فراصوت

یک فناوری سبز و نوین در ماشین‌ها و تجهیزات صنایع غذایی

محمود سلطانی فیروز

عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج

mahsoltani@ut.ac.ir

چکیده

فراصوت پر شدت (HIUS) یک فناوری سبز است که می‌تواند منجر به بهبود نرخ انتقال حرارت و جرم، ارائه یک تکنیک پردازش سریع‌تر و محدود کردن هزینه‌های تولید با افزایش بازده فرآیند شود. در فرآوری مواد غذایی، فراصوت به‌عنوان یک فناوری نوین امیدوارکننده برای سرعت بخشیدن به فرآیندها و تولید محصولات باکیفیت بالا در نظر گرفته می‌شود. این مقاله کاربردهای اخیر HIUS را برای فرآوری محصولات غذایی و مزایا و معایب این فناوری را ذکر می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که HIUS به دلیل اثرات مثبت آن بر کیفیت و حفظ خواص غذایی اولیه و ویژگی‌های حسی، ابزار مفیدی برای فرآوری محصول غذایی است. با مطالعه آخرین تحقیقات و پیشرفت‌ها درزمینه‌ی کاربردهای فراصوت، تأییدشده است که این تکنیک می‌تواند در تسریع فرآیندها، کاهش انرژی موردنیاز، افزایش بهره‌وری و تولید مواد غذایی باکیفیت بهتر مفید باشد. باوجوداین، به‌منظور حل چالش‌های پیش رو و برای کاربردهای بالقوه فناوری HIUS، تحقیقات بیشتری در زمینه‌های ذکرشده باید گسترش یابد. همچنین با پیشرفت تکنولوژی، تجهیزات پیشرفته‌تر، مبدل‌های فراصوت و ابزار دقیق‌تری معرفی می‌شوند که برای رفع چالش‌های کنونی باید در این زمینه به کار گرفته شوند؛ بنابراین تحقیقات آینده منجر به ارتقا و صنعتی شدن این فناوری خواهد شد.

کلمات کلیدی: فراصوت، کاویتاسیون، بهبود فرآیند، افزایش کیفیت.

مقدمه

فراصوت یک فناوری نوآورانه و مبتنی بر کاربرد امواج مکانیکی با فرکانس ۲۰ kHz تا ۱۰ MHz است که می‌توان آن را در دو محدوده طبقه‌بندی کرد: فراصوت با شدت پایین[1] (LIUS) که از فرکانس‌های در محدوده ۱۰۰ kHz تا ۱۰ MHz استفاده می‌کند و در شدت‌های کمتر از ۱ $W.cm^{-2}$ به کار گرفته می‌شود، درحالی‌که فراصوت پرشدت[2] (HIUS) از شدت‌های بالاتر از ۱ Wcm^{-2} در فرکانس های پایین بین ۲۰ kHz تا ۱۰۰ kHz استفاده می‌کند [۱]. HIUS توانایی تغییر خواص شیمیایی و فیزیکی مواد غذایی در فیلتراسیون، خشک‌کردن، استریل کردن، استخراج، نگهداری مواد غذایی، امولسیون کردن و غیره را دارد [۲]. از مزایای کاربرد HIUS در ماشین‌های صنایع غذایی می‌توان به افزایش راندمان، بهبود انتقال جرم و حرارت، کاهش زمان پردازش، افزایش اختلاط فیزیکی، کاهش دمای فرآوری، استخراج انتخابی و افزایش عملکرد اشاره کرد. علاوه بر این، HIUS می‌تواند در استراتژی «فناوری‌های سبز در تولید غذای سبز» به‌عنوان ابزاری کارآمد برای اطمینان از تولید باکیفیت بالا و ایمن مواد غذایی استفاده شود.

در میان فناوری‌های نوین فرآوری مواد غذایی، HIUS به دلیل عملکرد ساده، کنترل آسان، اثرات مطلوب بر خواص فیزیکو شیمیایی مواد غذایی و شرایط عملیاتی ملایم موردتوجه دانشمندان قرارگرفته است. این فناوری از امکان دستیابی به تولید صنعتی [۳] برخوردار است و پتانسیل بالایی برای افزایش مقیاس برای تولید انبوه محصولات غذایی دارد. با ترکیب مزایای HIUS با سایر فناوری‌های سنتی برای فرآوری محصولات غذایی، سیستم‌های جدیدی در مقیاس تحقیقاتی و نمونه اولیه طراحی می‌شوند که با رفع اشکالات و بهینه سازی، می‌توان این سیستم‌ها را برای تولید صنعتی تجاری کرد [۴].

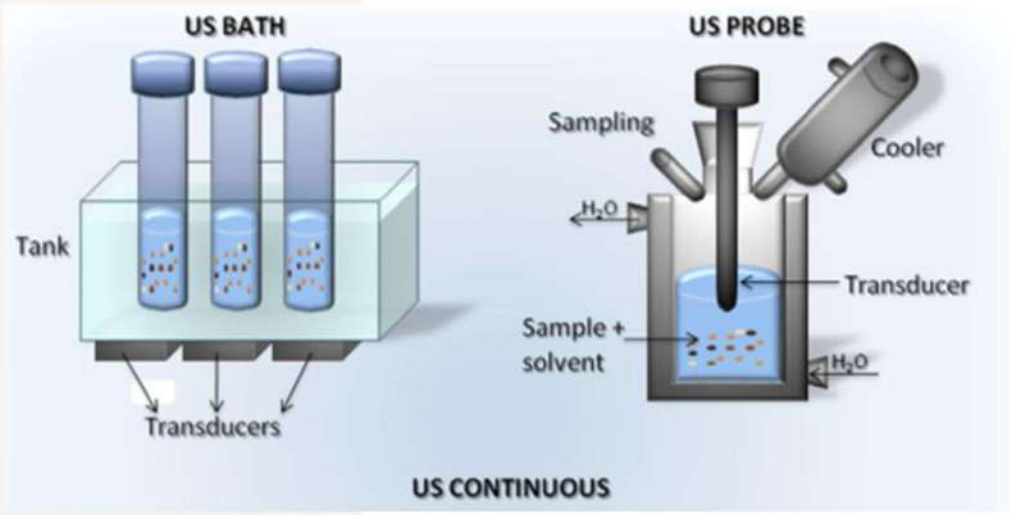
در اکثر موارد، HIUS باید به‌عنوان یک فناوری کمکی در نظر گرفته شود که عملکرد فرآوری اصلی را تشدید می‌کند. به‌عنوان‌مثال، در پاستوریزاسیون حرارتی، اثر HIUS بر غیرفعال سازی میکروبی در دماهای پایین‌تر از روش مرسوم کارآمدتر است که به حفظ کیفیت شیر به کاهش دناتوره شدن پروتئین کمک می‌کند [۴]؛ بنابراین به نظر می‌رسد HIUS پتانسیل بالایی در تسریع و بهبود فرآیندهای غذایی و همچنین به حداقل رساندن تلفات کیفیت محصول و تخریب ناشی از چنین فرآیندهایی دارد. ازاین‌رو، نیاز زیادی به تحقیقات مستمر در مورد توسعه فرآیندهای به کمک HIUS وجود دارد.

