



مروری بر چند کاربرد تکنولوژی آلتراسونیک در کشاورزی و صنایع غذایی

سجاد قاسمی پور دریاکناری^۱، محمودرضا گلزاریان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد

*آدرس پست الکترونیکی مکاتبه کننده: m.golzarian@um.ac.ir

چکیده

در سالهای اخیر، تأثیرات فیزیکی و شیمیایی امواج فراصوت در مواد واسط مایع و جامد به مقدار وسیعی در کاربردهای صنایع غذایی و کیفیت سنجی محصولات کشاورزی مشاهده شده است. 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. اعمال فرآیندهای فیزیکی که به وسیله امواج فراصوت تولید می‌شوند، هم با کاویتاسیون و هم بدون آن برای کاربردهای خاص فرایند تولید مواد غذایی مثل امولسیون‌سازی، فیلتراسیون، ترد کردن گوشت و اصلاح کیفیت مواد غذایی بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. در حالی که برخی موارد مانند امولسیون‌سازی و فیلتراسیون از نظر کاربرد در فرآیندهای صنعتی به خوبی رشد کرده‌اند، اما موارد دیگر مانند اصلاح کیفیت هنوز در مراحل اولیه پیشرفت خود باقی مانده‌اند. تحقیقات متنوع به عمل آمده در این زمینه حاکی از این است که این فرایند در صنایع غذایی و کیفیت سنجی محصولات کشاورزی، یک تکنولوژی نهفته و در عین حال مناسب جهت رشد و ترقی در صنایع مذکور می‌باشد که در آینده ای نزدیک بیش از پیش مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: امواج فراصوت، کاویتاسیون، کیفیت سنجی، پس از برداشت

مقدمه

امواج فراصوت (Ultrasonic)، امواج صوتی فراتر از محدوده فرکانس شنوایی انسان می‌باشد (عموما فراتر از ۲۰kHz). وقتی که امواج فراصوت به یک مایع واسط فرستاده می‌شود، برهمکنش بین این امواج، مایع مورد آزمایش و گازهای حل شده موجود، باعث به وجود آمدن پدیده‌ای می‌گردد که آن را کاویتاسیون صوتی (AC) می‌نامند [Chandrapala et al., ۲۰۱۲]. اما بطور خلاصه، هسته مرکزی گازهای حل شده تحت اثر میدان صوتی، به دلیل فشار موج اطرافشان، نوسان میکنند. در طی نوسانات، گازهای حل شده و بخار حلال، داخل و خارج حباب‌های در حال نوسان منتشر می‌شوند. در طی انتشار، مقدار گاز یا بخاری که در طی فرایند انبساط به درون حباب‌ها نفوذ می‌کنند، بیشتر از مقداری است که در طی فرایند یا فاز فشرده شدن نوسان حباب‌ها، از آنها خارج می‌شوند. این باعث می‌شود که رشد حباب‌ها افزایش یابد [Chandrapala et al., ۲۰۱۲]. رشد حباب‌ها تا رسیدن به مقدار نهایی ادامه می‌یابد و این همراه با یک سیکل صوتی و فروریختگی شدید آن‌ها می‌باشد که دمای بسیار زیادی را تولید می‌کند. دماهایی که در آزمایشات اندازه‌گیری شده است، در حدود ۱۰۰۰k تا ۲۰۰۰k می‌باشد، درحالی که مقدار پیش‌بینی‌های دمایی تا ۱۰۰۰۰k را تخمین می‌زنند. رادیکال‌های واکنشی بالایی نیز به همراه حباب‌های کاویتاسیون ایجاد میشود. علاوه براین برای ایجاد فعل و انفعالات شیمیایی، حباب‌های صوتی



موجب نیروهای فیزیکی شدیدی نیز می‌شوند [Chandrapala et al., ۲۰۱۲]. این امواج در فرکانس‌های بالا و توان پایین به عنوان یک ابزار تحلیلی و تشخیصی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در توان‌های بسیار بالا می‌توان آن را در فرآیندهای مختلف جهت ایجاد تغییرات گوناگون به کار گرفت. در این مقاله، به مرور کاربردهای تکنولوژی فراصوت در چند فرآیند قبل و پس از برداشت در کشاورزی و صنایع غذایی می‌پردازیم.

