

اثر فراصوت بر ارزیابی تازگی و فراوری تخم مرغ به عنوان روش فرایندی

جدید و پیشرفته

لیلا نادری	زهرة حمیدی اصفهانی	معصومه فائز*
استادیار	استاد	مری
دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران	دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران	عضو هیئت علمی دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
L_naderi@semnan.ac.ir	hamidy_z@modares.ac.ir	mfaez@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴

چکیده

تخم مرغ تازه منبع عالی از مواد مغذی و ترکیبات فراسودمند برای تأمین سلامتی انسان است. فراوری حرارتی متداول ترین روش برای ایمنی و ماندگاری پایدار این ماده غذایی است. اما دما اثرات مخربی مانند انعقاد و همچنین تغییر در طعم و بافت عناصر غذایی از جمله تخم مرغ ایجاد می کند. از طرفی حذف باکتری‌هایی مثل اشرشیاکلی^۱ یا سالمونلا^۲ نیاز به دمای بالا دارد. فراصوت فناوری سریع، متنوع، نوظهور، امیدوارکننده و در حال تحقیق و توسعه است که می تواند جایگزین فراوری حرارتی شود. به طور کلی، فراصوت در دو بخش تشخیص تازگی تخم مرغ و میکروبی زدایی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. ارزیابی تازه بودن تخم مرغ که با سطح پروتئین‌ها، مواد معدنی و ویتامین‌های موجود در آن ارتباط دارد، به شدت مورد نیاز صنایع غذایی است. بررسی‌ها نشان می دهد سرعت فاز فراصوت به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تخم مرغ بستگی دارد و می تواند به عنوان ابزاری غیرمخرب و کارآمد برای ارزیابی کیفیت تخم مرغ مورد استفاده قرار گیرد. در مورد میکروبی زدایی نیز فراصوت بسیار مؤثر و کاربردی است. بررسی‌ها نشان می دهد که فراصوت به تنهایی یا همراه با سایر فرایندهای پاستوریزاسیون^۳ می تواند برای فراوری به کار روند. این شیوه‌های پاستوریزه کردن می توانند به فراوری حرارتی کمک کنند یا حتی جایگزین آنها شوند.

واژگان کلیدی: تخم مرغ، فراوری با فراصوت، میکروبی زدایی، تشخیص تازگی، فراصوت

۱. مقدمه

محصولات مثل کیک‌ها، مایونز و محصولات گوشتی فراوری شده مورد استفاده قرار می گیرند [۲]. پروتئین‌های سفیده تخم مرغ به دلیل فعالیت زیستی، در دسترس بودن و کاربرد آسان آن در زمینه‌های مختلف زیست پزشکی از جمله کشت سلولی، ترمیم زخم، مهندسی بافت، مدل‌های کشت

تخم مرغ منبعی عالی از پروتئین‌های ضروری، چربی‌ها، ویتامین‌ها، مواد معدنی و ترکیبات زیست فعال است [۱]. پروتئین‌های تخم مرغ به دلیل خاصیت کف‌کنندگی، امولسیون و ژل‌زایی بسیار خوبی که دارند در طیف وسیعی از

ماندگاری بیشتر فراهم کند [۹]. در این میان، فراوری فراصوت به‌عنوان جایگزین مناسبی برای پاستوریزاسیون حرارتی مطرح شده است. در واقع این روش یک فناوری بالقوه برای بهبود ایمنی تخم‌مرغ و محصولات مشتق شده از آن از نظر میکروبی است [۱۰].

