Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Food Processing and Preservation Journal

Print ISSN: 2423-3544
Online ISSN: 2423-3803

Iranian Association of Food Scientists and Technologists

The principles and application of non-thermal ultrasound technology in food processing

Siyavash Amini[1], Javad Hesari[2*], Mahnaz Manafi Dizaj Yekan[3], Hamed Hamishehkar[4]

[1] PhD student, Department of Food Science and Technology, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2] Professor, Department of Food Science and Technology, University of Tabriz, Tabriz, Iran,
[3] Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Khoy Branch, Islamic Azad University, Khoy, Iran.
[4] Professor of Pharmaceutics, Drug Applied Research Center, Tabriz University of Medical Sciences

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2025-01-16
Revised: 2025-04-20
Accepted: 2025-05-14

Keywords:
Ultrasound
Transducers
Non thermal processing
Food Processing

ABSTRACT

Background and purpose: The growing demand for high-quality food with natural aromas and flavors, free from chemical additives, has led to an increased use of non-thermal food processes. Among these, ultrasound technology plays a significant role. Ultrasound involves sound waves above the human hearing range (<۱۶ kHz) and is generated by ultrasonic transducers that convert electrical energy into vibrational sound energy. This process enhances mass transfer through cavitation. Ultrasound has two primary applications in the food industry: high-intensity ultrasound for processing and low-intensity ultrasound for analysis. As a non-destructive technique, it does not leave physical or chemical residues on processed food, making it ideal for liquid foods like milk and juices. Its applications include cooking, frying, emulsification, homogenization, drying, extraction, and more. As it does not leave physical and chemical effects on food processing with this technology, it is In the dairy industry, ultrasound is utilized for cleaning, microbial disinfection, enzyme inactivation, homogenization, extracting bioactive proteins, and improving cheese production efficiency. This article specifically examines the effects of ultrasound on liquids and beverages, focusing on milk products.

Results: Power ultrasound is a food processing method that utilizes low-frequency sound waves, typically between 20 to 100 kHz, with sound intensities ranging from 10 to 1000 watts per square centimeter. This is achieved through transducers such as piezoelectric, magnetic, and venturi effects, which generate vibrational energy. A key consideration when applying power ultrasound in food technology is determining the appropriate amount of sound energy for the system, which can be assessed using methods like calorimetry and chemical dosimetry. The ultrasonic process is frequently combined with other preservation methods, such as heat and pressure, to more effectively deactivate microorganisms, particularly in the beverage industry. Moreover, the metamorphic technique is often used alongside modern technologies, including microwave processing, supercritical fluid extraction, extrusion, Soxhlet extraction, Cloninger distillation, enzyme extraction, and

liquid/solid phase techniques, to enhance the extraction of bioactive substances.

Conclusion: This review summarizes recent advancements in ultrasound technology within the food industry, particularly for liquid foods and beverages. Although ultrasound technology has been utilized for some time, its applications in food processing are relatively new. Different ultrasound frequencies facilitate quality control and processing. Low-intensity, non-destructive ultrasound provides a straightforward method for estimating food ingredients such as shrimp, dairy, fruits, and grains. In contrast, high-intensity, invasive ultrasound alters the biochemical properties of food through cavitation. The benefits of ultrasound in liquid food processing are significant: it enhances emulsification and sterilization while preserving bioactive compounds at lower temperatures compared to conventional methods. Ultrasound can break down fats and caseins, making it suitable for producing dairy probiotic drinks, which reduces processing time and costs while creating products with unique characteristics. Potential adverse effects on key quality parameters, such as color, anthocyanins, and ascorbic acid content, are minimal and generally not problematic. Additionally, quality parameters like turbidity may improve with mild sonication.

Cite this article: Amini, S., Hesari, J., Manafi Dizaj Yekan, M., Hamishehkar, H. 2025. The principles and application of non-thermal ultrasound technology in food processing. *Food Processing and Preservation Journal*, 17(1), 35-78.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/fppj.2025.23157.1855
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

فرآوری و نگهداری مواد غذایی
شاپا چاپی: ۳۵٤٤-۲٤۲۳
شاپا الکترونیکی: ۳۸۰۳-۲٤۲۳

مروری بر اصول و کاربرد فناوری غیرحرارتی فراصوت در فرآوری مواد غذایی

سیاوش امینی[۱]، جواد حصاری[۲*]، مهناز منافی دیزج یکان[۳]، حامد همیشه‌کار[٤]

[۱] دانشجوی دکتری تخصصی فناوری موادغذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[۲] استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: jhesari@tabrizu.ac.ir

[۳] استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران

[٤] استاد فارماسیوتیکس، مرکز تحقیقات علوم کاربردی دارویی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۱۰/۲۷
تاریخ ویرایش: ۱٤۰٤/۰۱/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۲/۲٤

واژه‌های کلیدی:
فراصوت
مبدل‌های فراصوت
فرایند غیرحرارتی
فرآوری مواد غذایی

چکیده

سابقه و هدف: استفاده از فرآیندهای غیرحرارتی به دلیل تقاضا برای مواد غذایی باکیفیت بالا، حاوی عطروطعم طبیعی بدون افزودنی‌های شیمیایی، افزایش یافته است. در میان فرآیندهای غیرحرارتی موادغذایی، فراصوت به تنهایی یا در ترکیب با سایر تکنولوژی‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخورداراست. به زبان ساده می‌توان گفت فراصوت امواج صوتی بالاتر از حد شنوایی انسان (بزرگ‌تر از ۱٦ کیلوهرتز) می‌باشد. امواج فراصوت نوعی انرژی ارتعاشی هستند که توسط مبدل‌های فراصوت، از تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی صوتی ارتعاشی و بالعکس تولید می‌شوند. موادغذایی که با فرآیند فراصوت فرآوری می‌شوند تا حدی تحت تأثیر پدیده کاویتاسیون و افزایش انتقال جرم قرارمی‌گیرند. فراصوت به‌طورکلی در صنایع غذایی دو کاربرد عمده دارد که شامل فراصوت با شدت بالا برای فرآوری مواد غذایی و فراصوت با شدت پایین برای آنالیز مواد غذایی می‌باشد و به‌دلیل برجای نگذاشتن آثار فیزیکی و شیمیایی در موادغذایی فرآوری شده به‌عنوان تکنیک غیرمخرب شناخته می‌شود. بیشترین کاربرد این فناوری در مواد غذایی مایع عمدتاً در شیر و آبمیوه‌ها است. این فناوری نوظهور در پخت‌وپز، سرخ‌کردنی، برش موادغذایی منجمد و نرم، امولسیون و هموژنیزاسیون، خشک‌کردن و فیلتراسیون، ترد کردن، استخراج، انجماد و کریستالیزاسیون، گاززدایی و کف‌زدایی کاربرد دارد. شاید کاربرد اصلی فراصوت در صنایع لبنی در تمیزکردن، گندزدایی میکروبی، غیرفعال کردن آنزیم‌ها، هوموژنیزاسیون، استخراج پروتیین‌های زیست فعال و افزایش بازده تولید پنیر باشد. این مقاله تأثیر فراصوت قدرت بر انواع موادغذایی را بررسی می‌کند.

یافته‌ها: فراصوت قدرتی که در فرآوری مواد غذایی به کار می‌رود از محدوده فرکانس پایین ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز با شدت صدای بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ وات بر سانتی‌متر مربع استفاده می‌شود. انرژی ارتعاشی توسط مبدل‌هایی همچون پیزوالکتریک و مغناطیسی و اثر ونتوری ایجاد می‌شود. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های استفاده از امواج فراصوت قدرتی در فناوری مواد غذایی، نیاز به یافتن مقدار مناسب انرژی صوتی برای اعمال در سیستم مورد نظر است که این مقدار از طرق مختلف

مانند کالری‌سنجی و دزیمتری شیمیایی تعیین می‌گردد. فرآیند فراصوت در ترکیب با سایر روش‌های نگه‌داری (به‌عنوان مثال گرما و فشار) برای اثربخشی بیشتر غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها در صنایع فرآوری موادغذایی علی‌الخصوص نوشیدنی‌ها به‌کار می‌رود. تکنیک فراصوت در ترکیب با سایر فن‌آوری‌های نوین مانند مایکروویو، سیال فوق بحرانی، اکستروژن، روش استخراج سوکسله، تقطیر کلونجر، استخراج آنزیمی و فاز مایع/جامد برای بهبود استخراج مواد زیست فعال بکار می‌رود.

نتیجه‌گیری: لذا این بررسی به‌طور خلاصه نتیجه پیشرفت‌های اخیر در استفاده از فناوری فراصوت در صنایع غذایی را به‌عنوان یک روش نوین در محصولات غذایی ازجمله موادغذایی مایع و لبنیات بیان می‌کند. فناوری فراصوت مدت‌هاست که وجود داشته است اما کاربردهای آن‌که شامل غذاهای مایع می‌شوند نسبتاً جدیدتر هستند. فرکانس‌های متفاوت فراصوت سهولت فرآوری را برای کنترل کیفیت و فرآوری مواد غذایی فراهم کرده‌است. فراصوت غیر مخرب با شدت کم روش ساده‌ای برای تخمین ترکیبات غذایی (میگو، لبنیات، میوه‌ها، غلات و غیره) ارائه می‌دهد. فراصوت تهاجمی با شدت بالا خواص بیوشیمیایی را از طریق ایجاد کاویتاسیون تغییر می‌دهد. مزایای استفاده از فراصوت برای فرآوری موادغذایی مایع واضح هستند که شامل افزایش ماندگاری موادغذایی از طریق کاهش میکروب‌ها، باکتری‌ها و کپک‌های آلوده‌کننده است. افزایش امولسیفیکاسیون و استریلیزاسیون در دماهای پائین‌تر از فرآیندهای معمولی می‌تواند درعین‌حال موجب حفظ ترکیبات فعال زیستی شود. فراصوت موجب خرد شدن چربی‌ها، شکستن کازئین‌ها شده و می‌توان محصولاتی با ویژگی‌های متفاوت مانند نوشیدنی پروبیوتیک لبنی، از طریق کاهش زمان فرآوری و با صرفه‌جویی اقتصادی تولید کرد. اثرات نامطلوب احتمالی مربوط به پارامترهای کلیدی کیفیت مانند رنگ، آنتوسیانین‌ها و محتوای اسیداسکوربیک اندک است و بنابراین به‌طورکلی مشکل‌ساز نیست. پارامترهای کیفیت مانند میزان کدورت ممکن است درواقع با فراصوت ملایم بهبود یابد.

استناد: امینی، سیاوش؛ حصاری، جواد؛ منافی دیزج یکان، مهناز؛ همیشه‌کار، حامد. (۱۴۰۳). مروری بر اصول و کاربرد فناوری غیرحرارتی فراصوت در فرآوری مواد غذایی. *فرآوری و نگهداری مواد غذایی*، ۱۷ (۱)، ۳۵-۷۸.

DOI: 10.22069/fppj.2025.23157.1855

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

در سال‌های اخیر فعالیت‌های زیادی در زمینه استفاده از امواج فراصوت برای فرآوری در غذاهای مایع، عمدتاً لبنیات و آب میوه‌ها، صورت گرفته است. با جست‌وجوی مقالات تحقیقاتی جدید، بیش از ۱۰۰ مقاله تنها در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۵ نوشته شده‌اند که نشان‌دهنده وسعت کار در این زمینه است. نویسنده‌های زیادی در فصل‌های کتاب‌های مختلف و مقاله‌های مروری حوزه‌های مختلف استفاده از امواج فراصوت در صنایع غذایی را پوشش داده‌اند که فرآوری غیرحرارتی مواد غذایی نوشیدنی‌ها [۱, ۲]، فرآوری در صنایع لبنی [۳, ٤]، فرآوری کنسانتره پروتئین‌های آب‌پنیر برای موادغذایی و نوشیدنی‌های ورزشی [٥]، بررسی پیامدهای استفاده از آن بر ایمنی مواد غذایی و خواص فیزیکوشیمیایی و تغذیه‌ای [٦] از آن جمله هستند. این مقاله مروری بر اصول کلی و اثرات اصلی فراصوت بر پارامترهای میکروبیولوژیکی، تغذیه‌ای و فیزیکوشیمیایی مواد غذایی مایع می‌باشد.

امواج فراصوت[1]: به زبان ساده، فراصوت را می‌توان به‌عنوان یک موج صوتی در فرکانس بالاتر از آستانه شنوایی انسان (بزرگ‌تر از ١٦ کیلوهرتز) تعریف کرد. امواج صوتی را می‌توان بر اساس محدوده فرکانس به سه دسته تقسیم کرد که عبارتند از (الف) امواج مادون صوت، به‌عنوان مثال، امواجی که فرکانس‌های زیر محدوده قابل شنیدن (کم‌تر از ۲۰ هرتز) قرار دارند. (ب) امواج قابل شنیدن یعنی امواج در محدوده فرکانسی ۲۰ هرتز تا ١٦ کیلوهرتز؛ و (ج) فراصوت یعنی امواج بزرگ‌تر ١٦ کیلوهرتز [۷].

فراصوت از نظر کیفی شبیه به صدای شنیداری است با این تفاوت که ارتعاشات فراصوت در فرکانس‌های (بزرگ‌تر از ۲۰ کیلوهرتز) بسیار زیاد است که توسط گوش انسان قابل تشخیص نیست. درواقع، یک موج صوتی بخشی از کل طیف حرکت تناوبی مواد (بدون احتساب حرکت انتقالی) است که در فرکانس‌های بسیار بالا به‌عنوان امواج حرارتی دیده می‌شود. همان‌طور که طیف‌سنجی الکترومغناطیسی کلاسیک می‌تواند ساختارهای مختلف را در یک ماده با برهم‌کنش با فرکانس‌های مختلف نور بررسی کند، طیف‌های فراصوت نیز در اصل می‌توانند جزئیات را در سطوح مختلف ساختار مواد آشکار کنند. سرعت فراصوت به آرایش مولکولی و برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی حساس است. سرعت صوت جزء پارامتر اصلی در سیستم‌های سنجش از طریق فراصوت است. هر ماده دارای مقدار منحصر به فردی از سرعت فراصوت است که به شکل هندسی و ساختار آن ماده نیز بستگی دارد. سرعت فراصوت با چگالی و پاسخ الاستیک ماده به فشار نوسانی مرتبط است [۸]. میرایی امواج و کاویتاسیون به انرژی، شدت و محیطی که فراصوت در آن منتشر می‌شود مرتبط است.

میرایی امواج[2]: هنگامی‌که یک موج فراصوت از طریق یک ماده منتشر می‌شود، در نتیجه نوسانات تولید شده توسط موج فراصوت که از مواد مربوط به ساختار میکروسکوپی آن عبور می‌کند، انرژی و شدت آن از دست می‌رود. این تضعیف به‌عنوان کاهش دامنه موج شناخته می‌شود. برخی از عوامل مانند گسترش پرتو فراصوت، جذب انرژی، پراکندگی، غیرخطی بودن، انتقال در سطح مشترک، پراکندگی در جهات مختلف بر دامنه و شکل موج امواج مافوق صوت تأثیر می‌گذارد [۸, ۱۰, ۱۱].

میرایی ازاین‌جهت مهم است که خواص طبیعی و شرایط بارگذاری را می‌توان به آن نسبت داد. میرایی معمولاً به‌عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری مورد استفاده

[1] Ultrasonic waves
[2] Attenuation

قرار می‌گیرد که منجر به تشکیل نظریه‌هایی می‌شود که پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی کاهش دهنده شدت فراصوت را توضیح می‌دهد.

جدول ۱- تفاوت بین فراصوت با شدت بالا و پایین

Table 1- Difference between high and low intensity ultrasound [9]

	فراصوت با شدت پائین Low intensity waves	فراصوت با شدت بالا High intensity waves
۱	غیر مخرب Non-destructive	مخرب Destructive
۲	به شناختن خواص فیزیکوشیمیایی مانند حالت فیزیکی، ترکیب و ساختار کمک می‌کند It helps to know the physicochemical properties such as physical state, composition, and structures.	خواص شیمیایی مانند سرعت امولسیون، سلول‌ها را مختل می‌کند، آنزیم‌ها رامهار می‌کند ، گوشت را نرم می‌کند. It helps to know the physical or chemical properties such as emulsion rate, disrupt cells, inhibit enzymes, tenderize meat.
۳	فرکانس‌های بیشتر از ۱۰۰ کیلوهرتز Frequencies are greater than 100 kHz.	فرکانس بین ۲۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز Frequencies between 20 and 500 kHz
٤	عدم تغییر خواص مواد غذایی Doesn’t modify the food properties.	تغییر خواص مواد غذایی Modify the properties of food products.

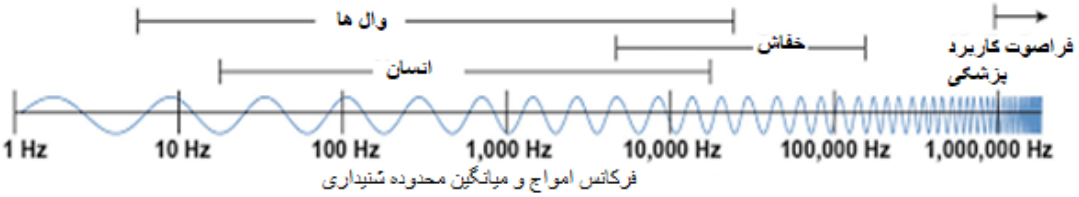
کاویتاسیون[1]: پدیده کاویتاسیون برای اولین بار در سال ۱۸۸۵ در حین آزمایش‌های دریایی، زمانی که به دلیل سرعت بسیار بالای پروانه‌ها با شکل‌گیری حفره‌هایی در آب منشأ هدررفتن نیرو و مشکلات دیگر بود، شناسایی شد [۱۲]. پس‌ازآن بابرت کنپ در سال ۱۹۳۰، توانست رفتار حباب‌های کاویتاسیون را به تصویر بکشد و نشان داد که اطراف حباب‌ها از نقاط کم‌فشار و پرفشار تشکیل شده‌اند [۱۳]. اساساً کاویتاسیون عبارت است از جوشاندن یک مایع به دلیل فشار کم و نه افزایش دما. بااین‌حال، ازآنجایی‌که اکثر مایعات حاوی گاز محلول هستند که افت فشار باعث آزاد شدن آن می‌شود، کاویتاسیون ممکن است به دلیل (الف) آزاد شدن گاز یا (ب) به دلیل جوشش با فشار کم یا در بیشتر موارد، مخلوطی از هر دو باشد [۱٤]. درواقع کاویتاسیون فرآیندی است که در آن حباب‌ها یا حفره‌ها پدیدار می‌شوند، منبسط می‌شوند سپس در مدت‌زمان کوتاهی منفجر می‌شوند و مقدار زیادی انرژی را در این فرآیند تخلیه می‌کنند [۱۵]. از فناوری فراصوت می‌توان برای ایجاد کاویتاسیون برای اهداف معین استفاده کرد.

فرکانس‌های اصلی فراصوت مورد استفاده برای فرآوری موادغذایی در محدوده ۲۰ تا ۲۵ کیلوهرتز کاربرد عمومی دارند [۱٦, ۱۷]. فراصوت اثرات مکانیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی را در مایعات از طریق تولید و متعاقب آن فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون ایجاد می‌کند. صوت از طریق یک سری امواج به‌صورت فشرده (تراکم) و انبساط (رقت) از طریق مولکول‌های محیطی عبور می‌کند و نیز در مواد غذایی مایع این امواج منتشر می‌شوند [۱۸].

ارتعاشات مکانیکی حاصل امواجی با شدت بالا هستند که عامل بالقوه در ایجاد حفره و جریان صوتی هستند و از طریق جامدات، مایعات یا گازها با فرکانس بیشتر از آستانه شنیداری ۲۰ کیلوهرتز منتشر می‌شود. که منجر به تغییرات متعدد در ویژگی‌های

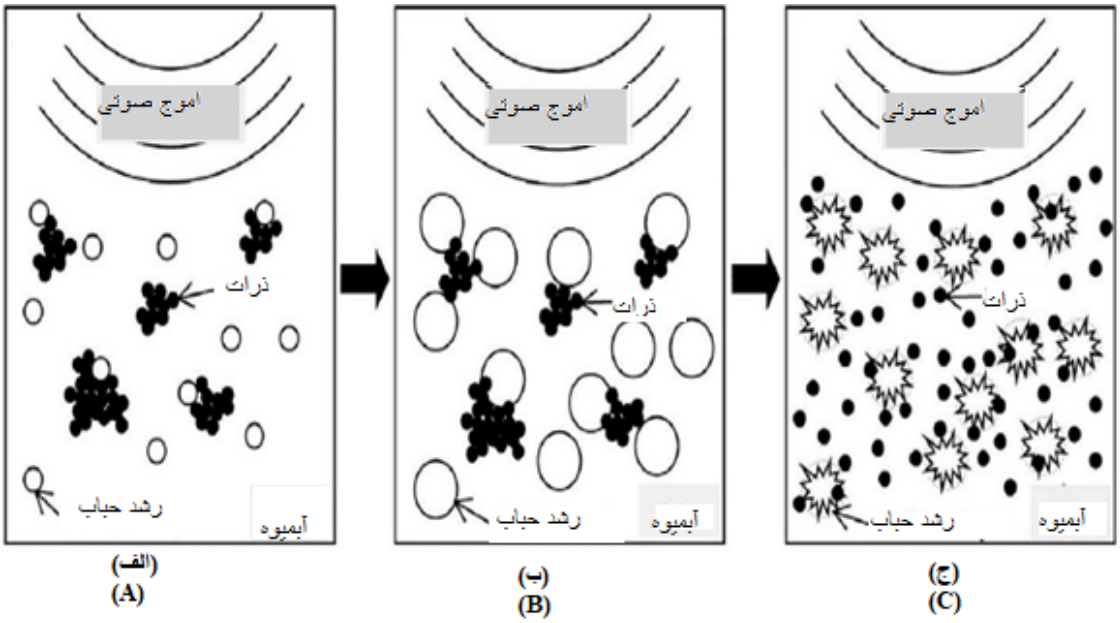
[1] Cavitation

فیزیکوشـــیمیـایی و همچنین عملکرد مواد غـذایی می‌شـــود. در ســـال‌های اخیر، فرآوری با فراصـــوت بـه‌عنوان یکی از فنـاوری‌هـای نگـه‌داری غیرحرارتی ســـریع چنـدکاربردی در حال ظهور اســـت که برای فرآوری مواد غذایی مورد اسـتفاده قرار می‌گیرد [۱۹]، ازجملـه آزمـایش غیر مخرب مواد، خشـــک‌کردن، کریسـتالیزاسـیون، فیلتراسـیون، اسـتخراج، امولسـیون کردن، تمیز کردن و به‌عنوان روش نگه‌داری (از طریق غیرفعـال کردن میکروب‌هـا و آنزیم‌هـا) [۲۰]. این فناوری دارای مزایای بی‌شـماری ازجمله کاهش زمان فرآوری، صـــرفـه‌جویی در انرژی، بهبود بهره‌وری و انتخاب پذیری، کاهش آثار فیزیکی و شیمیایی و بهبود ماندگاری و کیفیت محصولات غذایی است [۲۱].