تجهیزات فراصوت و مکانیسم اثر

حمام فراصوت و پروب فراصوت (شکل ۱) انواع اصلی دستگاه‌های HIUS هستند که برای فرآوری محصولات غذایی استفاده می شوند. این دستگاه‌ها را می‌توان به‌صورت جداگانه مورداستفاده قرار داد و یا با سایر سیستم‌های معمولی ادغام کرد.

سیستم پروب فراصوت که معمولاً در محدوده ۲۰ kHz کار می‌کند دارای چندین بخش مانند مبدل است که به یک پروب متصل می‌شود و یک تقویت‌کننده که شدت فراصوت را افزایش می‌دهد [۵]. پروب فراصوت معمولاً از تیتانیوم ساخته می شود و مستقیماً امواج صوتی را از طریق یک شیپوری فراصوت در محیط مایع منتشر می‌کند. پروب سیستم فراصوت را می‌توان بر روی واحدهای فرآوری نصب و با آن‌ها هماهنگ کرد. درحالی که حمام فراصوت به‌طور غیرمستقیم نمونه را با استفاده از مبدل‌های ساندویچی نصب‌شده در خارج از دیواره مخزن، فراصوت‌دهی می‌کند. معمولاً در فراصوت‌دهی محصول جامد از یک محیط واسط مایع استفاده می‌شود که اغلب آب است.

1 - Low intensity ultrasound
2 - High intensity ultrasound



شکل ۱
پروب و حمام فراصوت
در فرآوری محصولات
غذایی[۱۰]

یکی از نقاط ضعف حمام فراصوت میرایی و کاهش شدت امواج فراصوت توسط آب داخل حمام است، یکی دیگر از معایب حمام فراصوت نسبت به سیستم‌های پروب، پایین بودن توان تحویلی به مواد هدف است [۶]. فراصوت در منطقه وسیع‌تری پراکنده است و بنابراین شدت توان آن تقریباً ۱۰۰ برابر کمتر از سیستم پروب است [۷].

حمام فراصوت ابزار قدرتمندی نیست و در آن قدرت فراصوت داده‌شده توسط حمام فراصوت معمولی بین ۱ تا ۵ $W.cm^{-2}$ است. پارامترهای مؤثری که باید در هنگام استفاده از حمام فراصوت در نظر گرفته شوند عبارت‌اند از: حجم مایع، زمان تیماردهی، دمای مایع داخل حمام، فرکانس و موقعیت نمونه داخل حمام [۸]. اخیراً دستگاه‌های حمام با ویژگی‌های فرکانس چندگانه فراصوت در فرآوری مواد غذایی به کار می‌روند که هم‌زمان با استفاده از مبدل‌های فراصوت با فرکانس‌های مختلف، به ترتیب در پایین و کنار کار می‌کنند که نتیجه آن یک توزیع یکنواخت توان فراصوت است [۹].

مهم‌ترین پدیده‌ای که در فرایند فراصوت‌دهی محصول اتفاق می‌افتد، کاویتاسیون یا حفره‌زایی است. این پدیده عبارت است از تشکیل، رشد و فروپاشی حباب‌ها حاوی گاز در محیط مایع. فروریزش حباب ایجادشده یک انفجار میکروسکوپی است که باعث ایجاد تلاطم شدید موضعی و آزاد شدن انرژی گرمایی می‌شود.

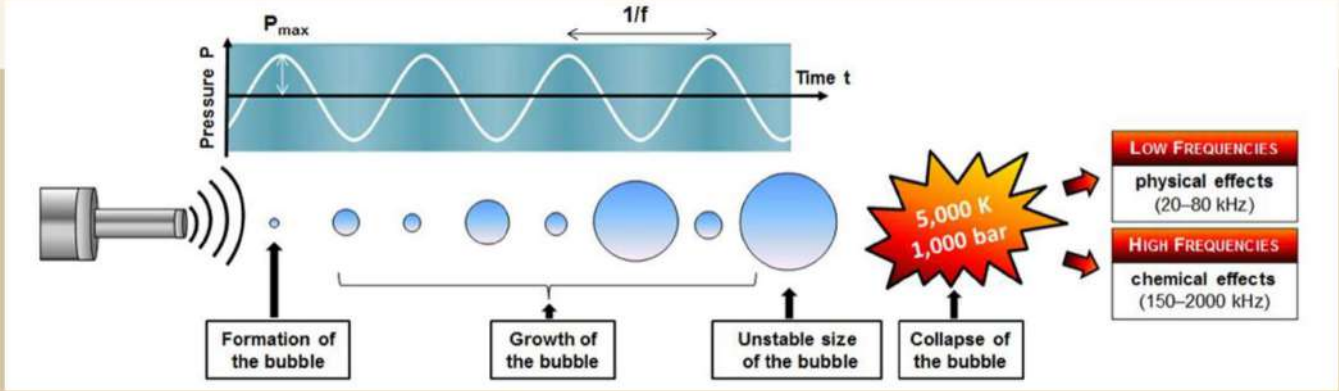
این پدیده منجر به افزایش دما تا چند هزار کلوین و فشار تا چند صد بار در ناحیه انفجار در ابعاد میکروسکوپی می‌شود.

هنگامی‌که امواج فراصوت از میان مولکول‌های مایع عبور می‌کنند، با نیروهای مکانیکی مواجه می‌شوند. امواج از طریق محیط به‌عنوان مجموعه‌ای از سیکل‌های فشرده سازی و رقیق سازی عبور می‌کنند. فشار مثبت اجزای ماده را فشرده می‌کند و فشار منفی باعث اتساع مولکول‌ها می‌شود. این سیکل به‌طور مکرر اتفاق می‌افتد تا زمانی که یک حفره درنتیجه واکنش بین اتساع و نیروی جاذبه مولکول‌ها ایجاد شود. سپس، اندازه حفره‌ها در سیکل‌های متوالی گسترش می‌یابد که درنهایت حباب‌های کاویتاسیون تولید می‌شوند [۱۱]. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، یک میکرو حباب تشکیل می‌شود، به دلیل انتشار یک‌طرفه و ادغام حباب–حباب شروع به رشد می‌کند و درنهایت به نقطه بحرانی به نام تشدید می‌رسد. در تشدید، ریز حباب ممکن است ناپایدار شود و به‌شدت در یک یا تعداد کمی از سیکل‌های صوتی به نام کاویتاسیون گذرا فروریزش کند و یا برای بسیاری از سیکل‌ها در اطراف اندازه تشدید که کاویتاسیون پایدار نامیده می‌شود، نوسان کند.

