بین دو تراگذر در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به توانایی نرم افزار آشکارساز رقمی رایانه‌ای (TNM)، سرعت نمونه‌برداری زیاد و دقت بالای آن، از این نرم‌افزار برای محاسبه دامنه سیگنال و بازبینی سیگنال‌ها استفاده شد. محاسبات آماری مورد نیاز با نرم افزارهای Microsoft Office Excel 2007 و SPSS 14 انجام شد.

تأثیر پوشگیری موج، نیروی تماس نمونه با تراگذر، لایه تأخیر، ضخامت نمونه، و ماده واسط^۱ بر میزان تغییر سرعت امواج و ضریب تضعیف بررسی شد. این آزمایش‌ها با انواع نمونه‌های محصول انجام پذیرفت. اندازه لایه تأخیری (معمولاً مواد پلیمری) در ارتباط با طول میدان نزدیک تراگذر فرستنده است. طول میدان نزدیک برای پلی‌کربنات از رابطه ۶ حدود ۲/۳۴ میلی‌متر محاسبه شد. اگر سرعت امواج عبوری در پلی‌کربنات ۲۶۰۰ متر بر ثانیه برابر سرعت عبوری پلی‌امید^۲ در نظر گرفته شود، زمان پرواز (TOF) برای گذر امواج از لایه تأخیر ۳/۶۶ میکروثانیه خواهد بود. بنابراین، در محاسبه دقیق سرعت امواج در نمونه باید این زمان از زمان پرواز (TOF) به دست آمده تفریق شود. به منظور انتقال امواج به نمونه و گذر از میدان نزدیک، لایه تأخیری به ضخامت حدود ۹ میلی‌متر در جلو تراگذر فرستنده نصب شد. با توجه به پژوهش‌های قبلی سطوح نیروی تماسی ± 1 (۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) نیوتن در نظر گرفته شد. در برخی مطالعات، از گریس (Mizrach et al., 1989) یا آب خود نمونه (Kim et al., 2004) به عنوان ماده واسط استفاده شده است. اما در این پژوهش برای جلوگیری از آلوده شدن نمونه و تراگذر و نیز امکان استفاده از نمونه‌ها برای آزمایش‌های بعدی، از ژل روانکار فراصوت^۳ استفاده شد. ضخامت نمونه‌ها با توجه به نوع میوه و سبزی از ۰/۵ تا ۱۲ سانتی‌متر تغییر می‌کرد. برای هر نمونه، کمینه ضخامت نمونه‌ها بر اساس طول