شکل ۱- امواج صوتی و آستانه شنوایی انسان

Figure 1- Sound waves and the human hearing threshold



شکل ۲- پدیده کاویتاسیون (الف) تشکیل حباب‌ها بوسیله امواج صوتی (ب) رشد اندازه حباب‌ها در طول سیکل انبساط (ج) فروپاشی حباب‌ها و تجزیه ذرات و پدیده تخریب سلول‌ها [۱۹]

Figure 2. Cavitation phenomenon: (A) Formation of bubbles by sound waves, (B) Growth of bubble size during expansion cycle, (C) Bubble collapse and particle disintegration and cell destruction phenomenon

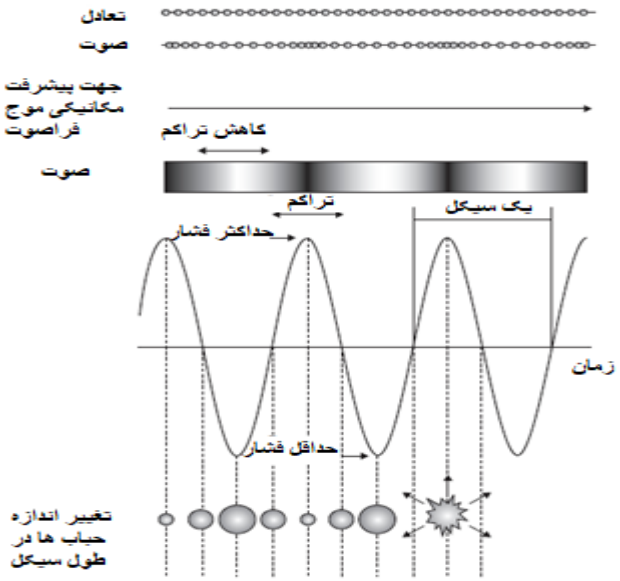
تجهیزات فراصـــوت معمولـاً در فرکانس‌های ۲۰ کیلوهرتز تـا ۱۰ مگـاهرتز کار می‌کنند [۲۲]. در طول چرخه انبساط، امواج فراصوت با شدت بالا حباب‌های کوچکی را ایجـاد می‌کننـد کـه بـه‌تـدریج بـه هم می‌پیوندند. با رسیدن به اندازه و حجم آستانه، حباب‌ها به دلیل ناتوانی در جذب انرژی بیشـتر دچار فروپاشی

شـدید می‌شـوند. این چرخه تشکیل حباب، انبساط و انفجار از نظر فنی به‌عنوان کاویتاسیون نامیده می‌شود. در حین انفجـار، در مجـاورت حبـاب‌هـای در حـال فروپاشـــی دما (تقریباً ۵۰۰۰ درجه‌کلوین) و فشـــار (تخمین زده شـــده در حدود ۵۰۰۰۰ کیلو پاســـکال) بسیار بالایی ایجاد می‌شود که می‌تواند ذرات را تجزیه کنـد و منجر به پراکندگی ذرات و اختلال در ســـلول می‌شود و یک اثر استریل‌سازی موضعی ایجاد می‌کند [۲۳]. شـکل‌گیری، رشد و فروپاشی حباب‌ها در حین کاویتاسیون در شکل ۲ نشان داده شده است.

با فروپاشی این حباب‌ها و ایجاد دماها و فشارهای بالا در مقیاس میکروســکوپی، منجر به ایجاد نیروهای برشـی شـدید می‌شود که باعث انتقال جرم، اختلاط و هموژنیزاسیون بسیار مؤثر و کارآمد شده و علاوه‌بر آن موجـب پـدیـده "نقاط داغ[1]" با دمای بالا در مایع در حال فرآوری می‌شـود. این فروپاشـی حفره‌ای، انرژی لازم برای اثرات مختلف در طول فرآوری مواد غذایی مانند کاهش اندازه گلبول‌های چربی، هموژنیزاســـیون بیشـــتر مایعات و افزایش اســـتخراج را فراهم می‌کند [۱۸]. حباب‌های کاویتاســـیون که در این روش ایجاد می‌شـوند به دو نوع تقسـیم می‌شـوند که در شـکل ۳ به‌وضوح قابل رؤیت است:

حفره‌هـای پـایـدار حباب‌هایی هســـتند که اغلب بـه‌صـــورت غیرخطی، در حـدود برخی از اندازه‌های تعادلی در طول سـیکل‌های متعدد فشار صوتی نوسان می‌کنند. آن‌ها برای مدت طولانی پایدار هســـتند و در کنـار هم جمع می‌شـــونـد و ابرهای حبابی بزرگی را تشکیل می‌دهند.

حفره‌های گذرا که کاویتاســـیون اینرســـی نامیده می‌شـــوند، حباب‌هایی هســـتند که پایداری آن‌ها برای یک دوره بسیار کوتاه، گاهی کمتر از یک سیکل است و به‌شدت فرو پاشیده و منفجر می‌شوند [۲٤]



شکل ۳- کاویتاسیون فراصوت [۲۵]

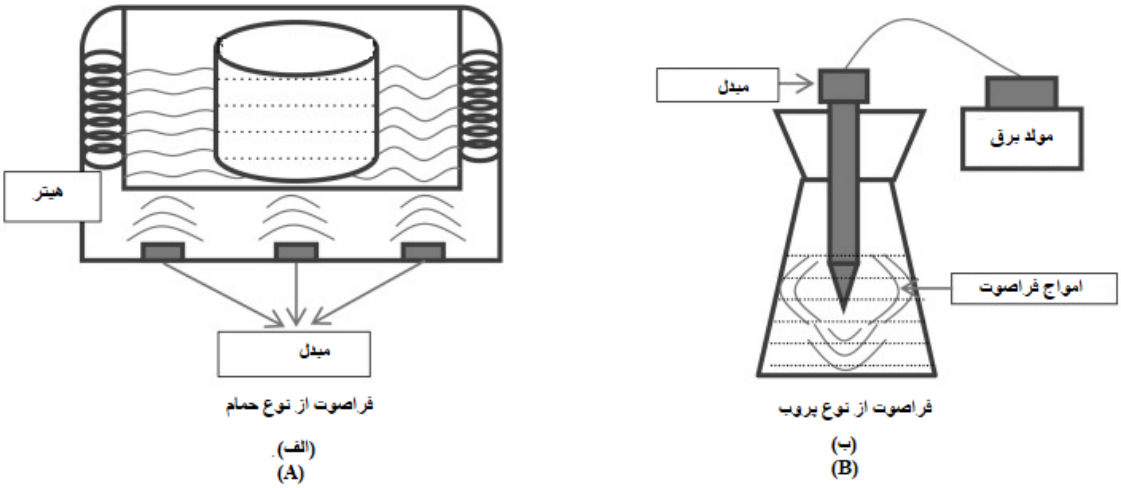
Figure 3. Ultrasonic Cavitation

[1] Hot spot

تولید امواج فراصوت: فراصوت قدرتی[1] که در فرآوری مواد غذایی به کار می‌رود از محدوده فرکانس پایین ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز با شدت صدای بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ وات بر سانتی‌متر مربع استفاده می‌شود. در این محدوده هسته‌های کوچک کاویتاسیون موجود در تمام مایعات فعال و حفره می‌شوند [۱۲]. انرژی ارتعاشی توسط مبدل‌های مافوق صوت تأمین می‌شود که انرژی الکتریکی را به انرژی صوتی تبدیل می‌کنند که دو نوع تولیدکننده امواج صوتی رایج است؛ پیزوالکتریک و مغناطیسی که رایج‌ترین آن‌ها پیزوالکتریک است [۲٦]. مبدل‌های مغناطیسی از نظر مصرف برق کارآمدی کم‌تری دارند اما این مزیت را دارند که ساختار بسیار قوی‌تری دارند و به همین دلیل برای کاربردهای سنگین مورد بررسی قرارمی‌گیرند [۲۷].

راه دیگر برای ایجاد کاویتاسیون از طریق اثر ونتوری[2] می‌باشد که یک مایع با فشار بالا از طریق یک روزنه کوچک وارد می‌شود. با بیرون آمدن از دهانه، مایع وارد شرایط فشار محیط می‌شود و فشارزدایی موجب ایجاد حباب‌های کاویتاسیون می‌شود. این نیروی محرکه به‌اصطلاح سوت مایع نام دارد و این فناوری برای سال‌ها در صنایع غذایی برای مخلوط کردن و امولسیون‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌است [۱٦].

ابزار انتقال امواج برای انجام فرآوری مواد غذایی دو نوع سیستم تماسی مستقیم (فراصوت از نوع پروب) و نوع سیستم غیر تماسی (فراصوت از نوع حمام) می‌باشد که انواع فراصوت از نوع پروب و حمام در شکل ٤ نشان داده شده است که در نوع تماسی از مایعات به‌عنوان محیط انتقال امواج استفاده می‌کنند که در فرآوری مواد غذایی مانند امولسیون‌سازی، گاززدایی از مایعات، جداسازی چربی، تشدید انتقال حرارت و جرم [۲۸]، هیدراتاسیون پودر، پاستوریزاسیون مواد غذایی مایع، استخراج مواد فعال زیستی، تقویت سرعت خشک شدن، سرعت انجماد و غیره مورد استفاده قرارمی‌گیرند [۲۹]. فراصوت پروب در محدوده ۲۰ تا ۳۵ کیلوهرتز آنرا به انتخابی بهینه برای انجام فرآوری تبدیل می‌کند درعین‌حال آسیب به ساختار پروب را به حداقل می‌رساند [۳۰]. فراصوت حمامی انرژی کم‌تری برای تولید امولسیون‌های پایدار مصرف می‌کنند [۳۱].



شکل ٤- تجهیزات مورد استفاده در فرآوری با فراصوت: (الف) فراصوت از نوع حمام (ب) فراصوت از نوع پروب [۳۲]

Equipment used in ultrasonic processing: (A) Bath-type ultrasonication (B) Probe-type ultrasonication.

[1] Power ultrasonic

[2] Venturi

انـدازه‌گیری انرژی امواج فراصـــوت (دوزیمتری): یکی از مهم‌ترین جنبه‌های اسـتفاده از امواج فراصوت قـدرتی در فنـاوری مواد غـذایی، نیـاز به یافتن مقدار مناسب انرژی صوتی برای اعمال در سیستم مورد نظر اســت. تقریباً تمام تجهیزات فراصــوت این قابلیت را دارند که توان تولید شــده یعنی دامنه ارتعاش مبدل را تغییر دهنـد. اندازه‌گیری طبیعی توان صـــوتی در یک مـایع بـا اســـتفـاده از هیـدروفون به دســـت می‌آید. بااین‌حال، نسبت به‌شدت مورد استفاده و نحوه استفاده در فرآوری مواد غذایی، این ابزار نسبتاً شکننده هستند. درواقع تقریباً غیرممکن اســت که یک رقم دقیق برای توان تعیین شود زیرا انرژی صوتی ممکن است جذب، منعکس و یا در تولید کاویتاسـیون اسـتفاده شود. اگر یک راکتور اصـلاً تلفات حرارتی نداشـته باشد، میزان انرژی را می‌توان از طریق کاویتاسیون به‌خوبی تخمین زد. بـااین‌حـال، کالری‌ســـنجی به‌عنوان یک راهنمای تقریبی استفاده می‌شود زیرا اکثر راکتورها دارای تلفات هســـتنـد. انرژی انتقـال‌یـافته به یک محیط غذایی را می‌توان به‌صورت شدت فراصوت (W/cm^2) یا چگالی انرژی صـــوتی (Wcm^{-3} یـا W/ml) بیان کرد [۳۳]. کالری‌سـنجی و دوزیمتری شیمیایی روش‌های معمول اندازه‌گیری انرژی امواج فراصوت هستند.

کالری‌ســـنجی: چگالی انرژی صـــوتی مقدار انرژی صـــوتی در واحد حجم اســـت. مزیت این اندازه‌گیری این اســـت کـه می‌توان از آن بـه‌عنوان راهنمـایی در افزایش مقیاس‌های اندازه‌گیری استفاده کرد. با استفاده از معـادلات زیر می‌توان آن را به‌صـــورت کالریمتری تعیین کرد [۲۶]، فراصـوت مطلق P به‌صـورت زیر به دست می‌آید:

رابطه ۱ $$P=mC_p(\frac{dT}{dt})_{t=0}$$

که m جرم است، C_p ظرفیت گرمایی ویژه و (dT/dt) نرخ اولیه تغییر دما در طی فرآوری با فراصوت است. این را می‌توان بـا جـاگـذاری داده‌های به‌دســـت‌آمده نســـبت به افزایش دما (با اســـتفاده از یک ترموکوپل استاندارد) با زمان تعیین کرد [۲۶].

شـدت فراصوت تلف شده (UI) از منبع انتشار با قطر D توسط ماسون و لوریمر [۳۴] ارائه شده است:

رابطه ۲ $$UI=\frac{4P}{\pi D^2}$$

چگالی انرژی صـوتی [۳۵] را می‌توان با تقسـیم توان فراصـــوت مطلق بر حجم (V) محیط (ســـانتی متر یا میلی‌لیتر) تعیین کرد:

رابطه ۳ $$AED=\frac{P}{V}$$

دزیمتری شـــیمیایی: کاویتاســـیون، انرژی کافی برای شـــکســـتن پیونـدهـای شـــیمیـایی آب برای تولید رادیکـال‌های H^o و OH^o تولیدمی‌کند. این رادیکال‌ها بســـیار واکنش‌پذیر و عمر کوتاهی دارند و می‌توانند پراکسـید هیدروژن (H_2O_2) را به‌عنوان یک محصـول تولیـدکننـد [۳۳]. مقـدار پراکســـیـد معیـاری برای رادیکال‌های تولید شده است و بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان دزیمتر شـــیمیایی برای فعالیت کاویتاســـیون اســـتفـاده کرد [۳۶, ۳۷]. ید آزادشـــده مولکولی در محلول، در ۳۵۵ نانومتر در طیف مرئی جذب می‌شود. بنابراین میزان ید آزاد شـــده را می‌توان با مقدار جذب در طول‌موج ۳۵۵ نـانومتر بـا یـک اســـپکتروفتومتر UV/مرئی با اســـتفاده از اســـتوکیومتری و قانون بیر لامبرت به دســـت آورد که غلظت H_2O_2 تخمین زده می‌شود [۳۸].

چـالش‌هـای فرآوری مواد غـذایی با فراصـــوت: مشـــکلات موجود در رابطـه بـا روش‌های مســـتند غیراســـتاندارد و پارامترهای کنترل مبنی بر اســـتفاده گسـترده از این فناوری یک چالش محسوب می‌شود. لـذا نیـاز دارد فعالیت‌ها و تحقیقات قابل‌توجهی برای درک و سـاده‌سازی و قابل‌اجرا بودن در سطح صنعتی برای این روش فناوری دارای پتانسـیل بالقوه، صورت

گیرد. بسیاری از مطالعات بر فرکانس ۲۰ تا ٤۰ کیلوهرتز متمرکز شده است که مطالعه بر روی فرکانس‌های مختلف به همراه پارامترهای لازم شامل شدت صوت، زمان و دمای فرآوری را می‌طلبد [۳۲].

وجود حباب‌های ریز در یک محلول می‌تواند تا حدی مانع ایجاد امواج فراصوت شده و در برخی موارد از پخش امواج در نمونه مورد فرآوری جلوگیری کند. این مشکل را می‌توان از طریق اندازه‌گیری امواج منعکس شده بجای امواج گذرا برطرف نمود. لذا در فرآوری با فراصوت اطلاعات زیادی از خواص ترموفیزیکی مانند چگالی، تراکم‌پذیری، ظرفیت گرمایی و هدایت الکتریکی یک ماده برای پیش‌بینی نظری خواص فرآوری با فراصوت لازم است. بنابراین اطلاعات تحلیلی تئوری از یک سیستم با چندین مؤلفه با ویژگی‌های ناشناخته کافی نیست [۳۲].

سیستم‌های نوع تماسی ممکن است مشکلاتی مانند ایجاد حفره در پروب‌های فراصوت در نتیجه فعالیت‌های حفره‌ای شدید ایجاد کنند که منجر به فرسایش سطوح منتشرکننده امواج می‌شود که به‌نوبه خود، ممکن است رسوب‌هایی در مواد غذای مورد فرآوری باقی بگذارد و در صورت تماس مستقیم با محصولات غذایی باعث آلودگی محصولات غذایی شود. بااین‌حال، با پیشرفت‌های اخیر در علم مواد، پروب‌های فراصوت ساخته شده از مواد بی‌اثر ازجمله کوارتز، پیرکس، سرامیک، پلی اتر اتر کتون یا پلی‌تترافلوراتیلن می‌توانند بر برخی از محدودیت‌های فلزی غلبه کنند.

روش‌های فرآوری با فراصوت قدرت: فرآیند فراصوت در ترکیب با سایر روش‌های نگه‌داری (به‌عنوان مثال گرما و فشار) برای اثربخشی بیشتر غیر فعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها در صنایع فرآوری موادغذایی علی‌الخصوص نوشیدنی‌ها به‌کار می‌رود [۱۹]. از روش‌های فرآوری با فراصوت قدرت می‌توان به فراصوت به تنهایی یا فراصوت همراه با حرارت، فشار، حرارت و فشار، ماکروویو، سیال فوق بحرانی، فناوری اکستروژن، استخراج سوکسله، تقطیر کلونجر، فرآیند اسمز، استخراج آنزیمی و میکرو استخراج فاز مایع/جامد اشاره کرد.

فراصوت: فراصوت به تنهایی در دمای پایین برای فرآوری مواد غذایی حساس به حرارت در زمان طولانی‌تر بکار رفته و نیاز به انرژی بیشتری دارد[۳۹].

فراصوت همراه با حرارت[1]: فراصوت همراه با حرارت ملایم جهت اثربخشی مشابه با دمای بالا برای غیرفعال سازی میکروارگانیسم‌ها نسبت به فرآیند حرارتی معمولی رایج، به‌کار می‌رود [٤۰].

فراصوت همراه با فشار[2]: فراصوت همراه با میانگین فشار (۳۰۰-۱۰۰ کیلوپاسکال) در دماهای پائین برای اثر بیشتر برای غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها کاربرد دارد [٤۱]. فرآیند فشار بالای (HHP) اعمال شده به تنهایی قادر به تخریب تمام میکروارگانیسم‌ها (هاگ‌ها) نمی‌باشد ولی استفاده همزمان با فراصوت با شدت بالا تولید گرما نموده و به‌این‌ترتیب تأثیر و کارایی فرآیند فشار بالا بیشتر شده و تأثیرات ناچیزی بر کیفیت مواد غذایی می‌گذارد لذا این فرآیند ترکیبی برای دماهای بین ۸-۵ درجه سانتیگراد طراحی شده است [۳۲].

فراصوت همراه با حرارت و فشار[3]: اثر ترکیبی فراصوت با حرارت و فشار تأثیر کاویتاسیون و انفجار حباب را به حداکثر می‌رساند. گزارش‌ها حاکی از اثر مؤثر این روش بر غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها، آنزیم‌های مقاوم به حرارت مانند لیپوکسیژناز، پراکسیداز، پلی‌فنل‌اکسیداز و لیپازها و پروتئازهای سودوموناس می‌باشد [۱٦].

[1] Thermosonication
[2] Manosonication
[3] manothermosonication

فراصوت همراه با مایکروویو: ترکیب فراصوت با ماکروویو، یکی از موثرترین روش‌های نوین است که استخراج سریع و کارآمد را فراهم می‌کند [۳۵]. اثر مکانیکی فراصوت بر تخریب دیواره سلولی پیکره گیاهان موجب دسترسی حلال‌ها به ترکیب مورد نظر شده و گرم شدن بسیار سریع توسط ماکروویو به‌طور همزمان، پرتوافکنی فراصوت را بهبود بخشیده و موجب نفوذ در ماتریکس و حلالیت آنالیت می‌شود [۴۲].

فراصوت همراه با استخراج سیال فوق بحرانی[1]: استخراج با فراصوت همراه با سیال فوق‌بحرانی یک تکنولوژی جدید است [۳۲]. کاستیو-زامودیو و همکاران [۴۳] همچنین مشاهده کردند فرآوری با CO2 فوق بحرانی همراه با فراصوت فشار بالا برای غیرفعال کردن میکروب‌های E. coli مؤثر بوده و عمر مفید ژامبون خشک شده را افزایش می‌دهد. استخراج با سیال فوق بحرانی دارای معایب خاصی مانند هزینه‌های بالاتر برای تجهیزات و پیچیدگی جداسازی اجزای قطبی بدون کمک اصلاح کننده CO2 است [۳۲].

فراصوت همراه با فناوری اکستروژن[2]: کستروژن با فشار دادن و بیرون راندن برای تولید شکر و آب‌میوه یا خشک شدن در واحدهای فرآوری روغن نباتی کاربرد دارد. متوسط نیروی اکستروژن، در بیشتر موارد، با افزایش دامنه فراصوت کاهش می‌یابد و اکسترودپذیری قوی‌تری ایجاد می‌کنند [۴۴].

فراصوت همراه با استخراج سوکسله[3]: استخراج سوکسله معمولاً برای دفع چربی‌ها و روغن‌ها از ماتریس آن‌ها استفاده می‌شود. علاوه‌بر این، مطالعه ترکیبی فراصوت و روش سوکسله برای بهره بردن از مزایای هر دو روش با کاهش تعداد چرخه‌های سوکسله، زمان فرآوری، دما و ترکیب حلال توسعه‌یافته است [۴۵].

فراصوت همراه با تقطیر کلونجر[4]: **فناوری** مرسوم برای جداسازی ترکیبات ناپایدار گیاهان مانند اسانس‌های روغنی تقطیر آلمبیک[5] هست که در اصطلاح علمی Clevenger distillation نامیده می‌شود. استفاده از فراصوت در روش تقطیر موجب کاهش زمان و بازده بیشتر استخراج و حفظ ترکیبات حساس به حرارت شده و شرایط بهینه صرفه‌جوئی اقتصادی و هزینه‌های تولید و حفظ محیط‌زیست می‌شود [۳۲].