کاربردها

۱- صنایع غذایی

۱-۱- امولسیون‌سازی

امولسیون‌سازی فراصوت یکی از کاربردهایی است که به خوبی در فرآیندهای غذایی گسترش یافته است. امولسیون‌سازی فرآیندی است شامل دو مایع مخلوط نشدنی (معمولاً آب و روغن)، که یکی از آنها به عنوان قطرات ریز در دیگری پراکنده می‌شود. بسته به اندازه قطرات فاز پراکنده شده، ذرات در ابعاد میکرو (۱۰۰-۱۰ nm)، نانو (۱۰۰-۱۰۰۰ nm) و ماکرو (۱۰۰-۱۰۰۰ μm) تقسیم بندی می‌شوند. در هنگام استفاده از امواج فراصوت برای کاربردهای امولسیون‌سازی، فرکانسی مناسب باید فراهم گردد. بدیهی است که طبق دستاوردها و دانسته‌ها، نیروهای برشی تولید شده در فرکانس‌های پایین (۲۰ kHz) بسیار قوی می‌باشند و این به دلیل شدت ماهیت فروپاشی حباب‌هاست [Chandrapala et al., ۲۰۱۲]. انتشار امواج فراصوت در یک سیستم متشکل از روغن (۱۰٪ روغن آفتابگردان) و آب، یک امولسیون‌سازی بهینه در فرکانس ۲۰ kHz را نتیجه می‌دهد. نیروهای برشی در فرکانس‌های ضعیف‌تر تولید می‌شوند و بنابراین برای کاربردهای امولسیون‌سازی مفید نمی‌باشند. فقط امواج فراصوت با فرکانس‌های پایین و نیروی زیاد (۱۰-۱۶ kHz)، قادر به تولید ذرات جهت امولسیون‌سازی می‌باشند. در مجموع انرژی لازم جهت تولید یک امولسیون به وسیله امواج فراصوت کمتر از انرژی مورد نیاز در روش‌های معمول است. امولسیون‌های تولید شده به روش فراصوت پایدارتر نیز می‌باشند. همچنین به سرفکتانت کمتری نیاز دارند (البته اگر نیاز داشته باشند)، اندازه‌های کوچکتر از ابعاد میکرو دارند و دارای توزیع بسیار مناسبی می‌باشند [Chandrapala et al., ۲۰۱۲].

۱-۲- فیلتراسیون (پاکسازی)

فناوری غشائی به صورت رایج یک «فناوری ثابت» در صنعت لبنیات و مواد غذایی برای خالص‌سازی آب و برای بهبود عملکرد جریان‌های به خارج رنده مایع است [Maskooki et al., ۲۰۱۰]. این فرآیند روشی مؤثر و روان جهت جداسازی می‌باشد [Lamminen et al., ۲۰۰۴]. یکی از موضوعات مهم در اجرای فرآیند فیلتراسیون، کاهش شدت جریان آب نفوذی به عنوان یک دستاورد هم در غطبش غلظتی و هم در ایجاد رسوب بر غشاء‌هاست است. رسوب غشائی در نتیجه افزایش چسبندگی و گرانروی حاصل از بستن روزه‌ها و شکل‌گیری کیک مانند می‌باشد [Muthukumaran et al., ۲۰۰۷; Maskooki et al., ۲۰۱۰]. چندین روش مختلف شیمیایی (استفاده از اسید، ماده قلیایی، آنزیم هیپوکلرات) و فیزیکی (استفاده از فشار آب) جهت جداسازی غشاء‌های رسوب کرده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها که اغلب با استفاده از واکنشگرهای شیمیایی از روش‌های پاکسازی شدیدی استفاده می‌کنند و به زمان زیادی نیاز دارند، باعث تخریب غشاء‌ها می‌شوند، آلودگی ثانویه‌ای را ایجاد می‌نمایند و خطرناک می‌باشند و/یا گران هستند [Maskooki et al., ۲۰۱۰]. اما استفاده از امواج فراصوت به عنوان روشی مؤثر جهت افزایش جریان در فرآیند تصفیه فراصوت یا میکروفیلتراسیون و برای بهبود پاکسازی رسوبات غشائی به اثبات رسیده است [Chandrapala et al., ۲۰۱۲]. و این تأثیر به سبب نیروهای فیزیکی حاصل از