شکل ۴ - نحوه قرارگیری نمونه بین تراگذر فرستنده و گیرنده و اتصال لایه تأخیر

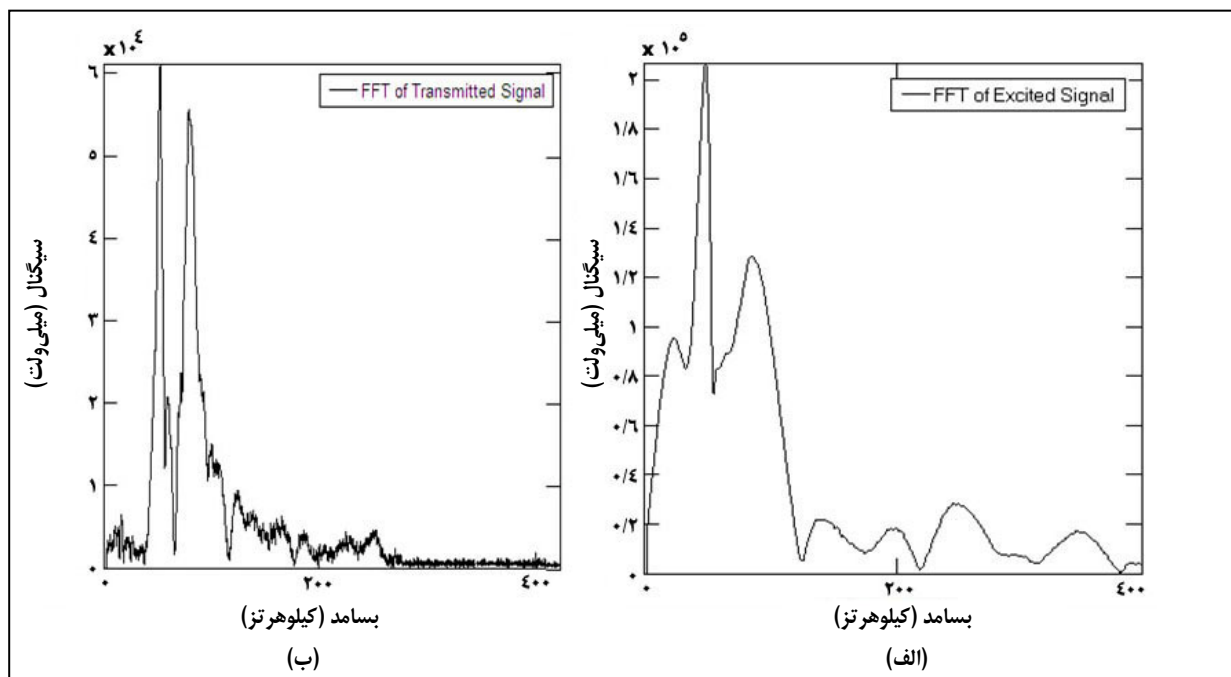
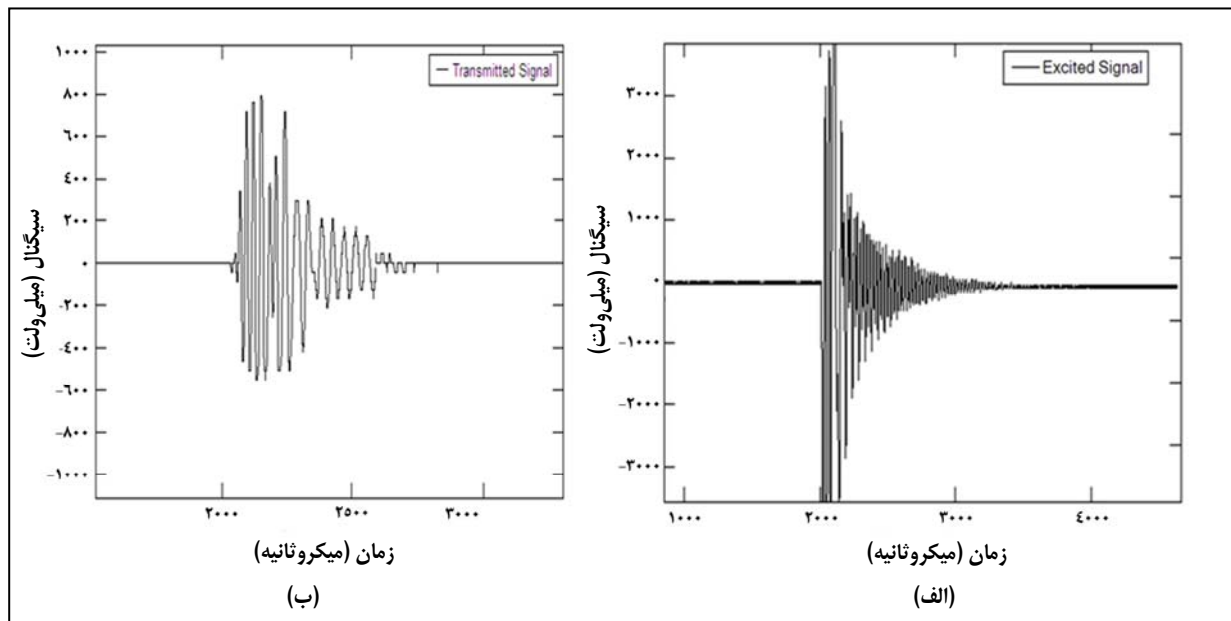
یافته‌ها و بحث

نتایج واسنجی

به صافی نوارگذر، نتیجه بهتری داشت برای ادامه آزمایش‌ها انتخاب شد. طیف بسامدی سیگنال‌ها از برنامه پردازش سیگنال و نرم افزار TNM قابل حصول است. نمونه‌ای از طیف بسامدی سیگنال‌ها برای میوه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. طیف بسامدی تراگذر مورد استفاده از نوع رزونانسی و شامل سه اوج^۱ اصلی است. اوج وسطی همان بسامد تحریک یا اسمی تراگذر است. بسامد تحریک در سامانه ساخته شده و بسامد تراگذر تهیه شده به طور تقریبی برابر با ۴۰ کیلوهرتز است.

بررسی سیگنال‌ها نشان داد که با واسنجی زمان پرواز (TOF)، سرعت امواج در هوا با دقت مناسبی اندازه‌گیری می‌شود که برابر $(SD= ۳/۲۴)$ متر بر ثانیه به دست آمد. شکل ۵، سیگنال‌های تحریک و دریافتی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با صافی‌ها پارازیت‌های وابسته به محیط، مدار، dc، و نیز پارازیت‌های ریز جلو سیگنال گیرنده در واسنجی برطرف شده است. صافی نیم قوسی که نسبت

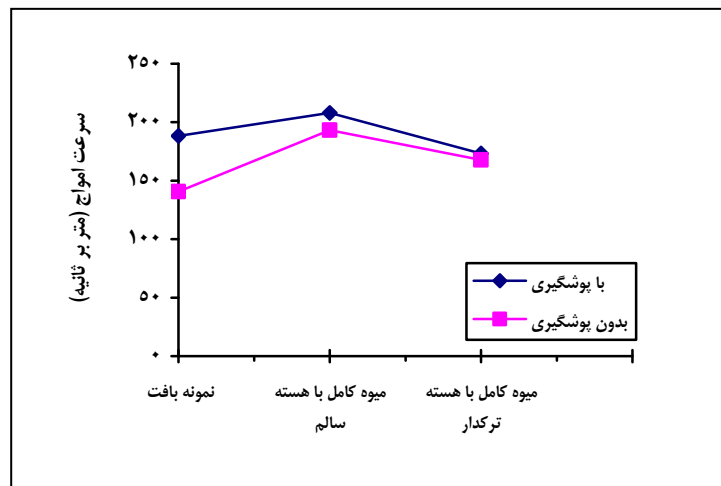
طراحی و ساخت سامانه سنجش فراصوتی و بررسی عوامل مؤثر...



