دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

تأثیر اولتراسوند (با شدت بالا) بر پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها

۱- حدیث ترکمن، ۲- محمد امین میری

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد علوم صنایع غذایی، دانشگاه زابل torkamanhadis1997@gmail.com

[۲] استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه زابل ma.miri@uoz.ac.ir

چکیده

امروز از نیروی اولتراسونیک به‌عنوان یک تکنولوژی نوین و برای فرآوری مواد غذایی در صنعت بهره گرفته می‌شود. با تنظیم فرکانس، امواج فراصوت قادرند در بسیاری از کاربردهای صنعتی همچون صنایع غذایی به‌کارگرفته شوند. تکنیک فراصوت دارای مزایایی چون ارزان بودن، ساده بودن و از منظر انرژی مقرون‌به‌صرفه بودن است. در مقاله حاضر به بررسی تأثیر اولتراسوند (با شدت بالا) بر پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها پرداخته شده است. نتایج بررسی حاکی از آن بود که اولترسوند با شدت بالا قادر است بر ساختار و عملکرد پروتئین‌ها و کربوهیدارت تأثیر داشته باشد و برای بهبود استخراج و عملکرد پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها استفاده شود.

واژه‌های کلیدی

اولتراسوند، پروتئین، کربوهیدرات، عملکرد

۱. مقدمه

استفاده از امواج صوتی با فرکانس بالا برای مایعات با شدت‌های کافی منجر به اثرات مکانیکی و شیمیایی می‌شود که ممکن است ساختار و ترکیب مواد را تغییر دهد [1]. کشف اثرات شیمیایی اولتراسوند با شدت بالا به سال ۱۹۲۷ باز می‌گردد که ریچاردز و لومیس اولین مقاله خود را در مورد سونوشیمی با عنوان "اثرات شیمیایی امواج صوتی با فرکانس بالا" منتشر کردند [2]. آن‌ها برای اولین‌بار توضیح دادند که استفاده از اولتراسوند «قوی» یا «شدت بالا» می‌تواند سرعت تعدادی از واکنش‌های شیمیایی معمولی را تسریع کند یا می‌تواند فرآیندهای ردوکس مشابه واکنش‌های ناشی از تشعشعات یونیزان را القا کند [3]. با این حال، منشأ این اثرات تا سال ۱۹۳۵ نامشخص بود. گسیل خود به خودی نور از آب هنگامی‌که در معرض امواج فراصوت شدید قرار گرفت مشاهده شد، این نور به فروپاشی حفره‌های ناشی از امواج فراصوت نسبت داده شد [4,5].

برهولت، در سال ۱۹۳۷، با استفاده از انرژی اولتراسونیک با توان بالاتر، نوع سومی از واکنش‌های سونوشیمیایی را توصیف کرد. به‌نظر می‌رسد که این واکنش‌ها منجر به تخریب پلیمرهای مصنوعی یا بیولوژیکی می‌شود [6]. از آن زمان، رشته سونوشیمی و اولتراسوند با قدرت به‌طور پیوسته رو به جلو حرکت کرده است. این پیشرفت توسط توسعه تکنیک‌های تحلیلی بهتری هدایت شده است که امکان ثبت دقیق اثرات فیزیکی و شیمیایی توزیع شده مکانی و زمانی را فراهم می‌کند که نتایج استفاده از اولتراسوند با شدت بالا است [7,8]. توسعه نسل جدیدی از مبدل‌های مافوق صوت، افزایش انرژی‌های ویژه حجم و توسعه سیستم‌های راکتوری کوچک‌تر را امکان‌پذیر کرده است [9].

۲. اولتراسوند

اولتراسوند یک موج صوتی است که برای شنوایی انسان با فرکانس بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز نامحسوس است. این فناوری به‌ویژه از فرکانس‌های ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز استفاده می‌کند، فرآیند کار اساسی آن به کاویتاسیون اولتراسونیک نسبت داده می‌شود که به شکل‌گیری سریع و فروپاشی حباب‌های گاز در یک محیط مایع، ایجاد فشار و دما در نقاط خاص به میزان بسیار زیادی اشاره دارد. دوره‌های زمانی کوتاه (میلی‌ثانیه)، ایجاد تغییراتی در مولکول‌های اطراف در مکان‌های خاص که در آن حباب‌ها به‌دلیل اختلاف فشار فرو می‌ریزند [10]. با توجه به اثرات کاویتاسیون، درمان اولتراسونیک می‌تواند احتمال تماس بین کمپلکس پروتئین-پلی‌ساکارید و ترکیبات زیست فعال را افزایش دهد و پایداری کواسرواسیون پیچیده را افزایش دهد [11].

۳. کاربرد اولتراسوند در صنایع غذایی

اولترسوند با شدت بالا برای تسریع فرآیندهای حمل‌ونقل انبوه در اختلاط، خشک کردن و استخراج، گاززدایی از مواد غذایی مایع، برای القای واکنش‌های اکسیداسیون/کاهش، برای استخراج پروتئین‌ها، برای غیرفعال‌سازی میکروبی و آنزیمی، برای القای هسته برای تبلور استفاده شده است. همچنین یکی از معدود روش‌هایی است که امکان تهیه امولسیون‌های زیر میکرونی را فراهم می‌کند [12,13,14].