امواج فراصوت می‌باشد. کایتاسیون صوتی نیز باعث آشفته‌گی فیزیکی، ایجاد جریان‌هایی با ابعاد میکرون و تولید نیروهای برشی می‌گردد. به سبب این نیروهای فیزیکی که ممکن است در سطح غشاءهای رسوبی، بر روی ماده جامد و در مجاورت منافذ اتفاق افتد، دفع ذراتی که منافذ را مسدود می‌کنند، میسر می‌گردد. در مجموع بکارگیری این روش بهینه برای پاکسازی غشاءها تأثیرات مثبت و مهمی در فرآیند خواهد داشت که شامل کاهش اتلاف زمان تولید، استفاده بهینه از مواد شیمیایی، افزایش طول عمر غشاءها و افزایش جریان و کنترل کیفیت می‌باشد [Muthukumaran *et al.*, ۲۰۰۷].

۳-۱- اصلاح گرانروی

کنترل گرانروی سیستم‌های غذایی به وسیله امواج فراصوت یکی از امید بخش‌ترین فرآیندهایی است که انجام می‌شود. دلایل شایستگی فراصوت عبارتند از: (۱) عدم نیاز به هر گونه ماده شیمیایی و افزودنی در طول فرآیند، (۲) فرآیند می‌تواند سریع و ساده باشد که در نتیجه باعث صرفه اقتصادی می‌گردد، (۳) و در این فرآیند تغییرات زیادی در ساختار شیمیایی مواد به وجود نمی‌آید. فرآیند اعمال امواج فراصوت برای اجراء در بسیاری از انواع نشاسته (ذرت، سیب‌زمینی، نشاسته کاسوامینوک و سیب‌زمینی شیرین) و پلی‌ساکاریدها تأیید شده است [Chandrapala *et al.*, ۲۰۱۲].

۳-۱-۴ لبنیات

استفاده از امواج فراصوت نیز بصورت فزاینده‌ای در گستره‌ای از فرآورده‌های لبنی، گسترش یافته است و دلایل آن عبارتند از، افزایش تأثیرات مثبت بر نگهداری غذا و تعدیل فعالیت آنزیم‌ها و قابلیت بهبود ساختار میکروسکوپی مواد در فعل و انفعالات ترکیب. تأثیرات فیزیکی امواج فراصوت در کاربردهایی مثل افزایش فیلتراسون امواج فراصوت آب پنیر، کاهش گرانروی محصول، هموژنیزه کردن گلبول‌های چربی شیر، تبلور یخ و لاکتوز، تولید ماست با خواص رئولوژیکال بسیار خوب، کاهش زمان کل تخمیر ماست و برش قالب‌های پنیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [Chandrapala *et al.*, ۲۰۱۲].

۳-۱-۵ ترد کردن گوشت

نرمی به عنوان یکی از مهم‌ترین کیفیت‌های گوشت پخته شده در نظر گرفته می‌شود و بیشترین اثر را در ادراک مصرف کننده دارد. نرمی گوشت به وسیله دو جزء اصلی از ماهیچه اسکلتی تعیین می‌شود: بافت پیوندی که قسمت زیادی از آن قسمت مایوفیبریل‌ها می‌باشد و بخش بافت همبند که سختی پس‌زمینه را تعیین می‌کند. اهمیت نرمی در تعیین مقبولیت گوشت و نیاز به فرآیندهایی که بهبودهای سریع و پایدار را نتیجه می‌دهند، باعث می‌شود که فرآیندهای مختلفی مورد ارزیابی قرار گیرند. یکی از گزینه‌ها استفاده از امواج فراصوت است که باعث شکستن فیزیکی مواد از طریق مکانیزم‌های وابسته به کایتاسیون مثل برش بالا، فشار، دما و تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود [Chandrapala *et al.*, ۲۰۱۲].