کاربرد فراصوت در صنایع گوشت

در سال‌های اخیر، محققان بر روی مطالعه اثرات HIUS بر فرآوری گوشت تازه ازجمله انتقال جرم، نرم کردن گوشت، انجماد و یخ‌زدایی تمرکز کرده‌اند. در فرآوری گوشت، HIUS می‌تواند غشای سلولی را تغییر دهد و به نرم کردن بافت‌ها کمک کند. لطافت، آبدار بودن و طعم و همچنین خواص ارگانولپتیک از عوامل اصلی کیفیت گوشت هستند. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که HIUS تأثیر مثبتی بر کیفیت گوشت دارد [۱۳,۱۴]. بااین‌حال، گزارش‌هایی از اثرات نامطلوب این فناوری بر خواص ارگانولپتیکی و فیزیکوشیمیایی گوشت وجود دارد. به‌عنوان‌مثال، اکسیداسیون لیپید در فرآوری گوشت به‌طورکلی منجر به تولید طعم‌های بد و بدبو می شود که منجر به خواص حسی نامطلوب می‌شود. ثابت شده است که HIUS اکسیداسیون لیپید و پروتئین را تشدید می‌کند [۱۵]. پروب فراصوت kHz ۲۰ باعث تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود، این پدیده منجر به اکسیداسیون پروتئین‌ها در گوشت گاو و از بین رفتن حلالیت اجزای میوفیبریل می‌شود [۱۵]. موضوعی که باید به آن توجه شود این است که انرژی جذب‌شده HIUS ممکن است منجر به افزایش تولید گرما تا دماهای بالا و متعاقباً آسیب حرارتی به گوشت شود. اثرات HIUS بر ظرفیت نگهداری آب گوشت را می‌توان مثبت یا منفی ارزیابی کرد، تغییرات به نوع و جهت الیاف،خواص خواص بیوشیمیایی و همچنین قدرت و زمان فراصوت بستگی دارد [۱۶].

انجماد یکی از سنتی‌ترین فرآیندهای نگهداری گوشت است که با مهار رشد میکروبی و کاهش واکنش‌های شیمیایی و آنزیمی، ماندگاری گوشت را افزایش می‌دهد تا خواص غذایی اولیه و ویژگی‌های حسی آن را حفظ کند. مشخص‌شده است که کیفیت محصولات غذایی ازجمله رنگ، مواد مغذی و خواص بافت تابعی از نرخ انجماد است [۱۳]. در روش‌های مرسوم، مشکلات انجماد زمانی رخ می‌دهد که سرعت انجماد کم باشد، در این حالت کریستال های یخ بزرگ و دارای لبه‌های تیز هستند که معمولاً در فضای بین سلولی تشکیل می‌شوند و باعث آسیب سلولی می‌شوند، درنهایت این امر منجر به تخریب محصول می‌شود. فراصوت به‌عنوان یک فناوری تکمیلی برای بهبود عملکرد انجماد و ذوب محصولات گوشتی عمل می‌کند. هنگامی‌که سرعت انجماد زیاد است، ازآنجایی‌که سرعت انتقال حرارت بالا است و زمان کافی برای خروج آب از بافت گوشت وجود ندارد، کریستال‌ها در اندازه‌های کوچک‌تر، یکنواخت‌تر و تعداد بیشتری در داخل و خارج سلول تولید می‌شوند؛ بنابراین از کاهش کیفیت محصول جلوگیری می‌کند. یکی از روش‌هایی که می‌تواند در کاهش اندازه بلورهای یخ و افزایش هسته‌زایی بسیار مفید باشد، HIUS است.



شکل ۲

نمایش شماتیک پدیده کاویتاسیون در محیط مایع [۱۲].

HIUS فرآیند تبلور را با هسته‌زایی و شکستن کریستال‌های یخ ارتقا می‌دهد. HIUS می‌تواند تعداد زیادی حباب کاویتاسیون ایجاد کند که به‌عنوان هسته برای تشکیل کریستال های یخ عمل می‌کنند؛ بنابراین، HIUS به حفظ کیفیت گوشت منجمد با افزایش نرخ انجماد و بهبود تشکیل کریستال‌های کوچک و حتی یکنواخت یخ کمک می‌کند [۱۷]. HIUS همچنین می تواند به‌طور مؤثر سرعت انتقال حرارت همرفتی را افزایش دهد و حرکت سریع حباب‌های حفره‌زایی نیز انتقال گرما و جرم را افزایش می‌دهد. حباب‌های حفره-زایی، کریستال‌های یخ را به اندازه‌های کوچک‌تر می شکنند، این کریستال‌های خردشده به‌عنوان هسته‌های جدید عمل می‌کنند که منجر به افزایش تصاعدی در سرعت انجماد می‌شود.

تغییر فاز مولکول‌های آب یک رویداد مهم است که منجر به آزاد شدن گرمای نهان و متعاقب آن تبلور مولکول‌ها می‌شود. استفاده از HIUS در این زمان می تواند سرعت هسته‌زایی و رشد کریستال را به‌شدت بهبود بخشد و منجر به تولید کریستال‌های یخ با توزیع یکنواخت‌تر و کوچک‌تر شود که دو عامل مهم بر کیفیت بافت‌های گوشت منجمد هستند؛ بنابراین، HIUS تأثیر مثبتی بر کیفیت گوشت در طول انجماد دارد.

اعمال شدت‌های فراصوت بیشتر از مقدار بهینه منجر به تولید گرما و طولانی شدن مرحله انتقال فاز می‌شود. دلیل دیگر می‌تواند کاهش سطح تماس در فصل مشترک مایع خنک‌کننده/گوشت باشد که به دلیل حباب‌های کاویتاسیون بیش‌ازحد ایجاد می‌شود؛ بنابراین، بیشترین توزیع یکنواخت کریستال های یخ و کمترین آسیب ساختاری گوشت در قدرت HIUS بهینه به دست می‌آید.

با توجه به تفاوت‌های ساختاری، فیزیکوشیمیایی و فیزیکی–مکانیکی در محصولات گوشتی، فرکانس، قدرت و شدت HIUS مناسب برای هر محصول ممکن است متفاوت باشد.

بنابراین، برای انتخاب پارامترهای فراصوتی بهینه، باید آزمایش‌های انحصاری برای بهینه‌سازی انجماد به کمک HUIS انجام شود؛ اما بیشتر پژوهشگران فراصوت تک فرکانس را در انجماد گوشت و فرآورده‌های گوشتی اعمال کردند. در این‌گونه مطالعات، قدرت و شدت فراصوت اغلب به‌عنوان متغیر و فرکانس فراصوت به‌عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته‌شده است. اخیراً، سیستم فراصوت چند فرکانسی برای انجماد گوشت استفاده‌شده است. ما و همکاران [۳] اثرات HIUS چند فرکانس را بر روی نرخ‌های انجماد، ویژگی‌های کیفی و ساختار ماهی موردمطالعه قراردادند، به این دلیل که فراصوت چند فرکانس نتایج بهتری نسبت به فراصوت تک فرکانس بر روی نرخ انجماد، خواص کیفی و ریزساختار گوشت ارائه می‌دهد.

