مقاله مروری

کاربردهای فراصوت در صنایع غذایی با تأکید بر مواد بسته‌بندی

بهجت تاج‌الدین
دانشیار
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی -کرج
behjat.tajeddin@yahoo.com
b.tajeddin@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

چکیده

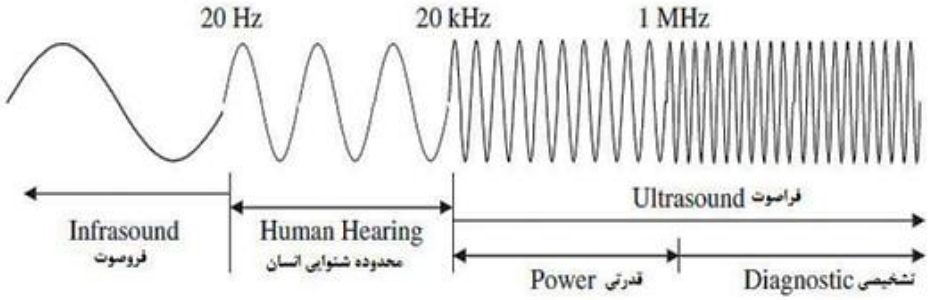
در حال حاضر، استفاده از امواج فراصوت در صنایع غذایی بسیار اهمیت پیدا کرده و کاربرد فراوان آن به‌عنوان یک فرایند غیرحرارتی در غذاهای حساس به حرارت، به دلیل حفظ ویژگی‌های حسی، تغذیه‌ای و عملکردی در کنار افزایش ماندگاری و ایجاد ایمنی در برابر فعالیت‌های میکربی، سبب توجه روزافزون به این فناوری شده است. کاربرد این امواج در فرایندهایی چون امولسیون‌سازی[۱]، توزیع و پراکندگی[۲]، حل شدن[۳]، و پایدارسازی[۴] امکان‌پذیر شده و تسریع یافته است. همان فرایندهایی که در تهیه و ساخت انواع فیلم‌ها و پوشش‌ها برای استفاده در صنایع بسته‌بندی، نقش پر رنگی دارند. به‌عبارت دیگر، یکی از مهم‌ترین کاربردهای امواج فراصوت، استفاده از آن در ساخت و طراحی انواع مواد بسته‌بندی از جمله مواد بسته‌بندی طبیعی یا زیست‌تخریب‌پذیر، و مواد بسته‌بندی نانویی است. چرا که توزیع و یکنواختی ذرات در شبکه پلیمری از اهمیت زیادی برخوردار است و در واقع تمام خصوصیات مورد انتظار از یک فیلم بسته‌بندی، در گرو این یکنواختی و توزیع یکسان است. استفاده از امواج فراصوت، به یکنواختی و همسانی بافت فیلم کمک می‌کند. همچنین، از آنجایی‌که امروزه از امواج فراصوت به‌عنوان کمک فرایند در کنار سایر فرایندها برای کف‌زدایی، آلودگی‌زدایی، استخراج، اکستروژن، استخراج، تصفیه فاضلاب، و غیره استفاده می‌شود؛ این مقاله به کاربرد امواج فراصوت در صنایع غذایی به‌ویژه تولید فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی می‌پردازد. علاوه‌براین، به اهمیت ویژگی‌های فیزیکی دستگاه فراصوت مورد استفاده در مطالعات علمی نیز در این مقاله اشاره می‌شود.

واژگان کلیدی: امواج فراصوت، بسته‌بندی، صنایع غذایی.

۱. مقدمه

امروزه، فرایندهایی که معمولا برای فراوری غذا کاربرد دارد، سبب ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی، و کاهش مواد مغذی ماده غذایی می‌شود. ازاین‌رو، به‌منظور حفظ ارزش غذایی محصول، روش‌های غیرحرارتی به‌کار گرفته شده است که یکی از این روش‌ها، استفاده از امواج فراصوت است. امواج فراصوت با به حداقل رساندن زمان فرایند، سبب افزایش کیفیت محصول می‌شود [۱]. امواج فراصوت یا اولتراسوند، امواج مکانیکی با

فرکانسی بالاتر از آستانه شنوایی انسان است و در محدوده بسامد یا فرکانس ۲۰ کیلوهرتز تا ده مگاهرتز قرار دارند [۲]. این امواج مطابق شکل ۱، به سه ناحیه اصلی فراصوت فرکانس پایین (۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز)، فرکانس متوسط (۱۰۰ کیلوهرتز تا یک مگاهرتز)، و فرکانس بالا (یک تا ده مگاهرتز) طبقه‌بندی می‌شوند [۳].



شکل ۱. طیف امواج فراصوت [۳]

از امواج فراصوت با فرکانس بالا بیشتر به‌عنوان یک روش تحلیلی برای به‌دست آوردن اطلاعاتی چون خواص فیزیک و شیمیایی محصول، میزان اسیدیته، سفتی بافت، میزان قند و غیره استفاده می‌شود. درحالی‌که امواج فراصوت با فرکانس پایین بیشتر در تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی مواد غذایی کاربرد دارد [۲].

استفاده از امواج فراصوت در مایعات سبب ایجاد کاویتاسیون آکوستیک می‌شود که پدیده تولید، رشد و فروپاشی حباب‌ها است. با انتشار امواج فراصوت، نوسانات حباب‌ها و فروپاشی آنها سبب ایجاد اثرات حرارت، مکانیکی و شیمیایی می‌شود. اثرات مکانیکی شامل فروپاشی، تلاطم و تنش برشی است. درحالی‌که اثرات شیمیایی شامل تولید رادیکال‌های آزاد است [۴].

۲. ویژگی‌های امواج فراصوت و کاربردهای آن

در مطالعات علمی با استفاده از امواج فراصوت، علاوه‌بر گزارش بسامد یا فرکانس دستگاه، توان دستگاه نیز مهم است. توان بر حسب وات، میزان انرژی منتقل‌شده از طریق موج است که تابعی از دامنه موج و فرکانس آن است. همچنین، علاوه‌بر میزان توان، مدت زمان اعمال توان نیز اهمیت دارد که توضیحات بیشتر در قسمت‌های بعدی بیان خواهد شد [۵].