پوشگیری سیگنال

بر سه حالت از اندازه‌گیری میوه شلیل نشان می‌دهد. علت آن دشواری اندازه‌گیری دقیق مدت زمان بین سیگنال تحریک و دریافتی است که بسیار کوتاه و در حد چند میکرو ثانیه است. در حالت بدون پوش، جلو سیگنال دریافتی به دلایل مختلف آشفته و پارازیت‌دار است که کار اندازه‌گیری را مشکل می‌کند. اما در پوشگیری سطح آستانه‌ای تعریف می‌شود که اندازه‌گیری زمان بر اساس آن آغاز خواهد شد. در این حالت، پارازیت‌های احتمالی جلو سیگنال دریافتی تأثیری بر اندازه‌گیری زمان پرواز نخواهد داشت. البته پوشگیری برای نمونه‌های سیب و موز تأثیر چندانی بر نتایج اندازه‌گیری نداشت. شاید علت آن در خاصیت بافت آنها باشد که نرم است و حباب هوای زیادی دارد.

برای اینکه محاسبه زمان پرواز (TOF) دقیق‌تر باشد باید به نحوی پارازیت‌های ناخواسته جلوی سیگنال دریافتی را حذف کرد. برخی پژوهشگران نشان داده‌اند که میانگین‌گیری و نرم کردن سیگنال دریافتی راهکاری مناسب برای کاهش و حذف پارازیت‌ها و اعوجاج است (Kim et al., 2004). اما در این پژوهش برای بی اثر کردن اعوجاج موجود در سیگنال دریافتی روشی جدید با عنوان پوشگیری به کار گرفته شد که شماتیک آن در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج آزمایش نشان داد که سرعت امواج محاسبه شده با نرم‌افزار برای نمونه‌های سیب‌زمینی، به، و شلیل در حالت پوش کمی بیش از سیگنال بدون پوش است. برای مثال شکل ۷، اثر پوشگیری سیگنال دریافتی را



شکل ۷- اثر پوشگیری سیگنال بر تغییرات سرعت امواج عبوری در میوه و بافت شلیل

ماده واسط

ضخامت ماده واسط نیز در آزمایش‌ها یکسان خواهد بود. اثر ماده واسط بر مقدار سرعت امواج ناچیز اما بر دامنه سیگنال متفاوت است (جدول ۲). تغییرات ضریب تضعیف آزمایش کل میوه بیشتر از آزمایش بافت نمونه‌ها بود. علت آن وجود آب در نمونه‌های بافت است. برخلاف شلیل، آزمایش نمونه‌های کامل برخی میوه‌ها مانند سیب زمینی بدون ماده واسط امکان‌پذیر نبود. بنابراین، برای آزمایش نمونه‌هایی که انتقال امواج فراصوت در آنها دشوار است، استفاده از ماده واسط اجتناب‌پذیر خواهد بود.

به‌طور کلی برای انتقال امواج و تطابق امپدانس بین دو ماده، به ماده واسط نیاز است. اما برای آزمایش میوه‌های آبدار مانند شلیل، به دلیل وجود آب در نمونه، نیازی به ماده واسط خارجی نیست. البته به دلیل اثر نوع ماده واسط بر سیگنال دریافتی، استفاده از یک نوع ماده واسط ترجیح داده می‌شود. ضمن اینکه با افزایش ضخامت ماده واسط، دامنه سیگنال کاهش می‌یابد (Raj *et al.*, 2007). با اعمال نیروی تماسی ثابت بر تمامی نمونه‌ها،

جدول ۲- تغییرات سرعت امواج عبوری و ضریب تضعیف متاثر از ماده واسط

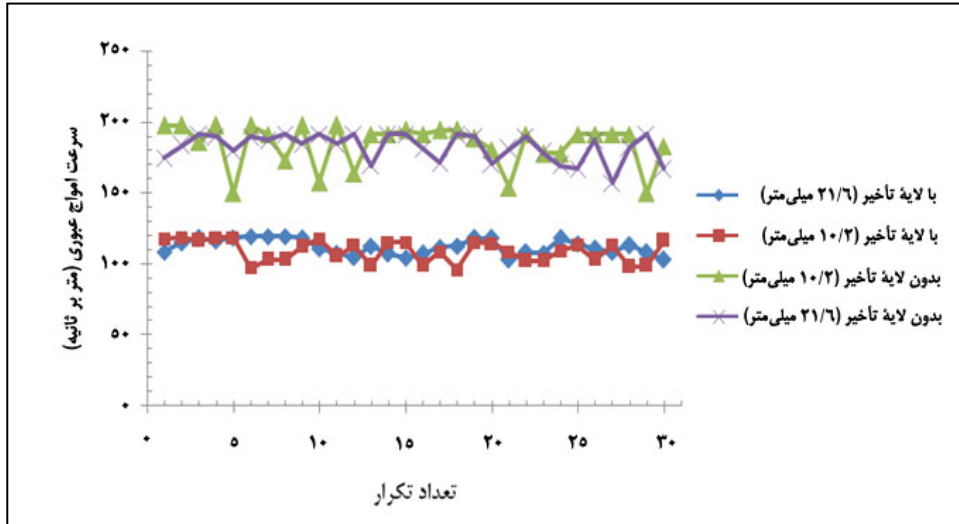
نمونه آزمایشی	سرعت امواج عبوری (متر بر ثانیه)	** ضریب تضعیف (دسی بل بر متر)
بافت به	با ماده واسط	بدون ماده واسط
میوه شلیل	با ماده واسط	بدون ماده واسط

* عدد درون پرانتز میزان انحراف معیار است، ** انحراف معیار ضریب تضعیف کمتر از ۰/۰۱ است.