محصولات گوشتی منجمد معمولاً برای مصرف و فرآوری‌های بعدی نیاز به یخزدایی دارند. روش‌های یخ-زدایی مرسوم معمولاً مبتنی بر هوای گرم، آب گرم و خلأ هستند. این روش‌ها بر کیفیت گوشت منجمد تأثیر می گذارند. از معایب اصلی این روش‌ها می‌توان به راندمان پایین، مصرف انرژی و زمان زیاد و افت کیفیت اشاره کرد. یک فرآیند یخزدایی ناکارآمد معمولاً کیفیت گوشت را بدتر و رشد و فعالیت میکروبی را تسریع می‌کند. روش‌های یخ-زدایی مرسوم دارای معایبی ازجمله تولید شیرابه و همچنین دناتوره شدن شدید پروتئین هستند. در یخزدایی گوشت، غشای سلولی آسیب‌دیده مایع درون‌سلولی را به بیرون نشت می‌دهد و از طرف دیگر، آب نگه‌داشته شده توسط نیروی مویینگی به دلیل از بین رفتن فیبرهای عضلانی کاهش می‌یابد. HIUS به‌عنوان یک فناوری کمکی توجه دانشمندان را برای غلبه بر معایب ذکرشده جلب کرده است. یخزدایی با کمک فراصوت به‌عنوان یکی از کاربردهای مفید فراصوت در تجهیزات صنایع غذایی، یک فناوری نوآورانه است که به کمک گرمای تولیدشده در مواد غذایی منجمد به تسریع سرعت ذوب و همچنین حفظ خواص کیفی اولیه آن کمک می‌کند. HIUS با ایجاد

فروپاشی حباب‌های حفره‌زایی انتقال حرارت را بهبود می بخشد و بر این اساس فرآیند یخزدایی را کوتاه می‌کند. عوامل متعددی ازجمله فرکانس و شدت فراصوت و ترکیب و ساختار محصول بر فرآیند یخزدایی تأثیر می گذارد. مهم‌ترین موضوع در این زمینه، طراحی و ساخت سونوترودهای چند فرکانسی است.

اثر فراصوت در محدوده ۲۵ kHz بر سرعت و زمان ذوب گوشت مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت که منجر به کاهش ۸۷٪ زمان موردنیاز برای ذوب در مقایسه با روش استاندارد شد، درحالی‌که بافت و خواص عملکردی گوشت در پایان فرآیند بدون آسیب باقی ماند [۱۸]. در طول فرآیند یخزدایی، حفره‌زایی فراصوتی می‌تواند ریزساختار گوشت را تغییر دهد، بنابراین بهینه‌سازی فرآیند یخزدایی با کمک فراصوت برای گوشت اجتناب‌ناپذیر به نظر می رسد. توان فراصوت بیشتر از مقدار بهینه ممکن است اثر مضری بر بافت و ساختار گوشت داشته باشد. مصرف انرژی بیشتر و گرمای بیش‌ازحد نیز ازجمله اثرات منفی توان‌های فراصوت بیشتر از بهینه است.

چالش‌هایی در انجماد و یخزدایی به کمک فراصوت وجود دارند که می‌توان به این موارد زیر اشاره کرد: گرمای تولیدشده توسط اثر حرارتی فراصوت توسط محیط مایع جذب می‌شود؛ که می‌تواند برخی از اثرات مثبت فراصوت را خنثی کند و حتی بر روند و سرعت انجماد تأثیر منفی بگذارد. اگر فراصوت‌دهی در حالت پیوسته باشد، می‌تواند گرمای زیادی ایجاد کند که از تشکیل کریستال‌های یخ جلوگیری می‌کند.

توزیع غیریکنواخت توان فراصوت در سیستم انجماد باعث توزیع نامتعادل HIUS در قسمت‌های مختلف محصول می‌شود. ازآنجایی‌که مدت‌زمان طولانی فراصوت¬دهی به دلیل تولید گرما برای هسته‌زایی نامطلوب است، فراصوت‌دهی کوتاه‌مدت نیز منجر به هسته‌زایی ناکافی می‌شود؛ بنابراین، بهینه‌سازی مدت‌زمان تیماردهی فراصوت برای کاربردهای مختلف اجتناب‌ناپذیر است.

فرآورده‌های گوشتی معمولاً موادی غیر همگن و بسیار میرا هستند که به دلیل عدم توانایی در نفوذ به قسمت‌های داخلی محصول و جذب HIUS توسط لایه‌های بیرونی، انتقال امواج فراصوت به لایه‌های درونی را با مشکل مواجه می‌کنند. گرمایش موضعی و گرمای بیش‌ازحد یک پدیده رایج در فراصوت است. در حین ذوب، به دلیل گرمای بیش‌ازحد ناشی از HIUS، افزایش سریع و موضعی دما ممکن است روی سطح گوشت منجمد اتفاق بیفتد که منجر به سوختگی سطحی می‌شود، درحالی‌که قسمت داخلی محصول هنوز ذوب نشده است. استانداردسازی فرآیند انجماد به کمک HIUS و متغیرهای محصول یک چالش بزرگ برای تجاری‌سازی این فناوری است. پارامترهای فراصوت و متغیرهای وابسته به محصول در مطالعات تحقیقاتی معمولاً متفاوت هستند و طبق یک پروتکل استاندارد تعریف نمی‌شوند. تفاوت در فرکانس، قدرت و شدت فراصوت و همچنین مدت‌زمان و نحوه تیماردهی در مطالعات منجر به نتایج متفاوتی می‌شود که صنعتی شدن این فناوری را برای یک محصول خاص دشوار می‌کند. خواص محصول (شامل ترکیب عضله و نوع عضله، ویژگی‌های ابعادی و غیره) و محیط خنک‌کننده و خواص آن (ویسکوزیته، دمای کار و غیره) نیز برای استانداردسازی لازم است تا بتوان این فناوری را به سطوح صنعتی ارتقا داد.

با توجه به موارد ذکرشده، ایجاد سیستم‌های انجمادی با توزیع یکنواخت توان و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی ضروری است. مطالعات بیشتر و بهینه‌سازی چنین سیستم‌هایی به استفاده از این فناوری در مقیاس‌های بزرگ‌تر برای کاربردهای تجاری کمک می‌کند. اگرچه پیشرفت قابل‌توجهی درزمینهٔ انجماد/یخزدایی به کمک فراصوت حاصل‌شده است، این فناوری هنوز در مقیاس آزمایشگاهی است، باید تلاش‌های بیشتری برای افزایش مقیاس و مناسب‌سازی برای کاربردهای تجاری انجام شود.

کاربرد فراصوت در صنایع لبنی

شیر به‌عنوان یکی از کامل‌ترین غذاها جایگاه ویژه‌ای در رژیم غذایی انسان دارد. این غذای باکیفیت حاوی هر سه ماده مغذی ضروری برای بدن ازجمله کربوهیدرات، چربی و پروتئین است. کربوهیدرات اصلی شیر لاکتوز است. شیر گاو حاوی حدود ۴۸٪ لاکتوز است، درحالی‌که مقدار کمی گالاکتوز، گلوکز و الیگوساکارید در آن وجود دارد. چربی شیر یک لیپید پیچیده است که به‌صورت امولسیون روغن در آب وجود دارد. شیر گاو حدود ۳٫۵–۴٪ چربی دارد. لیپیدهای شیر عمدتاً تری اسیل گلیسرول یا استرهای اسید چرب همراه با گلیسرول هستند. محتوای پروتئین شیر گاو حدود ۳٫۲٪ است که ۸۰٪ آن کازئین و ۲۰٪ پروتئین آب پنیر است [۱۹]؛ بنابراین، محتوای بالای مواد مغذی شیر، آن را به بستری مطلوب برای رشد میکروبی تبدیل می‌کند [۲۰] که تا حد زیادی بر ماندگاری آن تأثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه شیر دارای ترکیبات پیچیده و حساسی است؛ بنابراین باید توجه داشت که فرآوری ممکن است منجر به تغییرات فیزیکوشیمیایی و خواص ارگانولپتیکی نامطلوب محصول نهایی شود که یکی از بارزترین و مهم‌ترین اثرات این‌گونه فرآوری‌ها نارضایتی مصرف‌کننده است. امروزه سعی می‌شود فناوری‌های نوظهور غیرحرارتی جایگزین تکنیک‌های فرآوری حرارتی مرسوم در صنایع لبنی شود. این فناوری‌ها معمولاً شامل زمان پردازش کوتاه‌تر و هزینه کمتر و مصرف انرژی و اثرات نامطلوب کمتر بر محصولات غذایی و همچنین حفظ خواص غذایی و حسی آن‌ها هستند [۲۱].