فراصوت همراه با فرآیند اسمز[6]: استفاده از فراصوت در اسمز موجب جلوگیری از هدر رفتن آب و املاح در دمای کمتر درواقع با عنوان حفاظت از طعم، رنگ و ترکیبات حساس به دما بازده بیشتری ایجاد می‌کند [۴۶]. این پدیده به دلیل افزایش تخلخل دیواره سلولی (مقاومت کمتر) که نتیجه ایجاد کانال‌های کوچک است انتقال آب و املاح را افزایش می‌دهد [۴۷].

فراصوت همراه با استخراج آنزیمی: فراصوت با تخریب و ایجاد پارگی دیواره سلولی در استخراج به کمک آنزیم، استخراج ترکیبات زیست فعال را تسریع می‌کند این در حالی است که آنزیم ماتریس دیواره سلولی را به‌طور کامل هیدرولیز نمی‌کند [۴۸]. محققان [۴۹] پلی‌ساکارید سولفاته را با روش‌های آنزیمی (آلکالاز)، فراصوت و آنزیمی-فراصوت، استخراج و ویژگی‌های مولکولی آن‌را باهم مقایسه کردند. لین و همکاران [۵۰] از روش آنزیم به کمک فراصوت برای استخراج ماده اولیه پلی‌ساکاریدها از پوست پوملو شاطیان استفاده کردند.

[1] Supercritical fluid extraction (SFE)
[2] extrusion
[3] Soxhlet extraction
[4] Clevenger distillation
[5] alembic distillation
[6] osmotic dehydration

فراصـوت همراه با میکرو استخراج فاز مایع/ جامد: میکرو استخراج فاز جامد (*SPME*[1]) و میکرو فاز مایع اسـتـخـراج (*LPME*[2]) رایج‌ترین و گسـتـرده‌ترین روش‌های پیش فرآیند هستند. *LPME* یک روش آسان و کاربرپسند است اما مستلزم زمان و وجود حلال‌های آلی فراوان برای حل کردن نمونه اسـت [۵۱]. ترکیب فراصـوت با *LPME/SPME* مزایایی همچون راندمان استخراج بالاتر، تکرارپذیری بیشتر، زمان کم، مصرف کمتر حلـال، هزینه کم، حفظ محیط‌زیسـت دارد که برای تعیین ترکیبـاتی مانند فلزات سـنگین، داروهای ارگانیک، رنگ‌های غذایی، رنگ‌های خطرناک آب و آبمیوه‌ها استفاده می‌شود [۳۲].

کاربردهای فراصـوت قدرت: امروزه فراصـوت در همـه زمینـه‌ها ازجمله فرآوری مواد معدنی، صـنایع موادغذایی و آشـامیدنی، فراصـوت درمانی، اسـکن پزشکی، نانوتکنولوژی، زیست پزشکی و آزمایش‌های غیر مخرب کاربرد دارد [۵۲].

جدول ۲- کاربرد فراصوت در فرآوری‌های مواد غذایی

Table 2. Application of ultrasound in food processing [41]

نوع فرآوری Processing type	بهبود عملکرد Performance improvement
پختن و سرخ کردن Cooking and frying	بهبود انتقال حرارت در نتیجه زمان کوتاه‌تر و یکنواختی پخت Improved heat transfer resulting in shorter cooking times and uniformity
برش Cutting	می‌توان با کاهش فشار در غذاهای منجمد و نرم برش انجام داد Can be cut by reducing pressure in frozen and soft foods
ایجاد پراکندگی، اختلاط و هموژنیزاسیون Dispersion, mixing and homogenization	اختلاط شدید یکی از ویژگی‌های کاویتاسیون در سطح مشترک مایع/مایع است و به‌طور گسترده در تولید سس‌ها و سس مایونز استفاده شده است. Intense mixing is a characteristic of cavitation at the liquid/liquid interface and has been widely used in the production of sauces and mayonnaise.
مارینه کردن، ترشی کردن، آب نمک Marinating, pickling, brine	بهبود نفوذ مایعات به درون مواد غذایی که در سبزیجات و گوشت بکار می‌رود. Improves the penetration of liquids into food, used in vegetables and meat.
خشک کردن و فیلتراسیون Drying and filtration	افزایش سرعت خشک شدن هوا از بهبود انتقال حرارت ناشی می‌شود. فراصوت در فیلتراسیون کاربرد دارد زیرا جریان آب را از طریق کیک فیلتر بهبود می‌بخشد. The increased drying rate results from improved heat transfer. Ultrasound is used in filtration because it improves the flow of water through the filter cake.
ترد کردن Tenderization	بهبود تردی گوشت Improving meat tenderness
استخراج Extraction	شکسته شدن دیواره‌های سلولی در گیاهان همراه با بهبود نفوذ حلال منجر به عصاره‌گیری بهتر و گاهی استخراج هدفمندتر طعم دهنده‌ها و مواد مغذی از گیاهان و دانه‌ها می‌شود. Breaking down cell walls in plants, along with improved solvent penetration, leads to better extraction and sometimes more targeted extraction of flavors and nutrients from plants and seeds.
انجماد و کریستالیزاسیون Freezing and crystallization	می‌تواند از طریق کاویتاسیون شروع به کریستالیزاسیون بدون دانه‌گذاری کرد و در عین حال انتقال حرارت موثر را نیز فراهم می‌کند It can initiate crystallization through cavitation without graining while also providing efficient heat transfer.

[1] Solid-phase micro-extraction
[2] Liquid-phase micro-extraction

گاززدایی و کف‌زدایی	امواج فراصوت می‌تواند مانع ایجاد کف شود و همچنین با حذف گازهای موجود در مواد غذایی مایع، پایداری محصول را فراهم کند و از آسیب اکسیداتیو به محصول جلوگیری کند که فرآیندی مهم قبل از کنسرو کردن یا بطری کردن نوشیدنی محسوب می‌شود.
Degassing and defoaming	Ultrasound can prevent foaming and also provide product stability by removing gases from liquid foods and preventing oxidative damage to the product, which is an important process before canning or bottling beverages.

در صنایع غذایی کاربرد فناوری فراصوت گسترده است. فراصوت کم‌توان با فرکانس بالا (کم‌تر از ۲ مگاهرتز) که دارای حداقل اثرات فیزیکی و یا شیمیایی بر اجزای مواد غذایی است به‌عنوان یک تکنیک غیر مخرب ارزیابی کیفیتی شناخته‌شده‌است [۲۹]. درحالی‌که فراصوت با فرکانس پایین (کم‌تر از ۱ مگاهرتز) که به دلیل توانایی آن‌ها در ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی مطلوب در غذا، به‌عنوان امواج صوتی قدرتی شناخته می‌شود که کاربردهای گسترده آن در فرآوری‌های مختلف مورد استفاده قرارگرفته است [۲۹]. کاربردهای غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها، تمیز کردن و ضدعفونی تجهیزات، مخلوط کردن و همگن‌سازی، ایجاد کف و کف‌زدایی، حذف رسوب ذرات معلق در هوا، فیلتراسیون، بلورزایی، استخراج ترکیبات، انجماد و انجماد زدایی، خشک‌کردن، برش‌دادن، پخت، تغییر خواص رئولوژیکی، ریزپوشانی ترکیبات موادغذایی می‌باشد. در جدول (۲) کاربرد فناوری فراصوت قدرت در صنعت موادغذایی آورده‌شده‌است.

غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها: در صنایع غذایی به‌طورکلی بر غیرفعال‌کردن یا از بین‌بردن میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها به‌عنوان روشی برای حفظ و نگه‌داری موادغذایی با استفاده از روش‌های فیزیکی که عمدتاً شامل حرارت می‌باشد، نگریسته می‌شود که با موفقیت زیادی همراه بوده‌است. درحالی‌که حرارت می‌تواند به نگه‌داری مواد غذایی کمک‌کند اما می‌تواند باعث تخریب مواد مغذی و کاهش خواص ارگانولپتیکی مواد شود بنابراین جامعه علمی به دنبال روش‌های جایگزین برای حفظ مواد غذایی با استفاده از استراتژی‌ها یا اصول فیزیکی مختلف بوده است [۱٦].

فراصوت به‌طورکلی به‌عنوان یک عامل باکتری‌کش مؤثر در نظر گرفته‌می‌شود، مطالعات متعددی توانایی فراصوت بر غیرفعال کردن اسپورها و انواع میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها در محصولات لبنی، آب‌میوه‌ها را نشان داده است که مربوط به نازک شدن دیواره سلولی، تشکیل نقاط داغ نقطه‌ای و تولید رادیکال‌های آزاد در محیط می‌باشد [۱۸]. علاوه‌بر آن توانایی فراصوت برای تحریک فعالیت‌های بیولوژیکی توجه بسیار کمی را به‌خود جلب کرده است. بااین‌حال، به‌طورکلی اعتقاد بر این است که اثر تحریک کنندگی فراصوت عمدتاً به دلیل افزایش نفوذپذیری غشای سلولی و سرعت انتقال بالای مواد مغذی است. بنابراین فراصوت در شدت کم، راندمان تخمیر در برخی از فرآیندهای غذایی و نوشیدنی‌ها، به‌عنوان مثال، راندمان عملکرد بیفیدوباکتری‌ها و لاکتوباسیلوس‌ها در تخمیر شیر را افزایش می‌دهد [۵۳]. برای استریل کردن غذاهای مایع، انرژی‌های صوتی بسیار بالاتری استفاده می‌شود و روش‌هایی را که می‌توان استفاده کرد عبارتند از: فراصوت به تنهایی، مانوسونیکاسیون (فشار همراه با فراصوت)، ترموسونیکاسیون (حرارت همراه با فراصوت) یا مانوترموسونیکاسیون (گرما به همراه فشار توأم با فراصوت).

تلاش برای استفاده از فراصوت برای نگه‌داری مواد غذایی جدید نیست اما در ۱۰ سال گذشته

تلاش‌ها و مطالعات زیادی در این زمینه صورت‌گرفته‌است [٥٤]. تحقیقات اولیه در مورد فراصوت به اثرات آن بر مهم‌ترین عامل تغییر مواد غذایی یعنی بارمیکروبی اختصاص یافت. تخریب میکروارگانیسم‌ها توسط امواج فراصوت قدرتی در دهه ۱۹۲۰ گزارش شد [١٦]. پس‌ازآن، بررسی اثرات فراصوت بر روی گونه‌های مختلف میکروبی، حساسیت‌های بسیار متفاوتی را نشان داد که به شکل و اندازه میکروارگانیسم‌ها مرتبط بود. به‌استثنای برخی موارد، به‌طورکلی سلول‌های بزرگتر نسبت به سلول‌های کوچک‌تر حساس‌تر هستند و باکتری‌های کروی نسبت به باکتری‌های میله‌ای شکل مقاوم‌تر هستند. علاوه‌بر این، باکتری‌های گرم مثبت نسبت به گرم‌منفی‌ها و هوازی‌ها نیز مقاوم‌تر از باکتری‌های بی‌هوازی هستند. وضعیت فیزیولوژیکی سلول‌ها نیز نقش دارد، سلول‌های جوان‌تر حساس‌تر از سلول‌های مسن‌تر و هاگ‌ها بسیار مقاوم‌تر از سلول‌های رویشی هستند [٥٥].

مکانیسم‌هایی که از طریق آن‌ها فراصوت بر غیرفعال سازی میکروبی تأثیر می‌گذارد به وسیله کاویتاسیون صوتی ایجاد می‌شود که منجر به ضعیف شدن یا ازهم‌گسیختگی سلول‌های باکتریایی از طریق تعدادی از فرآیندها می‌شود [٥٦]. به زبان ساده، این فرآیندها را می‌توان به سه نوع دسته‌بندی کرد:

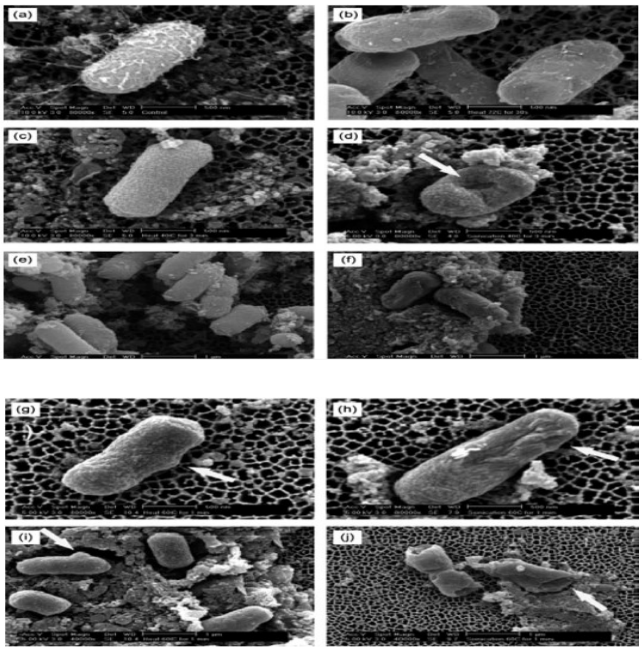
- آسیب دیواره سلولی باکتری، به دلیل اثرات مکانیکی ناشی از شیب فشار ایجاد شده در طی فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون در داخل یا نزدیک باکتری.
- نیروهای برشی ناشی از جریان میکرو که در خود سلول باکتری ایجاد می‌شود.
- حمله شیمیایی به دلیل تشکیل رادیکال‌های آزاد در حین کاویتاسیون که به ساختار دیواره سلولی حمله می‌کند و منجر به تجزیه آن می‌شود. علاوه‌بر این، مقدار کمی پراکسیدهیدروژن از طریق فراصوت تشکیل می‌شود که خود یک باکتری‌کش است.

اوگرتو رومرو و همکاران [٥٧] با استفاده از اسکن میکروسکوپ الکترونی محیطی (*ESEM*[1]) اثرات تیمارهای حرارتی و فراصوت را بر مورفولوژی *E coli K12* مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که سلول‌های شاهد یک بافت آن‌ها ی نرمال با رشته‌های الیگوساکارید خارجی را نشان می‌دهند درحالی‌که عملیات حرارتی (۷۲ درجه سانتیگراد) یک سطح غیر دآن‌ها ی و مقداری حفره‌های جزئی ایجاد می‌کند اما یکپارچگی سلول به‌خوبی حفظ می‌شود (شکل ٥). در مقابل، سلول‌های تحت فرآیند فراصوت در دمای ٤٠ درجه‌سانتیگراد به مدت ۳ دقیقه تغییرات قابل‌توجهی در مورفولوژی سلول نشان دادند. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که فراصوت سوراخ‌هایی را روی سطح سلول با قطرهای تقریبی ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر ایجاد می‌کند (شکل ٥). چنین حفره‌هایی را می‌توان به برخورد سریع مایع در حین فروپاشی حباب بر روی سطح سلولی که دیواره سلولی و غشای سیتوپلاسمی را سوراخ می‌کنند نسبت داد. فرآوری طولانی‌تر فراصوت ممکن است باعث نشت مواد داخل سلولی شود. اوگرتو رومرو و همکاران [٥٧] همچنین تغییر شکل دیواره سلولی و انقباض سطح سلول (شکل ٥) را برای فراصوت در دمای ٤٠ درجه‌سانتیگراد مشاهده کردند، درحالی‌که فراصوت در دمای بالاتر (٦٠ درجه سانتیگراد) منجر به آسیب گسترده و تغییرات قابل توجهی در مورفولوژی سلول شد، تصاویر *ESEM* نشان داد که آسیب سلولی ناشی از فراصوت در دماهای بالا عمدتاً مکانیکی است.

در شکل (٥) (a) نمونه شاهد، (b) حرارت با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۳۰ ثانیه، (c) دمای ٤٠

[1] Environmental scanning electron microscopy

درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ دقیقه (۸۰۰۰۰۰ برابر بزرگتر)، (d) فراصوت در دمای ٤۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۳ دقیقه، (e) درجه حرارت ٤۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۳ دقیقه با بزرگ‌نمایی ٤۰۰۰۰۰ برابر، (f) فراصوت در ٤۰ درجه‌سانتی‌گراد ۳ دقیقه، (g) حرارت ٦۰ درجه سانتی‌گراد، (h) فراصوت در دمای ٦۰ درجه برای یک دقیقه، (I) دمای ٦۰ درجه‌سانتی‌گراد به‌مدت یک دقیقه. گزارش شده است که فراصوت بر روی باکتری‌های گرم مثبت، مانند استافیلوکوکوس‌اورئوس و انتروکوک، کمتر مؤثر است [۵۸]. این موضوع به‌طور قطع می‌تواند به ساختار دیواره سلولی آن‌ها در مقایسه با باکتری‌های گرم منفی نسبت داده شود. همچنین هاگ‌ها به دلیل مقاومت بالایی که دارند، فراصوت آسیب نسبتاً کم‌تری به هاگ‌ها وارد می‌کند.



شکل ۵- سلول های اشرشیاکلی K12 مشاهده شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی (*ESEM*) [۵۷]

Figure 5. Escherichia coli K12 cells observed with environmental scanning electron microscopy (*ESEM*)

در تحقیقی حصاری [۵۹] به این نتیجه رسید که با افزایش قدرت امواج فراصوت میزان نابود شدن میکروارگانیسم‌ها افزایش می‌یابد، مقاومت باکتری گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس در برابر امواج فراصوت بیشتر از باکتری گرم منفی اشرشیاکلی بود اما هر دو باکتری پس از فرایند فراصوت نسبت به حرارت حساس‌تر شدند. شیب منحنی غیرفعال سازی میکروارگانیسم‌ها در مراحل اولیه فرایند بیشتر بود. افزایش حجم نمونه‌های مورد آزمایش موجب کاهش تأثیرگذاری امواج فراصوت گردیده و افزایش توان امواج فراصوت به‌کاررفته موجب افزایش قدرت میکروب‌کشی امواج شد. افزایش از بین‌رفتن میکروارگانیسم‌ها هنگامی‌که امواج فراصوت با گرما یا فشار ترکیب می‌شود، عموماً به اختلال مکانیکی بیشتر سلول‌ها نسبت داده می‌شود [۱٦]. یکی از بارزترین ویژگی‌های فراصوت همراه با فشار و فراصوت همراه با حرارت این است که به‌نظر نمی‌رسد عواملی که میکروارگانیسم‌ها را در برابر عملیات حرارتی مقاوم‌تر می‌کنند، بر مقاومت آن‌ها در برابر امواج فراصوت تأثیر بگذارند. این امر غیرفعال

سازی با امواج فراصوت را برای نگه‌داری مواد غذایی بسیار قابل‌توجه می‌کند زیرا اثربخشی آن نسبت به عملیات حرارتی بسیار کمتر به تیمار و شرایط واقعی غذا وابسته است. مزیت دیگر این است که آسیب به سلول‌های ناشی از گرما می‌تواند برگشت‌پذیر باشد اما برخلاف این، نتایج تجربی نشان می‌دهند که آسیب ناشی از فراصوت همراه با فشار غیرقابل برگشت است [٦٠].

برای حذف میکروارگانیسم‌ها از سطح قطعات سبزی که قبلاً برای از بین بردن آن‌ها از مواد شیمیایی مانند کلر استفاده می‌شد، آلوده‌زدایی سطوح میوه‌ها و سبزیجات (کاهو، خیار، هویج، جعفری و غیره) با استفاده از امواج فراصوت صورت گرفت [٦١]. در پژوهشی اثر امواج فراصوت روی آب میوه‌های پرتقال و سیب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد امواج فراصوت به‌تنهایی قادر به کاهش ٥ سیکل لگاریتمی جمعیت اشرشیاکلی در شدت‌های بالای فراصوت و مدت زمان ١٥ دقیقه بوده است [٦٢]. در تحقیقی که محققان بر روی باکتری‌های اشیرشیاکلی *O157: H7*، استافیلوکوکوس اورئوس، پنی سیلیوم‌کریزوژنوم یا کلستریدیوم‌اسپوروژنز که در شیر ریتنتیت برای تولید پنیر فراپالایش شده تلقیح شده بود با استفاده از فراصوت در مدت بیست دقیقه و در فرکانس‌های ٢٠، ٤٠ و ٦٠ کیلوهرتز با شدت ٨٠ درصد مورد فرآوری قرار دادند و مشاهده کردند که در طول ٦٠ روز فراصوت در فرکانس ٦٠ کیلوهرتز بالاترین میزان اثر غیر فعال‌سازی را بر روی میکروارگانیسم‌ها داشت [٦٣]. حصاری و همکاران برای از بین بردن میکروارگانیسم‌های استافیلوکوکوس‌اورئوس و اشرشیاکلی در کشک مایع از فراصوت و دی‌اکسید تیتانیوم و حرارت ملایم استفاده کردند [٥٩]. هوشیار و همکاران [٦٤] مشاهده کردند که فراصوت به همراه پاستوریزاسیون موجب نابودی کامل میکروارگانیسم‌های هوازی و کلی‌فرم‌ها در آب آلبالو گردید.

شاید چهار کاربرد اصلی فراصوت قدرتی در فرآوری لبنیات در تمیز کردن [٦٥]، ضدعفونی میکروبی، غیرفعال کردن آنزیم [٥٨] و هموژنیزاسیون [٤٠] باشد. باوجود نشانه‌های اولیه مبنی بر اینکه فراصوت می‌تواند چندین مزیت را به‌عنوان یک روش نگه‌داری شیر فراهم کند هنوز به‌عنوان یک روش

استاندارد مورد استفاده قرار نگرفته‌است. این تقریباً می‌تواند به چندین عامل "منفی" که در فرآوری با فراصوت است نسبت داده‌شود [۳۳]. راینر و همکاران [٦٦] همچنین تشکیل ان-آلکآن‌ها مانند هگزا-۱-ان، هپتا-۱-ان، اکتا-۱-ان و نون-۱-ان را پس از فرآوری با فراصوت در شیر گزارش کردند که محصولات اکسیداسیون لیپید هستند.