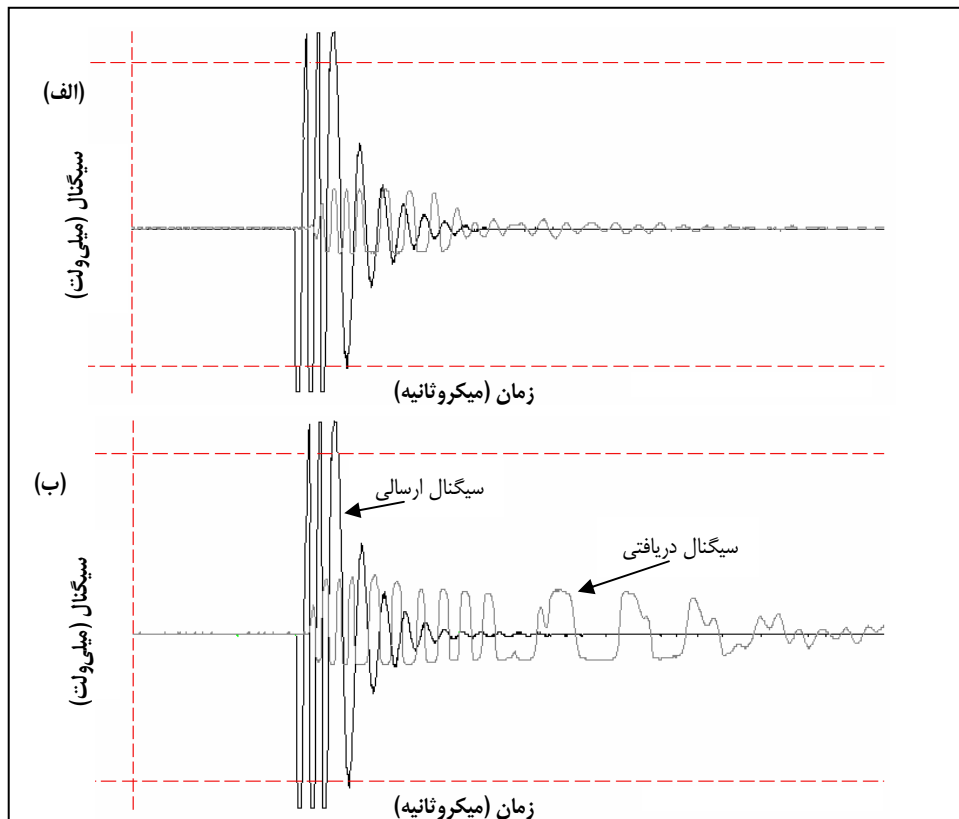
لایه تأخیر

تضعیف در برخی نمونه‌ها مانند موز یا سیب آن‌قدر بالاست که اغتشاشات میدان نزدیک را حذف کند. لایه تأخیر باعث کاهش شدت امواج می‌شود. در آزمایش سیب مشاهده شد که با استفاده از لایه تأخیر و در نمونه دارای ضخامت ۲۵ میلی‌متر، دامنه موج به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که امکان اندازه‌گیری ویژگی‌های فراصوتی وجود نخواهد داشت. ولی لایه تأخیر بر نتایج آزمایش سیب زمینی اثر مثبتی داشت (شکل ۹). بنابراین نوع و شرایط نمونه و ضخامت آن در مؤثر بودن لایه تأخیر در کاهش اعوجاج نقش بسزایی دارند.

برای اندازه‌گیری در میدان دور از یک صفحه پلی کربنات به ضخامت حدود ۹ میلی‌متر به عنوان لایه تأخیر استفاده شد. در حالت بدون لایه تأخیر و نمونه کم ضخامت، سیگنال دریافتی با هارمونی و اعوجاج خاصی همراه است. در این حالت میزان پراکندگی داده‌های حاصل هم زیاد است (شکل ۸). این پدیده ناشی از اغتشاشات منطقه نزدیک و نسبت کم ضخامت نمونه به طول موج است. پس لایه تأخیر موقعی نیاز است که ضخامت نمونه کم باشد. اما به کارگیری لایه تأخیر برای همه نمونه‌ها توصیه نمی‌شود، چون ضریب