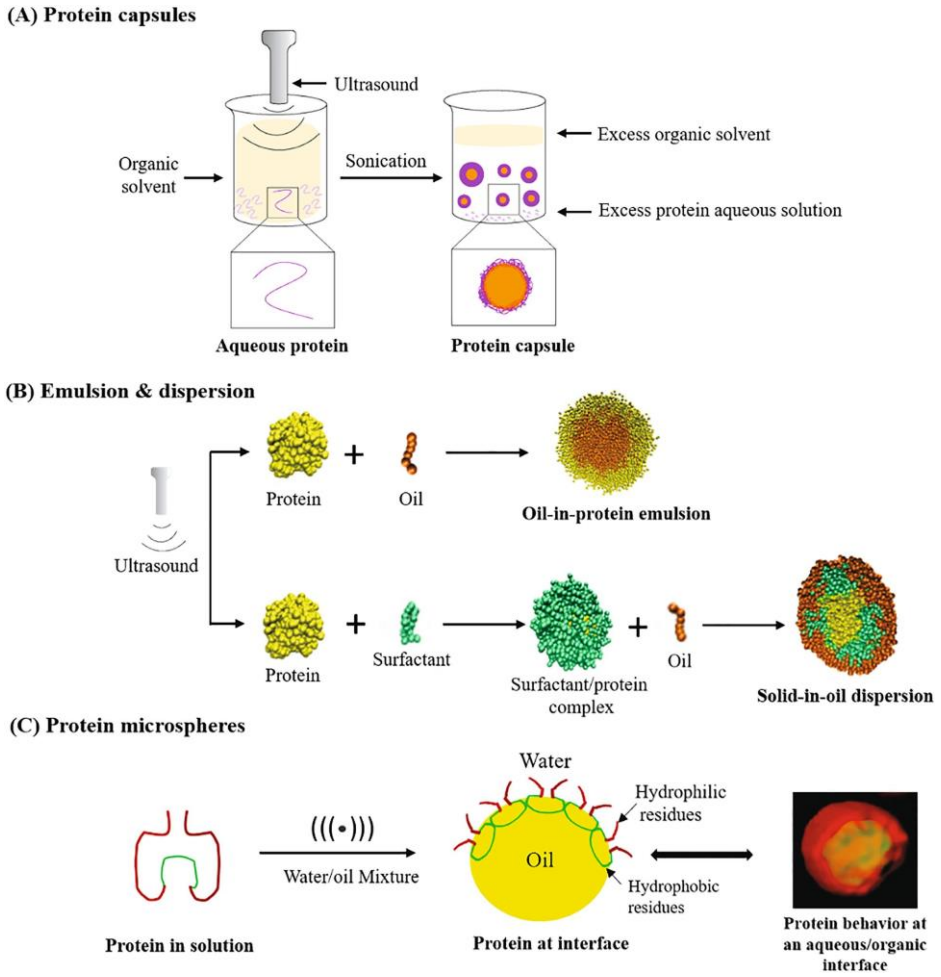
۴. تأثیر اولتراسوند با شدت بالا بر عملکرد پروتئین‌ها

پروتئین‌ها علاوه بر اینکه بخشی ضروری از رژیم غذایی انسان هستند، اجزای غذایی کاربردی هستند که می‌توانند فوم‌ها و امولسیون‌ها را تثبیت کنند، ژل‌ها را تشکیل دهند و فعالیت‌های بیولوژیکی را در داخل بدن و در شرایط آزمایشگاهی انجام دهند. آن‌ها بخش کلیدی جعبه ابزار اجزایی هستند که توسط دانشمندان علوم غذایی برای ایجاد غذاهایی با ظاهر، بافت، طعم و عطر مطلوب استفاده می‌شوند. عملکردهای زیادی که توسط پروتئین‌ها انجام می‌شود جلوه‌ای از ساختار آن‌هاست. به‌عنوان مثال، فعالیت س‌طحی پروتئین‌ها، که به آن‌ها اجازه می‌دهد امولسیفایرهای عالی باشند، از آمفی‌دوستی پروتئین‌ها ناشی می‌شود. ساختارهای خاص پروتئین‌ها همچنین باعث ویژگی بیولوژیکی بالایی می‌شود که مشخصه فعالیت آنزیم است. از آن‌جایی‌که درمان با اولتراسوند با شدت بالا می‌تواند منجر به اصلاح ساختار ماکرومولکول‌ها شود، پس از استفاده از اولتراسوند با شدت بالا می‌توان تغییراتی در عملکرد پروتئین انتظار داشت. ادبیات اخیر در مورد درمان اولتراسوند قدرتی پروتئین‌ها در محلول، عملکرد پروتئین را با توجه به موارد زیر مستند کرده است: تثبیت امولسیون و فوم؛ تشکیل ژل؛ و فعالیت آنزیمی در فناوری‌های غذایی، دارویی و نساجی. پروتئین‌ها را می‌توان با استفاده از فرآیند اولتراسوند با تغییر خواص ساختاری و فیزیولوژیکی آن‌ها اصلاح کرد. اولتراسوند قدرت به‌طور فزاینده‌ای برای بهبود کارایی استخراج پروتئین‌ها از مواد خام گیاهی و حیوانی استفاده می‌شود. با این‌حال، پروتئین‌های استخراج شده ممکن است در طول درمان اولتراسوند دچار تغییرات فیزیکوشیمیایی شوند. بنابراین درک جامعی از اثرات خاص اولتراسوند با شدت بالا بر روابط ساختار-عملکرد پروتئین‌ها برای استفاده از این فناوری به سودمندترین و کارآمدترین روش مورد نیاز است [15].