غیرفعال نمودن آنزیم‌ها: غیرفعال‌سازی آنزیمی فرآیند مهمی برای افزایش پایداری، ماندگاری و کیفیت بسیاری از فرآورده‌های غذایی است. به‌منظور پایدارسازی برخی موادغذایی، آنزیم‌ها می‌بایست غیرفعال و یا فعالیت آن‌ها کاهش داده شود. غیرفعال سازی آنزیم‌ها به‌راحتی توسط تیمار حرارتی می‌تواند حاصل شود. اما به‌هرحال، در برخی موارد آنزیم‌های مقاوم به حرارت یک مشکل عمده است و استفاده از دماهای بالا باعث تغییر برخی خصوصیات مواد غذایی خواهد شد. به‌کارگیری فراصوت در ترکیب با دیگر تیمارها در غیرفعال سازی آنزیم‌های موجود در موادغذایی مؤثر خواهد بود. در روش اعمال امواج فراصوت، کاویتاسیون موجب مرگ و از بین رفتن میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها می‌شود. توان بالای امواج فراصوت در محیط، میکروحباب‌هایی با فشار نوسانی ایجاد می‌کند که ترکیدن آن‌ها موجب افزایش دما و فشار محیطی می‌شود. این فرآیند با ایجاد نیروی برشی و تغییر سریع فشار تولیدشده، اثر مخربی را بر دیواره‌ی میکروب‌ها اعمال می‌کند. بنابراین امواج فراصوت مقاومت مکروارگانیسم‌ها را با آسیب فیزیکی وارده به آن‌ها کاهش می‌دهد و مشابه این تغییر را نیز در غیرفعال کردن آنزیم‌ها دارند [٦٧]. استفاده همزمان از گرما و فراصوت تحت‌فشار (مانوترموسونیکاسیون) موثرتر از عملیات حرارتی به تنهایی در غیرفعال کردن پروتئاز و لیپاز مقاوم در برابر حرارت ترشح شده توسط سودوموناس فلورسانس[1] است [٦٨, ٦٩].

تمیز کردن و ضدعفونی تجهیزات: تمیز کردن با فراصوت شاید قدیمی‌ترین کاربرد صنعتی فراصوت قدرت باشد. به دلیل هزینه کم و نتایج خوب، همچنان در صنایع متعددی ازجمله قسمت‌های نیمه‌هادی ماشین‌آلات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷۰]. مزیت اصلی تمیز کردن با فراصوت نسبت به روش‌های سنتی عدم وجود برس در این فرآیند است که اثرات کاویتاسیون در محیط، مکانیزم اصلی فرآیند تمیز کردن است. این تمیز کردن بدون برس به پاک کننده‌های فراصوت اجازه می‌دهد تا به مکان‌های غیرقابل دسترس در قسمت‌هایی با حفره‌های داخلی پیچیده دسترسی پیداکنند که در غیر این صورت تمیز کردن آن‌ها مشکل‌ساز است [۷۱]. تمیز کردن با فراصوت بر روی مواد سخت مانند فلزات، شیشه، سرامیک و پلاستیک که مقاومت ظاهری صوتی بسیار بالاتری نسبت به آب دارند، موثرتر است، به‌طوری‌که فراصوت به نحوی منعکس می‌شود که فشار را در سطح تقویت می‌کند [۷۲]. اکثر کاربردهای صنعتی فراصوت با شدت بالا در فرکانس‌های نسبتاً پایین می‌باشد و تمیز کردن با فراصوت از این قاعده مستثنی نیست. فرکانس‌های عملیاتی به‌طورکلی بسته به کاربرد آن بین ۲۰ تا ۵۰ کیلوهرتز است. به‌عنوان مثال، یک پاک‌کننده ۲۵ کیلوهرتزی نسبت به پاک‌کننده ۵۰ کیلوهرتز قدرت تمیز کردن بیشتری دارد زیرا با احتمال زیاد اثرات حفره‌ای در فرکانس‌های پائین‌تر بیشتر است. بااین‌حال، فرکانس‌های پایین‌تر می‌توانند به قطعات ظریف آسیب بزنند [۷۳]. علاوه‌بر این اگر مخزن تمیزکننده به‌طور مناسب برای تولید حباب‌های حفره‌ای به‌طور یکنواخت در سراسر مایع یا به‌طور خاص در مناطق مورد نظر طراحی شده باشد، این

[1] P.fluorescens

مزیت تا حدودی افزایش می‌یابد. رسوبات تارتارات در صنایع آبمیوه یک مشکل عمده هست که حل شدن مجدد آن به‌سختی صورت می‌گیرد و روش‌های رایج در حذف رسوبات تارتارات کارایی موثری ندارند، محققان [۷٤, ۷۵] نشان دادند که به وسیله فراصوت باقدرت ٤۰۰ وات یا ۱ کیلووات در عرض چند دقیقه می‌توان رسوبات تارتارات را حذف کرد.

مخلوط کردن و همگن سازی[1]: فرآیندهای صنعتی زیادی وجود دارد که از امواج فراصوت قدرت به‌عنوان وسیله‌ای برای اختلاط مواد استفاده می‌کنند [۱٦]. دامنه وسیعی از محصولات مورد استفاده از قبیل شیر، خامه، سوپ‌ها، سس‌ها، مواد آرایشی و غیره بر پایه امولسیون هستند. امولسیون‌ها درواقع دیسپرسیون‌های مایع در مایع هستند و یکی از کاربردهای فراصوت در فرآیند موادغذایی امولسیفیکاسیون و مخلوط کردن و هموژمیزاسیون است. این اثر اغلب در بخش‌های پتروشیمی، شیمیایی، آرایشی و بهداشتی و دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بخش مواد غذایی، فراصوت با فرکانس پایین و پرانرژی نیز به‌طور خاص برای تولید امولسیون، سس مایونز، آب‌میوه، سس کچاپ و شیر همگن استفاده می‌شود [۷٦]. با استفاده از امواج فراصوت کارایی هموژنیزاسیون افزایش می‌یابد زیرا شوک‌های فشار و دمای ایجادشده در اثر کاویتاسیون سبب متلاشی‌شدن گویچه‌های چربی و افزایش تعداد آن‌ها و موجب توزیع اندازه باریک‌تر و پراکندگی یکنواخت‌تری می‌شوند که کوتاه‌تر شدن فرآیند و بهبود توزیع ذرات و پایداری بیشتر امولسیون مطرح است [۷۷].

ایجاد کف و کف‌زدایی: کف پراکندگی گاز در مایعی است که در آن فواصل بین حباب‌های گاز بسیار کم است. درواقع کف را می‌توان تجمع حباب‌های گازی دانست که توسط یک لایه مایع بسیار نازک از هم جدا شده‌اند. در یک سیستم کف، نسبت حجمی گاز به مایع بسیار زیاد است و چگالی ظاهری به گاز نزدیک می‌شود [۱٦]. ایجاد کف در صنایع غذایی ازجمله در صنایع تخمیری مشکلاتی را برای کنترل تولید و تجهیزات و موجبات آلودگی را ایجاد می‌کند. برای از بین بردن کف در صنایع غذایی از روش‌های شیمیایی عوامل آنتی‌فوم یا ضدکف استفاده می‌شود. این محصولات معمولاً عوامل فعال سطحی هستند که به تنهایی قادر به تولید کف پایدار نیستند. آن‌ها بسیار مؤثر هستند اما گاهی اوقات با آلوده کردن فرآیند، اثرات نامطلوبی ایجاد می‌کنند. روش‌های مکانیکی مانند فراصوت قدرت با فروپاشی حباب‌ها با هر ضربه مکانیکی (تغییرات سریع فشار، نیروی برشی، نیروی فشاری، نیروی ضربه، مکش و نیروهای گریز از مرکز) موجب شکستن کف می‌شود که بیانگر روشی تمیز برای بدون تماس با مایع است [۷۷]. گاززدایی و فرآیند کف‌زدایی مایعات از کاربردهای جالب فراصوت است. درواقع، فراصوت حباب‌های کوچک معلق در مایع را مجبور می‌کند تا به سطح بروند و گاز محبوس شده را در محیط آزاد کنند بنابراین سطح گاز حل شده در زیر سطح مایع را کاهش می‌یابد. بنابراین فرآیند فراصوت برای به دست آوردن نوشیدنی‌های گازدار بدون کف، در سیستم‌های تخمیر یا در سایر فرآیندهایی که کف باعث بدتر شدن کیفیت محصولات می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷۸].

حذف رسوب ذرات معلق در هوا: وجود ذرات معلق هوا در بیشتر گازها به‌طورکلی نامطلوب تلقی می‌شود و روشی برای حذف ذرات معلق در هوا (جامد یا مایع) از طریق انعقاد است. یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌ها برای تجمع و رسوب ذرات معلق در هوا، استفاده از ارتعاشات صوتی یا فراصوت با شدت بالا است. این یک واقعیت شناخته شده است که استفاده

[1] Mixing and homogenization

از یک میدان صوتی با شدت بالا بر روی یک آئروسل باعث ایجاد فرآیند انعقاد ذرات معلق می‌شود [۱٦].

فیلتراسیون: در فرآیند فیلتراسیون، فراصوت توان بالا از طریق فراهم‌کردن انرژی کافی و کاهش فشردگی و ایجاد تعداد بیشتری کانال آزاد در سطح غشاهای فیلتراسیون در کلوخه‌های تجمع یافته بر روی منافذ غشاها، موجب خروج حلال (آب) عمل می‌شود. بنابراین فراصوت قدرت در فرآیند فیلتراسیون می‌تواند سبب کاهش زمان فرآیند و افزایش بازده آب‌گیری و طول عمر فیلتر گردد. همچنین انفجار حباب‌ها سبب جداسازی آب پیوندی بافت‌ها می‌شود که نیاز به فرآیند حرارتی بعدی را از بین برده یا کاهش می‌دهد [۷۷]. انرژی ارتعاشی تولید شده توسط فراصوت به ذرات اجازه می‌دهد تا در حالت تعلیق باقی بمانند و به حرکت خود ادامه داده و سطوح فیلترها را آزاد بگذارند و عبور حلال به منافذ را تسهیل کند. همچنین سطحی بدون اصطکاک ایجاد می‌کند که به مایع یا ذرات کوچک‌تر اجازه می‌دهد راحت‌تر از آن عبورکنند بنابراین جریان را بهبود می‌بخشد و زمان فرآیند را کاهش می‌دهد. مزیت دیگر این است که عمر فیلتر افزایش‌یافته و کاویتاسیون مداوم که در سطح خود فیلتر رخ می‌دهد، از انسداد و یا خوردگی جلوگیری می‌کند [۷۹].

بلورزایی[1]: پدیده کاویتاسیون سبب تحریک فرآیند هسته‌زایی و کاهش اندازه کریستال‌ها از طریق شروع هسته‌زایی [۸۰، ۸۱] در محصولات متبلوری مانند کره، مارگارین و خامه‌زده‌شده می‌گردد که فاز بلوری دارند [۷۷]. انجماد به کمک فراصوت زمان لازم برای تشکیل کریستال‌ها را کاهش می‌دهد و همگنی را افزایش و در نتیجه آسیب سلولی را کاهش می‌دهد و یکپارچگی محصول را حفظ می‌کند [۳۹]. با اعمال فرآیند فراصوت در محصولات دارای قندهای مهمی مانند D-فروکتوز و سوربیتول شامل آب‌نبات، کانفت، خامه و شکلات که فرآیند کریستالیزاسیون قند در این محصولات با تشکیل هسته‌های متعدد و سپس تقویت کریستال‌های مشخص موجب بهبود کیفیت این محصولات می‌گردد [۸۰]. این فرآیند تبلور فیزیکی بدون ورود مواد خارجی انجام می‌شود.

استخراج ترکیبات موادغذایی: از معایب تکنولوژی‌های متداول در استخراج می‌توان به مصرف بالای انرژی و مواد شیمیایی مضر (حلاها) اشاره کرد [۷۷]. اخیراً گزارشات بی‌شماری در ارتباط با توانایی بالای امواج فراصوت قدرت در استخراج ترکیبات مختلف مانند آلکالوئیدها، فلاوونوئیدها، آنتوسیانین‌ها، پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها، روغن‌های اساسی، رنگدانه‌ها، ترکیبات آروماتیک، ساپونین‌ها و غیره از منابع گیاهی منتشر شده است [۷۷]. مکانیسم اصلی استخراج با امواج فراصوت به پدیده کاویتاسیون و انفجار حباب‌ها مربوط می‌شود که باعث ایجاد اغتشاشات شدید موضعی و تلاطم‌های گرداب گونه شده که از این‌طریق انتقال جرم را افزایش می‌دهد و آزادسازی ترکیبات قابل استخراج را تسهیل و انتقال جرم را با تخریب دیواره سلولی تشدید می‌کند. استخراج با روش فراصوت روش تمیز و سبزی است که استفاده از مقادیر بالای حلال و نیز زمان فرآیند استخراج را کاهش می‌دهد [۷۷]. کیهانی و همکاران [۸۲] در استخراج ترکیبات ساپونینی از ریشه گیاه چوبک از فراصوت استفاده کردند و مشاهده کردند که عصاره گیری با امواج فراصوت در مقایسه با روش سوکسله مدت‌زمان دستیابی به عصاره بهینه را حدود ۱۲ مرتبه کوتاه‌تر کرد و شاخص تشکیل امولسیون و مقدار توانایی تشکیل کف افزایش یافت. بصیری و همکاران [۸۳] با بررسی تأثیر امواج پرقدرت فراصوت در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز بر راندمان استخراج

[1] Crystallization

روغن از دانه انار نشان دادند که در بین دو روش مورد بررسی، استخراج با امواج فراصوت بدون این‌که تاثیری بر ترکیب و کمیت اسیدهای چرب داشته باشد، بازده استحصال بیشتری دارد. همچنین آماده‌سازی دانه با آبگرم و فراصوت بازده استخراج روغن را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. افزون بر این مشخص گردید که در حضور امواج فراصوت زمان استخراج به ۳۰ دقیقه کاهش یافت. اساس این فناوری یک اصل جدید در مورد جداسازی ذرات است. امواج فراصوت پرانرژی اعمال شده به یک امولسیون با فرکانس پایین (<۳۰ کیلوهرتز) برای جداسازی امولسیون به اجزای آب و روغن آن استفاده شده است [۸٤]. نوشاد و همکاران [۸۵] از امواج فراصوت جهت استحصال پکتین از ضایعات بادمجان (پوست و کلاهک)، جعفرزاده و همکاران [۸٦] نیز برای استخراج پکتین از خمیر چغندرقند استفاده کردند. توتونچی و همکاران [۸۷] افزایش کارآیی استخراج عصاره چغندرقرمز به کمک امواج فراصوت و بتاسیکلودکسترین را گزارش کردند. استخراج کیموزین [۸۸] و β-گالاکتوزیداز [۸۹] و افزایش بازده پنیر [۳۳] از کاربردهای دیگر استفاده از فراصوت می‌باشد که در صنعت شیر گزارش شده است. در تحقیقی بر روی اثر فراصوت بر میزان آزادسازی ترکیبات فنلی در آب انگور قرمز، محققان مشاهده کردند که بیشترین ترکیبات فنلی در تیمار در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و بکارگیری فراصوت در مقایسه با تیمار حرارتی به تنهایی بود و فعالیت ضد اکسایشی و میزان آنتوسیانین‌ها در آب انگور قرمز در اثر پاستوریزاسیون و دماهای بالا به همراه شدت‌های بالای فراصوت به‌طور معنی‌داری کاهش نشان داد [۹۰]. همچنین در تحقیق دیگری، بیشترین احتباس و حفظ بتاکاروتن، ویتامین سی و فعالیت آنتی اکسیدانی در نمونه‌های زردآلو [۹۱, ۹۲] و آب آلبالو [۹۳] که تحت تیمار فراصوت با شدت مناسب قرار گرفته بودند، مشاهده شد. برای افزایش تولید الاکتیک‌اسید حاصل از لاکتوباسیلوس کازئی به‌عنوان یکی از محصولات میکروبی که کاربردهای متعدد داشته و راندمان تولید آن بسیار مهم است، محققان از فراصوت با شدت کم برای افزایش نفوذپذیری غشای سلولی استفاده کردند که منجر به بهبود فعالیت متابولیک گردید [۹٤].

انجماد و انجماد زدایی[1]: فرآیندهای انجماد و کریستالیزاسیون به‌هم مرتبط هستند. این فرآیندها ابتدا با هسته‌زایی و سپس تبلور مشخص می‌شوند [۹۵]. کاویتاسیون فراصوت به‌عنوان هسته برای تشکیل کریستال یا تخریب در هسته‌های اولیه عمل می‌کند. کریستال‌های ریز یخ بین شروع تبلور و تشکیل یخ تشکیل می‌شوند که زمان انجماد را کاهش می‌دهد [۹٦]. بااین‌حال، تخریب ساختار سلولی را کاهش می‌دهد. در انجماد با کمک فراصوت، به دلیل انتقال سریع جرم، افزایش گرما و شروع هسته‌زایی، می‌توان فرآیند انجماد را تسریع کرد [۹۷]. در ضمن ترکیدن حباب‌ها در طول کاویتاسیون، سبب تخریب کریستال‌های بزرگ موجود و کاهش اندازه و افزایش تعداد بلورها می‌شود [۷۷]. انجماد به وسیله فراصوت در داروسازی و همچنین موادغذایی با ارزش بالا و کریستالیزاسیون محصولاتی مانند تری‌گلیسرید چربی‌ها و روغن‌ها [۹۸]، چربی شیر [۹۹] و بستنی [۱۰۰] مناسب است.

خشک‌کردن موادغذایی: کاهش آب در دسترس میکروارگانیسم‌ها یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگه‌داری موادغذایی است [۷۷]. استفاده از انرژی فراصوت در خشک‌کردن بسیار امیدوارکننده است زیرا می‌تواند بدون تأثیر بر خصوصیات و کیفیت اصلی محصولات عمل کند. با فراصوت قدرتی می‌توان

[1] Freezing and defrosting

غذاهای حساس به حرارت مانند گوشت، ماهی، میوه‌ها و سبزیجات [۱۰۱] را با سرعت بیشتری و در دمای پایین‌تری نسبت به خشک‌کن‌های معمولی با هوای گرم خشک کرد [۱٦]. فراصوت می‌تواند به‌عنوان پیش‌تیمار و یا به‌عنوان کمک تیمار و ترکیب با روش‌های دیگر در خشک‌کردن مواد غذایی به‌کار برده شود [۱۰۲].

برش دادن موادغذایی: برش مواد مختلف، از استخوان گرفته تا شیرینی، با استفاده از روش‌های فراصوت دارای مزایایی نسبت به مکانیسم‌های برش معمولی است [۱۰۳]. یکی از کاربردهای جدید فراصوت، برش دادن موادغذایی است. فراصوت موجب کاهش نیروی لازم برای برش دادن موادغذایی کاهش و سرعت و بازده کار را افزایش می‌دهد که در برش موادغذایی نظیر کیک‌ها، پنیر، خمیر پیتزا، فرآورده‌های قنادی، نان، آب‌نبات و... استفاده می‌شود [۷۷]. علت کاهش نیروی لازم برای برش را می‌توان به تحریک ابزار و قطعه در لبه برش و در امتداد کناره‌های آن به دلیل برهم‌نهی حرکت برش با ارتعاش امواج فراصوت نسبت داد. نتایج نشان می‌دهد که ارتعاش فراصوت به‌طور قابل توجهی نیروی اصطکاک لغزشی را کاهش می‌دهد. بافت سطح تماس غذا بر شدت اثرات انتقال فراصوت تأثیر دارد. بافت سطح لغزنده نمونه بسیار مهم‌تر به نظر می‌رسد [۱۰٤]. برش موادغذایی با فراصوت تأثیر بصری قابل توجهی ایجاد و عملیات بسته‌بندی را تسهیل می‌کند [۱۰٤]. این تکنیک فواید زیادی دارد، ازجمله دقت و زیبایی برش و همچنین سرعت، حداقل بودن جابجایی محصول و ضایعات کمتر مواد اما عمدتاً عدم چسبندگی محصولات مختلف به تیغه و کاهش قابل‌توجه زمان مورد نیاز برای تمیز کردن تیغه [۱۰۵].

پخت مواد غذایی: درررویش متداول پخت، هنگامی‌که ماده‌غذایی در معرض دماهای بالا قرار می‌گیرد، بخش بیرونی ماده غذایی ممکن است بیش‌ازاندازه پخته‌شود که منجر به کاهش کیفیت محصول می‌گردد. با اعمال امواج فراصوت کاهش زمان پخت، حفظ رطوبت بیشتر پس‌از فرایند و در نتیجه موجب بهبود خصوصیات بافتی و تردی محصولات اتفاق می‌افتد [۷۷]. فراصوت سرعت فرآیندهای انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. کیانی و همکاران [۱۰٦] پدیده انتقال حرارت با استفاده از فراصوت در سطح را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که تابش فراصوت تأثیر امیدوارکننده‌ای بر افزایش نرخ انتقال حرارت همرفتی در طول خنک‌سازی غوطه‌وری اعمال کرد.

تغییر خواص رئولوژیکی مواد غذایی: فراصوت ممکن‌است ویسکوزیته را باتوجه به شدت آن دائمی یا موقت افزایش و کاهش دهد [۱۰۷]. در تحقیق که توسط چاندراپیلا و همکاران [۱۰۸] صورت گرفت مشخص شد که فراصوت بر میسل‌های کازئین و غلظت کلسیم تاثری نداشته و فقط ضخامت این اجزای شیر را کاهش می‌دهد که با توجه به دما، زمان و توان فراصوت می‌تواند خواص رئولوژیکی شیر را تغییر دهد. آصفی و جعفریان [۱۰۹] ظرفیت نگه‌داری آب ماست تولیدشده از شیری که توسط امواج فراصوت هموژنیزه‌شده با ماست تولیدشده از شیری که با روش متداول هموژن‌شده را مورد مقایسه قراردادند و مشاهده کردند هموژنیزاسیون به‌روش فراصوت در مقایسه با هموژنیزاسیون به روش کلاسیک موجب افزایش کارایی هموژنیزاسیون و ظرفیت نگه‌داری آب در ماست می‌شود. برخی پارامترهای آب‌انگور در اثر فراصوت مانند pH بریکس یا میزان اسیدیته، بدون تغییر باقی می‌مانند [٦٦, ۱۱۰]. ویسکوزیته غذاهای نشاسته‌ای پس از ژلاتینه شدن با استفاده از امواج فراصوت از طریق پلیمریزاسیون پلی ساکاریدهای نشاسته به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است [۱۱۱]. در نمونه‌های آب

سیب فراصوت شده در مدت ۳۰ دقیقه میزان ترکیبات پلی‌فنولیک به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و در مدت‌زمان ٦۰ دقیقه افزایش در کاروتنوئیدها، مواد معدنی (سدیم، پتاسیم و کلسیم) و ویسکوزیته را نشان می‌دهد [۱۱۲]. کیفیت آب‌میوه‌ها (پرتقال، لیموی شیرین، هویج، اسفناج) با استفاده از فراصوت و اولتراویولت نسبت به روش‌های سنتی در پارامترهایی همچون محتوی کل فنل، آنتی‌اکسیدان، میزان ویتامین سی و محتوی کربوهیدرات‌ها، ویژگی‌های حسی، رنگ و طعم، ثابت باقی می‌مانند [۱۱۳]. در تحقیقی برروی آب‌انگورقرمز، حصاری و همکاران [۱۱٤] مشاهده کردند که شدت تغییرات با تشدید شدت فراصوت در کیفیت آب‌میوه‌ها بیشتر بود. در تیمارهای فراصوت بیشترین تغییرات (مثبت یا منفی) در بالاترین شدت و مدت‌زمان تیمار فراصوت و دمای ٦۰ درجه‌سانتیگراد مشاهده‌شد. درکل نتایج مطالعه نشان می‌دهد که افزایش شدت فراصوت، دما و مدت‌زمان تیمار بر خواص کیفی تأثیر منفی می‌گذارد. لذا استفاده از شدت ٤۲/۷ میکرومتر فراصوت در دمای ٦۰ درجه سانتیگراد نسبت به پاستوریزاسیون موجب حفظ بهتر ترکیبات زیست فعال شد و کمترین تأثیر منفی را بر خصوصیات کیفی داشت.