شکل ۸- تأثیر لایه تأخیر و ضخامت نمونه بر سرعت امواج برای نمونه بافت سیب



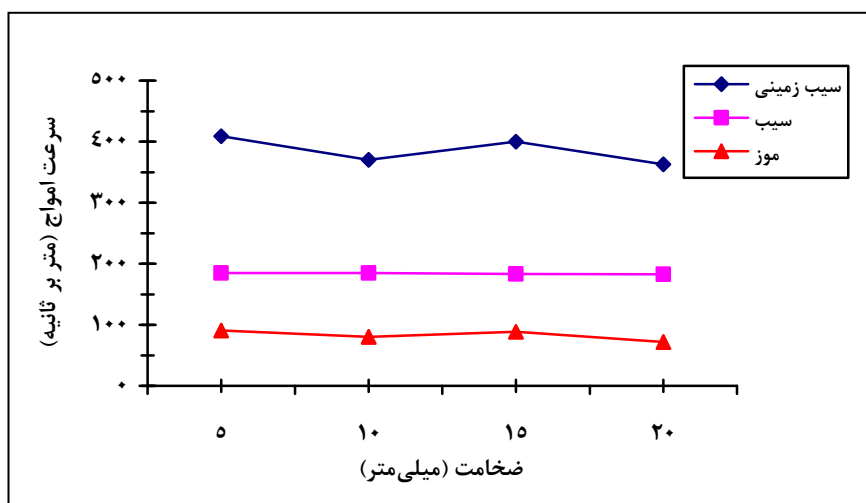
شکل ۹- اثر لایه تأخیر بر شکل سیگنال (نمونه سیب زمینی با ضخامت ۲۰/۶ میلی متر)،

الف) با لایه تأخیر، ب) بدون لایه تأخیر

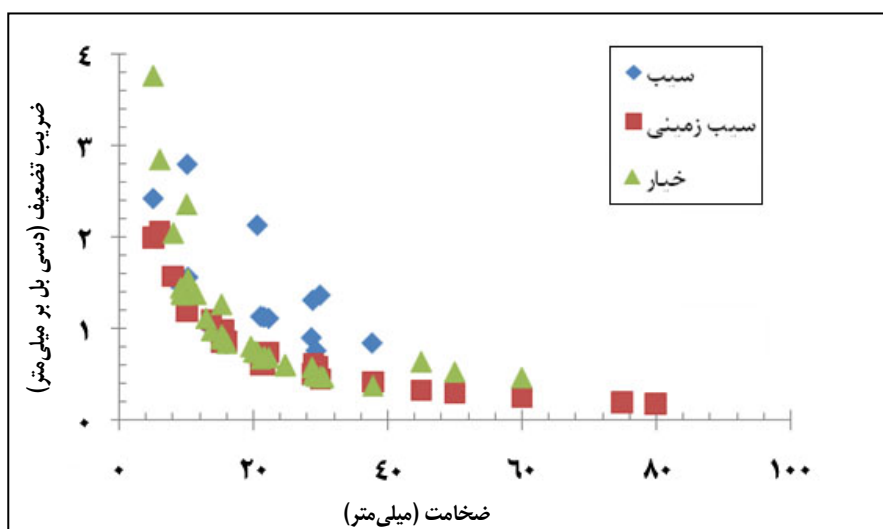
ضخامت نمونه

سیب زمینی را در ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد. که در آن اجزای بسامدی بالا تضعیف می‌شوند و میزان تضعیف با افزایش ضخامت نمونه افزایش می‌یابد. بسامد اوج نیز با تغییر ضخامت نمونه، جابه‌جا می‌شود. به عبارت ساده‌تر، با افزایش ضخامت نمونه، بسامدهای بالا بیشتر تضعیف می‌شوند. بنابراین، در هر آزمایش بهتر است ضخامت نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شود. میزراچ و همکاران (Mizrach *et al.*, 1999; 2006) در اکثر پژوهش‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که با تغییر وضعیت میوه، سرعت امواج نسبت به ضریب تضعیف تغییرات کمی دارد و شاخص خوبی برای کیفیت سنجی نیست. دلیل این امر به سامانه این محققان مرتبط است که در آن توانایی پایش سطحی و ضخامت نمونه مورد بررسی ۲ تا ۳ میلی‌متر است. کیم و همکاران (Kim *et al.*, 2004) با نمونه‌هایی با ضخامت ۲۲ میلی‌متر نشان دادند که زمان پرواز (TOF) و به تبع آن سرعت امواج، شاخص مناسبی است. نتیجه این است که ضخامت نمونه تأثیر زیادی در اندازه‌گیری شاخص‌ها دارد.

یکی از عوامل مؤثر در اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی، ضخامت نمونه است و باید گفت که اثر ضخامت نمونه‌ها نیز در ارتباط با لایه تأخیر است. آزمایش با نمونه‌های کم ضخامت با خطا همراه و پراکندگی داده‌ها زیاد است. دلیل این موضوع، وجود اغتشاش‌های امواج منتشر شده در جلو تراگذر فرستنده (ناحیه مرده^۱ در درون منطقه نزدیک) است. ضخامت نمونه بر سرعت امواج عبوری کم اثر است (شکل ۱۰) اما بر ضریب تضعیف اثر وارونه دارد و در ضخامت کم تغییر ضریب تضعیف زیاد است (شکل ۱۱). این یافته‌ها با نتایج پژوهشگران قبلی همخوانی خوبی دارد. کیم و همکاران (Kim *et al.*, 2004) طی آزمایش‌هایی روی سیب، هلو، و گلابی دریافتند که با افزایش ضخامت نمونه، میرایی کاهش و زمان پرواز (TOF) به‌طور خطی افزایش می‌یابد. دلیل میرا شدن سیگنال در ضخامت‌های زیاد با بررسی طیف بسامدی نمونه‌ها روشن می‌شود. شکل ۱۲، تغییرات طیف بسامدی نمونه