تحقیقات منتشر شده در مورد تأثیر امواج فراصوت با شدت بالا بر پروتئین‌ها طیف گسترده‌ای از شدت‌های اولتراسونیک کاربردی را گزارش می‌دهند. این به این دلیل است که ظرفیت‌های مبدل از ۵۰ تا ۲۰۰۰ وات متغیر است. ترسیم واضح انرژی اولتراسونیک مخصوص حجمی که نمونه‌ها در معرض آن قرار گرفتند بسیار مهم است زیرا اثرات فیزیکی اولتراسوند با شدت بالا اغلب به‌صورت خطی با شدت مقیاس نمی‌شوند. یافته‌های مربوط به تأثیر امواج فراصوت با شدت بالا بر فعالیت آنزیم ممکن است از فعالیت آنزیم غیرفعال کامل تا افزایش قابل‌توجه در فعالیت آنزیم متغیر باشد [15].

به‌عنوان یک روش پر انرژی، اولتراسوند در تشکیل امولسیون‌ها و پراکندگی‌های پروتئینی با اندازه قطرات یکنواخت و کوچک برای کاربردهای پزشکی، دارویی و آرایشی استفاده شده است [16,17]. به‌طورکلی، امولسیون‌های پروتئینی در مقیاس میکرو و نانو را می‌توان با تشدید انرژی کم و بالا به‌دست آورد [18]. برای تشدید کم انرژی، امولسیون‌ها به‌طور معمول با روش‌های وارونگی فاز و امولسیون‌سازی خود به خود تشکیل می‌شوند. این رویکردها به‌دلیل انتخاب محدود سورفکتانت‌ها و ترکیب آن‌ها به کاربرد در مقیاس بزرگ محدود می‌شوند. تشدید انرژی بالا قابل استفاده است زیرا امولسیون‌ها با استفاده از تجهیزات مکانیکی از جمله آسیاب‌های کلوئیدی، هموژنایزرهای فشار بالا و دستگاه‌های اولتراسونیک تشکیل می‌شوند. هنگام استفاده از استراتژی‌های مختلف، ارزیابی ویژگی‌های امولسیون‌های تولید شده از جمله ظاهر، اندازه، پایداری، رئولوژی و غیره اهمیت حیاتی دارد [19].

اولتراسوند قادر به تولید انرژی کافی برای امولسیون‌سازی است که به تجمع خودکار پروتئین‌ها کمک می‌کند (شکل ۱-A) این پدیده را می‌توان با تشکیل تلأطم بالا که باعث تحریک مولکولی می‌شود، توضیح داد.



شکل ۱. تصویری از کپسول‌های پروتئینی، نانوامولسیون‌های پروتئینی/میکروامولسیون‌ها و پراکندگی‌ها با استفاده از روش امولسیون‌سازی اولتراسونیک [17,18,20]

به‌طورکلی امولسیون‌ها در مقیاس نانو یا میکرو پایدار نیستند و می‌توانند به دو یا چند فاز تبدیل شوند. پایداری آن‌ها به اندازه قطرات امولسیون، توزیع اندازه ذرات، نوع امولسیفایر، غلظت، کشش سطحی و موارد دیگر بستگی دارد که اندازه قطرات تشکیل شده بر خواص امولسیون پراکنده تأثیر زیادی دارد (شکل ۱-B) [21]. میکروسفرهای پروتئینی به‌دلیل انرژی مکانیکی بالا تشکیل می‌شوند که باعث ایجاد ترکیب مجدد پروتئین در سطح مشترک روغن و آب می‌شود (شکل ۱-C) [22]. اولین مطالعات انجام شده توسط Suslick و همکاران (۱۹۹۴) بود که ادعا داشتند تشکیل ریزکره‌ها به‌دلیل وجود سیستئین بوده است [21]، اما نتایج مطالعات Silva و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که می‌توان میکروسفر را با پپتیدها بدون سیستئین تشکیل داد که از این دیدگاه حمایت می‌کند که ترکیب مجدد پروتئین در سطح مشترک روغن و آب می‌تواند قابل قبول‌ترین توضیح باشد [22]؛ مطالعات نشان می‌دهد که دامنه مناسب فراصوت، زمان فراصوت و دمای فرآیند می‌تواند برهمکنش جامع بین آن‌ها ایجاد کند و به شکل‌گیری و تثبیت امولسیون‌ها و پراکندگی‌ها کمک کند [18]. علاوه بر این، تثبیت قطرات در برابر ادغام نیز نقش مهمی در پایداری دارد، و انواع امولسیفایر/تثبیت‌کننده‌ها مانند سورفکتانت‌ها و پروتئین‌ها را می‌توان به سیستم معرفی کرد تا از تجمع و ادغام قطرات تشکیل‌شده جلوگیری کند [23]. جذب امولسیفایرهایی مانند