HIUS قابلیت‌های قابل‌توجهی در کاربردهای مختلف فرآوری شیر دارد. برخی از کاربردهای HIUS در فرآوری شیر عبارت‌اند از همگن‌سازی، تغییر ویسکوزیته، پاستوریزاسیون، غیرفعال‌سازی میکروبی و اصلاح ترکیبات زیست فعال.

فناوری HIUS دارای قابلیت شگفت‌انگیزی برای ارائه مزایای قابل‌توجهی مانند صرفه‌جویی در انرژی و بهبود خواص در فرآوری لبنیات است. نیاز به تحقیقات بسیار گسترده‌تر برای بررسی اثرات استفاده از این فناوری نوظهور در زمینه‌های مختلف فرآوری شیر برای استفاده راحت از HIUS به‌عنوان یک روش جایگزین امیدوارکننده برای فناوری‌های مرسوم است. HIUS بسته به نوع محصول، شرایط فرآوری (نحوه کاربرد، پروب اولتراسوند یا حمام، فرکانس، شدت، قدرت، زمان پردازش و دما)، تأثیرات بسیار متنوعی بر روی فرآیند و خواص محصول نهایی لبنی دارد.

پاستوریزاسیون

پاستوریزاسیون حرارتی یک فرآیند مرسوم برای افزایش ایمنی و ماندگاری شیر است. بااین‌حال، برخی از مسائل در طول پاستوریزه کردن اجتناب‌ناپذیر است که منجر به تغییرات ناخواسته مانند از دست دادن مواد مغذی ارزشمند، دناتوره شدن پروتئین و غیره در شیر می‌شود [۲۲]. در حال حاضر، دو تکنیک حرارتی اصلی در فرآوری شیر، پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون است [۲۳]. هدف پاستوریزاسیون کاهش باکتری‌های بیماری‌زا و آلاینده‌ها است که باعث می‌شود لبنیات برای مصرف ایمن باشد [۲۴]. فناوری‌های پاستوریزاسیون سنتی حرارتی شامل فرآوری طولانی‌مدت در دمای پایین (LTLT)، زمان کوتاه در دمای بالا (HTST) و دمای فوق‌العاده بالا (UHT) هستند که به دلیل کارآمد بودن هنوز هم در این صنعت به‌طور گسترده مورداستفاده قرار می‌گیرند.

HIUS در ترکیب با فرآوری حرارتی غیرفعال‌سازی میکروبی مؤثرتری را حتی در دماهای پایین‌تر نسبت به سیستم‌های مرسوم ارائه می‌کند که منجر به حفظ ارزش تغذیه‌ای، خواص فیزیکی و شیمیایی شیر می‌شود [۲۵].

بالتازار و همکاران [۲۴] اثر HIUS را بر پروتئین، خواص میکروبیولوژیکی و پروفایل اسید آمینه آزاد شیر نیمه چرب بررسی کردند.

پارامترهای پردازشی شامل توان فراصوت، چگالی انرژی، مدت‌زمان فرآوری و دما موردمطالعه قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که HIUS به‌طور قابل‌توجهی آلودگی باکتریایی و همچنین زمان فرآیند HTST را کاهش می‌دهد. ضمناً در نمونه‌های تیمار شده توسط HIUS با توان ۱۰۴ W، مدت‌زمان ۶ دقیقه و چگالی انرژی ۹۳۶ J/mL، مانند شیر فرآوری شده HTST رشد باکتری مشاهده نشد. قدرت بیشتر فراصوت در نمونه‌هایی با حجم برابر منجر به فروپاشی شدید حباب‌های کاویتاسیون می‌شود که درنتیجه اثرات مخرب شدیدتری بر باکتری‌ها ایجاد می‌شود که نشان می‌دهد فناوری HIUS به‌اندازه پاستوریزاسیون HTST برای غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها مؤثر است. با توجه به نتایج بالتازار و همکاران [۲۴] HIUS هیچ مشکل تکنولوژیکی یا تغذیه‌ای برای پروتئین‌های شیر ایجاد نکرد. بااین‌وجود، تیمار HIUS پیشنهادی (قدرت ۱۰۴ W، مدت‌زمان ۶ دقیقه و چگالی انرژی ۹۳۶ J/mL) روند پاستوریزاسیون را تا حد زیادی طولانی می‌کند که به‌طورجدی مانع استفاده از روش پیشنهادی در مقیاس بزرگ برای تجاری‌سازی می‌شود. درحالی‌که روش مرسوم HTST فرآیند پاستوریزاسیون را در زمان بسیار کوتاه‌تری کامل می‌کند.

HIUS می‌تواند باعث اکسیداسیون چربی و پروتئین در شیر و تشکیل اجزای فراری شود که برای مصرف‌کننده ناخوشایند است؛ بنابراین، تحقیق در مورد توسعه اجزای طعم در طول پردازش مبتنی بر HIUS باید انجام شود. بوئی و همکاران [۲۶] اثر HIUS را بر روی ۵۰ mL شیر مدل حاوی ۴٪ چربی و ۳/۵٪ پروتئین مطالعه کردند. مقدار کتون‌ها، آلدهیدها، استرها، الکل‌ها و هیدروکربن‌ها با زمان فراصوت‌دهی افزایش یافت. بااین‌حال، آن‌ها تأثیر دما بر تشکیل این ترکیبات را مطالعه نکردند. درحالی‌که در پردازش حرارتی شیر با کمک HIUS مانند پاستوریزه کردن اجزای فرار و طعم‌دهنده یک مسئله حیاتی است.

پردازش HIUS در فرکانس‌های پایین (در محدوده ۲۰ kHz) منجر به تولید رادیکال‌های آزاد کمتری می‌شود [۲۷]. از طرف دیگر، اگر از قرار گرفتن در معرض رادیکال‌های ایجادشده توسط کاویتاسیون اجتناب شود، هیچ تغییر اکسیداتیو در شیر توسط HIUS ظاهر نمی‌شود. مولکول‌های آب توسط نیروهای کاویتاسیون ناشی از HIUS تجزیه می‌شوند و رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیری را تشکیل می‌دهند که واکنش‌های اکسایشی-کاهشی ایجاد می‌کنند. رادیکال‌های آزاد ناشی از اکسیداسیون و هیدرولیز چربی به پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه و چربی آسیب می‌رسانند [۲۲] بنابراین، فرکانس‌های محدوده ۲۰ kHz مناسب‌ترین فرکانس برای فرآوری شیر است که در آن واکنش‌های نامطلوب منجر به طعم‌های ناخوشایند به حداقل برسد [۲۸].