شکل ۱۰ - تأثیر ضخامت نمونه بر سرعت امواج برای سیب، موز، و سیب زمینی

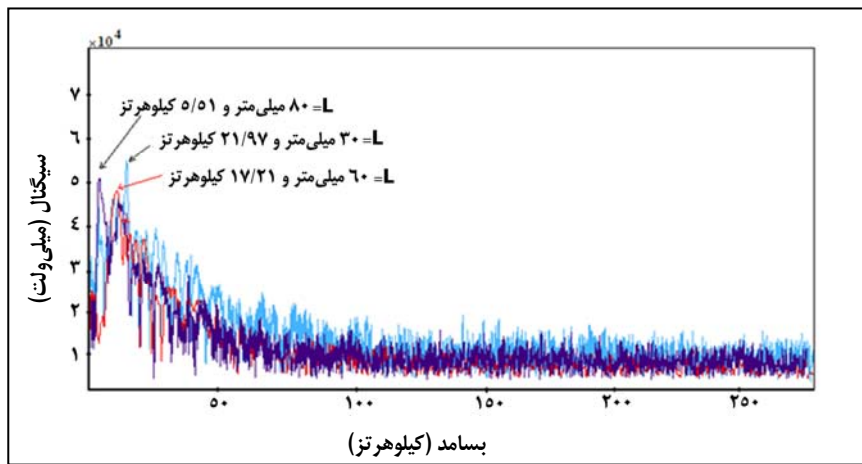


شکل ۱۱- تأثیر ضخامت نمونه بر ضریب تضعیف سیب، خیار و سیب زمینی

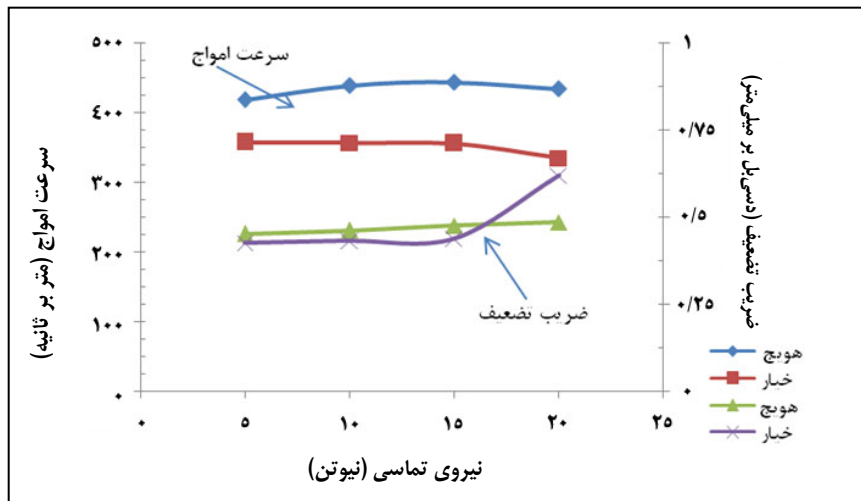
نیروی تماسی

سطح موجب پراکنش امواج و کاهش شدت آن می‌شود (Raj *et al.*, 2007). اما با افزایش نیروی تماسی، ماده‌ی واسط از بین نمونه و تراگذر خارج می‌شود و نیز اجازه‌ی ارتعاش کافی به صفحه‌ی خارجی تراگذر نمی‌دهد. بنابراین، شدت امواج ورودی به نمونه و تراگذر گیرنده کاهش می‌یابد. در این خصوص دو مسئله مطرح است: آسیب ندیدن و تماس کافی بین تراگذر و نمونه. وجود هر گونه حباب هوا بین تراگذر و نمونه باعث اخلاص در اندازه‌گیری خواهد شد. این امر در آزمایش نمونه‌ی خیار مشاهده شد که نیروی تماسی ۱ نیوتن بود. از سوی دیگر، نیروی تماسی زیاد برای اندازه‌گیری نمونه‌های نرم مانند میوه‌ی موز به دلیل آسیب رساندن به نمونه و نداشتن دقت کافی در اندازه‌گیری، مناسب نیست. بنابراین، با در نظر گرفتن موارد تماس کافی و بی‌نیازی از نیروی تماسی بالا و احتمال آسیب، نیروی تماسی ۵ نیوتن برای آزمایش‌های بعدی در نظر گرفته شد. این یافته‌ها با گزارش تحقیق‌های قبلی موافقت دارد (Mizrach *et al.*, 1999; 2003).