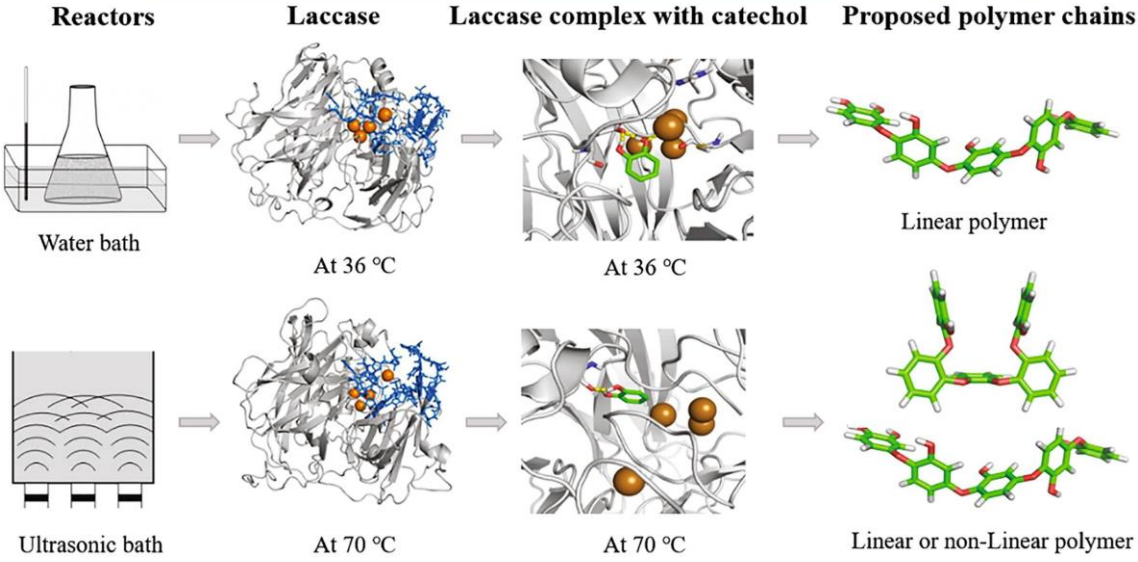
پروتئین پتانسیل زیادی برای تولید محصولات مبتنی بر امولسیون به‌عنوان سیستم‌های دارورسانی برای کاربردهای درمانی داخل وریدی نشان می‌دهد [18].

مطالعات زیادی به بررسی تأثیر اولتراسوند بر عملکرد پروتئین‌ها پرداخته‌اند. برای مثال نتایج مطالعات نشان داده است که اولتراسوند می‌تواند ظرفیت و پایداری امولسیون‌کنندگی پروتئین‌ها موثر باشد و در pHهای متفاوت، دامنه‌های متفاوت و همچنین در دماها و زمان‌های متفاوت اثرات متغیری برجای بگذارد [24,25,26,27,28].

همان‌طورکه گفته شد، اولتراسوند به‌عنوان روشی برای فعال‌سازی و غیرفعال کردن آنزیم بسته به شرایط مناسب یا نامناسب مورد استفاده قرار گرفته است [29]. روشن کردن مکانیسم فعال یا غیرفعال آنزیم خاص دشوار است زیرا چندین اثر شیمیایی و فیزیکی به‌طور همزمان رخ داده است. با این حال، مشخص است که تغییرات فعالیت آنزیم عمدتاً به ترکیب اسید آمینه و ترکیب پروتئین بستگی دارد [20,30].

استفاده از لاکاز به‌عنوان یک کاتالیزور امیدوارکننده به سرعت در تحقیقات مختلف با استفاده از فرآیند اولتراسوند توجه را به خود جلب کرده است [31,32]. لاکازها (EC 1.10.3.2) خانواده‌ای از اکسیدوردوکتازهای حاوی چندین مس هستند که می‌توانند طیف وسیعی از سوبستراها مانند فنولیک، معطر و برخی دیگر از ترکیبات را تنها با استفاده از اکسیژن هوا در شرایط ملایم اکسید کنند [33]. واکنش‌های کاتالیز شده با لاکاز به‌دلیل محصولات واکنش چند عملکردی بالقوه آن که در حوزه‌های نساجی، پزشکی و آرایشی استفاده می‌شوند، به‌طور گسترده توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [34,35]. در مطالعات قبلی اطلاعات دقیقی در مورد تأثیر اولتراسوند بر ساختار پروتئین‌های آنزیم لاکاز وجود ندارد [36,37]. Su و همکاران (۲۰۱۸) نقش اولتراسوند را در پلیمریزاسیون کاتکول با استفاده از لاکاز به‌عنوان کاتالیزور در مطالعات قبلی ارزیابی نمودند. هنگامی‌که اولتراسوند استفاده شد، اثرات فراصوت عمدتاً سطوح بالای انتقال است که انتقال جرم را افزایش می‌دهد و مکان‌های انتشار بیشتری ایجاد می‌کند و تعامل بین آنزیم‌ها و واکنش‌دهنده‌ها را در سیستم اولتراسونیک آبی افزایش می‌دهد. داده‌های به‌دست آمده یک اثر تشدید را برای واکنش با بازده تبدیل بالاتر و پلیمرهای طولانی‌تر همان‌طورکه انتظار می‌رود نشان می‌دهد. حمل‌ونقل جرم بالاتر تولید شده توسط اولتراسوند ویژگی اصلی مسئول دسترسی بالاتر بستر به آنزیم است که به تولید پلیمرهای طولانی‌تر کمک می‌کند [38].