تحقیقات انجام شده بر روی کاربرد فراصوت در فراوری مواد غذایی نشان داده است که فراوری با فراصوت باعث کاهش اندازه ذرات، بهبود حلالیت (پروتئین‌های ایزوله نخود و سویا)، بهبود خصوصیات امولسیون^۷ سفیده تخم‌مرغ، ژلاتین گاو و پروتئین‌های نخود می‌شود [۱۱]. همچنین نتایج تحقیق بر روی اثرات پارامترهای عملکردی منابع فراصوت مثل فرکانس، دما و مدت زمان تابش بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پروتئین سفیده تخم‌مرغ نشان می‌دهد که فناوری سبزی فراوری با فراصوت توان بالا به دلیل اثر سونوشیمیایی^۸ فراصوت بر ترکیب مولکولی پروتئین سفیده تخم‌مرغ باعث افزایش قابل توجه حلالیت، ظرفیت کف‌سازی و کاهش اندازه ذرات شده و خواص فیزیکوشیمیایی آن را بهبود می‌بخشد [۲]. همچنین تحقیقات نشان می‌دهد که فراصوت یا فراصوت به همراه سایر فناوری‌های گرمایشی باعث اختلال در حلالیت و تجمع پروتئین‌ها در ذرات کوچک‌تر شده و گلوبولین^۹ S۱۱ را به مقدار قابل توجهی آزاد می‌کند، بنابراین، این روش‌ها برای اصلاح خصوصیات امولسیون‌کننده گلوبولین S۱۱ مناسب هستند [۱۲].

همان‌طور که گفته شد، بسیاری از مواد غذایی مثل تخم‌مرغ و محصولات زیست‌فعال از نظر حرارتی حساس و در برابر تغییرات شیمیایی و فیزیکی آسیب‌پذیر هستند. فرآوری مواد غذایی با کمک فراصوت به‌عنوان روشی جدید و غیرحرارتی مورد توجه محققان قرار گرفته است. از جمله مزایای فراوری با فراصوت می‌توان به زمان پردازش کوتاه‌تر، افزایش کیفیت و نیز سازگاری با محیط زیست (فناوری سبزی) اشاره کرد [۱۳]. بنابراین، فراصوت برای استخراج و فرآوری محصولات و مواد غذایی حساس به حرارت بسیار مفید است. از آنجا که

سلول سه بعدی، داروسازی، فناوری‌های تغذیه و مواد غذایی و نیز حسگر زیستی^۴ (برای اندازه‌گیری سریع و آسان مولکول‌های موجود در مایعات بدن مثل خون و برای اهداف تشخیصی یا نظارتی) کاربرد دارند [۳]. مصرف تخم‌مرغ می‌تواند خطرات التهاب و بیماری‌های ایمنی را کاهش داده [۴] و احتمال ابتلا به آلزایمر را به دلیل کولین^۵ موجود در آن کاهش دهد [۵].

نگرانی در مورد کیفیت و ایمنی مواد غذایی باعث تمایل تولیدکنندگان به استفاده از روش‌هایی شد که نه تنها مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط زیست باشند، بلکه نگرانی در مورد کیفیت و پایداری مواد مغذی، ایمنی و عدم سمیت را به حداقل برسانند. تیمارسازی حرارتی، پتانسیل بالایی برای فرایند غذایی و تولید محصولات غذایی سالم و با ارزش افزوده بالا دارد ولی در برخی موارد باعث تغییرات قابل توجهی در خواص مواد غذایی شبیه تغییر رنگ (تیره‌گی آب میوه در فرایند پاستوریزاسیون)، توسعه عطر و طعم نامطلوب (طعم پختگی در شیر پاستوریزه) و کاهش مواد مغذی (حذف کاروتنوئید^۶ پس از پاستوریزاسیون) می‌شود [۶]. فرایند حرارتی متعارف در تخم‌مرغ نیز به دلیل وجود پروتئین‌های حساس به حرارت به راحتی می‌تواند باعث تجزیه و تجمع پروتئین و در نتیجه کاهش عملکرد پروتئین‌های تخم‌مرغ شود. بر این اساس صنعت غذا به دنبال روش‌های جدید فراوری غیرحرارتی یا روش‌هایی است که حرارت کمتری تولید کنند، تا عملکرد پروتئین‌ها حفظ شود [۲]. بنابراین، چالش اصلی همان شناسایی فناوری‌های جدید است که نه تنها ویژگی‌های ذاتی عملکرد تخم‌مرغ یا اجزای آن را بهبود بخشد، بلکه کیفیت محصول را نیز افزایش دهد [۷]. یک روش مناسب باید عمر مفید محصولات را افزایش و میکروارگانیزم‌های نامطلوب را کاهش داده و کاهش خواص مواد مغذی و تغییر ظاهر محصولات را به حداقل برساند [۸]. استفاده از فناوری‌های جدید می‌تواند روش‌های مناسبی برای تولید محصولات غذایی با کیفیت بالا و