در بررسی اثر نیروی تماسی بر سیگنال دریافتی مشخص شد که با افزایش نیروی تماسی، دامنه‌ی سیگنال قویتر و زمان گذر سیگنال اندکی کمتر می‌شود. با این همه ضریب تضعیف، تغییرات افزایشی محسوسی دارد (شکل ۱۳). میزراچ و همکاران (Mizrach *et al.*, 2003) در آزمایشی برای بررسی خاصیت آردی سیب اعلام کردند که با افزایش نیروی تماسی از صفر تا ۱۰ نیوتن، انرژی عبور افزایش می‌یابد. اما این افزایش تا قبل از ایجاد تغییرات فیزیکی در ساختار نمونه است. در آزمایش بافت موز مشاهده شد که افزایش نیرو (بیش از ۵ نیوتن) باعث آسیب (گسیختگی) بافت و قطع انتقال امواج می‌شود. به دلیل تماس ناکافی بین تراگذر و نمونه در نیروی تماسی ۱ نیوتن شاخص‌ها اندازه‌گیری نشد. در نیروی تماسی زیاد مانند ۲۰ نیوتن، ضریب تضعیف کمی افزایش می‌یابد. این اتفاق چنین تفسیر می‌شود که با افزایش سطح تماس تراگذر با نمونه، جفت شدن^۱ و انتقال امواج بهبود می‌یابد. ناصافی



شکل ۱۲- تأثیر ضخامت نمونه سیبزمینی بر طیف بسامدی



شکل ۱۳- اثر نیروی تماسی بر سرعت امواج و ضریب تضعیف نمونه‌های بافت هویج و خیار

نتیجه گیری

نتیجه آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای نفوذ هر چه بهتر امواج به درون نمونه‌ها، تراگذرایی با بسامد ۴۰ کیلوهرتز، ماده واسط مناسب و نیروی تماسی در حدود ۵ نیوتن، مناسب است. پوشگری سیگنال اندازه‌گیری را آسان و دقت را تا حدی بیشتر می‌کند، و یکنواختی داده‌های سرعت امواج را بهبود می‌بخشد. با توجه به مشخصات فنی سامانه، برای تعیین شاخص‌های فراصوتی محصولات کشاورزی باید از امواج فراصوتی با بسامد کم و توان تحریک مناسب استفاده کرد. برای

در این مقاله، به چگونگی طراحی و ساخت سامانه فراصوتی اشاره شد که با بهره‌گیری از مطالعات و پژوهش‌های قبلی، دارای قابلیت‌هایی منحصر به فرد است. اصول کارکرد سامانه، به کارگیری امواج فراصوت برای تشخیص میزان قابلیت عبور امواج فراصوت محصولات کشاورزی است. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی سامانه با هوا نشان داد که خطای اندازه‌گیری سرعت عبور امواج از هوا در حدود ۰/۶ درصد است. بررسی

افزایش دقت اندازه‌گیری باید بسامد و به همراه آن توان سامانه را افزایش داد. علی‌رغم اینکه بافت اکثر میوه‌ها و سبزی‌ها به دلیل وجود دانه، غیر همگن و اندازه‌گیری شاخص‌ها مشکل است، سامانه فراصوتی ساخته شده نشان داد که توانایی خوبی در اندازه‌گیری شاخص‌های فراصوتی دارد. نتایج آزمایش نشان داد که این سامانه قابلیت اندازه‌گیری سرعت و میزان تضعیف امواج فراصوت را در اکثر میوه‌های با بافت همگن مانند سیب، سیب‌زمینی، به، هویج، شلیل و موز دارد. اما برای سبزی‌های دارای بافت ناهمگن مانند، بهتر است قسمتی از بافت همگن آن برای آزمایش در نظر گرفته شود. روش فراصوت در سنجش کیفیت محصول‌های کشاورزی روند تکاملی دارد و هنوز سامانه تجاری در این زمینه وجود ندارد. به منظور تبیین توانایی و قابلیت این روش، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های بیشتر با نمونه‌های دیگر ادامه یابد.

قدردانی

از جناب آقای مهندس علیرضا منتظر از گروه الکترونیک دانشگاه شهید رجایی و مدیر شرکت نوین افزار پیشرو در طراحی و ساخت دستگاه تپ‌ساز و تپ‌گیر، و از جناب آقای دکتر مهدی سعادت‌مند برای کمک در برنامه‌نویسی قدردانی می‌شود.

مراجع

- Abbott, J. A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 15, 207-225.
- Abbott, J. A., Lu, R., Upchurch, B. L. and Stroshine, R. L. 1997. Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables. *Hortic. Rev.* 20, 1-120.
- Bechar, A., Mizrach, A., Barreiro, P. and Landahl, S. 2005. Determination of Mealiness in Apples using Ultrasonic Measurements. *Biosys. Eng.* 91(3): 329-334.
- Butz, P., Hofmann, C. and Tauscher, B. 2005. Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable quality analysis. *J. Food Science.* 70(9): 131-141.
- Cartz, L. 1998. *Nondestructive testing, Radiography, Ultrasonics, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current.* ASM International. USA.
- Cheng, Y. and Haugh, C. G. 1994. Detecting Hollow Heart in Potatoes Using Ultrasound. *Trans. ASAE.* 37(1): 217-222.
- Gaete-Garretón, L., Yolanda Vargas-Hernández, Y., Cristian León-Vidal, C. and Alex Pettorino-Besnier, A. 2005. A novel noninvasive ultrasonic method to assess avocado ripening. *J. Food Sci.* 70(3):187-191.
- Gaonkar, A. G. 1995. *Food Processing Recent Developments.* Elsevier Science. Amsterdam. Netherlands.
- Hurng, H. Y., Lu, F. M. and Ay, C. 2007. Evaluating and modeling physiological tissue texture of mango immersed in water by using ultrasonic. *Inter. Agric Eng. J.* 16(1-2), 1-13.
- Kim, K. B., Jung, H. M., Kim, M. S. and Kim, G. S. 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.