علاوه بر این، مطالعات شبیه‌سازی دینامیک مولکولی تغییرات محل فعال ساختار میانی لاکاز را تحت فرآیند اولتراسوند نشان داد (همان‌طورکه در شکل ۲ نشان داده شده است) [38,39]. پدیده کاویتاسیون باعث افزایش دمای محلی به‌عنوان شکل اصلی می‌شود، بنابراین روش شبیه‌سازی بازپخت برای مطالعه رفتار لاکاز تحت حرارت انجام شد. نتایج شبیه‌سازی Su و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که درمان اولتراسوند منجر به یک سایت فعال آنزیمی بازتر می‌شود که ناشی از تغییرات ساختاری مطلوب بدون تغییر یکپارچگی ساختاری آن است. این تغییر ممکن است نقش مهمی در کارایی کاتالیزوری، پایداری و گزینش‌پذیری داشته باشد که محصولاتی با ساختارها یا محصولات متفاوت در مراحل مختلف تولید می‌کند. شایان ذکر است که با استفاده از اولتراسوند، زمان نیمه عمر آنزیم کاهش می‌یابد، اما پارامترهای فرکانس و توان مناسب اولتراسوند می‌تواند واکنش‌های آنزیمی را قبل از غیرفعال‌سازی پروتئین سرعت بخشد [38]، در این حالت از دست دادن فعالیت محصول نهایی تولید شده را محدود نخواهد کرد.



شکل ۲. ساختارهای ترکیبی پروتئین و ساختارهای پلیمری پیشنهادی تحت شرایط مختلف پردازش. سمت چپ (خط ۱): حمام آب (کم انرژی) و حمام اولتراسونیک (با انرژی بالا). در مرکز (خط ۲،۳): ساختارهای میانی لاکاز در دمای ۳۶ درجه سانتی‌گراد و ۷۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده در تصویر، سایت فعال و حفره‌های دسترسی کاتکول به سایت مس T1 با استفاده از زنجیره‌های جانبی اسید آمینه آبی برجسته می‌شوند. اتم‌های لاکاز (خاکستری) و مس (نارنجی)، کاتکول به رنگ سبز؛ سمت راست (خط ۴): ساختارهای پیشنهادی پلی (کاتکول) که با محاسبات کوانتومی، در سطح B3LYP/6-311++G(d,p) به‌دست می‌آیند [38,39]

مطالعات زیادی به بررسی تأثیر اولتراسوند بر عملکرد پروتئین‌ها پرداخته‌اند و نتایج متفاوتی به‌دست آمده است برای مثال Hu و همکاران (۲۰۱۳) اثر اولتراسوند بر پراکندگی پروتئین ایزوله سویا را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که درمان اولتراسونیک می‌تواند حلالیت پروتئین ایزوله سویا را بهبود بخشد [40]. نتایج مطالعات Kingwascharapong و همکاران (۲۰۲۱) نیز مشابه نتایج قبل بوده و حلالیت پروتئین استخراج شده از ملخ بمبئی در اثر اولتراسوند بهبود پیدا نمود [28].

فراصوت باعث ایجاد حفره می‌شود که حباب‌های گذرا را ایجاد می‌کند که هنگام فروپاشی، رادیکال‌های آزاد واکنش‌پذیر گسترده‌ای تولید می‌کنند که به فرآیندها کمک می‌کنند [31,41]. Rahman و همکاران (۲۰۲۰) پیشنهاد کرد که بیشتر تغییرات در پروتئین از رادیکال-های آزاد به‌ویژه رادیکال‌های هیدروکسیل به‌دست می‌آید. این رادیکال‌های آزاد می‌توانند اکسیداسیون گروه‌های جانبی آمینو اسیدی را در زنجیره‌های پروتئینی القا کنند. حساس‌ترین زنجیره‌های جانبی گروه‌های معطر موجود در باقی‌مانده‌های فنیل آلانین، تیروزین و تریپتوفان هستند [41]. نتایج مطالعات دیگری نیز بر این امر تأکید می‌کنند که فراصوت بر فعالیت‌های مهار رادیکال پروتئین‌ها و فعالیت-های آنتی‌اکسیدانی آن‌ها تأثیر می‌گذارد [28,31,41].

همچنین مطالعات دیگری نیز بر تأثیر اولتراسوند بر ویژگی‌های کف‌کنندگی [28,42]؛ ظرفیت آب و روغن [24,25]؛ اهدای الکترون [28]؛ ترکیبات شیمیایی [25] پروتئین تأکید نموده‌اند. نتایج مطالعات Kingwascharapong و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان داد که اولتراسوند می‌تواند راندمان استخراج پروتئین را از ملخ بمبئی افزایش دهد [28]. نتایج مطالعات قدرتی شاه توری و نورانی (۱۳۹۷) نیز نتایج مشابهی داشت و نشان داد که استفاده از اولتراسوند می‌تواند موجب بهبود راندمان استخراج پروتئین و بهبود درصد خلوص پروتئین استخراج شده گردد [43].