زمان نگهداری و همچنین تغییرات کیفی در حین نگهداری تخم مرغ مورد بررسی قرار گرفته است. بخش پایانی مقاله نیز به مقایسه روش‌های مختلف فراوری تخم مرغ و سپس نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲. فراصوت و کاربرد آن در صنایع تخم مرغ

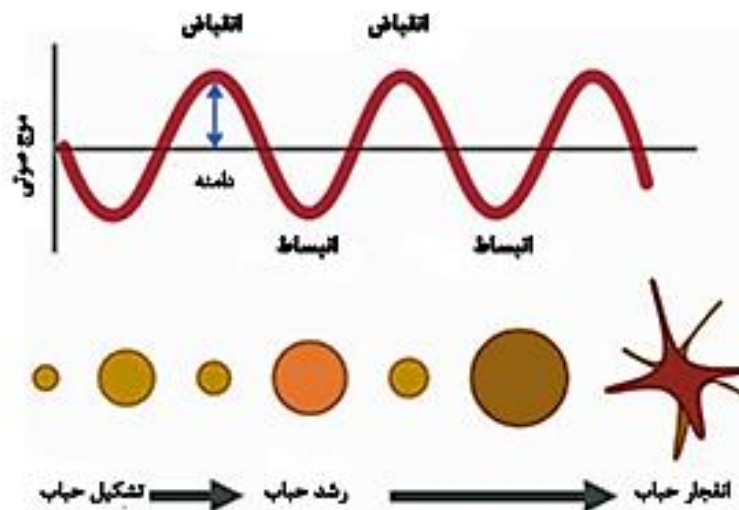
۲-۱. فراصوت

به‌طور کلی فراصوت به‌عنوان یک موج مکانیکی با فرکانس بالاتر از ۲۰ کیلو هرتز تعریف می‌شود.

فرکانس امواج صوتی در محدوده شنوایی انسان یعنی ۱۶ هرتز تا ۲۰ کیلو هرتز و فرکانس امواج فراصوت در فرکانس‌های بالاتر از شنوایی انسان یعنی در محدوده فرکانس ۲۰ کیلو هرتز تا ۱۰ مگاهرتز قرار دارند [۱۶] و هنگامی که از محیطی عبور می‌کنند، باعث جابه‌جایی طولی ذرات و در نتیجه انبساط و انقباض تناوبی در محیط می‌شوند [۱۳]. در طی این انبساط و انقباض در نقاطی که فشار مایع از مقدار بحرانی پایین‌تر است، حباب‌های بخار ایجاد می‌شوند. سپس این حباب‌ها منبسط و منقبض می‌شوند و در نهایت حباب‌ها در چرخه انقباض به شرایط یک بحرانی می‌رسند که انفجار اتفاق افتاده و مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود. نمایی از این فرایند در شکل ۱ نشان داده شده است. دما و فشار تخمینی در لحظه فروپاشی به ترتیب حدود ۵۰۰۰ کلون و ۱۰۰۰ اتمسفر است [۱۷]. این فشار و دمای زیاد که به دلیل انفجار حباب‌ها در مجاورت سطح سلول فراهم می‌شوند، باعث ایجاد میکروجهت‌هایی شده که به سمت سلول بوده و باعث پارگی آنها می‌شود.

تجهیزات مورد نیاز فراصوت به‌راحتی و در دسترس هستند، صنایع غذایی علاقه زیادی به استفاده از این فناوری جدید و سازگار با محیط زیست دارد.