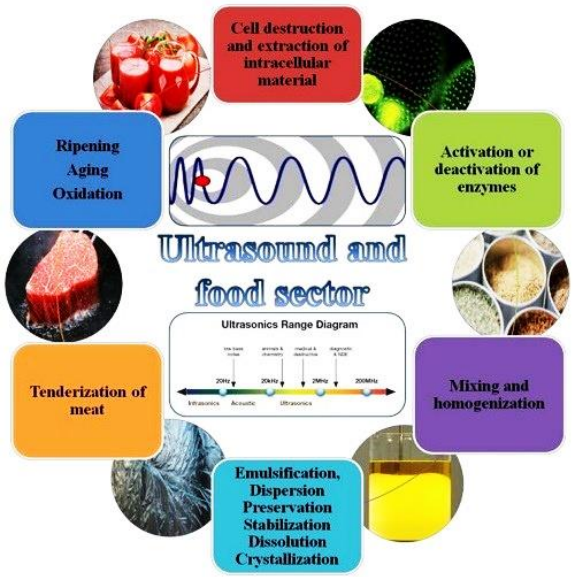
امواج فراصوت به سه روش مختلف استفاده مستقیم روی محصول، اتصال به دستگاه، و غوطه‌ور شدن در دستگاه اولتراسونیک در صنایع غذایی کاربرد دارد [۶].

به‌طور معمول، یک دستگاه اندازه‌گیری اولتراسوند شامل قطعه اندازه‌گیری سلولی[۵]، مولد موج الکتریکی، مبدل و اسیلوسکوپ است. مرسوم‌ترین روش مورد استفاده، روش پالس- اکو[۶] نام دارد. در این روش، مولد موج الکتریکی یک پالس الکتریکی با فرکانس و دامنه مشخص تولید و سپس مبدل، پالس الکتریکی را به پالس اولتراسونیک تبدیل می‌کند. پالس از نمونه عبور و پس از برخورد با دیواره داخلی قطعه منعکس شده و به مبدل، جاییکه در آن تشخیص داده می‌شود باز می‌گردد. روش موج پایدار[۷] و روش پیچ و تاب[۸]، از دیگر روش‌ها هستند [۸،۷].

از امواج فراصوت برای امولسیون‌کنندگی، کف‌زدایی، آلودگی‌زدایی، استخراج، اکستروژن، نرم کردن گوشت[۹]، و تصفیه فاضلاب در صنعت استفاده می‌شود. همچنین، امواج فراصوت در فرکانس‌های پایین در فرایندهای پیش تصفیه، گاززدایی، تبلور، استخراج و آماده‌سازی نمونه هضم بسیار کاربرد دارد [۹]. در زیر، به برخی از مهم‌ترین کاربردهای امواج فراصوت در صنایع غذایی اشاره می‌شود.

۳. کاربردهای فراصوت در صنایع غذایی

شکل ۲ که از جستجوی اینترنتی انتخاب شده است [۱۰]، به خوبی، مهم‌ترین کاربردهای فراصوت را در صنایع غذایی نشان می‌دهد.



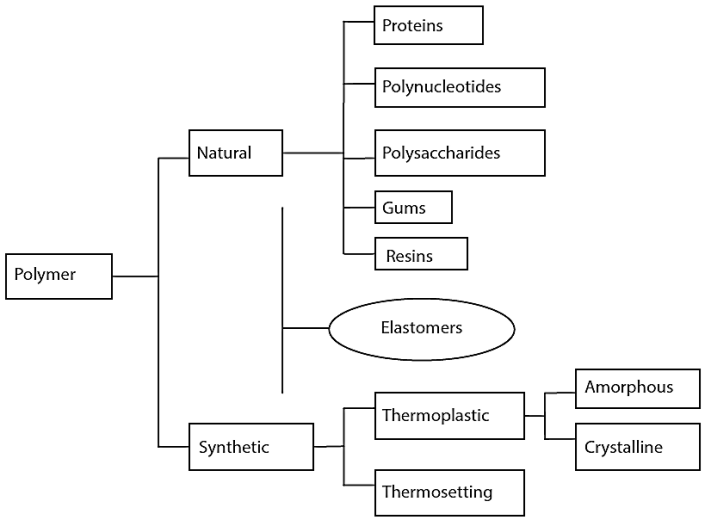
شکل ۲. فراصوت و صنایع غذایی [۱۰]

علاوه‌بر استفاده‌های متعدد فراصوت در صنایع غذایی، کاربردهایی چون امولسیون‌سازی، توزیع و پراکندگی، حل‌شدگی، و پایدارسازی در شکل ۲ نشان داده شده است. این چهار فرایند که به‌کمک امواج فراصوت امکان‌پذیر شده و تسریع می‌یابد از جمله روش‌هایی هستند که نقش پر رنگی در تهیه و ساخت انواع فیلم‌ها و پوشش‌ها برای استفاده در صنایع بسته‌بندی دارند. ازاین‌رو، به دلیل اهمیت این موضوع، ابتدا به نقش امواج فراصوت در تهیه مواد بسته‌بندی اشاره می‌شود.

۳-۱. استفاده از امواج فراصوت در تهیه فیلم‌های بسته‌بندی مواد غذایی

دسترسی به انواع مواد پلیمری از جمله فیلم‌های بسته‌بندی با دامنه وسیعی از خصوصیات فیزیکی و وسایل بسته‌بندی قابل تغییر، توانسته است توجه فروشگاه‌های کوچک، خرده‌فروشی یا عمده‌فروشی را به خود جلب کند. یکی از موضوع‌های مهم در بحث بسته‌بندی، ساخت و طراحی انواع مواد بسته‌بندی از جمله مواد بسته‌بندی طبیعی یا زیست تخریب‌پذیر، و مواد بسته‌بندی نانویی است. استفاده از امواج فراصوت، به یکنواختی و همسانی بافت در هر دو نوع این فیلم‌ها کمک می‌کند که در زیر به آن اشاره می‌شود.