هموژنیزاسیون (همگن‌سازی)

لیپیدهای موجود در شیر به شکل گلبول‌های چربی شیر هستند که حاوی یک هسته تری گلیسیرید هستند که توسط یک غشای نازک به نام غشای گلبول چربی شیر احاطه شده‌اند. غشاء حاوی لیپیدهای قطبی، کلسترول و پروتئین‌های اختصاصی غشاء است که به‌عنوان امولسیفایر چربی شیر عمل می‌کند و از گلبول‌های چربی در برابر تخریب و ادغام آنزیمی محافظت می‌کند [۲۹]. در همگن‌سازی، رسیدن به محصولی با ذرات یکنواخت مطلوب است. شیر دارای چربی‌هایی با اندازه ذرات مختلف است. وقتی شیر گرم می‌شود، چربی‌ها به‌صورت خامه روی سطح شیر قرار می‌گیرند، بنابراین برای جلوگیری از تجمع چربی باید ذرات چربی را شکسته و به‌اندازه مای کوچک‌تر تبدیل کرد. برای دستیابی به هدف مذکور روش‌های مختلفی مانند هموژنایزر تحت‌فشار وجود دارد که در آن ذرات در هنگام عبور از یک روزنه در اثر برخورد شکسته می‌شوند. روش دیگر همگن‌سازی مکانیکی است که در آن اختلاط باعث شکستن ذرات می‌شود [۳۰]؛ اما روش دیگر HIUS است [۳۱].

HIUS عملکرد قابل‌توجهی را در کاهش اندازه گلبول-های چربی شیر براثر نوسانات فشار، تلاطم و برش نشان می‌دهد [۲۹]. فروپاشی میکروحباب‌های کاویتاسیون باعث ایجاد نیروهای برشی موضعی و تلاطم می‌شود که گلبول‌های چربی را به اندازه‌های کوچک‌تر می‌شکند [۲۹]. کوه و همکاران [۳۲] گزارش کردند که هموژنایزر معمولی و هموژنایزر فراصوت اندازه ذرات چربی مشابهی را در شیر تولید می‌کنند، اما با استفاده از روش اختلاط برشی در هموژنایزر معمولی، کاهش اندازه ذرات کارایی کمتری دارد. علاوه بر این، نیروهای برشی مکانیکی مسئول کاهش اندازه ذرات چربی هستند. درحالی‌که HIUS به دلیل پدیده کاویتاسیون تأثیر بیشتری بر یکنواختی اندازه ذرات چربی در شیر دارد.

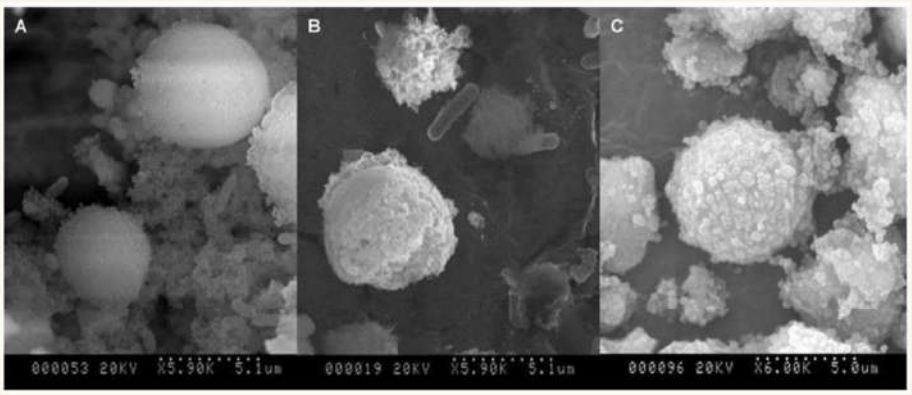
برمودز-آگویر و همکاران [۳۳] عملیات حرارتی همراه با HIUS را بر روی شیر اعمال کردند و ریزساختار گلبول‌های چربی را پس از فرآیند حرارتی بررسی کردند. HIUS با ویژگی‌های ۴۰۰ W، ۲۴ kHz و دامنه µm ۱۲۰، با یک پروب ۲۲ mm در دمای ۶۳ °C اعمال شد. آن‌ها دریافتند که گرمایش هم‌زمان برای بهبود عملکرد HIUS در کاهش اندازه گلبول‌های چربی موردنیاز است.

فشار موضعی ایجادشده در محدوده ۱۰۰ MPa به دلیل فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون کارآمدتر از روش معمول همگن‌سازی است که در فشارهای پایین‌تر در محدوده ۲۰ تا ۵۰ MPa عمل می‌کند. در شکل ۳، گلبول‌های چربی فراصوت‌دهی شده در دمای ۶۳ °C نشان شده است.

لیو و همکاران [۲۹] دریافتند که HIUS در مقایسه با فرآیند همگن‌سازی مرسوم به‌طور یکسان اندازه گلبول-های چربی شیر را کاهش می‌دهد، اما منجر به آسیب کمتری به پروتئین‌های غشای گلبول چربی شیر می‌شود. اگرچه HIUS توانایی خوبی در همگن‌سازی شیر نشان داده است، اما ممکن است طعم شیر را به دلیل فشارهای موضعی و دماهای موضعی بسیار زیاد ایجادشده توسط حباب‌های کاویتاسیون در حال فروپاشی تغییر دهد. بااین‌حال، آن‌ها ثابت کردند که HIUS ممکن است یک فناوری مطلوب برای همگن‌سازی شیر باشد، اما آن‌ها تحقیقات بیشتری را در مورد بهینه‌سازی و افزایش مقیاس این فناوری برای درک چالش‌های موجود پیشنهاد کردند.

فیلتراسیون

غشاء و فرآیندهای غشایی به دلیل مصرف انرژی کمتر نسبت به سایر روش‌های جداسازی مرسوم به‌طور



شکل ۳

ریزساختار گلبول‌های چربی در شیر، A فراوری حرارتی در ۶۳ °C ۱۰B دقیقه ترموسونیکاسیون در ۶۳ °C ۳۰ C دقیقه ترموسونیکاسیون در ۶۳ °C [۳۳].

مزایای فناوری غشاء عبارت‌اند از: عملکرد آسان، طراحی فشرده و مدولار، انرژی ورودی کمتر و شرایط فرآوری ملایم [۳۴]. بااین‌حال، محدودیت اصلی برای استفاده گسترده از فناوری غشاء در صنایع غذایی، کاهش شار نفوذ به دلیل رسوب است. رسوب‌گیری مشکل اصلی محدودکننده در فرآیندهای غشایی است که شار نفوذ را کاهش می‌دهد.