ریزپوشانی ترکیبات موادغذایی[1]: فناوری فراصوت به‌عنوان یک تکنیک امولسیون‌سازی مؤثر، به‌ویژه برای تشکیل سیستم‌های ریزپوشانی که حاوی ترکیبات چربی‌دوست با خواص زیست فعال و طعم‌دهنده، پتانسیل خوبی دارد. امروزه تکنیک ریزپوشانی را می‌توان به‌عنوان فرآیندی برای تثبیت ترکیبات فعال از طریق ساختار سیستم‌هایی تعریف کرد که قادر به تضمین حفظ خواص شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی آن‌ها و همچنین آزادسازی یا تحویل آن‌ها در شرایط تعیین‌شده یا مطلوب باشد. امولسیون‌سازی به کمک فراصوت یک تکنیک مؤثر برای کاهش متوسط قطر قطرات امولسیون‌ها از طریق ریزبرش ایجاد شده توسط اختلال شدید میکروحباب‌های تشکیل شده بوسیله پدیده حباب صوتی است. همچنین چنین تکنیکی را می‌توان با استفاده از امولسیفایرهایی با عملکرد سریع در کاهش کشش سطحی تقویت کرد [۱۱۵]. مشخص شده است که استفاده از امواج فراصوت در شرایط مطلوب می‌تواند مزایایی مانند کنترل بیشتر بر اندازه ذرات، حلالیت بیشتر داروها، تبلور کنترل شده و تولید نانومواد را به همراه داشته باشد [۱۱٦]. مانگونت و همکاران [۱۱۷] از دو روش اولتراتوراکس و فراصوت برای ریزپوشانی عطر پنیر در ماتریس‌های کربوهیدراتی استفاده نموده و مشاهده‌کردند که از نظر راندمان ریزپوشانی، بهترین سیستم ریزپوشانی عطر پنیر با استفاده از امواج فراصوت برای مرحله امولسیون‌سازی می‌باشد که در مقایسه با زمانی که از مخلوط‌کننده اولتراتوراکس استفاده می‌شد، اندازه میکروریزپوشان کمتر و میزان حفظ عطر پنیر بالاتر بود.

کاربرد فراصوت قدرت در فرآوری انواع موادغذایی: براساس نوع و مکانیسم ایجاد، کاویتاسیون به انواع اکوستیک[2] (ناشی از فراصوت قدرت)، هیدرودینامیک، نوری و ذره‌ای تقسیم می‌شود. کاویتاسیون اکوستیک و هیدرودینامیک هستند که منجر به ایجاد شدت‌های لازم برای تغییرات شیمیایی و فیزیکی در سیستم‌های موادغذایی می‌شوند. این مزایای کاویتاسیون است که باعث می‌شود فراصوت قدرت در فرآوری موادغذایی کاربرد داشته باشد [۷۷]. فراصوت علاوه‌بر کاربرد تجاری در برخی از صنایع (شیمیایی، آرایشی، نساجی، پلیمری و پتروشیمی) مورد اخیراً در صنایع غذایی برای انواع اقلام مواد

[1] Encapsulation

[2] Acoustic

غذایی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱۸]. فناوری فراصوت اخیراً به‌عنوان جایگزین سریع، قابل‌اعتماد، نسبتاً ارزان و ساده برای عملیات‌های معمولی فرآوری مواد غذایی برای کریستالیزاسیون، امولسیون‌سازی، اختلاط و همگن‌سازی، کف‌زدایی، فعالیت آنزیمی، اصلاح ویژگی‌های عملکردی پروتئین‌های مختلف مواد غذایی، افزایش ماندگاری و کیفیت محصولات غذایی، غیرفعال‌سازی میکروبی، انجماد، نرم‌کردن، ترشی‌کردن، ذوب، خشک کردن انجمادی و تغلیظ، خشک‌کردن، استخراج طعم دهنده‌ها و تمیزکردن و ضدعفونی کردن تجهیزات فرآوری مواد غذایی مورد استفاده قرارگرفته است [۱۱۹].

فرآورده‌های گوشتی: در دهه گذشته، برخی از محققان پتانسیل استفاده از فراصوت را به تنهایی یا به‌صورت ترکیب با روش‌های دیگر برای کاربردهایی ازجمله بهبود معیارهای کیفی مانند نرمی، اصلاح ویژگی‌های عملکردی پروتئین‌ها، افزایش ماندگاری، تغییر ساختار محصولات گوشتی مورد بررسی قرار داده‌اند. کاهش نمک در نمک‌سودکردن یا مارینادکردن [۱۲۱]، و افزایش بازده پخت، افزایش نگه‌داری آب [۱۲۰]، تردکردن [۱۳۸]، پختن [۲۱]، رفع انجماد [۱۳۹]، انجماد [۳۹]، غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها [۳۹] و تعیین خصوصیات لاشه، ترکیب گوشت ازجمله کاربردهای فراصوت قدرت در گوشت و فرآورده‌های گوشتی می‌باشد [۱٤۰, ۱٤۱]. بیشتر مطالعات انجام‌گرفته در سال‌های اخیر در مراحل مختلف فرآورده‌های گوشتی برای بهبود کیفیت و کاهش بار میکروبی در فرآیند ضدعفونی‌سازی می‌باشد [۱۱۹]. همچنین پایداری اکسیداتیو، ویژگی‌های حسی و رنگ از ویژگی‌های مهم گوشت است که تحت تأثیر امواج فراصوت قرامی‌گیرند [۱۲٤].

جدول ۳- کاربردهای فرا صوت در فرآوری موادغذایی

Table 3. Applications of ultrasound in food processing

	محصولات Products	مزایا Benefits	منابع References
فرآورده‌های گوشت	مرغ، گوشت گاو، ماهی	افزایش تردی، بهبود دینامیکی آب بافت، افزایش ظرفیت نگه‌داری آب، بهبود رنگ، تغییر و تشدید *pH* و اثرات ضد میکروبی، کوتاه شدن دوره رسیدن	[۳۹, ۱۲۰-۱۲۳]
Meat products	Chicken, beef, fish	Increased tenderness, improved tissue water dynamics, increased water retention capacity, improved color, changed and intensified *pH* and antimicrobial effects, shortened ripening period	
میوه‌ها و سبزیجات	میوه‌ها و سبزیجات تازه با فرآوری حداق، آب‌میوه‌ها، پوره‌ها، روغن-های گیاهی تصفیه شده و خوراکی	کاهش بار میکروبی، (استریلیزاسیون و ضدعفونی)، تغییر رنگ، غیرفعال نمودن آنزیم‌ها و حساسیت‌زدایی، افزایش خواص خشک‌کردن، ارزیابی کیفیت و خلوص روغن‌ها	[۱۸, ۱۲۳-۱۲۶]
Fruits and vegetables	Fresh fruits and vegetables with minimal processing, juices, purees, refined and edible vegetable oils	Reducing microbial load (sterilization and disinfection), changing color, inactivating enzymes and desensitizing, increasing drying properties, assessing the quality and purity of oils	
فرآورده‌های غله‌ای	خمیر آرد، فرآورده‌های نانوایی، (نان، بیسکویت، کلوچه، ویفر، محصولات خمیری(دونات، پنکیک))	ارزیابی ویژگی‌هیا خمیر و محصولات خمیری: بافت، رئولوژی، دانسیته، شاخص حجمی. افزایش سفتی و بافت و ترکیب رنگ، بهبود خواص حسی و بصری	[۱۲٤, ۱۲۷, ۱۲۸]

Cereal products	Flour dough, bakery products (bread, biscuits, cookies, wafers, dough products (donuts, pancakes))	Evaluation of dough and dough product properties: texture, rheology, density, .bulk index Increasing firmness and texture and color combination, improving sensory and visual properties	
فرآورده‌های لبنی	شیر، ماست، پنیر، بستنی	غیرفعال نمودن میکروارگانیسم‌ها، هموژنیزاسیون، کاهش اندازه گلبول‌های چربی، افزایش خواص ارگانولپتیکی و کیفیت تغذیه‌ای، کاهش زمان رسیدن پنیر و محصولات تخمیری	[۳۳, ۴۰, ۱۰۹, ۱۲۴, ۱۲۹]
Dairy products	Milk, yogurt, cheese, ice cream	Inactivation of microorganisms, homogenization, reduction of fat globule size, increase of organoleptic properties and nutritional quality, reduction of ripening time of cheese and fermented products	
امولسیون‌ها	مایونز، سس‌ها، خامه‌ها، امولسیون‌های روغن	افزایش شاخص پایداری، ظرفیت امولسیون، شاخص فعالیت امولسیون‌ها	[۱۳۰-۱۳۴]
Emulsions	Mayonnaise, sauces, milk creams, oil emulsions	Increase in stability index, emulsion capacity, emulsion activity index	
آب Water	فاضلاب Sewage	حذف آلاینده‌های آلی و بیولوژیکی Removal of organic and biological contaminants	[۱۳۵-۱۳۷]

لی و همکاران [۱۴۲] نشان دادند که فراصوت موجب کاهش زمان ذوب شدن[1] گوشت منجمد بدون آسیب به ساختار عضلانی گردید. کاراویو و همکاران [۱۴۳] گوشت را با فراصوت مورد تیمار قرار دادند و مشاهده کردند که فراصوت pH و درخشندگی گوشت را افزایش و باعث کاهش بار میکروبی نسبت به گوشت شاهد کاهش داد. در طول مدت نمک‌سودکردن گوشت، فراصوت موجب کاهش اشیرشیاکلی و باسیلوس‌سرئوس پس از ۱۲۰ دقیقه می‌شود [۱۴۴]. فراصوت موجب تغییر در pH گوشت نیز می‌شود که می‌توان به آزادشدن یون به داخل سیتوپلاسم از سلول‌ها یا تغییرات در ساختار پروتئین نسبت داد که منجر به تغییراتی در آرایش عملکردهای یونی شده و باعث تغییر در pH عضلات می‌شود [۱۲۳]. فراصوت در افزایش نرمی گوشت و کوتاه‌کردن دوره پیری[2]، بدون هیچ تاثیری بر سایر پارامترهای کیفیت، موثراست [۱۲۲] و همچنین افزایش ظرفیت اتصال آب و انسجام گوشت می‌گردد [۱۴۵]. این به پارگی ساختار میوفیبریلار پروتئین، خردشدن ماکرومولکول‌های کلاژن، مهاجرت پروتئین و موارد دیگر نسبت داده می‌شود که پروتئولیز را همراه با افزایش تروپونین $-T$ و تخریب دسمین زمانی که گوشت تحت فرآوری فراصوت قرار می‌گیرد تسریع می‌کنند [۱۴۶]. کانگ و همکاران [۱۴۷] اثر فراصوت (۲۰ کیلوهرتز، در مدت ۱۲۰-۳۰ دقیقه) بر عضله گوشت گاو که به صورت نمک‌پاشی عمل‌آوری شده بود را مورد بررسی قراردادند و افزایش تردی، پروتئولیز دسمین و تروپونین-T، اکسیداسیون متوسط میوزین که باعث پلیمریزاسیون است را در گوشت مورد تحقیق مشاهده کردند. زو و همکاران [۱۴۸]

[1] Thawing

[2] Beef aging

نشـان دادند که فراصـوت قدرت می‌تواند به‌طور قابل توجهی میزان نمـک را افزایش دهـد و برای ظرفیـت نگـه‌داری آب، تیمـار بـا فراصـــوت می‌توانـد به‌طور قابل‌توجهی کاهش فشار و محتوای آب آزاد را کاهش دهد درحالی‌که محتوای آب تثبیت‌شـده و سـختی را بهبود بخشـــد، بـااین‌حال، اثرات معنی‌داری بر فنری، جویدن و انعطاف‌پذیری گوشت گاو ادویه‌دار مشاهده نکردند و همچنین استفاده از امواج فراصوت در حین پخـت‌وپز می‌توانـد به‌طور موثری باعث افزایش نفوذ نمـک، بهبود ظرفیـت نگـه‌داری آب و بهبود لطـافـت گوشت گاو ادویه‌دار شود.

بیشـتر داده‌های منتشـر شـده نشـان می‌دهد که راندمان ضد میکروبی فراصوت در برخی شرایط نسبتاً پایین اسـت و تنها در شرایط خاص می‌توان فراصوت را جـایگزین واقعی و موثری برای روش‌هـای ضـــد میکروبی رایج فعلی کرد [۱٤۹]. فراصوت روشی نوین برای نمک‌سـود کردن محصولاتی مانند گوشت، بجای روش‌های سـنتی می‌باشد که موجب تولید محصولات نمکی با غلظت پایین‌تر کلریدسدیم می‌گردد همچنین فرآوری بـا فراصـــوت موجـب پخش بهتر نمـک در محصول شده و نیاز به نمک در زمان نمک‌زنی را کمتر می‌کند و تشـکیل پوسـت در گوشـت خام را کاهش می‌دهد [۱۲۱, ۱۵۰, ۱۵۱]. فراصـــوت با شـــدت کم معمولـاً برای بهبود طعم، لطـافـت و کیفیت اســـتفاده می‌شود که برای دستیابی به مقبولیت مصرف‌کننده مهم است.

آلـن و هـمـکـاران [۱۵۲] بـرای از بـین بردن باکتری‌هایی که از طریق باقیمانده‌های غذا و پساب‌های سـیستم شستشو موجب آلوده شدن جعبه‌های صنعتی گوشت و ماهی و جعبه‌های حمل‌ونقل مرغ زنده شده بود، از غوطه‌وری در حمام فراصوت استفاده کردند و مشـاهدات آن‌ها نشان داد هنگامی‌که زمان غوطه وری از ۰ تـا ۱۲۰ ثـانیـه و دمـای آب از ۳۵ بـه ۵۸ درجه سـانتیگراد افزایش یـافـت، تعـداد انتروباکتری‌ها در مقایسه با مقادیر اولیه به‌تدریج کاهش یافت. بااین‌حال، ترکیـب فرآینـد فراصـــوت بـا دمای غوطه‌وری ٦۰ درجه‌سـانتی‌گراد، تعداد انتروباکتری‌ها را به مقدار زیر حد تشخیص در ۱ یا ۳ دقیقه کاهش داد.

محققان اثر پیش تیمار با فراصـوت را بر سـینتیک انتقال جرم و خصـوصـیات فیزیکوشـیمیایی و حسی فیله گوشـت بوقلمون سرخ شده به روش عمیق مورد بررسی قراردادند و مشاهده کردند که فراصوت جذب روغن را کاهش و خصـــوصـــیات حســـی را بهبود می‌بخشـــد و اســـتفـاده از آن به‌عنوان پیش‌تیمار در غذاهای سـرخ‌کردنی و فسـت‌فودها را پیشـنهاد دادند [۱۵۳].

فراصـــوت کم‌توان باوجود گران و دشـــوار بودن نسـبت به روش‌های *NMR* و تصویرنگاری با اشعه *X*، بـه‌عنوان روشـــی کـارآمد برای اندازه‌گیری ترکیب و ضـــخـامت، تعیین درصـــد بافت چربی و پروتئین و درجه‌بندی گوشـت حیوانات زنده و لاشه‌ها در صنایع غذایی را به خود اختصاص داده است [۱٥٤].

میوه‌ها و سـبزی‌ها: میوه‌ها و سـبزی‌های تازه مسـتعد تخریب سـریع هسـتند و حفظ کیفیت آن‌ها در صنایع غذایی بسـیار چالش‌برانگیز اسـت. فراصوت می‌تواند یک فناوری نوظهور در کاهش میزان صـدمات قبل و بعد از برداشـت باشد. تفسیر نتایج حاصل از فرآوری میوه‌ها و سبزی‌ها با فراصوت پیچیده است زیرا منافذ و حفره‌هـای موجود در آن‌هـا باعث پراکندگی امواج فراصوت می‌شوند و در نتیجه اثر کاهش‌دهنده‌ای روی اثر فراصـوت دارند [۱۱]. فراصـوت باعث تغییر رنگ میوه‌ها و سـبزی‌ها شـده که می‌توان آن‌را به غیرفعال شـدن احتمالی آنزیم‌های فنل پراکسـیداز و پلی فنل اکسـیداز نسبت داد [۱۲٤]. انرژی آکوستیک فراصوت به دلیل اثرات شـیمیایی و فیزیکی به اسـتخراج باقی مانده آفت‌کش‌ها کمک می‌کند. اخیراً، فراصوت روشی

مؤثر برای حذف باقی مانده آفت‌کش‌ها از میوه‌ها و سبزیجات تازه گزارش شده است [۱۲۵, ۱۵۵-۱۵۷]. حذف آفت‌کش‌ها از طریق ایجاد شدید رادیکال‌های آزاد اکسیداتیو، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته است [۱۵۸]. به‌طورکلی، راندمان حذف قابل‌توجه بقایای آفت کش‌ها توسط فراصوت در محصولات غذایی تازه به کاویتاسیون فراصوت نسبت داده می‌شود [۱۵۹]. این روش تمیزکردن برای میوه‌ها و سبزی‌های تازه مؤثر است زیرا به زمان کم‌تری نیاز دارد، رنگ و مواد مغذی و بافت را حفظ می‌کند و برای استفاده در صنایع غذایی بی‌خطر است [۱۲۵]. چن و همکاران [۱۲٦] همچنین بیان‌کردند که استفاده از فراصوت بر روی محصولات تازه می‌تواند تشکیل بیوفیلم‌ها یا میکروب‌ها را مهار یا محدود کند. همچنین فراصوت به ترد و لطیف کردن سبزیجات تازه کمک می‌کند. گروهی از محققان تأثیر فراصوت را بر ویژگی‌های ارگانولپتیک و کیفیت تغذیه‌ای انبه ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که فراصوت قوام، رنگ و محتوای فنل‌های کاروتنوئید و اسید اسکوربیک را نسبت به نمونه شاهد حفظ می‌کند [۱٦۰, ۱٦۱].

استفاده از فراصوت به‌عنوان یک تکنولوژی فرآوری غیرحرارتی به‌عنوان جایگزین مناسب بجای استفاده از روش‌های حرارتی مرسوم است زیرا به نظر می‌رسد تأثیر آن بر خواص حسی و تغذیه‌ای آب میوه‌های تازه حداقل است درحالی‌که توانایی فرآوری مایعات در دمای بسیار پایین‌تر را دارد. توانایی آن در حفظ کیفیت آبمیوه باعث افزایش مواد تشکیل‌دهنده زیست فعال می‌شود و به دلیل کاهش میکروارگانیسم‌های فاسدکننده بسیار موردتوجه است [۱۸]. در پژوهشی که توسط حصاری و همکاران [۱۱٤] بر روی ویژگی‌های شیمیایی آب‌انگور قرمز با استفاده از فراصوت همراه با حرارت صورت گرفت، نشان دادند که فراصوت همراه با حرارت حرارتی تأثیر معنی‌داری برروی بریکس، pH و اسیدیته آب انگور قرمز نداشته و حاوی بیشترین میزان فعالیت ضداکسایشی، محتوی فنلی و آنتوسیانین بود. نتایج مطالعات محققان نشان می‌دهد تیمار فراصوت می‌تواند موثرترین تیمار در حفظ خصوصیات کیفی آب آلبالو [٦٤] و آب انار [۱۳] در مقایسه با روش پاستوریزاسیون باشد. رسوبات تارتارات در صنایع آبمیوه یک مشکل عمده هست که به‌سختی مجدداً حل می‌شود و روش‌های رایج در حذف رسوبات تارتارات کارایی موثری ندارند، بتیس و پاتیس [۷٤] نشان دادند که به وسیله فراصوت با قدرت ٤۰۰ وات یا ۱ کیلووات در عرض چند دقیقه می‌توان رسوبات تارتارات را حذف کند.

ارزیابی خواص یک غذا عمدتاً از طریق تجزیه‌وتحلیل سرعت صوت انجام می‌شود. حسگرهای فراصوت به محققان اجازه می‌دهند غلظت قند موجود در شربت‌ها و آب میوه‌ها یا الکل را در برخی نوشیدنی‌ها تعیین کنند. اندازه‌گیری آنلاین و مداوم محتوای الکل آبجو در طول تخمیر با این سنسورها امکان‌پذیر است [۱٦۲].

محصولات غله‌ای: انواع مختلفی از محصولات مبتنی بر غلات مانند بیسکویت، غلات صبحانه و محصولات نانوایی وجود دارد که نان محصول اصلی غله‌ای محسوب می‌گردد [۱۲٤]. رابطه قوی بین رئولوژی خمیر و میرایی و سرعت فراصوت در خمیر وجود دارد [۱۲۸]، و امکان ارزیابی خواص فیزیکی خمیر، تعیین زمان حیاتی و پارامترهای فنی مؤثر بر فرآیند توسعه خمیر با استفاده از فراصوت با فرکانس پایین میسر است [۱٦۳, ۱٦٤]. ازطریق محاسبه انتقال سرعت فراصوت در خمیر که یک روش سریع و

کم‌هزینه است می‌توان برای کنترل تغییر قوام خمیر گندم که به دلیل ژلاتینه‌شدن پروتئین‌ها و نشاسته ایجاد می‌شود، استفاده کرد [۱٦٥]. فرآوری با فراصوت نشاسته گندم، موجب افزایش حلالیت آن و جذب روغن [۱۲۷]، کاهش ویسکوزیته و افزایش پایداری ویسکوزیته داغ و سرد، افزایش دمای خمیری شدن نشاسته گندم و سیب‌زمینی می‌شود که درواقع کمکی برای تولید نشاسته اصلاح شده فیزیکی رقیق در حالت جوش می‌تواند باشد که امروزه اغلب با روش‌های شیمیایی نظیر تیمار با اسید یا اکسیداسیون تولید می‌شوند [۱٦٦]. افزایش شدت و زمان اعمال فراصوت تأثیر مثبت بر ویژگی‌های نان دارد و موجب سفیدتر شدن رنگ نان، خواص ظاهری و بهتر بودن بافت نان شده و بیاتی نان را به تأخیر می‌اندازد [۱٦۷] در مورد سینتیک دانه شلتوک استفاده از امواج فراصوت در سطوح مختلف توان و فرکانس در مدت‌زمان استراحت دهی می‌تواند بر خصوصیات مکانیکی شلتوک اثرگذار باشد و باعث کاهش مدت‌زمان خشک شدن دانه شلتوک و مصرف انرژی ویژه شود [۱٦۸]. سفتی خمیر، بافت نان، افزایش مولفه‌های رنگ و بهبود کیفیت محصولات با خواص بصری و حسی از اثرات فراصوت می‌باشد [۱٦۹]. همچنین تیمار با فراصوت آب‌گریزی سطح خمیر آرد گندم را کاهش می‌دهد و ساختار ثانویه گلیادین، گلوتن و گلوتنین را مرتب می‌کند و خواص ساختاری گلوتن را بهبود می‌بخشد [۱۷۰].