به‌طورکلی، مواد زیستی[۱۰] که بیشتر مواد غذایی از آن مشتق می‌شوند در صورت وجود فرصت کافی، به‌ویژه هنگامی‌که در شرایط نامطلوب نگهداری قرار گیرند، فاسد می‌شوند. فساد در اصل، ناشی از تخریب میکربی یا واکنش‌های شیمیایی است که موجب تغییراتی در محصول می‌شود و ممکن است کیفیت آن را کاهش داده و خطر بالقوه‌ای برای سلامتی باشد و سرانجام به زیان اقتصادی قابل توجهی منتهی شود. بسته‌بندی، یکی از روش‌های قدیمی و مرسوم برای نگهداری این مواد زیستی یا در واقع، محصول‌های کشاورزی است. مهم‌ترین هدف بسته‌بندی، سالم رساندن ماده تولیدی از محل تولید تا محل مصرف با درنظر گرفتن شرایط مصرف‌کننده است [۱۱]. موادی که برای بسته‌بندی استفاده می‌شوند از جنس‌ها و شکل‌های متنوعی تشکیل شده‌اند. یکی از مواد پر مصرف در بسته‌بندی مواد غذایی، پلیمرها هستند. پلیمرها در دو شکل طبیعی، و سنتزی (مصنوعی) که از مشتقات مواد نفتی هستند، به‌کار می‌روند که در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. طبقه‌بندی پلیمرها [۱۲]

امروزه توسعه و پیشرفت بسته‌بندی مواد غذایی با فیلم‌ها و پوشش‌های طبیعی و خوراکی روز به روز در حال افزایش است. فیلم‌ها یا پوشش‌های خوراکی از لایه‌ای نازک و هموار که بیشتر از جنس پلیمرهای طبیعی مانند پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و چربی‌ها هستند، ساخته می‌شوند و روی مواد غذایی قرار می‌گیرند [۱۳].

پوشش‌دهی محصولات غذایی با فیلم‌ها و پوشش‌های طبیعی مزایای فراوانی چون زیست تخریب‌پذیری، ممانعت از فساد و آلودگی میکربی، به تعویق انداختن پلاسیدگی در میوه‌ها و سبزی‌ها طی انبارداری، حفظ مطلوب ظاهر محصول، جلوگیری از تبادل رطوبت، حفظ رایحه محصول، جلوگیری از قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی، ممانعت از چکیدن یا تراوش[11] در گوشت، حامل مواد افزودنی مانند ترکیبات ضدمیکربی، ضداکسایش، طعم‌دهنده‌ها و رنگ‌ها، و جلوگیری از سبز شدن پوست سیب‌زمینی در برابر نور دارد [۱۴]. بنابراین، فیلم‌های پلیمری طبیعی جایگزین مناسبی برای فیلم‌های پلیمری سنتزی هستند اما در مقایسه با آنها از ویژگی‌های مکانیکی ضعیفی برخوردارند. یکی از راهکارهای مناسب برای بهبود ویژگی‌های فیلم‌ها و محلول‌های تشکیل‌دهنده آنها، استفاده از امواج فراصوت است.

یکی از پلیمرهای طبیعی از دسته پلی ساکاریدها موجود در شکل ۳، سلولز است که جزء اصلی دیواره سلولی گیاهان بوده و به دلیل ویژگی‌های مکانیکی منحصر به‌فرد و تجدیدپذیر بودن در بسیاری از صنایع از جمله داروسازی، پارچه‌بافی، کاغذ و صنایع غذایی کاربرد دارد. این پلی‌ساکارید، وزن مولکولی بالایی داشته و در آب نامحلول است و درنتیجه استفاده از آن محدودیت دارد. اما، می‌توان با به‌کارگیری تیمارهای مختلف از جمله امواج فراصوت، زنجیره سلولز را شکسته و با کوتاه کردن واحدهای پلیمری، وزن مولکولی آن را کاهش داد. سلولز اصلاح شده را می‌توان برای تهیه فیلم‌های بسته‌بندی استفاده کرد [۱۲].

بنابراین، امواج فراصوت دارای خواص اصلاح‌کنندگی طی فرایند تولید فیلم‌ها هستند. برای مثال، در پژوهشی توسط احمدی و همکاران (۱۳۸۹)، فیلم‌های خوراکی متیل‌سلولزی تهیه و تأثیر امواج فراصوت بر میزان نفوذپذیری نسبت به بخار آب، مقاومت کششی و میزان کشش در نقطه شکست در این فیلم‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که تیمار فراصوت تا حد زیادی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فیلم‌های متیل‌سلولزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۵].

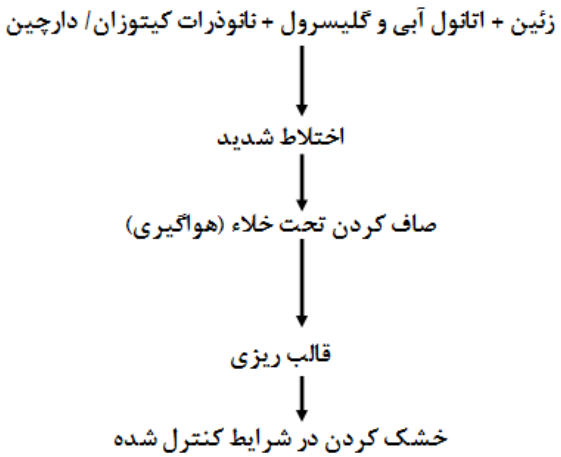
در پژوهش دیگری، از امواج فراصوت برای بهبود خواص فیلم خوراکی تولید شده از کفیران، پلی‌ساکاریدی که توسط میکروارگانیسم‌های دانه کفیران تولید می‌شود، استفاده شد. نتایج نشان داد امواج فراصوت سبب ایجاد فیلم‌هایی مقاوم نسبت به رطوبت و نفوذپذیری بخار آب می‌شود [۱۶].

یکی از موضوع‌های مهم در ساخت و طراحی انواع مواد بسته‌بندی نانویی، توزیع و یکنواختی ذرات در شبکه پلیمری است و در واقع تمام خصوصیات و انتظاراتی که از یک فیلم بسته‌بندی وجود دارد بستگی به یکنواختی و توزیع یکسان ذرات دارد. استفاده از امواج فراصوت، به یکنواختی و همسانی بافت فیلم کمک می‌کند. برای مثال، برزگر و همکاران (۱۳۹۴) به‌منظور ارزیابی و بهینه‌سازی یک نوع فیلم نانوکامپوزیتی، از مخلوط نشاسته، مونت‌موریلونیت[۱۲] (ذرات نانورس) با نرم‌کننده گلیسرول استفاده کرده و پس از اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها، فیلم بهینه را انتخاب کردند. سپس، تأثیر امواج فراصوت بر خصوصیات فیلم بهینه را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که که اعمال امواج فراصوت به مدت ۳۰ دقیقه، سبب بهبود قابل توجهی در خصوصیات مکانیکی و نفوذپذیری فیلم می‌شود [۱۷].