۲- کشاورزی

با وجود استفاده گسترده و موفقیت‌های بدست آمده در استفاده از امواج فراصوت در بسیاری از زمینه‌ها، استفاده چندانی از این تکنیک جهت تست محصولات غذایی تازه نشده است. چندین سال بکارگیری امواج فراصوت جهت اندازه‌گیری‌های مربوط به بسیاری از میوه‌ها و سبزیجات به دلیل تفاوت بسیاری که در خواص صوتی‌انها نسبت به مواد بیولوژیکی یا صنعتی وجود دارد، بسیار کم بوده است [Povey and Mason, ۱۹۹۸]. میرایی اولیه موج



فرستاده شده که از مهم ترین فاکتورها در کاربرد این تکنولوژی محسوب می شود، در بسیاری از میوه ها و سبزیجات ناشی از خلل و فرج موجود در آن ها است. در نتیجه، تفسیر داده های فراصوت مربوط به آنها بسیار پیچیده می شود [Povey and Mason, ۱۹۹۸]. توسعه سریع سنسورها، ریزپردازنده ها و روش های مختلف تجزیه و تحلیل سیگنال، فرصت های جدیدی را برای استفاده از این تست ساده و غیر مخرب به وجود آورده است. با این وجود، تجهیزات صنعتی موجود هنوز هم نیازمند اصلاحات جهت کاربرد در بافت های میوه می باشند. محاسبه فرکانس و توان مناسب جهت انتشار امواج فراصوت در محصولات کشاورزی و همچنین انتخاب تجهیزات و روش های اندازه گیری مناسب ضروری می باشد. سیستم های اندازه گیری فراصوت در نمونه بافت یا کل میوه باید مورد آزمایش و بررسی قرار گیرند [Mizrach et al., ۱۹۸۹].

۲-۱ پارامترهای مربوط به کیفیت محصولات که با امواج فراصوت مورد ارزیابی قرار می گیرند

روش التراسونیک جهت استفاده در مواد غذایی زمینه وسیعی از کاربردهای مختلف را با ارائه اطلاعات جامعی درباره خواص مواد تحت آزمایش، تشکیل می دهند [Povey and Mason, ۱۹۹۸]. برای بافت میوه ها و سبزیجات تغییرات این خواص، بخشی از فرآیندهای طبیعی که در طول دوره رشد و رسیدگی، و در زمان برداشت، انبارداری و عمر قفسه ای رخ می دهد را تشکیل می دهند. تغییرات فیزیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی مختلفی در طول این فرآیند رخ داده می دهد، و هر تغییر در دوره های قبل، هنگام و پس از برداشت، به طور خاص به وسیله یک یا چند فاکتور تعیین می شود. تغییرات به شیوه های مختلف در دوره های متفاوت تشریح می شوند، و عمدتاً مربوط به کیفیت محصول نهایی هستند. ویژگی های بافتی جزء فاکتورهای اصلی ارزیابی کیفیت می باشند [Peacock et al., ۱۹۸۶]، و به طور منظم برای تعیین مرحله رسیدن انواع میوه ها و سبزیجات مورد استفاده قرار می گیرند [Abbott et al., ۱۹۹۹]. مهم ترین مشخصه های مربوط به کیفیت محصولات، به دو دسته پارامترهای مکانیکی و پارامترهای فیزیکوشیمیایی تقسیم می شوند. مهم ترین مشخصه مکانیکی میوه ها و سبزیجات که با امواج فراصوت مورد ارزیابی قرار می گیرد، سفتی است. این پارامتر، بیانگر تغییرات بافت محصول در طی دوره های رشد، رسیدن، انبارداری و عمر قفسه ای می باشد. همچنین مهم ترین مشخصه های کیفی فیزیکوشیمیایی که به وسیله امواج فراصوت اندازه گیری می شوند عبارتند از وزن خالص (DW)، محتوی روغن، مقدار ماده جامد انحلال پذیر (TSS) و اسیدیته [Mizrach et al., ۲۰۰۰]. امواج فراصوت روشی مناسب جهت اندازه گیری پارامترهای مذکور می باشد.