اخیراً گزارش‌ها بی‌شماری در ارتباط با توانایی بالای امواج فراصوت قدرت در استخراج ترکیبات مختلف مانند آلکالوئیدها، فلاوونوئیدها، آنتوسیانین‌ها، پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها، روغن‌های اساسی، رنگدانه‌ها، ترکیبات آروماتیک، ساپونین‌ها و غیره از منابع گیاهی منتشر شده است [۷۷]. مکانیسم اصلی استخراج با امواج فراصوت به پدیده کاویتاسیون و انفجار حباب‌ها مربوط می‌شود که باعث ایجاد اغتشاشات شدید موضعی و تلاطم‌های گرداب گونه شده که ازاین‌طریق انتقال جرم را افزایش می‌دهد و آزادسازی ترکیبات قابل استخراج را تسهیل و انتقال جرم را با تخریب دیواره‌سلولی تشدید می‌کند. استخراج با روش فراصوت روش تمیز و سبزی است که استفاده از مقادیر بالای حلال و نیز زمان فرآیند استخراج را کاهش می‌دهد [۷۷]. فراصوت قدرت درزمینه استخراج ترکیبات زیست‌فعال، فنلیک [۱۷۱]، آرابینوکسیلان [۱۷۲] از غلات و پنتوزان از سبوس گندم [۱۷۳] و استخراج روغن از دانه‌ها [۱۷٤]، استخراج بتاگلوکان از دانه سورگوم [۱۷٥] کاربرد دارد. هرومادکوا و همکاران [۱۷٦] برای استخراج پلی‌ساکاریدها دو روش فراصوت و آب داغ قلیایی رقیق را باهم مقایسه و مشاهده کردند که میزان پلی‌ساکارید کل استخراج شده با روش فراصوت بالاتر بود. میزان بازده استخراج β-گلوکان از جو با اعمال فراصوت بهبود می‌یابد و کاویتاسیون ایجاد شده در طول فراصوت، محدودیت‌های انتقال جرم در فرآیند استخراج را بهبود می‌بخشد. فرآیند فراصوت به زمان‌ها ی استخراج بسیار کوتاه (۳ تا ۱۰ دقیقه) نیاز دارد و انرژی کمی مصرف می‌کند [۱۷۷].

فرآورده‌های لبنی: فراصوت یک فناوری کارآمد است که باعث حفظ مواد مغذی می‌شود و منجر به افزایش ماندگاری و کیفیت بهتر محصولات لبنی می‌شود و هزینه کم‌تری داشته و جهت کاربرد صنعتی، سریع و ساده است [۱۲۹]. شاید کاربردهای اصلی فراصوت قدرت در فرآوری لبنیات در تمیز کردن [٦٥]، ضدعفونی میکروبی [٥۹]، غیرفعال کردن آنزیم [٥۸] و هموژنیزاسیون [٤۰]، افزایش نگه‌داری آب ماست [۱۷۸] باشد. بااین‌حال تعدادی از کاربردهای دیگر برای استفاده از فراصوت در صنعت شیر گزارش شده است، به‌عنوان مثال، استخراج کیموزین [۸۸] و β-

گـالاکتوزیداز [۸۹] و افزایش بازده پنیر [۳۳]، پایداری ویژگی‌های رنگ، گرانروی و حسی شیرکاکائو [۱۷۹]. اســتفاده همزمان از گرما و فراصــوت تحت‌فشــار (مانوترموسـونیکاسیون) موثرتر از عملیات حرارتی به تنهایی در غیرفعال کردن پروتئاز و لیپاز مقاوم در برابر حرارت ترشـح شـده توسـط سـودوموناس فلورنس[1] اســت [٦٨]. باوجود نشــانه‌های اولیه مبنی بر اینکه فراصوت می‌تواند چندین مزیت را به‌عنوان یک روش نگـه‌داری شــیر فراهم کنـد هنوز به‌عنوان یک روش اسـتاندارد مورد اسـتفاده قرار نگرفته‌اسـت. این تقریباً می‌توانـد بـه چنـدین عـامل "منفی" که در فرآوری با فراصوت است نسبت داده شود [۳۳]. رینر و همکاران [٦٦] همچنین تشــکیل ان-آلکآن‌ها مانند هگزا-۱-ان، هپتا-۱ان، اکتا-۱-ان و نون-۱-ان را گزارش کردند که آن‌ها نیز محصولات اکسیداسیون لیپید هستند.

فراصـوت قدرت قادر به افزایش زنده ماندن سویه پروبیوتیک برای کشت‌های آغازین مورد استفاده برای تولید شـیر کشـت و محصـولات آن است. همچنین با آزادسازی آنزیم، لاکتاز و تحریک تولید اسید، هیدرولیز لـاکتوز را تســریع می‌کنـد و درنتیجه زمان تخمیر را کـاهش می‌دهـد. فرآوری فراصــوت به دلیل افزایش پپتیدهای زیســت‌فعال و الیگوســاکاریدها و کاهش محتوای لـاکتوز، خواص ارگـانولپتیـک محصــولـات شــیرتخمیرشــده را همراه بـا کیفیت تغذیه‌ای آن‌ها افزایش می‌دهـد [۱۰۲]. تخمیر شــیر در حضــور بیفیدوباکتری‌ها برای تولید ماسـت توسـط فراصـوت تسـریع می‌شود زیرا هیدرولیز لاکتوز توسط آنزیم β-گالاکتوزیداز که پس از تخریب سلول‌های باکتری آزاد می‌شـود، افزایش می‌یابد [۱۸۰]. فراصوت همچنین با آزادسـازی آنزیم‌های درون‌سـلولی، با تسـریع تجزیه ساختار پروتئین و افزایش خواص بافتی، ارگانولپتیکی و ویژگی‌هـای تغـذیه‌ای باعث کاهش زمان لازم برای رسـیدن پنیر می‌شـود [۱۸۱]. انجام پیش‌تیمار شـیر با فراصوت قبل از دلمه بستن با رنت، میزان دناتوراسیون پروتئین‌های آب‌پنیر، محتوی کلسیم محلول و فسفات، اسـتحکام ژل، اسـتحکام دلمه، چسـبندگی، ظرفیت نگه‌داری آب، اتصالات عرضی ژل دلمه پنیر را افزایش می‌دهد [۱۸۲]، درحالی‌که زمان ژله‌ای شدن امولسیون را کاهش می‌دهد. این امر به حضور گلبول‌های چربی کوچک‌تر نسـبت داده می‌شـود که با پروتئین‌های آب پنیر که تا حدی دناتوره شده، تثبیت شده‌اند. بااین‌حال دماهای شــدید و شــرایطبرشــی انجام فرآوری با فراصــوت می‌توانـد منجر به تولید هیدروکســیل و رادیکـال هـای هیدروژن شــود [۱۷] که به نوبه خود می‌توانند منجر به اکسـیداسیون لیپیدها و خراب شدن محصـول شـیر شـوند [۱۸]. فراصوت همچنین چربی شـیر را پراکنده می‌کند و موجب می‌شـود تا ماسـت همگن و چسـبناک‌تر شــود [۲۱]. مطالعه‌ای توسـط کاندراپالا و همکاران [۱۰۸] در مورد تأثیر فراصوت بر روی کازئین و کلســیم انجام شــد و نشــان داد که میســل‌های کازئین و غلظت کلســیم تغییر نمی‌کند، درحالی‌که ویسکوزیته شیر کاهش می‌یابد.

انگوین و همکـاران [۵۳] تـأثیر فراصــوت ۲۰ کیلوهرتز را بر فعـالیـت‌هـای تخمیری چهار ســویه مختلف بیفیدوباکتریوم در شیر مورد بررسی قرار دادند و نتایج آن‌ها نشـان داد که فراصوت در شرایط اعمال شــده می‌تواند زمان تخمیر مورد نیاز برای رسـیدن به pH=٤/٧ را بـرای ســه نـمونـه از چهـار نمونـه بیفیدوباکتریوم کاهش دهد و همچنین نشــان دادند که زنده ماندن هر ســه ســویه تحت تأثیر قرارگرفته از فراصـوت در پایان تخمیر با نمونه شاهد قابل مقایسه بود. در این تحقیق مشــخص کردند که ســلول‌های باکتری پروبیوتیک توسط فراصوت پاره شدند و آنزیم داخل سـلولی β-گالاکتوزیداز آزاد شدند که هیدرولیز

[1] P.fluorescens

لـاکتوز و ترانس گـالاکتوزیلاسـیون را افزایش داد و متعاقباً رشـد سلول‌های باکتریایی باقی‌مانده را در شیر تلقیح شـده در طی تخمیر افزایش داد. در بررسـی اثر فراصوت بر همگن‌شدن شیر و تخمیر ماست مشخص شـد که فراصـوت با دامنه بالا و افزایش زمان فرآیند، تأثیر بسـیار خوبی بر همگن‌سـازی داشـت و موجب کـاهش زمـان تخمیر و افزایش قـابـل‌توجـه ظرفیـت نگه‌داری آب و بهبود ویسـکوزیته شد [۱۸۳]. بهری و همکـاران [۱۸٤] با مقایسـه اثر فراصـوت پروب و حمـامی به این نتیجه رسـیدند که فراصـوت باعث افزایش عملکرد پنیر و محتوای رطوبـت و کاهش *pH* نسـبت به نمونه شـاهد می‌شـود، به‌طوری‌که بیشترین میزان رطوبـت و راندمان مربوط به تیمار فراصـوت پروب در ۲ دقیقه در دمای ۳۰ درجه‌سـانتی‌گراد بود و در پارامترهای چسبندگی و فنری بودن تغییری مشاهده نکردند.

اسـتفاده از فراصـوت با فرکانس بالاتر (بیش‌تر از ٤۰۰ کیلوهرتز) در دمـای ۳۵ درجه‌سـانتیگراد برای سـهولت جداسـازی چربی شیر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، با توجه به اینکه امواج فراصـوت در شـیر یکسـری نقاط کم‌فشـار (گره‌های کم‌فشـار) و پرفشار (گره‌هـای پرفشـار) ایجـاد می‌کنـد چربی‌ها از نقاط کم‌فشار به نقاط پرفشار مهاجرت کرده و بهم‌پیوسته و سـرعت خامه‌ای شـدن افزایش‌یافته و جداسازی آن با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد [۳].

در تولید بسـتنی، فراصوت روی مخلوطی از شیر، شـیرخشـک، خـامـه، چربی‌هـای گیـاهی، قنـدها، امـولسـیـفـایرهـا، افزودنی‌هـای مختلف، میوه‌هـا، طعم‌دهنده‌ها و رنگ‌ها استفاده می‌شود که باید در طول فرآینـد انجماد همگن، پاسـتوریزه و به آرامی همزده شـوند تا از تشـکیل کریستال‌های یخ بزرگ در هنگام انجماد جلوگیری شود. فراصوت در طول دوره انجماد برای بهبود کیفیت بستنی استفاده می‌شود. کریستال‌های یخ با اندازه و توزیع یکنواخت نقش مهمی در کیفیت محصـول دارند و هسـته‌زایی مهم‌ترین عامل کنترل، تشکیل و توزیع کریستال‌ها در هنگام انجماد است. در این مرحلـه، هوا نیز به مقدار متناسـب با آب و مواد جامد موجود در مخلوط تزریق می‌شود تا قوام خامه‌ای حاصـل شود و فراصوت باقدرت بالا کیفیت بستنی را بهبود می‌بخشـد و درعین‌حال اندازه کریسـتال‌ها را حفظ و از تشـکیل کریسـتال‌های یخ بر روی پوسـته بسـتنی جلوگیری می‌کنـد. علـاوه‌بر این، زمـان‌ها ی انجمـاد کوتـاه‌تر، کـارایی و ظرفیـت فرآینـد تولید را افزایش می‌دهد، علاوه‌بر آن قوام بستنی را بهتر و طعم خـامه‌ای ایجاد می‌کند [۸۰]. کوت و همکاران [۱۸۵, ۱۸٦] با تحقیقی که بر روی اثر فراصوت بر ویژگی‌های بسـتنی انجام دادند مشخص کردند که فراصوت اندازه ذرات بسـتنی را بـه‌طور قـابـل توجهی کاهش داد و موجـب نرم‌تر شـدن بافت بسـتنی شـد. همچنین فراصـوت موجـب کـاهش کف‌کنندگی در بسـتنی می‌گردد [۱۸۷]. فراصوت می‌تواند در فرآیند و مرحله کریستالیزاسیون بذردهی را آغاز کرده و رشد کریستال بعـدی را کنترل کنـد. بـه همین ترتیب، فرآیند انجماد تسـریع می‌شـود که منجر به کیفیت بهتر محصـول می‌شـود. این به این دلیل اسـت که فراصـوت تکه‌تکه شـدن کریسـتال را افزایش می‌دهد و بنابراین تولید کریسـتال‌های خالص کوچک‌تر با اندازه یکنواخت را بیشـتر می‌کند. همچنین از رسـوب کریستال در سطح سرد جلوگیری می‌کند و سرعت انتقال حرارت بالایی را حفظ می‌کند [۳۹, ۱۸۸, ۱۸۹]. نتایج تحقیق محققان نشـان داد که در مقایسـه با ماست به‌دست‌آمده از شیر گرم شـده معمولی (۹۰ درجه سـانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه)، ماسـت فرآوری شـده با موجب تولید ماسـت سفت‌تری شد [٦٦].

در زمینه آنالیز با استفاده از فراصوت، درصد روغن مخلوط شـده روی خامه شـیر فرآوری شـده قابل

تشخیص است و نتایج نشان می‌دهد با افزودن مواد تقلبی بیشتر بر روی شیر، سرعت فراصوت نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه می‌توان درصد تقلب را شناسایی کرد. از امواج فراصوت آنالیزی می‌توان در تعیین زمان بریدن لخته [۱۹۰-۱۹۲]، تشخیص زمان رسیدن پنیر و نیز آشکارسازی شکاف‌های نازک داخل پنیرها به دلیل تخمیرهای نامناسب و در حالت کلی برای تعیین غلظت [۱۹۳]، ساختار و شرایط فیزیکی اجزای مختلف موجود در مواد غذایی استفاده نمود [۱۹٤]. بندیتو و همکاران [۱۹۵] گزارش کردند که فراصوت با شدت پائین می‌تواند برای تشخیص زمان رسیدن پنیرها مورد استفاده قرار گیرد که این رفتار نتیجه تغییرات خاصیت ارتجاعی پنیر در طول رسیدن (افزایش مدول تغییر شکل) به دلیل از دست دادن رطوبت بود. هموژنیزاسیون شیر، جلوگیری از گرفتگی غشاها حین فیلتراسیون [۱۹٦]، امولسیفیه نمودن [۱۹۷]، جلوگیری از تشکل کریستال‌ها [۹۹]، غیرفعال سازی‌آنزیم‌ها و به‌ویژه میکروارگانیسم‌ها [۱۹۸] ازجمله کاربردهای امواج فراصوت قدرت در صنعت لبنیات است [۱۹۹]. ارزیابی و تعیین درجه رسیدگی پنیرهایی که در طول رسیدن سفت می‌شوند و ارزیابی پارامترهای حسی و تشخیص خلل و فرج ناشی از تخمیر غیرعادی از دیگر کاربردهای فراصوت می‌باشد [۱۹۳, ۲۰۰].

امولسیون‌ها: فرآیندهای صنعتی زیادی وجود دارد که از امواج فراصوت قدرت به‌عنوان وسیله‌ای برای اختلاط مواد استفاده می‌کنند [۱٦]. دامنه وسیعی از محصولات مورد استفاده از قبیل شیر، خامه، سوپ‌ها، سس‌ها، مواد آرایشی و غیره بر پایه امولسیون هستند. امولسیون‌ها درواقع دیسپرسیون‌های مایع در مایع هستند و یکی از کاربردهای فراصوت در فرآیند موادغذایی امولسیفیکاسیون و مخلوط کردن و هموژمیزاسیون است. با استفاده از امواج فراصوت کارایی هموژنیزاسیون افزایش می‌یابد، زیرا شوک‌های فشار و دمای ایجادشده در اثر کاویتاسیون سبب متلاشی‌شدن گویچه‌های چربی و افزایش تعداد آن‌ها و موجب توزیع اندازه باریک‌تر و پراکندگی یکنواخت‌تری می‌شوند که موجب کوتاه‌تر شدن فرآیند و بهبود توزیع ذرات و پایداری بیشتر امولسیون مطرح است [۷۷].

امولسیون‌ها و چربی‌هایی مانند سس مایونز، سس، خامه و غیره را می‌توان با فراصوت با شدت کم توصیف کرد. فراصوت با شدت کم به‌عنوان یک تکنیک تحلیلی قدرتمند برای ارزیابی خواص شیمیایی و فیزیکی مانند محتوای چربی جامد، محتوای روغن، سختی، تبلور، ترکیب روغن و تبلور عمل می‌کند [۲۰۱]. فراصوت یک فناوری نوین و کارآمد برای افزایش و بهبود ظرفیت امولسیون‌سازی می‌باشد [۲۰۲]. زو و همکاران مشخص کردند که شاخص فعالیت و پایداری امولسیون‌سازی و حلالیت پس از فراصوت افزایش نشان می‌دهد [۲۰۳]. کارپنتر و نیکوراتی [۲۰٤] گزارش کردند که امولسیون روغن‌خردل تهیه شده با استفاده از فراصوت، در شرایط محیطی، حتی پس از یک دوره نگه‌داری ۳ ماهه، بدون هیچ تغییر قابل توجهی مبنی بر جداسازی فاز یا تشکیل کرم، پایدار ماند. شاخص و پایداری امولسیون‌سازی نمونه‌ها با افزایش زمان تیمار فراصوت افزایش می‌یابد [۲۰۵]. نتایج تحقیق فریزاد و عباسی [۲۰٦] نشان داد که با افزایش زمان اعمال امواج فراصوت، pH و ویسکوزیته هیدروکلوئید کاهش و حلالیت و حداقل غلظت ژل‌شوندگی صمغ خرنوب افزایش می‌یابد.

کف را می‌توان تجمع حباب‌های گازی دانست که توسط یک لایه مایع بسیار نازک از هم جدا شده‌اند. در یک سیستم کف، نسبت حجمی گاز به مایع بسیار زیاد است و چگالی ظاهری به گاز نزدیک می‌شود

[۱۶]. ایجاد کف در صنایع‌غذایی ازجمله در صنایع تخمیری مشکلاتی را برای کنترل تولید و تجهیزات و موجبات آلودگی را ایجاد می‌کند. روش‌های مکانیکی مانند فراصوت قدرت با فروپاشی حباب‌ها با هر ضربه مکانیکی (تغییرات سریع فشار، نیروی برشی، نیروی فشاری، نیروی ضربه، مکش و نیروهای گریز از مرکز) موجب شکستن کف می‌شود که بیانگر روشی تمیز و بدون تماس با مایع است [۷۷].

فناوری فراصوت به‌عنوان یک تکنیک امولسیون‌سازی مؤثر، به‌ویژه برای تشکیل سیستم‌های ریزپوشانی که حاوی ترکیبات چربی‌دوست با خواص زیست‌فعال و طعم‌دهنده، پتانسیل خوبی دارد. امروزه تکنیک ریزپوشانی را می‌توان به‌عنوان فرآیندی برای تثبیت ترکیبات فعال از طریق ساختار سیستم‌هایی تعریف کرد که قادر به تضمین حفظ خواص شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی آن‌ها و همچنین آزادسازی یا تحویل آن‌ها در شرایط تعیین‌شده یا مطلوب باشد. امولسیون‌سازی به کمک فراصوت یک تکنیک مؤثر برای کاهش متوسط قطر قطرات امولسیون‌ها از طریق ریزبرش ایجاد شده توسط اختلال شدید میکروحباب‌های تشکیل شده به وسیله پدیده حباب صوتی است. همچنین چنین تکنیکی را می‌توان با استفاده از امولسیفایرهایی با عملکرد سریع در کاهش کشش سطحی تقویت کرد [۱۱۵]. پردیح و همکاران [۲۰۷] نشان دادند که تشکیل امولسیون روغن در آب یک فرآیند دومرحله‌ای است. ابتدا سطح فاز روغن توسط امواج صوتی مختل شده و از هم جدا می‌شود. ثانیاً انفجارهای کاویتاسیون باعث اختلال بیشتر و پراکنده شدن قطرات روغن می‌شود. در حین کاویتاسیون اکوستیک بین فصل مشترک فاز آبی و روغن، قطرات و ذرات فاز روغن به اندازه‌های کوچک در اثر امواج ضربه‌ای تشکیل شده در حین کاویتاسیون کاهش می‌یابد. تحت تأثیر امواج فراصوت، شکستن و ادغام قطرات روغن باعث ایجاد حالت پایدارتر با پراکندگی قطرات باریک‌تر می‌شود [۲۰۷, ۲۰۸]. مشخص شده است که استفاده از امواج فراصوت در شرایط مطلوب می‌تواند مزایایی مانند کنترل بیشتر بر اندازه ذرات، حلالیت بیشتر داروها، تبلور کنترل‌شده و تولید نانومواد را به همراه داشته باشد [۱۱۶]. مانگونت و همکاران [۱۱۷] از دو روش اولتراتوراکس و فراصوت برای ریزپوشانی عطر پنیر در ماتریس‌های کربوهیدراتی استفاده کردند و مشاهده‌کردند که از نظر راندمان ریزپوشانی، بهترین سیستم ریزپوشانی عطر پنیر با استفاده از امواج فراصوت برای مرحله امولسیون‌سازی به‌دست‌آمد که اندازه میکروریزپوشان کمتر و حفظ عطر بالاتری نسبت به زمانی که از مخلوط‌کننده اولتراتوراکس استفاده می‌شد، به‌دست‌آمد.