در پژوهش دیگری، برای تهیه فیلم‌های نانوکامپوزیت کربوکسی‌متیل‌سلولز و پلی‌وینیل الکل، ذرات نانورس پس از توزین، با غلظت‌های ۰/۵ ، ۱ و ۳ درصد وزنی- وزنی (براساس وزن کربوکسی‌متیل سلولز) به محلول اضافه شد و به‌مدت ۱۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت قرار گرفتند. این امواج، از خواص اصلاح‌کنندگی فیلم‌ها برخوردار هستند و موجب حل شدن کامل ذرات نانورس در محلول می‌شوند. این محلول روی ظرف مسطحی ریخته شده و در دمای محیط به‌مدت ۱۸ ساعت خشک شد. فیلم‌های خشک در شکل ۴، نشان داده شده‌اند [۱۸].

شکل۴. فیلم‌های نانوکامپوزیت کربوکسی‌متیل سلولز/ پلی‌وینیل الکل/ رس [۱۸]

واحدی‌کیا و همکاران نیز، با استفاده از روش قالب‌گیری (کستینگ[۱۳])، فیلم نانویی براساس زئین[۱۴] که یک نوع پلیمر پروتئینی طبیعی در شکل ۳ است، تهیه کردند. برای این کار ابتدا محلول ۱۷/۵ درصد وزنی- وزنی زئین در اتانول ۸۰٪ تهیه و به مدت یک ساعت در دمای ۷۵ درجه سلسیوس با سرعت ۴۰۰ دور در دقیقه حرارت داده شد. در ادامه، ۸/۷۷ درصد وزنی گلیسرول اضافه و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۳۷ درجه سلسیوس کاملا همگن شدند. با عمل قالب‌گیری، فیلم مورد نظر به‌دست آمد. برای استفاده از این فیلم به‌منظور کاربرد آن در بسته‌بندی فعال[۱۵]، فیلم زئین مطابق روش فوق آماده شد، و پس از افزودن گلیسرول و هم‌زدن به مدت ۸ دقیقه، اسانس دارچین در سطح ۲ درصد (نسبت به وزن پلیمر) اضافه شده و با هموژنایزر به مدت ۷ دقیقه برای پخش یکنواخت در محلول، عمل هم‌زدن صورت گرفت. برای ساخت نمونه‌های چندسازهٔ زیستی زئین- نانوکیتوزان[۱۶] نیز، سوسپانسیون[۱۷] نانوکیتوزان ۳۰ دقیقه توسط همزن فراصوت هم‌زده شد و هر ۱۰ دقیقه آب دستگاه به‌منظور جلوگیری از افزایش دمای سوسپانسیون تعویض شد. سپس این سوسپانسیون با غلظت ۴ درصد وزنی به محلول قبلی اضافه گردید. پس از قالب‌گیری و خشک شدن، فیلم نانوزیست کامپوزیتی فعال تهیه شد [۱۹]. شکل ۵، روش ساخت نانوچند سازه بر مبنای زئین را به اختصار نشان می‌دهد.



شکل ۵. روش ساخت نانو چندسازه زیستی فعال زئین [۱۹]

۳-۲. استفاده از امواج فراصوت در اندازه‌گیری ضخامت

یکی از کاربردهای امواج فراصوت، اندازه‌گیری ترکیب و ضخامت بافت چربی در حیوانات زنده و لاشه است. به‌طور معمول از روش تصویرنگاری با اشعه ایکس استفاده می‌شود، این روش بسیار گران، دشوار و پر زحمت است درصورتی‌که اندازه‌گیری با روش فراصوت بسیار سریع‌تر و دقیق‌تر از روش‌های دیگر است. اساس انجام این روش بر مبنای اختلاف سرعت عبور پالس فراصوت در بافت چربی و گوشت است [۸]. پینوا و بوسلا در سال ۲۰۱۹ درصد چربی درون ماهیچه‌ای را با این روش بررسی کردند [۲۰].

۳-۳. استفاده از امواج فراصوت برای استخراج مواد گیاهی

استخراج با امواج فراصوت به دلیل برخورداری از دمای پایین‌تر، سبب کاهش تخریب و از دست رفتن مواد در مقایسه با روش‌های مرسوم است. برای مثال، در فرایند مرسوم استخراج پکتین با آب داغ و یک اسید معدنی در مدت زمان چند ساعت، استخراج صورت می‌گیرد. به دلیل زمان بسیار طولانی، پکتین استخراج شده دچار تخریب حرارتی شده و در نتیجه ممکن است تغییرات نامطلوب در خواص فیزیکوشیمیایی و عملکردی آن ایجاد شود [۲۱]. در فرایند استخراج با امواج فراصوت، از امواجی با فرکانس بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز و حلال‌ها استفاده می‌شود. فرایند کاویتاسیون، سبب شکستن دیواره سلولی شده و نفوذ حلال به درون بافت گیاهی، باعث آزادسازی محتویات درونی سلول به بیرون می‌شود [۲۲]. برای مثال، نتایج بررسی شرایط استخراج پکتین[۱۸] از تفاله شاه‌توت به کمک امواج فراصوت توسط مسیبی و امام‌جمعه (۱۳۹۶) نشان داد که زمان استخراج، شدت امواج و نسبت نمونه به حلال، به شدت بر راندمان استخراج پکتین تأثیر می‌گذارند [۲۳]. همچنین، نتایج بررسی خواص عملکردی لیزاب یا موسیلاژ[۱۹] دانهٔ میوهٔ به استخراج شده با امواج فراصوت توسط فرهمند و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد که استفاده از امواج فراصوت به دلیل تأثیر مثبت بر خواص عملکردی، می‌تواند روش مناسبی برای استخراج موسیلاژه دانه میوه به باشد [۲۴].