علاوه‌براین پس از تخم‌گذاری، به دلیل تبادل گازها با محیط و از بین رفتن رطوبت، کیفیت تخم مرغ با گذشت زمان تغییر می‌کند. ارزیابی تازه بودن تخم مرغ که با سطح پروتئین‌ها، مواد معدنی و ویتامین‌های آن ارتباط زیادی دارد، کاری اساسی و مهم در صنایع غذایی است [۱]. تخم مرغ با پوسته فاسد شدنی است و می‌تواند به‌سرعت در طی ذخیره‌سازی دچار افت کیفیت شده و باعث خسارت اقتصادی عمده‌ای به صنعت طیور شود. این افت کیفیت با تغییرات شیمیایی، تغذیه‌ای، عملکردی و بهداشتی همراه است. سرعت این تغییرات در زمان ذخیره‌سازی به دما، رطوبت، محیط گازی، زمان نگهداری، سن و نژاد مرغ بستگی دارد [۱۴]. تغییرات شیمیایی و فیزیکی زیادی در طی دوره انبارکردن و نگهداری تخم مرغ اتفاق می‌افتد. از جمله تغییرات فیزیکی مشاهده‌پذیر در طی دوره انبارکردن و نگهداری تخم مرغ می‌توان به افزایش مساحت حفره هوا، نازک شدن ضخامت سفیده و زرده تخم مرغ اشاره کرد. عموماً افزایش مساحت حفره هوایی به دلیل از دست دادن CO₂ و آب از طریق پوسته است. همچنین تغییرات مربوط به کهنه‌تر شدن سفیده و زرده تخم مرغ از مشهودترین تغییرات هستند [۱۵]. در این مقاله در ابتدا به فراصوت و نحوه عملکرد آن و سپس به کاربرد فراصوت در مورد تخم مرغ به‌عنوان محصولی مهم پرداخته خواهد شد. این بخش به دو قسمت استفاده از فراصوت در تشخیص تازگی تخم مرغ و نیز میکروزدایی تقسیم می‌شود. پتانسیل فراصوت برای تعیین تازگی، پیش‌بینی



شکل ۱. سازوکار حفره زایی فراصوت [۱۷].

حتی در مدت زمان‌های کوتاه نیز به دلیل رشد میکروبی بسیار آسیب‌پذیر است.

بنابراین، تخم‌مرغ تازه بسیار فاسد شدنی است و زمان ماندگاری محدودی دارد [۹]. برخی از پارامترهای مهم ارزیابی کیفیت تخم‌مرغ عبارتند از واحد هاو^{۱۱}، pH آلبومین، شاخص زرده، رنگ زرده و کاهش وزن تخم‌مرغ [۱۹]. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، واحدها و حجم سلول هوا در طول زمان نگهداری به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. همچنین شاخص زرده در طول زمان نگهداری کاهش می‌یابد. افزایش حجم سلول هوا مهم‌ترین تغییر فیزیکی قابل مشاهده در تخم‌مرغ در طول دوره ذخیره‌سازی است که عمدتاً به دلیل از دست دادن آب و CO₂ از طریق پوسته‌ی تخم‌مرغ و نیز تغییرات مربوط به آلبومین (سفیده) و زرده است [۲۰].

پدیده حفره‌زایی در نزدیک لایه مرزی آن سبب اغتشاش، از بین رفتن لایه مرزی، افزایش سطح تماس و ایجاد منافذ کوچک در سطح شده که عمل جذب و انتشار مواد تسهیل می‌یابد [۱۸]. فراصوت عمدتاً با دو روش مختلف به کار گرفته می‌شود که عبارتند از:

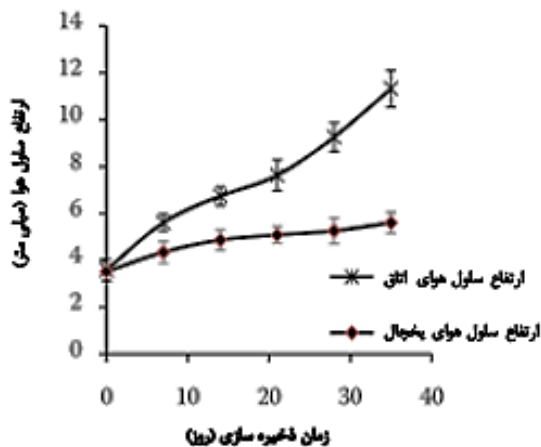
۱- قرار دادن پروب فراصوت در محصول مایع، و

۲- غوطه‌ور کردن محصول در حمام فراصوت.

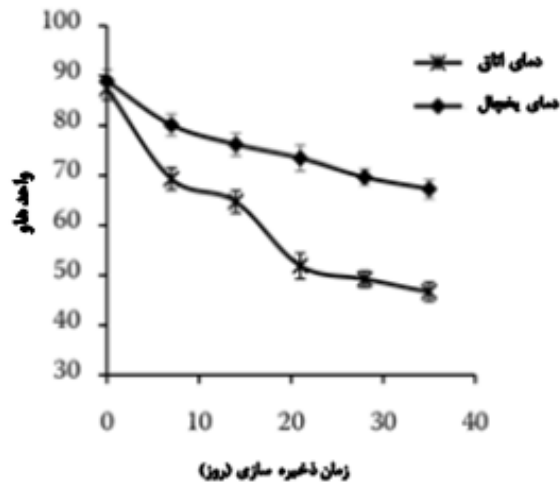
اگر چه حمام فراصوت در مقایسه با پروب دارای توان کمتری است، اما برای غیرفعال‌سازی میکروبی و بهبود کیفیت محصولات غذایی کاربرد دارد [۲].

۲-۲. تخمین تازگی تخم‌مرغ

علی‌رغم اینکه تخم‌مرغ دارای بسته‌بندی طبیعی (پوسته‌ی تخم‌مرغ) است، اما به دلیل میزان زیاد پروتئین موجود در آن



(ب)

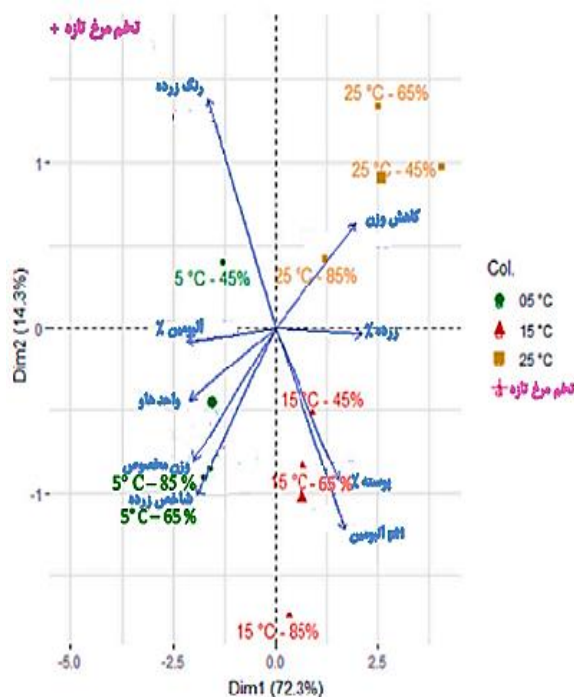


(الف)

شکل ۲. نمودارهای الف) عدد هوا و ب) ارتفاع سولول هوا بر حسب زمان در دمای اتاق و دمای یخچال [۲۰].