آب و فاضلاب: شاید یکی از سودمندترین کاربردهای فراصوت در صنعت، پتانسیل استفاده از آن در تصفیه آب و فاضلاب باشد. از بین بردن یا تبدیل آلاینده‌های آلی و حذف آلاینده‌های بیولوژیکی از اهداف اساسی تحقیقات مربوط به فراصوت است. تحقیقات اخیر نشان داده است که آلودگی‌زدایی آب از طریق تکنیک‌های فراصوت در مقایسه با سایر فرآیندها ممکن است در سیستم‌های امروزی کاربردی‌تر و امکان‌پذیر باشد [۱۳۵, ۱۳۶]. رن و همکاران [۲۰۹] دریافتند که فراصوت موجب حذف ترکیبات نیتروژن و فسفر به ترتیب ۹۶٫۸٪ و ۹۷٫۷٪ شد و آنالیز بار میکروبی نشان داد که فراصوت به‌طور قابل توجهی بر جمعیت میکروبی تأثیر می‌گذارد و می‌تواند تشکیل ساختار جمعیت میکروبی مطلوب را تسریع کند. چانگ و همکاران [۲۱۰] گزارش کردند که فراصوت می‌تواند میزان حذف مس را از ۵۵٫۷ به ۹۵٫۶٪ بهبود بخشد و اتیلن‌دی‌آمین‌ترا استیک‌اسید را تجزیه کند. محققان دو نمونه از حذف آلودگی بیولوژکی از آب شامل غیر فعال کردن پلانکتون‌های مسدودکننده

فیلترها در سیستم‌های توزیع آب و نابودی جوانه‌های جلبک‌ها را در مقیاس صنعتی نشان دادند [۱۳۷]. لی و همکاران [۲۱۱] و وانگ و همکاران [۲۱۲] در تحقیق مشابهی دریافتند که فراصوت می‌تواند به‌طور قابل توجهی فشار غشایی را کاهش و در نتیجه رسوب غشاء را کاهش دهد. در تصفیه لجن فاضلاب، فراصوت اغلب به‌عنوان پیش تصفیه برای افزایش کارایی فرآیندهای وقت‌گیر و ناکارآمد مرسوم استفاده می‌شود [۲۱۳, ۲۱٤].

مزایا و مضرات فراصوت: فراصوت یک فناوری سبز و دوستدار محیط‌زیست است که به طرز عالی فرآیندهای مختلف در صنایع‌غذایی را بهبود بخشیده‌است. همچنین به‌عنوان یک جایگزین عالی برای فناوری‌های متداول مبتنی بر حرارت که برای کیفیت محصول مضر هستند، عمل می‌کند. فراصوت منجر به تولید محصول باکیفیت بهتر در دماهای پایین‌تر، با نرخ انتقال حرارت و جرم بهبودیافته، هزینه پائین، بهبود کیفیت و خلوص محصول نهایی با افزایش خواص ارگانولپتیک، سفتی و بافت محصول می‌شود. که در انواع گروه‌های موادغذایی شامل فرآورده‌ای گوشت، میوه‌ها و سبزیجات، غلات، لبنی و امولسیون‌ها کاربرد دارد. علی‌رغم این مزیت‌ها فراصوت هنگامی‌که در شدت‌های بالا اعمال می‌شود به دلیل افزایش دما باعث تولید گرما می‌شود که می‌تواند اثرات مخربی بر ویژگی‌های ارگانولپتیکی و تغذیه‌ای محصول غذایی داشته باشد. همچنین اثربخشی فراصوت دربرابر غیرفعال‌سازی‌های میکروبی و آنزیمی کاملاً موفق نبوده‌است. بااین‌حال، ترکیب فراصوت همراه با دما و فشار ممکن است اثر هم‌افزایی آن‌را افزایش داده و باعث غیرفعال شدن شود. همچنین فراصوت با قدرت بالا ممکن‌است اثرات نامطلوب فیزیکی و شیمیایی از طریق رادیکال‌های آزاد شده در اثر کاویتاسیون برروی غذاها داشته باشد که منجر به اکسیداسیون لیپیدها می‌شود که با طعم و بو، دناتوره شدن پروتئین و کاهش محتوای فنلی کل به دلیل تخریب اسیداسکوربیک همراه‌است. کاربرد هم‌افزایی فراصوت با دما و فشار همچنین منجربه تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود که واکنشی را کاتالیز می‌کند که ممکن است به ساختار پروتئین آسیب برساند و درنتیجه بر بافت محصول غذایی تأثیر منفی بگذارد. بنابراین شدت و هم‌افزایی فراصوت باید قبل از استفاده بهینه شود.

نتیجه‌گیری

فناوری فراصوت مدت‌هاست که وجود داشته است اما کاربردهایی که شامل غذاهای مایع می‌شوند نسبتاً جدیدتر هستند. فراصوت امروزه در حال تبدیل‌شدن به یک فناوری در حال تکامل در دنیای علم و فناوری موادغذایی می‌باشد. فرکانس‌های متفاوت فراصوت سهولت فرآوری را برای کنترل کیفیت و فرآوری موادغذایی فراهم کرده است. فراصوت غیرمخرب با شدت‌کم روش ساده‌ای برای تخمین ترکیبات غذایی (میگو، لبنیات، میوه‌ها، غلات و غیره) ارائه می‌دهد. فراصوت تهاجمی با شدت بالا خواص بیوشیمیایی را ازطریق ایجاد کاویتاسیون تغییر می‌دهد. مزایای استفاده از فراصوت برای فرآوری موادغذایی مایع واضح هستند، افزایش امولسیفیکاسیون و استریلیزاسیون در دماهای پائین‌تر از فرآیندهای معمولی می‌تواند درحین حال که موجب حفظ ترکیبات فعال زیستی شود، موجب خرد شدن چربی‌ها، شکستن کازئین‌ها شده و می‌توان محصولات نوشیدنی پروبیوتیک لبنی با ویژگی‌های متفاوت، با کاهش زمان فرآوری و صرفه‌جویی اقتصادی تولید کرد. به نظر می‌رسد مصرف کنندگان نیز از خواستار تولید چنین محصولی هستند که نشان می‌دهد فرآوری با فراصوت عملکرد خوبی ازلحاظ تولید محصولی باکیفیت، بافت خوب، طعم بهتر ارائه داده‌است. اثرات نامطلوب احتمالی مربوط به

پارامترهای کلیدی کیفیت مانند رنگ، آنتوسیانین‌ها و محتوای اسیداسکوربیک اندک است و به‌طورکلی مشکل‌ساز نیست. پارامترهای دیگر کیفیت مانند میزان کدورت ممکن است درواقع با فراصوت ملایم بهبود یابد. به نظر می‌رسد می‌بایست تلاش‌های مضاعفی برای به اجرا درآمدن فراصوت در مقیاس صنعتی صورت پذیرد. لذا تحقیقات بیشتری برای بررسی اثرات ترکیبی فراصوت (بیشتر از ۲۵ کیلوهرتز) با فن‌آورهای غیرحرارتی دیگر در فرآوری موادغذایی و مسائل مربوط با هدف اصلی مورد نیاز است.

منابع

1. Ortega-Rivas, E. and I. Salmerón-Ochoa, Nonthermal food processing alternatives and their effects on taste and flavor compounds of beverages. Critical reviews in food science and nutrition, 2014. **54**(2): p. 190-207.
2. Aneja, K.R., et al., Emerging preservation techniques for controlling spoilage and pathogenic microorganisms in fruit juices. International journal of microbiology, 2014. **2014**.
3. Ashokkumar, M., Applications of ultrasound in food and bioprocessing. Ultrasonics sonochemistry, 2015. **25**: p. 17-23.
4. Crudo, D., et al., Process intensification in food industry: Hydrodynamic and acoustic cavitation for fresh milk treatment. 2014.
5. Mohammadi, V., et al., Ultrasonic techniques for the milk production industry. Measurement, 2014. **58**: p. 93-102.
6. Zinoviadou, K.G., et al., Fruit juice sonication: Implications on food safety and physicochemical and nutritional properties. Food Research International, 2015. **77**: p. 743-752.
7. Mason, T.J., High powered ultrasound in physical and chemical processing. New Acoustics. Selected Topics, 2002.
8. Firouz, M.S., A. Farahmandi, and S. Hosseinpour, Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices and dairy products industries: A review. Ultrasonics sonochemistry, 2019. **57**: p. 73-88.
9. Natarajan, S. and V. Ponnusamy, WITHDRAWN: A review on the applications of ultrasound in food processing. 2020, Elsevier.
10. Ihara, I., Ultrasonic Sensing: Fundamentals and its applications to nondestructive Evaluation. Sensors: Advancements in Modeling, Design Issues, Fabrication and Practical Applications, 2008: p. 287-305.
11. Mizrach, A., Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre- and postharvest processes. Postharvest biology and technology, 2008. **48**(3): p. 315-330.
12. Brennen, C.E., Cavitation in medicine. Interface focus, 2015. **5**(5): p. 20150022.
13. M, H.L.H.J.A.D.S.S., The Effect of Thermo-sonication Compare to pasteurization on Bioactive and Quality Parameters in Pomegranate Juice. Food Science and Technology, 2018. **15**(9): p. 463-473.
14. Pearsall, I.S., Cavitation. Chartered Mechanical Engineer, 1974. **21**(7).
15. Gogate, P.R., Hydrodynamic cavitation for food and water processing. Food and Bioprocess Technology, 2011. **4**: p. 996-1011.
16. Mason, T.J., et al., Application of ultrasound, in Emerging technologies for food processing. 2005, Elsevier. p. 323-351.
17. Makino, K., M.M. Mossoba, and P. Riesz, Chemical effects of ultrasound on aqueous solutions. Formation of hydroxyl radicals and hydrogen atoms. The Journal of physical chemistry, 1983. **87**(8): p. 1369-1377.
18. Paniwnyk, L., Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. Ultrasonics Sonochemistry, 2017. **38**: p. 794-806.
19. Birwal, P., G.P. Deshmukh, and M.R. Ravindra, Nonthermal Processing of Dairy Beverages, in Milk-Based Beverages. 2019, Elsevier. p. 397-426.

20. Zisu, B., M. Schleyer, and J. Chandrapala, Application of ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk. International Dairy Journal, 2013. **31**(1): p. 41-43.
21. Chemat, F. and M.K. Khan, Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. Ultrasonics sonochemistry, 2011. **18**(4): p. 813-835.
22. Lopez-Malo, A., et al., Multifactorial fungal inactivation combining thermosonication and antimicrobials. Journal of food engineering, 2005. **67**(1-2): p. 87-93.
23. Rokhina, E.V., P. Lens, and J. Virkutyte, Low-frequency ultrasound in biotechnology: state of the art. Trends in biotechnology, 2009. **27**(5): p. 298-306.
24. Show, K.-Y., T. Mao, and D.-J. Lee, Optimisation of sludge disruption by sonication. Water Research, 2007. **41**(20): p. 4741-4747.
25. Tiwari, B.K. and T.J. Mason, Chapter 6 - Ultrasound Processing of Fluid Foods, in Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods, P.J. Cullen, B.K. Tiwari, and V.P. Valdramidis, Editors. 2012, Academic Press: San Diego. p. 135-165.
26. Mason, T.J., Sonochemistry. 1990: Royal Society of Chemistry Cambridge, UK.
27. Ryndzionek, R. and Ł. Sienkiewicz, A review of recent advances in the single-and multi-degree-of-freedom ultrasonic piezoelectric motors. Ultrasonics, 2021: p. 106471.
28. Gondrexon, N., et al., Intensification of heat and mass transfer by ultrasound: Application to heat exchangers and membrane separation processes. Ultrasonics sonochemistry, 2015. **25**: p. 40-50.
29. Ojha, K.S., B.K. Tiwari, and C.P. O'Donnell, Effect of ultrasound technology on food and nutritional quality, in Advances in food and nutrition research. 2018, Elsevier. p. 207-240.
30. Gao, M., et al., Impact of ultrasonic probe type, frequency, and static pressure on large-scale graphene exfoliation. Ultrasonics Sonochemistry, 2024. **111**: p. 107103.
31. Patil, L. and P.R. Gogate, Ultrasound assisted synthesis of stable oil in milk emulsion: Study of operating parameters and scale-up aspects. Ultrasonics Sonochemistry, 2018. **40**: p. 135-146.
32. Singla, M. and N. Sit, Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. Ultrasonics Sonochemistry, 2021. **73**: p. 105506.
33. Cullen, P.J., B.K. Tiwari, and V. Valdramidis, Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods. 2011: Academic Press.
34. Mason, T. and J. Lorimer, A general introduction to sonochemistry, in Sonochemistry: the uses of ultrasound in chemistry. 1990, The Royal Society of Chemistry Cambridge, UK. p. 1-8.
35. Dil, E.A., et al., Optimization of process parameters for determination of trace Hazardous dyes from industrial wastewaters based on nanostructures materials under ultrasound energy. Ultrasonics sonochemistry, 2018. **40**: p. 238-248.
36. Ebrahiminia, A., M. Mokhtari-Dizaji, and T. Toliyat, Correlation between iodide dosimetry and terephthalic acid dosimetry to evaluate the reactive radical production due to the acoustic cavitation activity. Ultrasonics sonochemistry, 2013. **20**(1): p. 366-372.
37. De-Nasri, S.J., et al., Quantifying OH radical generation in hydrodynamic cavitation via coumarin dosimetry: Influence of operating parameters and cavitation devices. Ultrasonics Sonochemistry, 2022. **90**: p. 106207.
38. Ashokkumar, M., et al., Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008. **9**(2): p. 155-160.
39. Zheng, L. and D.-W. Sun, Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes—a review. Trends in Food Science & Technology, 2006. **17**(1): p. 16-23.
40. Villamiel, M. and P. de Jong, Influence of high-intensity ultrasound and heat treatment in continuous flow on fat, proteins, and native enzymes of milk. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000. **48**(2): p. 472-478.
41. Ercan, S.S. and C. Soysal, Use of ultrasound in food preservation. 2013.

42. Vo, T.P., et al., Recovering bioactive compounds from yacon (Smallanthus sonchifolius) using the ultrasonic-microwave-assisted extraction technique. Applied Food Research, 2024. **4**(2): p. 100451.
43. Castillo-Zamudio, R., et al., Use of high-power ultrasound combined with supercritical fluids for microbial inactivation in dry-cured ham. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021. **67**: p. 102557.
44. Chen, J., et al., Physical and chemical effects of ultrasound vibration on polymer melt in extrusion. Ultrasonics sonochemistry, 2010. **17**(1): p. 66-71.
45. García-Hernández, V.M., et al., Comparison of soxhlet and ultrasound methods for oil extraction from Spanish flaxseeds. Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2019: p. 332-6.
46. Prithani, R. and K.K. Dash, Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020. **64**: p. 102407.
47. Roueita, G., M. Hojjati, and M. Noshad, Study of physicochemical properties of dried kiwifruits using the natural hypertonic solution in ultrasound-assisted osmotic dehydration as pretreatment. International Journal of Fruit Science, 2020. **20**(sup2): p. S491-S507.
48. Armenta, S., S. Garrigues, and M. de la Guardia, The role of green extraction techniques in Green Analytical Chemistry. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2015. **71**: p. 2-8.
49. Alboofetileh, M., et al., Bioactivities of Nizamuddinia zanardinii sulfated polysaccharides extracted by enzyme, ultrasound and enzyme-ultrasound methods. Journal of food science and technology, 2019. **56**: p. 1212-1220.
50. Lin, B., et al., Ultrasound-assisted enzyme extraction and properties of Shatian pomelo peel polysaccharide. Ultrasonics Sonochemistry, 2023. **98**: p. 106507.
51. Hashemi, B., et al., Recent advances in liquid-phase microextraction techniques for the analysis of environmental pollutants. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2017. **97**: p. 83-95.
52. Natarajan, S. and V. Ponnusamy, A review on the applications of ultrasound in food processing. Materials Today: Proceedings, 2020.
53. Nguyen, T.M.P., Y.K. Lee, and W. Zhou, Stimulating fermentative activities of bifidobacteria in milk by highintensity ultrasound. International dairy journal, 2009. **19**(6-7): p. 410-416.
54. Mason, T.J., L. Paniwnyk, and F. Chemat, Ultrasound as a preservation technology, in Food preservation techniques. 2003, Elsevier. p. 303-337.
55. Ahmed, F. and C. Russell, Synergism between ultrasonic waves and hydrogen peroxide in the killing of micro-organisms. Journal of Applied Bacteriology, 1975. **39**(1): p. 31-40.
56. Joyce, E., et al., The development and evaluation of electrolysis in conjunction with power ultrasound for the disinfection of bacterial suspensions. Ultrasonics Sonochemistry, 2003. **10**(4-5): p. 231-234.
57. Ugarte-Romero, E., et al., Inactivation of Escherichia coli with power ultrasound in apple cider. Journal of food science, 2006. **71**(2): p. E102-E108.
58. Ordonez, J., et al., A note on the effect of combined ultrasonic and heat treatments on the survival of thermoduric streptococci. Journal of Applied Bacteriology, 1984. **56**(1): p. 175-177.
59. Hesari, J., Effect of ultrasound waves and titanium dioxide on Staphylocuccos areus and Escherichia coli in liquid Kashk. Journal of Food Processing and Preservation, 2015. **7**(2): p. 1-16.
60. Pagán, R., et al., Resistance ofListeria monocytogenesto ultrasonic waves under pressure at sublethal (manosonication) and lethal (manothermosonication) temperatures. Food Microbiology, 1999. **16**(2): p. 139-148.
61. Seymour, I., et al., Ultrasound decontamination of minimally processed fruits and vegetables. International journal of food science & technology, 2002. **37**(5): p. 547-557.
62. Patil, S., et al., The effects of acid adaptation on Escherichia coli inactivation using power ultrasound. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009. **10**(4): p. 486-490.

63. Jalilzadeh, A., et al., The effect of ultrasound treatment on microbial and physicochemical properties of Iranian ultrafiltered feta-type cheese. Journal of Dairy Science, 2018. **101**(7): p. 5809-5820.
64. Hooshyar, L., et al., Effect of ultrasonication on microbial counts and physic-chemical properties of sourcherry juice. 2020.
65. McClements, D.J., Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. Trends in Food Science & Technology, 1995. **6**(9): p. 293-299.
66. Riener, J., et al., A comparison of selected quality characteristics of yoghurts prepared from thermosonicated and conventionally heated milks. Food Chemistry, 2010. **119**(3): p. 1108-1113.
67. Kuldiloke, J., Effect of ultrasound, temperature and pressure treatments on enzyme activity and quality indicators of fruit and vegetable juices. 2002, Berlin, Techn. Univ., Diss., 2002.
68. Vercet, A., P. Lopez, and J. Burgos, Inactivation of heat-resistant lipase and protease from Pseudomonas fluorescens by manothermosonication. Journal of Dairy Science, 1997. **80**(1): p. 29-36.
69. Villamiel, M. and P. de Jong, Inactivation of Pseudomonas fluorescens and Streptococcus thermophilus in Trypticase® Soy Broth and total bacteria in milk by continuous-flow ultrasonic treatment and conventional heating. Journal of food engineering, 2000. **45**(3): p. 171-179.
70. Shoh, A., Industrial applications of ultrasound-A review I. High-power ultrasound. IEEE transactions on sonics and ultrasonics, 1975. **22**(2): p. 60-70.
71. Jenderka, K.-V. and C. Koch, Investigation of spatial distribution of sound field parameters in ultrasound cleaning baths under the influence of cavitation. Ultrasonics, 2006. **44**: p. e401-e406.
72. Harvey, G. and A. Gachagan, Simulation and measurement of nonlinear behavior in a high-power test cell. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2011. **58**(4): p. 808-819.
73. Suslick, K.S. and G.J. Price, Applications of ultrasound to materials chemistry. Annual Review of Materials Science, 1999. **29**(1): p. 295-326.
74. Bates, D. and A. Patist, Industrial applications of high power ultrasonics in the food, beverage and wine industry, in Case Studies in Novel Food Processing Technologies. 2010, Elsevier. p. 119-138.
75. Yap, A. and W. Bagnall, High power ultrasonics: a new and powerful tool for removing tartrate deposits and killing viable Brettanomyces cells in barrels. Australian and New Zealand Wine Industry Journal, 2009. **24**(5): p. 29-39.
76. Luján-Facundo, M.J., et al., Cleaning efficiency enhancement by ultrasounds for membranes used in dairy industries. Ultrasonics Sonochemistry, 2016. **33**: p. 18-25.
77. S.H. PEIGHAMBARDOUST and J. HESARI, Advanced technologies in the food industry. Vol. 0. 2015: Univercity of Tabriz.
78. Gallego-Juárez, J.A., Basic principles of ultrasound. Ultrasound in food processing: Recent advances, 2017: p. 1-26.
79. Patist, A. and D. Bates, Industrial applications of high power ultrasonics, in Ultrasound technologies for food and bioprocessing. 2010, Springer. p. 599-616.
80. De Castro, M.L. and F. Priego-Capote, Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization). Ultrasonics sonochemistry, 2007. **14**(6): p. 717-724.
81. Virone, C., et al., Primary nucleation induced by ultrasonic cavitation. Journal of crystal Growth, 2006. **294**(1): p. 9-15.
82. Keyhani, V., et al., Ultrasound-assisted extraction of saponins from chubak plant (Acanthophyllum Glandulosum) root based on their emulsification and foaming properties. Research and Innovation in Food Science and Technology, 2016. **4**(4): p. 325-342.
83. Basiri, S., et al., An investigation on the effect of ultrasound waves and pretreatment methods on the extraction of oil from pomegranate seeds. 2011.