۳-٤. استفاده از امواج فراصوت در خشک کردن مواد غذایی

خشک کردن مواد غذایی یکی از روش‌های کهن در نگهداری مواد غذایی است که از دیرباز به‌عنوان روشی برای افزایش زمان ماندگاری برخی از موادغذایی استفاده می‌شود [۲۵]. یکی از روش‌های متداول در خشک کردن، استفاده از جریان هوای داغ با جابه‌جایی اجباری است که درکنار مزایای فراوان، معایبی هم دارد. برای کاهش معایب این روش می‌توان از پیش تیمارهای مختلف از جمله فرایند فراصوت قبل از عمل خشک کردن با جریان هوای داغ، استفاده کرد [۲۶].

فراصوت با افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و افزایش سرعت انتشار مولکول‌های آب در حین خشک شدن، سبب کاهش میزان چروکیدگی و بهبود خصوصیات رنگی و حسی محصول خشک شده می‌شود [۲۷].

نتایج بررسی استفاده از امواج فراصوت در خشک کردن مواد غذایی (تولید چیپس سیب)، که توسط تاج‌الدین و رفیعی (۱۳۹۷) انجام شده، نشان داد که تیمار فراصوت با ایجاد کانال میکروسکوپی، خروج آب را راحت‌تر کرده و در نتیجه سبب

افزایش بازجذب آب می‌شود. از نظر سفتی، به دلیل ایجاد منافذ و سپس سستی در دیواره منافذ، در اثر فشار متلاشی و به سرعت شکسته می‌شود. میزان چروکیدگی به علت افزایش سرعت خشک شدن، کاهش می‌یابد. همچنین، این افزایش سرعت خشک شدن سبب بهبود رنگ محصول می‌شود [۲۸].

نتایج پژوهش کاوه و همکاران (۱۳۹۷) که بر تأثیر پیش تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز در خشک کردن لیموترش با روش هوای گرم انجام شده است نشان داد که با افزایش دمای هوای ورودی و اعمال زمان ۴۰ دقیقه برای توان مصرفی ۷۰ وات فراصوت، زمان خشک کردن کاهش یافته و در تمامی دماها کمترین میزان انرژی برای خشک کردن لیموترش مصرف می‌شود [۲۹]. شایان ذکر است هنگام استفاده از فراصوت، علاوه‌بر فرکانس دستگاه، توان دستگاه، و مدت زمان اعمال توان نیز اهمیت دارد [۵]، موضوعی که متاسفانه در خیلی از کارهای پژوهشی از جمله برخی از پژوهش‌های استفاده شده در این مطالعه، نادیده گرفته شده است.

۳-۵. استفاده از امواج فراصوت در نگهداری آب میوه‌ها

یکی از مراحل مهم در فرایند تولید آب میوه، پاستوریزه کردن قبل از بسته‌بندی است که به کمک حرارت صورت می‌گیرد. روش‌های حرارتی تأثیر مثبتی بر افزایش ماندگاری محصول و نابودی میکروارگانیسم‌ها دارند اما استفاده از دمای بالا در این فرایند سبب از بین رفتن ویتامین‌ها، قهوه‌ای‌شدن غیرآنزیمی، غیرطبیعی‌شدن پروتئین‌ها و از دست دادن طعم در ماده غذایی می‌شود [۳۰]. نتایج بررسی تاثیر میدان الکتیریکی پالسی مجهز به امواج مادون قرمز (IR^{20}) بر محتوای اسیداسکوربیک موجود در آب گوجه‌فرنگی نشان داد که به دلیل حساسیت حرارتی بالای اسید اسکوربیک، فرایند حرارتی IR سبب کاهش چشمگیر میزان این ویتامین می‌شود [۳۱].

یکی از روش‌های غیر حرارتی، استفاده از امواج فراصوت است که به دلیل انتشار طولی در مایعات و گازها، سبب ایجاد فازهای متناوبی از تراکم و انبساط می‌شوند. این تغییرات فشار در محیط ماده غذایی سبب ایجاد حباب‌های گاز می‌شود. با ادامه روند تراکم و انبساط، حباب‌ها به بیشترین حجم خود رسیده و در نهایت متلاشی می‌شوند. با ترکیدن این حباب‌ها، پدیده کاویتاسیون رخ می‌دهد. یعنی، با متلاشی شدن آنها، دمای موضعی بالا و به حدود ۵۵۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۵۰۰۰۰ کیلو پاسکال می‌رسد. این فرایند سبب ایجاد نیروی برشی و تلاطم سیال در ناحیه حفره می‌شود [۳۳، ۳۲].

توکلی و همکاران (۱۳۹۳)، تأثیر امواج فراصوت بر برخی از خواص کیفی آب هویج را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که سه متغییر توان امواج فراصوت، دما و زمان بر محتوای فنلی کل آب هویج تیمار شده معنی‌دار بوده و سبب کاهش مقدار آن شده است. تغییرات فعالیت ضداکسایشی نیز طی تیمار فراصوت معنی‌دار بوده و با افزایش توان و زمان تیمار، روند کاهشی داشته است. به‌طور کلی، خواص کیفی مورد بررسی در آب هویج تیمار شده توسط امواج فراصوت نسبت به نمونه تیمار نشده مطلوب‌تر بوده است [۳۴].

علائی و همکاران (۱۴۰۰) نیز برای به حداقل رساندن آسیب‌های حرارتی در فرایند تغلیظ آب هندوانه، دستگاه امواج فراصوت-حرارتی تحت شرایط خلاء را طراحی کرده و به بررسی عملکرد آن پرداختند. در این پژوهش، از سه سطح دمایی، سه سطح فشار خلاء و سه سطح توان امواج فراصوت استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای تغلیظ بر زمان فرایند تغلیظ و انرژی مصرفی کل اثر مثبت داشته و بر میزان محتوای لیکوپن و تغییرات کلی رنگ اثر منفی دارد. کاهش فشار خلاء سبب افزایش میزان لیکوپن و کاهش تغییرات رنگ، زمان و انرژی مصرفی شد. افزایش توان امواج فراصوت سبب افزایش محتوای لیکوپن، تغییرات کلی رنگ، انرژی مصرفی کل و کاهش زمان فرایند تغلیظ شد [۳۵].