۵. تأثیر اولتراسوند با شدت بالا بر عملکرد کربوهیدرات‌ها

تکنیک‌های کلاسیک برای استخراج حلال کربوهیدرات‌ها از مواد آلی بر اساس انتخاب مناسب حلال‌ها است. استخراج اولیه با الکل، ترکیبات قطبی و آپولار را جدا می‌کند، درحالی‌که حلال‌هایی با قطبیت پایین، مواد چربی دوست را جدا می‌کنند [44]. دسته‌های خاصی

از کربوهیدرات‌ها را می‌توان با آب تنظیم شده بر روی مقادیر مختلف pH استخراج کرد. قبل از استخراج، می‌توان مواد را برش داد یا آسیاب کرد تا مساحت سطح را افزایش دهد. برای افزایش سرعت استخراج از هم زدن یا هم زدن مکانیکی استفاده می‌شود. تکنیک های مورد استفاده برای بهبود بازده و سرعت استخراج ممکن است در ترکیب با اولتراسوند با شدت بالا مورد استفاده قرار گیرد [15].

فراصوت می‌تواند کارایی استخراج کربوهیدرات‌ها را افزایش دهد. با توجه به پلی‌ساکاریدها، به نظر می‌رسد اولتراسوند به‌ویژه برای استخراج پلیمرهای با وزن مولکولی کم مانند قندهای ساده یا الیگومرها مفید باشد [45]. تعدادی از مطالعات بر استخراج کربوهیدرات-های پیچیده متمرکز شده‌اند و گزارش هایی از استخراج موفقیت آمیز دکستران، زایلان، پکتین، کیتین و سلولز منتشر شده است [46,47,48].

بسیاری از محققین پیشنهاد کرده‌اند که این اثرات مکانیکی فراصوت بر روی ماتریکس جامد استخراج شده است که مسئول بهبود بازده استخراج است. به‌نظر می‌رسد که اولتراسوند با شدت بالا نفوذ بیشتری از حلال را به مواد سلولی فراهم می‌کند. این می‌تواند منجر به بهبود عملکرد املاح شود. به‌نظر می‌رسد که تولید جت‌های نوسانی نزدیک سطوح جامد، مانند دیواره‌های سلولی چغندر قند، در استخراج قند مفید باشد. اگر انرژی به اندازه کافی بالا باشد، دیواره‌های سلولی ممکن است در واقع شکسته شوند. این امر آزادسازی محتوای داخل سلولی را تسهیل می‌کند. در مطالعاتی که شامل استخراج به کمک فراصوت انواع کربوهیدرات‌های با وزن مولکولی بالا می‌شود، تغییر ناچیزی در ساختار مولکولی، خواص عملکردی و فعالیت‌های بیولوژیکی آن‌ها گزارش شده است. هنگامی‌که اولتراسوند در پراکندگی کربوهیدرات‌های استخراج شده در غیاب سایر ترکیبات گیاهی مزاحم اعمال می شود، این وضعیت می‌تواند به طور چشم‌گیری تغییر کند [15].

نتایج مطالعات مسیبی و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که زمان استخراج، شدت صوت و نسبت نمونه به حلال هر سه شدیداً بر روی راندمان استخراج پکتین از تفاله شاه توت (*Morus nigra*) اثرگذار هستند و راندمان با افزایش هرسه پارامتر به‌صورت خطی افزایش پیدا کرد که سهم شدت صوت در استخراج پکتین به مراتب بیشتر از دو پارامتر دیگر بود [49]. افزایش قابل توجه راندمان و سایر خواص عملکردی در مطالعه‌ی فرهمند و همکاران (۱۳۹۴) تأییدکننده این است که استخراج به کمک فراصوت می‌تواند به‌عنوان روشی برای جایگزین شدن با روش رایج (استخراج آبی) پیشنهاد گردد. نتایج مطالعات ایشان نشان داد با افزایش شدت و زمان استخراج با فراصوت، میزان راندمان، حلالیت و پایداری کف موسیلاژ دانه بِه نیز افزایش قابل توجهی می‌یابد [50].

۶. نتیجه‌گیری

اولتراسوند با شدت بالا می‌تواند برای بهبود استخراج و عملکرد پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها استفاده شود. به‌دلیل ماهیت پیچیده فرآیند کاویتاسیون که اثرات فیزیکی و شیمیایی اولتراسوند با شدت بالا را هدایت می‌کند. حساسیت بیوپلیمرهای غذایی به امواج فراصوت با شدت بالا به ساختار مولکولی آن‌ها بستگی دارد. مولکول‌های سخت خطی مانند کربوهیدرات‌ها نسبت به پروتئین‌های کروی بیشتر مستعد تأثیرات مکانیکی امواج فراصوت با شدت بالا هستند.

۷. منابع

[1] Suslick, K. S., Price, G. J., 1999. Applications of Ultrasound to Materials Chemistry, Annual Review of Material Science, 29, 295-326.
[2] Richards, W. T., Loomis, A. L., 1927. The chemical effects of high frequency sound waves I. A preliminary survey, Journal of the American Chemical Society, 49, 3086-3100.
[3] Heusinger, H., 1990. Comparison of the reactions induced by ultrasound and gamma rays in aqueous lactose solutions, Ultrasonics, 1, 30-36.
[4] Mason, T. J., Lorimer, J. P., 2002. Applied Sonochemistry: The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing, Willey-VCH, Weinheim.
[5] Mason, T. J., Peters, D., 2002. Practical Sonochemistry: Power Ultrasound Uses and Applications, 2nd Edition, Woodhead Publishing, London.
[6] Brohult, S., 1937. Splitting of the haemocyanin molecule by ultrasonic waves, Nature, 140, 805.
[7] Bernstein, L. S., Zakin, M. R., Flint, E. B., Suslick, K. S., 1996. Cavitation thermometry using molecular and continuum sonoluminescence, Journal of Physical Chemistry, 100, 6612-6619.