تکنیک‌های سنتی برای به حداقل رساندن رسوب-گیری، اصلاح سطح غشاء و دستکاری جریان با کنترل شرایط هیدرودینامیکی است. درحالی‌که این روش‌ها مشکل را به‌طور کامل حل نمی‌کنند [۳۵]. اخیراً، ماژول‌های ارتعاشی پیشنهاد شده‌اند که نرخ‌های برشی بالاتری تولید می‌کنند و آشفتگی را در سطح غشاء افزایش می‌دهند و باعث افزایش انتشار مجدد ذرات در محلول توده‌ای می‌شوند. فیلتراسیون غشایی به کمک HIUS توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است. HIUS عملکرد فیلتراسیون را با شکستن لایه کیک در سطح غشاء و افزایش شار بهبود می‌بخشد. HIUS قادر است نیروی هیدرودینامیکی سیالات و متعاقباً شار را افزایش دهد که ممکن است به دلیل افزایش انتقال جرم به دلیل تلاطم بالاتر به‌جای اثر فراصوت باشد [۳۵]. فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون باعث حذف لایه‌های رسوب‌کننده از سطح غشاء توسط نیروهای تلاطم و برشی می‌شود که می‌تواند بر نیروهای جاذبه بین لایه کیک و سطح غشاء غلبه کند. مکانیسم‌های پیشنهادی برای توضیح اثر HIUS بر رسوب غشایی عبارت‌اند از: جریان صوتی، میکرواستریمر، میکروجریان و میکروجت. جریان صوتی به مایع اجازه می‌دهد تا ذرات را با فعل‌وانفعالات ضعیف‌تر با سطح غشا جارو کند. میکرواستریمرها حباب‌هایی هستند که در هنگام برخورد با حباب‌های دیگر با ادغام انتشار می‌یابند و رشد می‌کنند و وقتی به سطح آلوده می‌رسند، ذرات رسوب‌شده روی غشاء را می‌کشند و نوعی حباب با اندازه فزاینده تولید می کنند [۳۶]. میکروجریان حرکت سیال در جهات مختلف ناشی از سیکل فشرده‌سازی- اتساع یکسان حباب‌های کاویتاسیون است که منجر به تنش برشی با مشخصات سرعت دینامیکی می‌شود که ذرات رسوب شده روی غشاء را در حین ریزش جاروب می‌کند. میکروجت ها جت های سیالی هستند که در سرعت‌های بالا (۱۰۰ تا ۲۰۰ m/s) به دلیل فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون پرتاب می‌شوند که اجازه می‌دهد مواد جامد رسوب‌کرده روی سطح غشاء تمیز شوند [۳۵].

میرزایی و محمدی [37] دریافتند که HIUS بر شار شیر مؤثر است و ضریب افزایش شار ۲۱۷٪ در فشار خوراک ۰/۸ bar بار به دست آمد، درحالی‌که هیچ اثر نامطلوبی بر یکپارچگی غشا نداشت. افزایش توان HIUS از W ۲۰ به W ۴۰، منجر به افزایش ضریب افزایش شار از ۲۲۸٪ درصد به ۴۹۰٪ شد که به دلیل دامنه بیشتر HIUS و کاویتاسیون شدیدتر بود. این پدیده به دلیل کاهش اندازه ذرات و انسداد غشا است. بااین‌حال، اثر دقیق توان فراصوت بر اولترافیلتراسیون شیر نیاز به بررسی بیشتر دارد. علاوه بر این، باید توجه داشت که توان‌های بالاتر بسته به شرایط فرآیند و غشاء می‌توانند بر ساختار غشا تأثیر بگذارند. هنگامی‌که غشاء دور از ناحیه کاویتاسیون قرار می‌گیرد، فقط جریان صوتی می تواند بر حذف ذرات تأثیر بگذارد و حباب‌های کاویتاسیون قبل از رسیدن به سطح غشاء در خوراک فرومی‌ریزند. همچنین حالت پیوسته HIUS به‌جای حالت پالسی برافزایش شار تأثیر بیشتری داشت.

قدرت‌های شدید HIUS می‌تواند به غشاء آسیب برساند. از طرف دیگر افزایش سرعت جریان متقاطع باعث کاهش آسیب بر روی سطوح غشا می‌شود. بااین‌حال، اثر مضاعف HIUS و سرعت جریان متقاطع نباید تنها روی افزایش شار و/یا کاهش آسیب سطح غشاء در نظر گرفته شود. همچنین بررسی اثرات آن‌ها بر روی ماکرومولکول های خاص، مانند دناتوره شدن پروتئین‌ها در طی فیلتراسیون شیر، بسیار مهم است [۳۵].

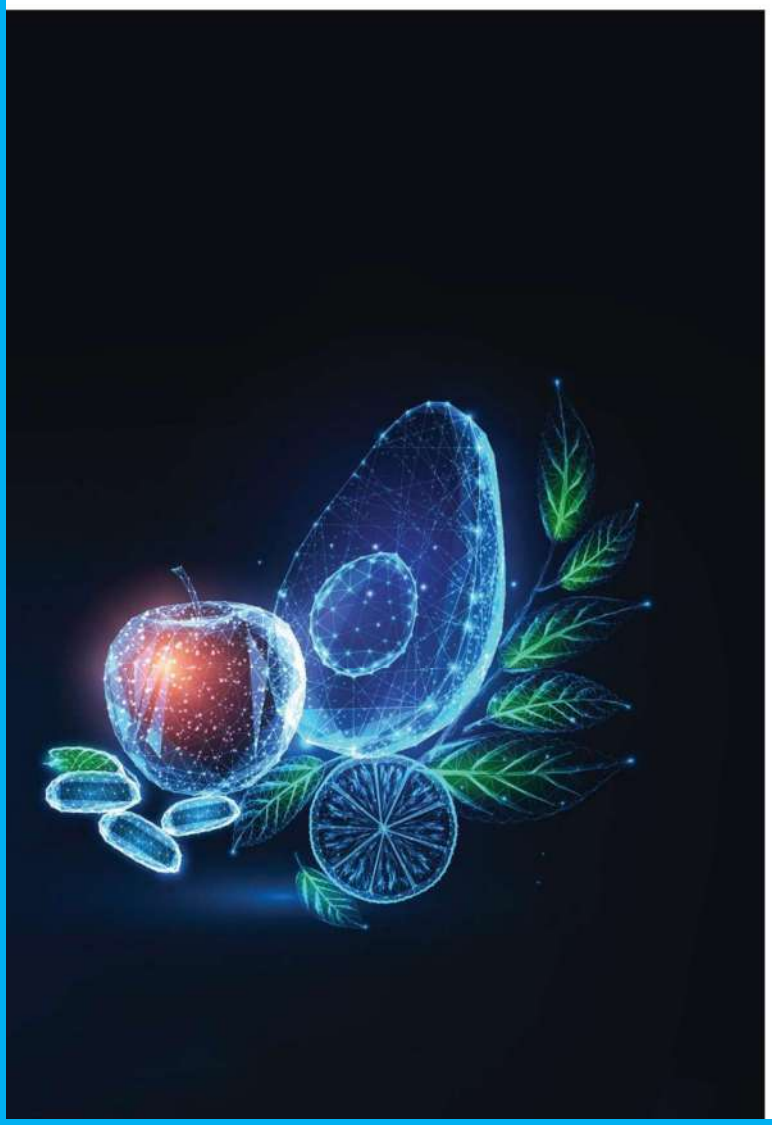
نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیقات انجام‌شده در مورد تأثیر فراصوت بر فرآوری و کیفیت نهایی محصول و با پیشرفت این فناوری، به‌کارگیری فراصوت در فرآوری محصولات غذایی به‌صورت تجاری در آینده نزدیک اتفاق خواهد افتاد. در حال حاضر، در مقیاس‌های صنعتی محدودیت‌هایی برای این فرآیند وجود دارد و تلاش می‌شود تا با غلبه بر آن‌ها، دامنه کاربرد فراصوت افزایش پیدا کند. تحقیقات امروزی در مقیاس آزمایشگاهی انجام می‌شود، بنابراین مطلوب است که با صنعتی شدن این فناوری گامی در جهت افزایش وسعت دامنه کار و تلاش برای تجاری‌سازی آن برداشته شود. بااین‌حال، گفته می‌شود که این فناوری ازنظر اقتصادی امکان‌پذیر است، اما کمبود دانش برای توسعه سیستم های مبتنی بر HIUS در مقیاس کامل وجود دارد. از سوی دیگر، مقیاس‌پذیری فرآیندهای فراصوتی با استفاده از راکتورهای فراصوت در مقیاس بزرگ، سونوترودها و مبدل‌های اولتراسونیک همچنان یک چالش برای کاربردهای صنعتی است؛ بنابراین، مطالعات بیشتری باید در مورد افزایش مقیاس سیستم های پیوسته به کمک HIUS و فرآیندهای مرتبط در فرآوری محصولات غذایی انجام شود.