۳-۶. استفاده از فراصوت در تصفیه فاضلاب صنایع غذایی

تصفیه فاضلاب صنعتی به‌ویژه در صنایع لبنی با مشکلات متعددی روبه‌رو است. فاضلاب صنایع لبنی حاوی مواد آلی چون پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و چربی‌ها است. همچنین، غلظت مواد جامد معلق و نیز میزان نیتروژن آن زیاد است که این موضوع سبب تغییرات چشمگیر pH می‌شود [۳۶]. برای تصفیه بیولوژیکی فاضلاب صنایع، معمولا از روش‌هایی مانند لجن فعال، صافی‌های چکه‌ای، تماس‌دهنده‌ای بیولوژیکی چرخان، راکتورهای ناپیوسته متوالی، لاگون‌های هوادهی شده، برکه‌های تثبیت، نیزارهای پیش ساخته و راکتور بی‌هوازی استفاده می‌شود [۳۷]. هر یک از این فرایندها، مشکلات خاص خود را دارد. برای مثال، هیدرولیز مواد آلی به‌عنوان مرحله محدودکننده در فرایند تصفیه فاضلاب است و سبب کاهش سرعت فرایند تصفیه بیولوژیکی می‌شود. استفاده از امواج فراصوت به فرایند هیدرولیز املاح آلی کمک می‌کند [۳۳].

نتایج بررسی‌های مهردادی و همکاران (۱۳۹۰) که بر تأثیر کاربرد امواج مافوق صوت بر محلول‌سازی (هیدرولیز) و بهبود قابلیت تجزیه بیولوژیکی ترکیبات آلی فاضلاب صنایع لبنی انجام شد نشان داد که امواج مافوق صوت با توان کمتر و زمان انتشار بیشتر برای هیدرولیز مواد آلی فاضلاب بهتر است. با هیدرولیز مواد آلی، سرعت فرایند تصفیه بیولوژیکی افزایش می‌یابد [۳۷]. کمانی و همکاران (۱۳۹۸) نیز با بررسی کارآیی فرایند تلفیقی اولتراسونیک-پرسولفات در کاهش مواد آلی فاضلاب سنتتیک لبنی نشان دادند که فرایند پرسولفات فعال شده با امواج صوتی می‌تواند یک روش مناسب و کارآ در حذف مواد آلی فاضلاب صنایع لبنی باشد [۳۸].

۳-۷. استفاده از فراصوت در کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی- غذایی

روش‌های گوناگونی برای ارزیابی کیفیت و تعیین تقلب در مواد غذایی و محصولات کشاورزی وجود دارد که ممکن است مخرب یا غیرمخرب باشد. مزیت روش‌های غیرمخرب این است که نمونه پس از آزمون، قابل استفاده بوده و می‌توان تمام مواد را آزمایش کرد، درحالی‌که در روش مخرب به علت تخریب ماده، بایستی آزمون‌ها روی نمونه‌های کوچک صورت گیرد. یکی از آزمون‌های غیرمخرب، روش فراصوت است که در تعیین کیفیت محصولات کشاورزی و دامی و فراورده‌های آنها استفاده شده و ایمنی مواد غذایی از نظر وجود مواد خارجی مثل سنگ، شیشه و غیره را تضمین می‌کند. برای این کار، معمولا از فراصوت تشخیصی[۲۱] با توان پایین برای شدت‌های کمتر از یک وات بر سانتی‌متر مربع استفاده می‌شود [۳]. برای مثال، در محصولات با ارزشی چون روغن زیتون، متقلبان آن را با روغن‌های ارزان قیمتی مانند پالم مخلوط کرده و سود زیادی به‌دست می‌آورند. فراصوت، روش مناسبی برای تشخیص چنین تقلب‌هایی است. برای نمونه، جورج و همکاران (۲۰۱۷)، روغن‌های نارگیل با خلوص ۵ تا ۱۰۰ درصد ترکیب شده با روغن‌های پالم و آفتابگردان را تهیه و خصوصیات فراصوتی آنها را با استفاده از یک مبدل یک مگاهرتزی سامانه پالس- اکو بررسی کردند و توانستند تقلب در روغن بکر نارگیل را تشخیص دهند [۳۹].

۳-۸. استفاده از فراصوت برای غیرفعال کردن آنزیم‌ها و میکروارگانیسم‌ها

برای غیرفعال‌سازی آنزیم‌ها، معمولا روش‌های حرارتی کاربرد دارد اما همیشه به دلیل ملاحظات کیفی قابل استفاده نیست. استفاده از امواج فراصوت بالای ۲۰ کیلوهرتز، یکی از راه‌های جایگزین برای روش حرارتی است که در محلول‌های آبی، موجب تجزیه یا غیرفعال شدن درشت مولکول‌ها از جمله آنزیم‌ها می‌شوند. همچنین، برای غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها در مواد غذایی، روش‌های گرمایی چون پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون مرسوم هستند که گاه ممکن است اثراتی روی محتوای تغذیه‌ای و کیفیت غذا داشته باشند.

ازاین‌رو، با استفاده از امواج فراصوت، می‌توان سلول‌های میکربی را غیرفعال کرد [۴۱، ۴۰].

٤. نتیجه‌گیری

فراصوت یکی از فناوری‌های مهم و ضروری در صنعت غذا است. امروزه بیش از پیش به مزایای استفاده از این روش در صنعت غذا توجه شده است. مزایای این روش در مقایسه با روش‌های مشابه، دقیق‌تر است. زیرا، روشی سریع، کم هزینه، قابل حمل و دوستدار محیط زیست است که به آسانی قابل استفاده بوده و استفاده از آن، مهارت و پیچیدگی خاصی نیاز ندارد. این روش، منافع اقتصادی زیادی نیز دارد زیرا می‌تواند به تشخیص تقلب در مواد غذایی کمک کند و ضمن اجتناب از سودجویی، از متضرر شدن مصرف‌کننده نیز جلوگیری کند. همچنین از این روش می‌توان به‌عنوان یک روش کمکی در برخی فرایندها مثل خشک کردن استفاده کرد. نکته مهم در استفاده از فراصوت، توجه به ویژگی‌های فیزیکی آن از جمله فرکانس، توان، و مدت زمان استفاده است. در این مقاله، تلاش شد تا با ذکر مثال‌های کاربردی، برخی از استفاده‌های مهم امواج فراصوت در صنعت غذا به‌ویژه مواد بسته‌بندی، به‌طور خلاصه بیان شود.