[8] Kanthale, P. M., Gogate, P. R., Pandit, A. B., Wilhelm, A. M., 2003. Mapping of an ultrasonic horn: link primary and secondary effects of ultrasound, Ultrasonics Sonochemistry, 10, 331-335.
[9] Povey, M. J. W., Mason, T. J., 1998. Ultrasound in Food Processing. London: Blackie Academic and Professional.
[10] O'Sullivan, J., Murray, B., Flynn, C., Norton, I., 2016. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins, Food Hydrocolloids, 53, 141-154.
[11] Ren, X., Hou, T., Liang, Q., Zhang, X., Hu, D., Xu, B., Chen, X., Chalamaiah, M., Ma, H., 2019. Effects of frequency ultrasound on the properties of zein-chitosan complex coacervation for resveratrol encapsulation, Food Chemistry, 279, 223-230.
[12] Bhaskaracharya, R., Kentish, S. E., Ashokkumar, M. 2009. Selected applications of ultrasonics in food processing, Food Engineering Reviews, 1, 31-49.
[13] Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., Lee, D.-U., 2004. Applications and potential of ultrasonics in food processing, Trends in Food Science and Technology, 5, 261-266.
[14] Camino, N. A., Pérez, O. E., Pilosof, A. M. R., 2009. Molecular and functional modification of hydroxypropylmethylcellulose by high-intensity ultrasound, Food Hydrocolloids, 23, 1089-1095.
[15] Weiss, J., Gulseren, I., Kjartansson, G., 2011. Physicochemical effects of high-intensity ultrasonication on food proteins and carbohydrates. In: Nonthermal processing Technologies for Food, USA: Blackwell Publishing, 109-30.
[16] Shimanovich, U., Bernardes, G. J. L., Knowles, T. P. J., Cavaco-Paulo, A., 2014. Protein micro- and nano-capsules for biomedical applications, Chemical Society Reviews, 5, 1361-1371.
[17] Gaikwad, S. G., Pandit, A. B., 2008. Ultrasound emulsification: effect of ultrasonic and physicochemical properties on dispersed phase volume and droplet size, Ultrasonics Sonochemistry, 554-563.
[18] Hashtjin, A. M., Abbasi, S., 2015. Optimization of ultrasonic emulsification conditions for the production of orange peel essential oil nanoemulsions, Journal of Food Science and Technology, 52, 2679-2689.
[19] Jafari, S. M., He, Y., Bhandari, B., 2007. Effectiveness of encapsulating biopolymers to produce sub-micron emulsions by high energy emulsification techniques, Food Research International, 7, 862-873.
[20] Narayanan, C., Bernard, D., Doucet, N., 2016. Role of conformational motions in enzyme function: selected methodologies and case studies, Catalysts (Basel, Switzerland), 6, 81
[21] Suslick, K. S., Grinstaff, M. W., Kolbeck, K. J., Wong, M., 1994. Characterization of sonochemically prepared proteinaceous microspheres, Ultrasonics Sonochemistry, 1, S65-S68.
[22] Silva, R., Ferreira, H., Azoia, N. G., Shimanovich, U., Freddi, G., Gedanken, A., Cavaco-Paulo, A., 2012. Insights on the mechanism of formation of protein microspheres in a biphasic system, Molecular Pharmaceutics, 11, 3079-3088.
[23] García-Moreno, P. J., Horn, A. F., Jacobsen, C., 2014. Influence of casein-phospholipid combinations as emulsifier on the physical and oxidative stability of fish oil-in-water emulsions, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 5, 1142-1152.
[24] آلا قاسمی‌کیا، علی گنجلو، ماندانا بی مکر، ۱۴۰۱. بهینه‌سازی استخراج پروتئین دانه شنبلیله به کمک امواج فراصوت و بررسی خصوصیات ساختاری، عملکردی و فعالیت ضد اکسایشی آن، مجله علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۲۶، ۵۵-۳۹.
[25] مهدیه صفررضوی‌زاده، محمدحسین آق‌خانی، محمد حسین عباس‌پور فرد، فرشته حسینی، ۱۳۹۸. تأثیر روش‌های استخراج قلیایی و فراصوت بر روی برخی از خواص ایزوله پروتئین کینوآ، فناوری‌های جدید در صنعت غذا، ۳، ۴۰۹-۳۹۹.
[26] Vera-Salgado, J., Calderón-Chiu, C., Calderón-Santoyo, M., Barros-Castillo, J. C., López-García, U. M., Ragazzo-Sánchez, J. A., 2022. Ultrasound-Assisted Extraction of Artocarpus heterophyllus L. Leaf Protein Concentrate: Solubility, Foaming, Emulsifying, and Antioxidant Properties of Protein Hydrolysates, Colloids Interfaces, 6, 50.