۲-۲- حالات مختلف بررسی و اندازه گیری مشخصه های مربوط به میوه ها

مشخصه های فراصوتی میوه ها و سبزیجات در قسمت هایی از بافت و همچنین در کل قسمت های آنها مورد اندازه گیری و بررسی قرار گرفته است. قسمت های بافتی در محفظه های استوانه ای و ... به منظور دستیابی به مشخصه های صوتی در ارتباط با پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند سفتی، محتوی روغن و درصد وزن خالص (WD%) مورد ارزیابی قرار گرفته اند. همچنین نیمی از میوه برای مطالعه مسیر امواج فراصوت به همراه بافت های میوه و برای ایجاد مدل هادی و میوه کامل جهت ارزیابی های غیر مخرب مشخصه های فیزیکوشیمیایی، تعیین زمان انبارداری و عمر قفسه ای تحت آزمایش قرار گرفت. اندازه گیری مشخصه های مربوط به میوه ها معمولاً به سه روش اندازه گیری نمونه های بافتی، اندازه گیری مشخصه های مربوط به نیمه برش خورده میوه و اندازه گیری های مربوط به تمام سطح میوه صورت می گیرد [Mizrach., ۲۰۰۷].



۲-۳- کاربردهای امواج فراصوت و نتایج بدست آمده در مراحل قبل و بعد از برداشت محصولات

کشاورزی

سیستم‌های فراصوت نام برده شده در این تحقیق، جهت اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی در میوه‌ها قبل و بعد از برداشت، ساخته یا اصلاح شده است. این سیستم‌ها اندازه‌گیری سریع و غیرمخرب را به منظور دستیابی به مقدار تغییرات فیزیوشیمیایی در میوه‌ها و سبزیجات در طول دوره رشد و انبارداری و عمر قفسه‌ای را میسر می‌سازد. در بیشتر نمونه‌ها، سیستم برای نمونه خاصی از میوه ساخته شده است و معمولاً در دو مرحله از مراحل رشد و انبارداری آن اندازه‌گیری‌ها صورت گرفته است. در طی دوره رشد، یک سیستم فراصوت ممکن است اطلاعات مهمی راجع به فرایند رسیدن محصول، به دست دهد و زمانی مناسب جهت برداشت محصول (وقتی که میوه به میزان مناسب رشد خود رسید) را تعیین نماید. همچنین ممکن است اطلاعاتی در مورد مشخصه‌های فیزیوشیمیایی وابسته به کیفیت محصول را در اختیار گذارد [Mizrach et al., ۱۹۹۹a]. در مدت انبارداری و عمر قفسه‌ای، سیستم‌های فراصوت می‌توانند تغییرات مشخصه‌های فیزیوشیمیایی بافت میوه و سبزی مانند سفتی، نرمی، خاصیت اردی و سایر فاکتورهای کیفی گوشت میوه را حس نماید و بدان وسیله زمان مناسب توزیع در بازار آنها را تعیین نمایند [Mizrach et al., ۲۰۰۳; Gaete-Garreton et al., ۲۰۰۵]. سیستم‌های فراصوت همچنین جهت اندازه‌گیری تغییرات فیزیوشیمیایی میوه در طی انبارداری درازمدت [Mizrach et al., ۱۹۹۴] یا مدت-زمان عمر قفسه‌ای [Mizrach et al., ۲۰۰۰] مورد استفاده قرار می‌گیرند.