٦. مآخذ

[1] Czechowska-Biskup, Renata, Bozena Rokita, Salah Lotfy, Piotr Ulanski, and Janusz M. Rosiak, "Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound", *Carbohydrate Polymers*, 2005, Vol.60, no.2, pp.175-184.

[2] J Mason, T., Farid Chemat, and Mircea Vinatoru, "The extraction of natural products using ultrasound or microwaves", *Current Organic Chemistry*, 2011, Vol.15, no.2, PP.237-247.

[۳] زارع‌زاده، م.ر.، و ابونجمی، م.، "فراصوت تشخیصی، روشی غیرمخرب در کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی – غذایی"، *فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، دوره دوم، شماره سوم، ۱۳۹۷،صص. ۳۲-۴۱.

[4] Yusaf, Talal, and Raed A. Al-Juboori, "Alternative methods of microorganism disruption for agricultural applications". *Applied Energy*, 2014, Vol.114, pp.909-923.

[5] Santacatalina, J. V, M. Contreras, S. Simal, J. A. Cárcel, and José Vicente Garcia-Perez, "Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple", *Ultrasonics sonochemistry*, 2016, Vol.28, pp.100-109.

[6] Majid, Ishrat, Gulzar Ahmad Nayik, and Vikas Nanda, "Ultrasonication and food technology: A review", *Cogent Food & Agriculture*, 2015, Vol.1, no.1, pp.1071022.

[7] Gallo, Monica, Lydia Ferrara, and Daniele Naviglio, "Application of ultrasound in food science and technology: A perspective", *Foods*, 2018, Vol.7, no.10, p.164.

[۸] سلطانی کاظمی، م.، و آبدانان مهدی‌زاده، س.، "کاربرد اولتراسونیک در فراوری و کنترل کیفیت صنایع غذایی"، *دومین همایش ملی مکانیزاسیون و فناوری‌های نوین در کشاورزی، تهران، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان*، ۱۳۹۵.

[9] Jiao, Yue, and Yuegang Zuo, "Ultrasonic extraction and HPLC determination of anthraquinones, aloe-emodine, emodine, rheine, chrysophanol and physcione, in roots of Polygoni multiflori", *Phytochemical Analysis*, 2009, Vol.20, no.4, pp.272-278.

[10] Swarnnika. Ultrasound in food processing. https://foodscience-technology.com/applications-of-ultrasound-in-food-processing/amp/ , [viewed at 01/06/2021.]

[۱۱] تاج‌الدین، ب.، "*بسته‌بندی مواد غذایی با اتمسفر تغییر یافته*" (ترجمه)، تهران: انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی، ۱۳۹۸، (چاپ دوم)، ۳۲۹ صفحه.

[12] Tajeddin, Behjat, "Cellulose-based polymers for packaging applications", *Lignocellulosic polymer composites (Kumar Thakur V, Ed.)*, 2014, pp.477-498.

[13] Parreidt, T. S., K. Müller, and M. Schmid, "Alginate-Based Edible Films and Coatings for Food Packaging Applications", *Foods*, 2018, Vol.7, no.170, pp.1–38.

[14] Chawla, Rekha, S. Sivakumar, and Harsimran Kaur, "Antimicrobial edible films in food packaging: Current scenario and recent nanotechnological advancements-a review", *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2021, Vol.2, p.100024.

[۱۵] احمدی، ع.، عزیزی، م.، هادیان،ز.، "اثر تیمار فراصوت بر برخی ویژگی‌های فیلم‌های متیل سلولزی و استفاده از فیلم‌های اصلاح شده در بسته‌بندی نان باگت"، مجله *علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران*، ۱۳۹۸، س. ۵، ش.۳، ص. ۱۸-۱۱.

[۱۶] بختیاری، س.، و جوادیان، ر.، "اثر تیمار فراصوت بر خصوصیات فیزیکی فیلم خوراکی کفیران"، *پنجمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار*، ۱۳۹۵.

[۱۷] برزگر،ح.، عزیزی، م.، برزگر،م.، و حمیدی اصفهانی، ز. "ارزیابی و بهینه‌سازی فیلم نانوکامپوزیتی نشاسته-رس"، *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، ۱۳۹۴، سال ۱۲، شماره ۴۹، صص. ۹۳-۱۰۱.

[18] Tajeddin, Behjat, and Najmeh Ramedani, "Preparation and characterization (Mechanical and water absorption properties) of CMC/PVA/clay nanocomposite films", *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 2016, Vol.35, no.3, pp.9-15.

[19] Vahedikia, Nooshin, Farhad Garavand, Behjat Tajeddin, Ilaria Cacciotti, Seid Mahdi Jafari, Tayebeh Omidi, and Zahra Zahedi, "Biodegradable zein film composites reinforced with chitosan nanoparticles and cinnamon essential oil: Physical, mechanical, structural and antimicrobial attributes", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, Vol.177, pp.25-32.

[20] Schwesig, René, Souhail Hermassi, Georg Fieseler, Lars Irlenbusch, Frank Noack, Karl-Stefan Delank, Roy J. Shephard, and Mohamed-Souhaiel Chelly, "Anthropometric and physical performance characteristics of professional handball players: influence of playing position", *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 2016, Vol.57, no.11, pp.1471-1478.

[21] Koubala, B. B., Germain Kansci, L. I. Mbome, M-J. Crépeau, J-F. Thibault and M-C. Ralet, "Effect of extraction conditions on some physicochemical characteristics of pectins from "Améliorée" and "Mango" mango peels", *Food Hydrocolloids*, 2008, Vol.22, no.7, pp.1345-1351.

[22] Toma, Maricela, M. Vinatoru, Larysa Paniwnyk, and Timothy J. Mason, "Investigation of the effects of ultrasound on vegetal tissues during solvent extraction," *Ultrasonics sonochemistry*, 2001, Vol.8, no.2, pp.137-142.

[۲۳] مسیبی، و.، و امام جمعه، ز.، "بهینه‌سازی شرایط استخراج پکتین به کمک امواج اولتراسونیک از تفاله شاه توت (*Morus nigra* L.)"، *نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران*، ۱۳۹۶، سال ۱۳، شماره ۴، صص. ۶۱۰- ۵۹۴.