منابع

[1] M. Gallo, L. Ferrara, D. Naviglio, Foods ***2018****, 7, 164.*
[2] Z. J. Dolatowski, J. Stadnik, D. Stasiak, Acta Sci. Pol. Technol. Aliment. ***2007****, 6, 88.*
[3] P. Cui, X. Yang, Q. Liang, S. Huang, F. Lu, J. Owusu, X. Ren, H. Ma, Ultrason. Sonochem. ***2020****, 62, 104859.*
[4] L. M. Carrillo-Lopez, I. A. Garcia-Galicia, J. M. Tirado-Gallegos, R. Sanchez-Vega, M. Huerta-Jimenez, M. Ashokkumar, A. D. Alarcon-Rojo, Ultrason. Sonochem. ***2021****, 73, 105467.*
[5] I. Lavilla, C. Bendicho, in Water Extr. Bioact. Compd., Elsevier, ***2017****, pp. 291–316.*
[6] F. Chemat, N. Rombaut, A.-G. Sicaire, A. Meullemiestre, A.-S. Fabiano-Tixier, M. Abert-Vian, Ultrason. Sonochem. ***2017****, 34, 540.*
[7] S. V. Sancheti, P. R. Gogate, Ultrason. Sonochem. ***2017****, 36, 527.*
[8] S. Shokri, F. Javanmardi, M. Mohammadi, A. Mousavi Khaneghah, Ultrason. Sonochem. ***2022****, 83, 105938.*
[9] B. Xu, S. M. R. Azam, M. Feng, B. Wu, W. Yan, C. Zhou, H. Ma, Ultrason. Sonochem. ***2021****, 81, 105855.*
[10] D. Pingret, A. S. Fabiano-Tixier, F. Chemat, Accelerated Methods for Sample Preparation in Food, Elsevier, ***2012****.*
[11] N. Bhargava, R. S. Mor, K. Kumar, V. S. Sharanagat, Ultrason. Sonochem. ***2021****, 70, 105293.*
[12] G. Chatel, L. Novikova, S. Petit, Appl. Clay Sci. ***2016****, 119, 193.*
[13] M. Zhang, N. Haili, Q. Chen, X. Xia, B. Kong, Meat Sci. ***2018****, 136, 1.*
[14] Q. Sun, X. Zhao, C. Zhang, X. Xia, F. Sun, B. Kong, LWT ***2019****, 108, 106.*
[15] A. D. Alarcon-Rojo, L. M. Carrillo-Lopez, R. Reyes-Villagrana, M. Huerta-Jiménez, I. A. Garcia-Galicia, Ultrason. Sonochem. ***2019****, 55, 369.*
[16] M. R. Kasaai, Nat. Sci. ***2013****, 05, 14.*
[17] N. S. Deora, N. N. Misra, A. Deswal, H. N. Mishra, P. J. Cullen, B. K. Tiwari, Food Eng. Rev. ***2013****, 5, 36.*
[18] C. Gambuteanu, P. Alexe, J. Food Sci. Technol. ***2015****, 52, 2130.*

[19] L. Jaiswal, M. Worku, Crit. Rev. Food Sci. Nutr. ***2022****, 62, 7503.*
[20] D. Wang, J. Fritsch, C. I. Moraru, J. Dairy Sci. ***2019****, 102, 8798.*
[21] A. Mohamad, N. N. A. K. Shah, A. Sulaiman, N. Mohd Adzahan, R. M. Aadil, J. Food Process. Preserv. ***2020****, 44, DOI 10.1111/jfpp.14940.*
[22] R. K. Abrahamsen, J. A. Narvhus, Int. Dairy J. ***2022****, 131, 105375.*
[23] L. Nunes, G. M. Tavares, Trends Food Sci. Technol. ***2019****, 90, 88.*
[24] C. F. Balthazar, A. Santillo, J. T. Guimarães, A. Bevilacqua, M. R. Corbo, M. Caroprese, R. Marino, F. A. Esmerino, M. C. Silva, R. S. L. Raices, M. Q. Freitas, A. G. Cruz, M. Albenzio, Ultrason. Sonochem. ***2019****, 51, 241.*
[25] O. O. Alegbeleye, J. T. Guimarães, A. G. Cruz, A. S. Sant'Ana, Trends Food Sci. Technol. ***2018****, 82, 148.*
[26] A. T. H. Bui, D. Cozzolino, B. Zisu, J. Chandrapala, LWT ***2021****, 147, 111677.*
[27] P. Juliano, A. E. Torkamani, T. Leong, V. Kolb, P. Watkins, S. Ajlouni, T. K. Singh, Ultrason. Sonochem. ***2014****, 21, 2165.*
[28] V. Akdeniz, A. S. Akalın, Trends Food Sci. Technol. ***2019****, 86, 392.*
[29] Y. Liu, S. Boeren, L. Zhang, P. Zhou, K. Hettinga, Innov. Food Sci. Emerg. Technol. ***2021****, 70, 102703.*



[30] D. J. McClements, E. Newman, I. F. McClements, Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. ***2019****, 18, 2047.*
[31] S. A. Bredikhin, V. N. Andreev, A. N. Martekha, E. A. Soldusova, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. ***2022****, 954, 012014.*
[32] L. L. A. Koh, J. Chandrapala, B. Zisu, G. J. O. Martin, S. E. Kentish, M. Ashokkumar, Food Bioprocess Technol. ***2014****, 7, 556.*
[33] D. Bermúdez-Aguirre, R. Mawson, G. V. Barbosa-Cánovas, J. Food Sci. ***2008****, 73, E325.*
[34] K. Nath, H. K. Dave, T. M. Patel, Trends Food Sci. Technol. ***2018****, 73, 12.*
[35] K. K. Dey, X. Zhao, B. M. Tansi, W. J. Méndez-Ortiz, U. M. Córdova-Figueroa, R. Golestanian, A. Sen, Nano Lett. ***2015****, 15, 8311.*
[36] M. LAMMINEN, J. Memb. Sci. ***2004****, 237, 213.*
[37] A. Mirzaie, T. Mohammadi, J. Food Eng. ***2012****, 108, 77.*