خلاصه

خواص امواج فراصوت به وسیله واسطه‌هایی که آن را انتشار می‌دهند، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در مایع واسطه نیروهای فیزیکی شدیدی به وسیله امواج فراصوت که شامل جریان‌های صوتی، کاویتاسیون، برش، میکروجت و تکان می‌باشد، تولید می‌شوند. این نیروهای فیزیکی در تولید امولسیون‌های مواد غذایی، ترد کردن فرآورده‌های گوشتی، فیلتراسیون مواد غذایی، در میان چندین کاربرد دیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعلاوه خواص عملکردی نشاسته، پروتئین‌ها و سایر مواد غذایی بوسیله تأثیرات فیزیکی و شیمیایی تولید شده توسط کاویتاسیون صوتی و سایر نیروهای امواج فراصوت، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. همچنین در این مرور به تکنولوژی امواج فراصوت اشاره شد و شرایط کاربرد آن در محصولات کشاورزی به منظور کیفیت سنجی به عنوان آزمونی غیر مخرب ذکر گردید. با وجود حجم بسیار زیاد کار در دسترس استفاده از امواج فراصوت در مواد غذایی و کیفیت سنجی محصولات کشاورزی، تنها تعدادی محدود از کاربردها برای پیشرفت قابل قبولی رسیده‌اند. با توسعه سفارشی کردن تجهیزات با مقیاس بزرگ برای کاربردهای صنایع غذایی و کشاورزی خاص، قابل پیش‌بینی است که تعداد زیادی از این کاربردها طی سال‌های آینده توسعه خواهند یافت.

منابع

- Abbott, J.A., (۱۹۹۹), Quality measurement of fruits and vegetables. Postharvest Biol. Technol, ۱۵, ۲۰۷-۲۲۵.
- Chandrapala, J., Oliver, C., Kentish, S., Ashokkumar, M., (۲۰۱۲), Ultrasonics in food processing. Ultrasonics Sonochemistry, ۱۹, ۹۷۵-۹۸۳
- Gaete-Garreton, L., Vargas-Hernandez, Y., Leon-Vidal, C., Pettorino-Besnier, A., (۲۰۰۵), A novel noninvasive ultrasonic method to assess avocado ripening. Journal of Food Science, ۷۰, E۱۸۷-E۱۹۱.



- Lamminen, M.O., Walker, H.W., Weavers, L.K., (۲۰۰۴), Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes, *Journal of Membrane Science*, ۲۳۷, ۲۱۳-۲۲۳.
- Maskooki, A., Kobayashi, T., Mortazavi, S.A., Maskooki, A., (۲۰۱۰), Effect of low frequencies and mixed wave of ultrasound and EDTA on flux recovery and cleaning of microfiltration membranes, *Separation and Purification Technology*, ۵۹, ۶۷-۷۳.
- Mizrach, A., Galili, N., Rosenhouse, G., (۱۹۸۹), Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Trans. ASAE* ۳۲, ۲۰۵۳-۲۰۵۸.
- Mizrach, A., Galili, N., Rosenhouse, G., (۱۹۹۴), A method and a system for non-destructive determination of quality parameters in fresh produce. *Israel Patent No.* ۱۰۹۴۰۶.
- Mizrach, A., Flitsanov, U., Akerman, M., Zauberman, G., (۲۰۰۰), Monitoring avocado softening in low-temperature storage using ultrasonic measurements. *Computer and Electronics in Agriculture*, ۲۶, ۱۹۹-۲۰۷.
- Mizrach, A., (۲۰۰۷), Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre- and postharvest processes, *Postharvest Biology and Technology*, ۴۸, ۳۱۵-۳۳۰.
- Muthukumar, S., Kentish, S., Stevens, G.W., Ashokkumar, M., Mawson, R., (۲۰۰۷), The application of ultrasound to dairy ultrafiltration: the influence of operation conditions, *Journal of Food Engineering*, ۸۱, ۳۶۴-۳۷۳.
- Povey, M.J.W., Mason, T.J., (۱۹۹۸), *Ultrasound in Food Processing*, Springer, Berlin.
- Peacock, B.C., Murray, C., Kosiyachinda, S., Kosittrakul, M., Tansiriyakul, S., (۱۹۸۶), Influence of harvest maturity of mangoes on storage potential and ripe fruit quality. *ASEAN Food Journal*, ۹۹.