[۲۴] فرهمند،ع.، وریدی،م.، کوچکی،ا.،"ارزیابی خواص عملکردی موسیلاژ دانه به استخراج شده به کمک فراصوت"، *نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران*، ۱۳۹۵، س.۱۲، ش.۱، ص ۱۸۱-۱۶۳.

[25] Ibitwar, B. B., Bhupinder Kaur, Sadhna Arora, and Pankaj B. Pathare, "Osmo-Convective Dehydration of Plum (Prunus salicina L.)", *International Journal of Food Engineering*, 2008, 4, no.8.

[26] Gowen, A., N. Abu-Ghannam, J. Frias, and J. Oliveira, "Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (Cicer arietinum L.) Undergoing microwave–hot air combination drying", *Trends in Food Science & Technology*, 2006, Vol.17, no.4, pp.177-183.

[27] Deng, Yun, and Yanyun Zhao, "Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji)", *LWT-Food Science and Technology*, 2008, Vol.41, no.9, pp.1575-1585.

[۲۸] تاج‌الدین، ب.، و رفیعی، ز.، "استفاده از امواج فراصوت در خشک کردن مواد غذایی (مطالعه موردی: تولید چیپس سیب)"، *صوت و ارتعاش*، ۱۳۹۷، سال ۷، شماره ۱۴، صص. ۹۷- ۹۰.

[۲۹] کاوه، م.، جهان‌بخش، ا.، عسکری اصلی‌ارده، ع.، و ایمانیان، ک.، "خشک‌کردن لیموترش با روش هوای گرم تحت تأثیر پیش تیمار فراصوت"، *فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی*، ۱۳۹۷، سال ۶، شماره ۲، صص.۲۳۳- ۲۴۵.

[30] Patterson, Margaret F., Alan M. McKay, Malachy Connolly, and Mark Linton, "The effect of high hydrostatic pressure on the microbiological quality and safety of carrot juice during refrigerated storage", *Food Microbiology*, 2012, Vol.30, no.1, pp.205-212.

[۳۱] آقاجان‌زاده، س.، ضیائی‌فر، ا.، کاشانی‌نژاد، م.، و رضائی‌اصل، ع.، "تأثیر میدان الکتریکی پالسی مجهز به امواج مادون قرمز بر محتوای اسیداسکوربیک موجود در آب گوجه‌فرنگی"، *نشریه فراوری و نگهداری مواد غذایی*، ۱۳۹۹، سال ۱۲، شماره ۱، صص.۶۶- ۴۹.

[32] Soria, Ana Cristina, and Mar Villamiel, "Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review", *Trends in food science & technology*, 2010, Vol.21, no.7, pp.323-331.

[33] Gonze, E., S. Pillot, E. Valette, Y. Gonthier, and A. Bernis, "Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification,* 2003, Vol.42, no.12, pp.965-975.

[۳۴] توکلی دخرآبادی، م.، حمیدی اصفهانی، ز.، و عباسی، س.، "تأثیر امواج فراصوت بر برخی خواص کیفی آب هویج با استفاده از روش سطح پاسخ"، *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، ۱۳۹۳، سال ۲، شماره ۵، صص.۲۵- ۱۷.

[۳۵] علائی، ب.، امیری چایجان، ا.، و عزیزی تبریززاده، م.، "بهینه‌سازی عملکرد دستگاه امواج فراصوت- حرارتی تحت شرایط خلاء در فرایند تغلیظ آب هندوانه"، *مهندسی بیوسیستم ایران*، ۱۴۰۰، سال ۵۲، شماره ۱، صص.۶۵- ۵۶.

[36] Wang, Lawrence K., Yung-Tse Hung, Howard H. Lo, and Constantine Yapijakis, eds., "*Waste treatment in the food processing industry",* CRC press, 2005.

[۳۷] مهردادی، ن.، زاهدی، ع.، محمدی اقدم، ع.، و آقاجانی یاسینی، آ.، "کاربرد امواج مافوق صوت بر محلول سازی (هیدرولیز) و بهبود قابلیت تجزیه بیولوژیکی ترکیبات آلی فاضلاب صنایع لبنی، مطالعه موردی: صنایع لینی پگاه تهران"، *آب و فاضلاب*، ۱۳۹۰، شماره ۲، صص.۷۰- ۶۴.

[۳۸] کمانی، ح.، حسین پناهی، آ.، نورابادی، ا.، و آبی، غ.، "بررسی کارآیی فرایند تلفیقی اولتراسونیک- پرسولفات در کاهش مواد آلی فاضلاب سنتتیک لبنی"، *مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی بیرجند*، ۱۳۹۸، سال ۲۶، شماره ۱، صص.۴۳- ۳۲.

[39] George, Tony, Elizabeth Rufus, and Zachariah C. Alex, "Artificial neural network based ultrasonic sensor system for detection of adulteration in edible oil", *Journal of Engineering Science and Technology,* 2017, Vol.12, no.6, pp.1568-1579.

[۴۰] یوسف‌زاده ثانی، س.، مرتضوی، س.ع.، آ.، شیخ‌الاسلامی، ز.، کریمی، م.، و الهامی‌راد، ا.ح.، "کاربردهای امواج فراصوت در صنایع غذایی و تأثیر آن در بهبود کیفیت فرآورده‌های سوخاری"، *صوت و ارتعاش*، ۱۳۹۶، سال ۶، شماره ۱۲، صص.۱۱۹- ۱۰۵.

[۴۱] یزدانی، م.، صنعت‌پور، س.، "کاربرد فراصوت در اصلاح زیستی آلاینده‌های آلی"، *مجله ایمنی زیستی*، ۱۳۹۳، سال ۷، شماره ۲، صص.۹- ۱.

پی‌نوشت:

1. Emulsification
2. Dispersion
3. Dissolution
4. Stabilization
5. Cell Measurement
6. Pulse-echo Technique
7. Stable Wave Technique
8. Pitch-catch Technique
9. Tenderize
10. Biological Materials
11. Drip or Leach or Exudation
12. Montmorillonite
13. Casting
14. Zein
15. Active Packaging
16. Nanochitosan
17. Suspension
18. Pectin
19. Mucilage
20. Infrared
21. Diagnostic Ultrasound