[27] Wang, Q., Wang, Y., Huang, M., Hayat, K., Kurtz, N. C., Wu, X., Ahmad, M., Zheng, F., 2021. Ultrasound-assisted alkaline proteinase extraction enhances the yield of pecan protein and modifies its functional properties, Ultrasonics Sonochemistry, 80, 105789.
[28] Kingwascharapong, P., Chaijan, M., Karnjanapratum, S., 2021. Ultrasound-assisted extraction of protein from Bombay locusts and its impact on functional and antioxidative properties, Scientific Reports, 11, 17320.
[29] Mawson, R., Gamage, M., Terefe, N. S., Knoerzer, K., 2011. Ultrasound in Enzyme Activation and Inactivation. In: Feng, H., Barbosa-Canovas, G., Weiss, J. (eds) Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. Food Engineering Series. Springer, New York, NY.
[30] Petrović, D., Risso, V. A., Kamerlin, S. C. L., Sanchez-Ruiz, J. M., 2018. Conformational dynamics and enzyme evolution, Journal of the Royal Society Interface, 144, 20180330.
[31] Basto, C., Silva, C. J., Gübitz, G., Cavaco-Paulo, A., 2007. Stability and decolourization ability of Trametes villosa laccase in liquid ultrasonic fields, Ultrasonics Sonochemistry, 3, 355-362.
[32] Rodríguez Couto, S., Toca Herrera, J. L., 2006. Industrial and biotechnological applications of laccases: a review, Biotechnology Advances, 5, 500-513.
[33] Pezzella, C., Guarino, L., Piscitelli, A., 2015. How to enjoy laccases, Cellular and Molecular Life Sciences, 72, 923-940.
[34] Mate, D. M., Alcalde, M., 2017. Laccase: a multi-purpose biocatalyst at the forefront of biotechnology, Microbial Biotechnology, 10, 1457-1467.
[35] Basto, C., Tzanov, T., Cavaco-Paulo, A., 2007. Combined ultrasound-laccase assisted bleaching of cotton, Ultrasonics Sonochemistry, 14, 350-354.
[36] Goncalves, I., Silva, C., Cavaco-Paulo, A., 2015. Ultrasound enhanced laccase applications, Green Chemistry, 17, 1362-1374.
[37] Ferrero, F., Periolatto, M., 2012. Ultrasound for low temperature dyeing of wool with acid dye, Ultrasonics Sonochemistry, 19, 601-606.
[38] Su, J., Castro, T. G., Noro, J., Fu, J., Wang, Q., Silva, C., Cavaco-Paulo, A., 2018. The effect of high-energy environments on the structure of laccase-polymerized poly(catechol), Ultrasonics Sonochemistry, 48, 275-280.
[39] Su, J., Fu, J., Silva, C., Cavaco-Paulo, A., 2019. Can Laccase-assisted processing conditions influence the structure of the reaction products?. Trends in Biotechnology, 7, 683-686.
[40] Hu, H., Wu, J., Li-Chan, E. C.Y., Zhu, L., Zhang, F., Xu, X., Fan, G., Wang, L., Huang, X., Pan, S., 2013. Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions, Food Hydrocolloids, 2, 647-655.
[41] Rahman, M. M., Byanju, B., Grewell, D., Lamsal, B. P., 2020. High-power sonication of soy proteins: hydroxyl radicals and their effects on protein structure, Ultrasonics Sonochemistry, 64, 105019.
[42] Misir, G. B., Koral, S., 2019. Effects of ultrasound treatment on structural, chemical and functional properties of protein hydrolysate of rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*) by-products, Italian Journal of Food Science, 31, 205-223.
[43] میترا قدرتی شاه توری، مولود نورانی، ۱۳۹۷، ارزیابی تأثیر پیش تیمار فراصوت بر درصد خلوص ایزوله پروتئینی استخراج شده از دانه گلرنگ، اولین همایش ملی علوم کشاورزی و زیست محیطی ایران، باوی.
[44] Silva, G. L., Lee, I. S., Kinghorn, A. D., 1998. Special Problems with the Extraction of Plants. New Jersey: Humana Press.
[45] Mason, T. J., Paniwnyk, L., Lorimer, J. P., 1996. The uses of ultrasound in food technology, Ultrasonics Sonochemistry, 3, S253-S260.
[46] Hromadkova, Z., Ebringerova, A., Valachovic, P., 1999. Comparison of classical and ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Salvia officinalis* L, Ultrasonics Sonochemistry, 5, 163-168.

[47] Hromadkova, Z., Ebringerova, A., Valachovic, P., 2002. Ultrasound-assisted extraction of water-soluble polysaccharides from the roots of valerian (*Valeriana officinalis* L.), Ultrasonics Sonochemistry, 9, 37-44.

[48] Hromadkova, Z., Ebringerova, A., 2003. Ultrasonic extraction of plant materials- investigation of hemicellulose release from buckwheat hulls, Ultrasonics Sonochemistry, 10, 127-133.

[49] عاطفه فرهمند، مهدی وریدی، آرش کوچکی، ۱۳۹۵. ارزیابی خواص عملکردی موسیلاژ دانه بِه استخراج‌شده به‌کمک فراصوت، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، ۱، ۱۸۱-۱۶۳.

[50] وحید مسیبی، فریده طباطبایی یزدی، زهرا امام جمعه، ۱۳۹۶. بهینه‌سازی شرایط استخراج پکتین به کمک امواج اولتراسونیک از تفاله شاه توت (*Morus nigra* L.). نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، ۴، ۶۱۰-۵۹۴.