84.Pangu, G.D. and D.L. Feke, Acoustically aided separation of oil droplets from aqueous emulsions. Chemical Engineering Science, 2004. **59**(15): p. 3183-3193.
85.Noshad, M., M.A. Mehrnia, and N. Dehghan, Evaluation of physicochemical properties of pectin extracted from eggplant waste using ultrasound technique. Iranian Food Science & Technology Research Journal, 2019. **15**(4): p. 477-484.
86.Jafarzadeh-Moghaddam, M., et al. Optimization of ultrasonically assisted extraction of pectin from sugar beet pulp. in Biol Forum Int J. 2016.
87.Tutunchi, P., et al., Extraction of red beet extract with β-cyclodextrin-enhanced ultrasound assisted extraction: A strategy for enhancing the extraction efficacy of bioactive compounds and their stability in food models. Food Chemistry, 2019. **297**: p. 124994.
88.Kim, S. and J. Zayas, Comparative quality characteristics of chymosin extracts obtained by ultrasound treatment. Journal of food science, 1991. **56**(2): p. 406-410.
89.Sakakibara, M., et al., Effect of ultrasonic irradiation on production of fermented milk with Lactobacillus delbrueckii. Ultrasonics Sonochemistry, 1994. **1**(2): p. S107-S110.
90.Sorourian, R., et al., Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from Typha domingensis: Structural characterization and functional properties. International Journal of Biological Macromolecules, 2020. **160**: p. 758-768.
91.Sakooei-Vayghan, R., et al., Effects of osmotic dehydration (with and without sonication) and pectin-based coating pretreatments on functional properties and color of hot-air dried apricot cubes. Food chemistry, 2020. **311**: p. 125978.
92.Hooshyar, L., J. Hesari, and S. Azadmard-Damirchi, Investigation of selected thermal and non-thermal preservative techniques to produce high quality and safe to drink sour cherry, red grape and pomegranate juices. Journal of food science and technology, 2020. **57**: p. 1689-1697.
93.Hooshyar, L., et al., The effect of thermal sonication of bioactive compounds and some of the quality parameters of sour cherry juice compared to the usual pasteurization method. Journal of Food Hygiene, 2019. **9**(33).
94.Dahroud, B.D., et al., Low intensity ultrasound increases the fermentation efficiency of Lactobacillus casei subsp. casei ATTC 39392. International journal of biological macromolecules, 2016. **86**: p. 462-467.
95.Qiu, L., et al., Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. Ultrasonics sonochemistry, 2020. **68**: p. 105230.
96.Chow, R., et al., A study on the primary and secondary nucleation of ice by power ultrasound. Ultrasonics, 2005. **43**(4): p. 227-230.
97.Dalvi-Isfahan, M., et al., Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields. Journal of Food Engineering, 2017. **195**: p. 222-234.
98.Kiani, H. and D.-W. Sun, Numerical simulation of heat transfer and phase change during freezing of potatoes with different shapes at the presence or absence of ultrasound irradiation. Heat and Mass Transfer, 2018. **54**: p. 885-894.
99.Martini, S., A. Suzuki, and R. Hartel, Effect of high intensity ultrasound on crystallization behavior of anhydrous milk fat. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2008. **85**: p. 621-628.
100.Mortazavi, A. and F. Tabatabaie, Study of ice cream freezing process after treatment with ultrasound. World Applied Sciences Journal, 2008. **4**(2): p. 188-190.
101.Kowalski, S., D. Mierzwa, and M. Stasiak, Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions. Drying Technology, 2017. **35**(8): p. 939-947.
102.Huang, D., et al., Application of ultrasound technology in the drying of food products. Ultrasonics Sonochemistry, 2020. **63**: p. 104950.
103.Gibert, J.M., G. Fadel, and M.F. Daqaq, On the stick-slip dynamics in ultrasonic additive manufacturing. Journal of Sound and Vibration, 2013. **332**(19): p. 4680-4695.
104.Schneider, Y., et al., Ultrasonic excitation affects friction interactions between food materials and cutting tools. Ultrasonics, 2009. **49**(6-7): p. 588-593.

105.Alarcon-Rojo, A., et al., Power ultrasound in meat processing. Meat science, 2015. **107**: p. 86-93.
106.Kiani, H., D.-W. Sun, and Z. Zhang, The effect of ultrasound irradiation on the convective heat transfer rate during immersion cooling of a stationary sphere. Ultrasonics sonochemistry, 2012. **19**(6): p. 1238-1245.
107.Patist, A. and D. Bates, Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. Innovative food science & emerging technologies, 2008. **9**(2): p. 147-154.
108.Chandrapala, J., et al., The effect of ultrasound on casein micelle integrity. Journal of dairy science, 2012. **95**(12): p. 6882-6890.
109.Asefi, N. and P. Jafarian, The Effect Of Ultrasonic Homogenization On Water Holding Capacity Of Yoghurt. 2013.
110.Aadil, R.M., et al., Combined effects of sonication and pulsed electric field on selected quality parameters of grapefruit juice. LWT-Food Science and Technology, 2015. **62**(1): p. 890-893.
111.Iida, Y., et al., Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008. **9**(2): p. 140-146.
112.Abid, M., et al., Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice. Ultrasonics sonochemistry, 2013. **20**(5): p. 1182-1187.
113.Khandpur, P. and P.R. Gogate, Understanding the effect of novel approaches based on ultrasound on sensory profile of orange juice. Ultrasonics sonochemistry, 2015. **27**: p. 87-95.
114.Hesari, J., et al., The Effect of Thermal Sonication on the Chemical Properties of Red Grape Juice Compared to the usual Pasteurization Method. Food Processing and Preservation Journal, 2020. **11**(2): p. 21-34.
115.Silva, E.K., et al., Encapsulation of bioactive compounds using ultrasonic technology, in Ultrasound: Advances for food processing and preservation. 2017, Elsevier. p. 323-350.
116.Sarode, C., Y. Jagtap, and P. Gogate, Ultrasound for Improved Encapsulation and Crystallization with Focus on Pharmaceutical Applications, in Optimization of Pharmaceutical Processes. 2022, Springer. p. 193-229.
117.Mongenot, N., S. Charrier, and P. Chalier, Effect of ultrasound emulsification on cheese aroma encapsulation by carbohydrates. Journal of Agricultural and Food chemistry, 2000. **48**(3): p. 861-867.
118.Soria, A.C. and M. Villamiel, Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. Trends in food science & technology, 2010. **21**(7): p. 323-331.
119.Turantaş, F., G.B. Kılıç, and B. Kılıç, Ultrasound in the meat industry: General applications and decontamination efficiency. International journal of food microbiology, 2015. **198**: p. 59-69.
120.Wang, A., et al., Changes in calpain activity, protein degradation and microstructure of beef M. semitendinosus by the application of ultrasound. Food Chemistry, 2018. **245**: p. 724-730.
121.Cárcel, J., et al., High intensity ultrasound effects on meat brining. Meat Science, 2007. **76**(4): p. 611-619.
122.Chang, H.J., et al., Effects of ultrasound treatment on connective tissue collagen and meat quality of beef semitendinosus muscle. Journal of Food Quality, 2015. **38**(4): p. 256-267.
123.Stadnik, J. and Z.J. Dolatowski, Influence of sonication on Warner-Bratzler shear force, colour and myoglobin of beef (m. semimembranosus). European Food Research and Technology, 2011. **233**: p. 553-559.
124.Bhargava, N., et al., Advances in application of ultrasound in food processing: A review. Ultrasonics sonochemistry, 2021. **70**: p. 105293.
125.Azam, S.R., et al., Efficacy of ultrasound treatment in the removal of pesticide residues from fresh vegetables: A review. Trends in Food Science & Technology, 2020. **97**: p. 417-432.
126.Chen, F., M. Zhang, and C.-h. Yang, Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review. Ultrasonics sonochemistry, 2020. **63**: p. 104953.

127.Jamal Abadi, M. and S. Sarem Nejad, Investigation on the Physicochemical Properties of Ultrasound Treated Wheat Starch. Journal of food science and technology(Iran), 2015. **13**(53): p. 127-136.
128.Ross, K., L. Pyrak-Nolte, and O. Campanella, The use of ultrasound and shear oscillatory tests to characterize the effect of mixing time on the rheological properties of dough. Food Research International, 2004. **37**(6): p. 567-577.
129.Akdeniz, V. and A.S. Akalın, New approach for yoghurt and ice cream production: High-intensity ultrasound. Trends in Food Science & Technology, 2019. **86**: p. 392-398.
130.Esmaeilzadeh Kenari, R. and A. Nemati, The effectiveness of ultrasound bath and probe treatments on the quality of baking and shelf life of cupcakes. Food Science & Nutrition, 2020. **8**(6): p. 2929-2939.
131.Zhang, Z., et al., Hydrodynamic cavitation as an efficient method for the formation of sub-100 nm O/W emulsions with high stability. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016. **24**(10): p. 1477-1480.
132.Anandan, S., et al., Physicochemical characterization of black seed oil-milk emulsions through ultrasonication. Ultrasonics Sonochemistry, 2017. **38**: p. 766-771.
133.Leong, T.S., et al., Preparation of water-in-oil-in-water emulsions by low frequency ultrasound using skim milk and sunflower oil. Food Hydrocolloids, 2017. **63**: p. 685-695.
134.Shanmugam, A. and M. Ashokkumar, Functional properties of ultrasonically generated flaxseed oil-dairy emulsions. Ultrasonics sonochemistry, 2014. **21**(5): p. 1649-1657.
135.Mahamuni, N.N. and Y.G. Adewuyi, Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound for waste water treatment: a review with emphasis on cost estimation. Ultrasonics sonochemistry, 2010. **17**(6): p. 990-1003.
136.Kyllönen, H., et al., Experimental aspects of ultrasonically enhanced cross-flow membrane filtration of industrial wastewater. Ultrasonics sonochemistry, 2006. **13**(4): p. 295-302.
137.Mason, T., et al., Potential uses of ultrasound in the biological decontamination of water. Ultrasonics sonochemistry, 2003. **10**(6): p. 319-323.
138.Peña-González, E., et al., Quality and sensory profile of ultrasound-treated beef. Italian Journal of Food Science, 2017. **29**(3).
139.Miles, C., M. Morley, and M. Rendell, High power ultrasonic thawing of frozen foods. Journal of Food Engineering, 1999. **39**(2): p. 151-159.
140.Nollet, L.M., et al., Handbook of meat, poultry and seafood quality. 2012: Wiley Online Library.
141.Dikeman, M., Animal growth and empty body composition. The science of meat quality, 2013: p. 29-48.
142.Li, D., et al., The comparison of ultrasound-assisted thawing, air thawing and water immersion thawing on the quality of slow/fast freezing bighead carp (Aristichthys nobilis) fillets. Food chemistry, 2020. **320**: p. 126614.
143.Caraveo, O., et al., Physicochemical and microbiological characteristics of beef treated with high-intensity ultrasound and stored at 4°C. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015. **95**(12): p. 2487-2493.
144.Kang, D., et al., Inactivation of Escherichia coli O157: H7 and Bacillus cereus by power ultrasound during the curing processing in brining liquid and beef. Food Research International, 2017. **102**: p. 717-727.
145.Mulet, A., et al., Noninvasive ultrasonic measurements in the food industry. Food Reviews International, 2002. **18**(2-3): p. 123-133.
146.Barekat, S. and N. Soltanizadeh, Effects of ultrasound on microstructure and enzyme penetration in beef longissimus lumborum muscle. Food and Bioprocess Technology, 2018. **11**: p. 680-693.
147.Kang, D.-c., et al., Effects of ultrasound on the beef structure and water distribution during curing through protein degradation and modification. Ultrasonics Sonochemistry, 2017. **38**: p. 317-325.

148.Zou, Y., et al., Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking. International Journal of Food Science and Technology, 2018. **53**(3): p. 828-836.
149.Arce-Garcia, M., et al. Ultrasound treatments and antimicrobial agents effects on Zygosaccharomyces rouxii. in IFT Annual Meeting Book of Abstracts. 2002.
150.Hatloe, J., Methods for pickling and/or marinating non-vegetable foodstuff raw material. Int. Pat. WO, 1995. **9518537**.
151.Sánchez, E.S., et al., Effect of acoustic brining on the transport of sodium chloride and water in Mahon cheese. European Food Research and Technology, 2000. **212**: p. 39-43.
152.Allen, V.M., et al., Effect of ultrasonic treatment during cleaning on the microbiological condition of poultry transport crates. British poultry science, 2008. **49**(4): p. 423-428.
153.Sarbaz, N., M. Dost, and M. Aliabadi, Evaluation of the effect of ultrasonic pretreatment on the kinetics of mass transfer and physicochemical and sensory properties of deep-fried turkey meat fillet. 2018.
154.Crews Jr, D. and R. Kemp, Genetic evaluation of carcass yield using ultrasound measures on young replacement beef cattle. Journal of animal science, 2002. **80**(7): p. 1809-1818.
155.da Silva Malheiros, P., et al., Development and characterization of phosphatidylcholine nanovesicles containing the antimicrobial peptide nisin. Food Research International, 2010. **43**(4): p. 1198-1203.
156.Zhou, Q., et al., The effects and mechanism of using ultrasonic dishwasher to remove five pesticides from rape and grape. Food chemistry, 2019. **298**: p. 125007.
157.Yu, C., et al., A new household ultrasonic cleaning method for pyrethroids in cabbage. Food Science and Human Wellness, 2020. **9**(3): p. 304-312.
158.Deshmukh, N.S. and M.P. Deosarkar, A review on ultrasound and photocatalysis-based combined treatment processes for pesticide degradation. Materials Today: Proceedings, 2022. **57**: p. 1575-1584.
159.Cengiz, M.F., et al., A novel technique for the reduction of pesticide residues by a combination of low-intensity electrical current and ultrasound applications: A study on lettuce samples. Food Chemistry, 2021. **354**: p. 129360.
160.Valente, M., A. Prades, and D. Laux, Potential use of physical measurements including ultrasound for a better mango fruit quality characterization. Journal of Food Engineering, 2013. **116**(1): p. 57-64.
161.Santos, J.G., et al., Influence of ultrasound on fresh-cut mango quality through evaluation of enzymatic and oxidative metabolism. Food and Bioprocess Technology, 2015. **8**: p. 1532-1542.
162.Contreras, N.I., et al., Analysis of the sugar content of fruit juices and drinks using ultrasonic velocity measurements. International journal of food science & technology, 1992. **27**(5): p. 515-529.
163.Elmehdi, H., J. Page, and M. Scanlon, Using ultrasound to investigate the cellular structure of bread crumb. Journal of Cereal Science, 2003. **38**(1): p. 33-42.
164.Skaf, A., et al., A new acoustic technique to monitor bread dough during the fermentation phase. Journal of Food Engineering, 2009. **93**(3): p. 365-378.
165.Petrauskas, A., Evaluation of porous food products by using ultrasonic methods. Ultragarsas/Ultrasound, 2007. **62**(3): p. 20-25.
166.Karimi, M., et al., The effect of ultrasound on some characteristics of wheat and potato starch. 2008.
167.Maghsoudlou, Y., S.R. Falsafi, and H. Rostamabadi, Effect of sonication on physical, chemical and functional properties of oat starch. Journal of Food Processing and Preservation, 2020. **12**(1): p. 145-160.
168.KHODABADI, F.N., et al., Effect of Ultrasound on Drying Kinetics of Rough Rice at Tempering Duration in an Infrared-Hot Air Combined Dryer. 2020.

169.Jalali, M., et al., The effect of the ultrasound process and pre-gelatinization of the corn flour on the textural, visual, and sensory properties in gluten-free pan bread. Journal of Food Science and Technology, 2020. **57**: p. 993-1002.
170.Zhang, Y., et al., Effects of ultrasound-assisted freezing on the water migration of dough and the structural characteristics of gluten components. Journal of Cereal Science, 2020. **94**: p. 102893.
171.Wang, J., et al., Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from wheat bran. Food chemistry, 2008. **106**(2): p. 804-810.
172.Wang, J., et al., Optimisation of ultrasound-assisted enzymatic extraction of arabinoxylan from wheat bran. Food chemistry, 2014. **150**: p. 482-488.
173.Emamiyan, M., et al., Extraction of pentosans from wheat bran by conventional and combined methods. Journal of food science and technology(Iran), 2020. **16**(97): p. 37-49.
174.Gorji, N., et al., Evaluation of physicochemical properties of sour-orange seed oil extracted by different methods. Journal of food science and technology(Iran), 2015. **13**(54): p. 121-133.
175.Naghipour, f., et al., sorghum pretreatment by ultrasound for improvement of β-glucan extraction by hot water method and evaluation of it's physicochemical properties. 2018.
176.Hromadkova, Z., A. Ebringerova, and P. Valachovič, Comparison of classical and ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from Salvia officinalis L. Ultrasonics sonochemistry, 1999. **5**(4): p. 163-168.
177.Benito-Román, Ó., E. Alonso, and M. Cocero, Ultrasound-assisted extraction of β-glucans from barley. LWT-Food Science and Technology, 2013. **50**(1): p. 57-63.
178.Şengül, M., et al., The effect of ultrasonic homogenization on water holding capacity of yogurt. 2009.
179.Ostadzadeh, M., S. Abbasi, and M.R. Ehsani, Effect of ultrasonication on cacao particle size, color, viscosity, and sensory properties of cacao flavored milk. 2012.
180.Sfakianakis, P. and C. Tzia, Conventional and innovative processing of milk for yogurt manufacture; development of texture and flavor: A review. Foods, 2014. **3**(1): p. 176-193.
181.Gómez, M., et al., Characterization of cake batters by ultrasound measurements. Journal of Food Engineering, 2008. **89**(4): p. 408-413.
182.Liu, Z., et al., Ultrasound improves the renneting properties of milk. Ultrasonics sonochemistry, 2014. **21**(6): p. 2131-2137.
183.Wu, H., G.J. Hulbert, and J.R. Mount, Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2000. **1**(3): p. 211-218.
184.Bahri, S.M.H. and R. Kenari, The effects of ultrasound waves on yield, texture and some qualitative characteristics of cheese. Iranian Food Science and Technology Research Journal, 2018. **14**(3): p. 41-51.
185.Kot, A., A. Kamińska-Dwórznicka, and E. Jakubczyk, Study on the influence of ultrasound homogenisation on the physical properties of vegan ice cream mixes. Applied sciences, 2022. **12**(17): p. 8492.
186.Kamińska-Dwórznicka, A. and A. Kot, The Physical Properties and Crystal Structure Changes of Stabilized Ice Cream Affected by Ultrasound-Assisted Freezing. Processes, 2024. **12**(9): p. 1957.
187.Jambrak, A., et al., Experimental design and optimization of ultrasound treatment: Functional and physical properties of sonicated ice cream model mixtures. J. Food Process. Technol, 2012. **3**: p. 145.
188.Mason, T.J., Developments in ultrasound—non-medical. Progress in biophysics and molecular biology, 2007. **93**(1-3): p. 166-175.
189.Luque de Castro, M. and F. Priego-Capote, Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization). Ultrasonics sonochemistry, 2007. **14**(6): p. 717-724.
190.Jiménez, A., et al., Contributions to ultrasound monitoring of the process of milk curdling. Ultrasonics, 2017. **76**: p. 192-199.

191.Derra, M., et al., Estimation of coagulation time in cheese manufacture using an ultrasonic pulse-echo technique. Journal of Food engineering, 2018. **216**: p. 65-71.
192.Derra, M., et al., Prediction of milk coagulation time using an ultrasonic experimental and theoretical method based on Argand diagram. Journal of Food Measurement and Characterization, 2017. **11**: p. 1851-1862.
193.Benedito, J., et al., Use of ultrasound to assess Cheddar cheese characteristics. Ultrasonics, 2000. **38**(1-8): p. 727-730.
194.Crespo, A., et al., Application of ultrasound for quality control of Torta del Casar cheese ripening. Journal of Dairy Science, 2020. **103**(10): p. 8808-8821.
195.Benedito, J., et al., Cheese maturity assessment using ultrasonics. Journal of Dairy Science, 2000. **83**(2): p. 248-254.
196.Jin, Y., et al., Effects of ultrasound on cross-flow ultrafiltration of skim milk: Characterization from macro-scale to nano-scale. Journal of membrane science, 2014. **470**: p. 205-218.
197.Juliano, P., et al., Enhanced creaming of milk fat globules in milk emulsions by the application of ultrasound and detection by means of optical methods. Ultrasonics sonochemistry, 2011. **18**(5): p. 963-973.
198.Scudino, H., et al., Ultrasound stabilization of raw milk: Microbial and enzymatic inactivation, physicochemical properties and kinetic stability. Ultrasonics sonochemistry, 2020. **67**: p. 105185.
199.Babaei, F., J. Hessari, and H. Jadeiri, Application of ultrasound waves in the dairy industry, in The First National Conference on Developing Comprehensive Strategic Quality in Food Safety. 2014.
200.Cho, B., J. Irudayaraj, and M.C. Bhardwaj, Rapid measurement of physical properties of Cheddar Cheese using a non–contact ultrasound technique. Transactions of the ASAE, 2001. **44**(6): p. 1759.
201.Zhu, Z., et al., Effects of sonication on the physicochemical and functional properties of walnut protein isolate. Food Research International, 2018. **106**: p. 853-861.
202.Higuera-Barraza, O., et al., Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins. Ultrasonics sonochemistry, 2016. **31**: p. 558-562.
203.Carpenter, J. and V.K. Saharan, Ultrasonic assisted formation and stability of mustard oil in water nanoemulsion: Effect of process parameters and their optimization. Ultrasonics Sonochemistry, 2017. **35**: p. 422-430.
204.Albano, K.M. and V.R. Nicoletti, Ultrasound impact on whey protein concentrate-pectin complexes and in the O/W emulsions with low oil soybean content stabilization. Ultrasonics Sonochemistry, 2018. **41**: p. 562-571.
205.Yanjun, S., et al., Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate. Journal of Food Engineering, 2014. **124**: p. 11-18.
206.Farizad, S. and H. Abbasi, Effect of ultrasonic waves on structural, functional and rheological properties of locust bean gum. Iranian Food Science and Technology Research Journal, 2023. **19**(2): p. 365-381.
207.Perdih, T.S., M. Zupanc, and M. Dular, Revision of the mechanisms behind oil-water (O/W) emulsion preparation by ultrasound and cavitation. Ultrasonics sonochemistry, 2019. **51**: p. 298-304.
208.Plüisch, C.S. and A. Wittemann, Assembly of nanoparticles into “colloidal molecules”: toward complex and yet defined colloids with exciting perspectives. Advances in Colloid Science, 2016: p. 237-264.
209.Ren, H.-Y., et al., Ultrasonic enhanced simultaneous algal lipid production and nutrients removal from non-sterile domestic wastewater. Energy Conversion and Management, 2019. **180**: p. 680-688.

210.Chang, J.-H., et al., The electrochemical phenomena and kinetics of EDTA–copper wastewater reclamation by electrodeposition and ultrasound. Separation and Purification Technology, 2009. **68**(2): p. 216-221.
211.Li, D., et al., Optimization of the operating parameters for online ultrasonic on controlling membrane fouling in SMBR. Desalination and Water Treatment, 2013. **51**(19-21): p. 3832-3839.
212.Wang, Z., et al., Enhanced denitrification performance of Alcaligenes sp. TB by Pd stimulating to produce membrane adaptation mechanism coupled with nanoscale zero-valent iron. Science of The Total Environment, 2020. **708**: p. 135063.
213.Yin, X., et al., A review on the dewaterability of bio-sludge and ultrasound pretreatment. Ultrasonics Sonochemistry, 2004. **11**(6): p. 337-348.
214.Mason, T.J., Sonochemistry and sonoprocessing: the link, the trends and (probably) the future. Ultrasonics Sonochemistry, 2003. **10**(4-5): p. 175-179.