- 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.
- Mizrach, A. 2007. Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. *Postharvest Biol. Technol.* 46, 271-274.
- Mizrach, A., Galili, N. and Rosenhouse, G. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Trans. ASAE.* 32(6): 2053-2058.
- Mizrach, A., Schmilovitch, Z., Avidan, B. 2006. Maturity Measurements of Olive Fruits using Acoustic and Compression Methods. CIGR. World Congress of Agricultural Engineering for a Better World. Sep. 3-7. Berlin. Germany.
- Mizrach, A., Galili, N., Teitel D. C. and Rosenhouse, G. 1994. Ultrasonic evaluation of some ripening parameters of autumn and winter-grown 'Galia' melons. *Scientia Hort.* 56(4): 291-297.
- Mizrach, A., Flitsanov, U., Schmilovitch, Z. and Fuchs, Y. 1999. Determination of mango physiological indices by mechanical wave analysis. *Postharvest Biol. Technol.* 16,179-186.
- Mizrach, A., Galili, N., Gan-mor, S., Flitsanov, U., and Prigozin, I. 1996. Model of ultrasonic parameters to assess avocado properties and shelf life. *J. Agric. Eng. Res.* 65, 261-267.
- Mizrach, A., Bechar, A., Grinshpon, Y., Hofman, A., Egozi, H. and Rosenfeld, L. 2003. Ultrasonic classification of mealiness in apples. *Trans. ASAE.* 46(2): 397-400.
- Prakash, M. N. K. and Ramana, K. V. R. 2003. Ultrasound and its application in the food industry. *J. Food Sci. Technol.* 40(6): 563-570.
- 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. *Agric. Engin. Res.* 26, 151-160.
- Raj, B., Rajendran, V. and Palanichamy, P. 2007. Science and Technology of Ultrasonic. Alpha Science International Ltd. Pangbourne. U. K.
- Rose, J. L. 2004. Ultrasonic Waves in Solid Media. Cambridge University Pub. Cambridge. UK.
- Sarkar, N. and Wolfe, R. R. 1983. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Trans. ASAE.* 26(2): 624-629.
- Self, G. K., Ordozgoiti, E., Povey, M. J. W. and Wainwright, H. 1994. Ultrasonic evaluation of ripening avocado flesh. *Postharvest Biol. Technol.* 4, 111-116.
- Shewfelt, R. L. 1999. What is quality?. *Postharvest Biol. Technol.* 15(3): 197-200.
- Verlinden, B. E., Smedt, V. D. and Nicola, B. M. 2004. Evaluation of ultrasonic wave propagation to measure chilling injury in tomatoes. *Postharvest Biol. Technol.* 32, 109-113.
- Hedrick, W. H., Heykes, D. L. and Starchman, D. E. 2005. *Ultrasound Physics and Instrumentation.* 4th Ed. Elsevier Mosby. Philadelphia. US.
- Subramanian, C. V. 2006. *Practical Ultrasonic.* Alpha Science International Ltd. Oxford. UK.



Development of an Ultrasonic System and Evaluation of Effective Parameters in Ultrasonic Measurement of Agricultural Products

H. Zaki Dizaji, S. Minaei^{*}, T. Tavakkoli Hashtjin and M. Mokhtari

^{*} Corresponding Author: Associate Professor, Tarbiat Modares University, P. O. Box: 14115-336, Tehran, Iran. E-mail: sminaei@gmail.com

Ultrasonic testing (UT), a nondestructive testing (NDT) method, is under development for quality determination of agricultural products, although it has long been used in the food industry. Determination and measurement of product quality are important in modern agricultural research. Noninvasive/nondestructive quality determination is a novel aspect of the postharvest process in which parameters measured by NDT methods are correlated with product quality. Reviews show that the “through-transmission method” is better than other UT methods for examination of agricultural products. The main parameters of the through-transmission method are wave velocity and attenuation. In this research, a UT system was designed and developed to analyze a signal passing through a product. The system consisted of a set of fabricated pulser/receiver units with ultrasonic transducers, control software and a data acquisition system. The system semi-automatically determined the two important ultrasonic parameters of wave velocity and attenuation coefficient by signal processing. The effect of couplant type, contact force, enveloping, delay line, and sample thickness were investigated using the signal. Several types of fruits and vegetables having differing tissue types (apple, potato, nectarine, banana, carrot, cucumber and quince) were selected for testing. The thicknesses of the samples were 5cm to 12cm. Results demonstrated that using couplant, enveloping signal, low contact force (5N) and suitable sample thickness, the ultrasonic measurement system could measure ultrasonic parameters effectively at a suitable response speed. The ultrasonic wave was transmitted through most of these products using a pulse signal with 40kHz excited frequency at low power. The precision of the time-of-flight measurement increased with enveloping of the transmitted signal.

Key Words: Attenuation, Nondestructive Testing, Pulse Wave, Qualimeter, Wave Velocity