بین تخم‌مرغ‌ها بلافاصله پس از تخم‌گذاری و پس از نگهداری ۱۴ روزه وجود ندارد. عملاً گروه تخم‌مرغ تازه در طی زمان قابل دسترس نیست. نتایج بررسی در زمان‌های کمتر انبارداری تخم‌مرغ، مثلاً ۷ روز نیز مؤید این مساله است. نکته حائز اهمیت دمای نگهداری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تخم‌مرغ‌های انبار شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد رفتار کاملاً متفاوتی را نسبت به سایر تخم‌مرغ‌های انبار شده نشان می‌دهند که بیانگر این مطلب است که دما مهم‌ترین عامل محیطی است که بر تازگی تخم‌مرغ تأثیر دارد. به‌طور کلی، تخم‌های ذخیره شده در ۵ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد با مقادیر بالاتر واحدها و، شاخص زرده، وزن مخصوص و رنگ زرده مشخص می‌شوند، درحالی‌که تخم‌مرغ‌های ذخیره شده در ۲۵ درجه سانتی‌گراد با کاهش وزن بالاتر در زمان ذخیره‌سازی از سایر دماها متمایز می‌شوند. این اختلاف در زمان‌های کمتر ذخیره‌سازی هم مشاهده می‌شود البته میزان اختلاف اندکی کمتر است.

همچنین هرچه واحد هوا بالاتر باشد، کیفیت آلبومین بهتر خواهد بود [۱۹]. شاخص زرده^۲، ویسکوزیته^۳ زرده را نشان می‌دهد و مقادیر بالاتر YI نشان‌دهنده کیفیت بهتر تخم‌مرغ است [۲۱]. حفظ کیفیت تخم‌مرغ‌های با پوسته در بازاریابی بسیار مهم است و افزایش پایداری این تخم‌مرغ‌ها در حین نگهداری ضروری است. مقاومت پوسته نه تنها برای به حداقل رساندن انتقال جرم از طریق پوسته تخم‌مرغ مهم است و باعث افزایش ثبات ذخیره‌سازی آن می‌شود، بلکه باعث افزایش ویژگی‌های ضدباکتری تخم‌مرغ نیز می‌شود. این امر باعث افزایش دوره نگهداری در دمای محیط و کاهش تلفات اقتصادی است [۲۲]. کیفیت تخم‌مرغ یک مفهوم چند بعدی است که به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. تحقیقات زیادی تأثیر عوامل مختلف بر کیفیت تخم‌مرغ را مورد بررسی قرار داده‌اند. به‌عنوان مثال، تأثیر سه عامل محیطی (دما، زمان نگهداری و رطوبت نسبی) بر شاخص‌های کیفیت تخم‌مرغ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، هیچ شباهتی



شکل ۳. نمودارهای همبستگی برای شاخص‌های کیفیت مهم تخم‌مرغ پس از ذخیره‌سازی ۲۱ روز در دماهای مختلف. [۲۳].

تربکبات زیست‌فعال، خشک کردن و غیرفعال‌سازی آنزیم به دست فیلتراسیون کسب کرده است [۳۲]. این فناوری یکی از روش‌های غیرمخرب و کم هزینه است که می‌تواند در ارزیابی کیفیت و کشف تقلب در محصولات کشاورزی، دام و طیور مورد استفاده قرار گیرد [۳۳]. در استفاده از فناوری‌های مبتنی بر فراصوت اغلب به دلیل ارزان‌تر بودن، قابلیت حمل دستگاه و زیست‌سازگاری نسبت به سایر روش‌ها برتری دارند. علاوه بر این، امواج فراصوت کم انرژی در آزمایش غیرمخرب^{۱۹} (NDT)، تأثیرات منفی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی مواد زیستی ندارند [۳۴]. ابونجمی در سال ۲۰۱۴ با پیش‌بینی محاسبه سرعت فراصوت در تخم‌مرغ، امکان پیش‌بینی غیرمخرب شاخص‌های اصلی کیفیت تخم‌مرغ‌های تجاری را بررسی کرد و مدلی برای ارزیابی تازگی تخم‌مرغ با استفاده از فراصوت غیرمخرب ارائه نمود. در این آزمایش از امواج فراصوت با فرکانس ۱۵۰ کیلو هرتز و با سرعت نمونه‌برداری ۲/۵ گیگا نمونه بر ثانیه^{۲۰} در بررسی تازگی تخم‌مرغ‌ها استفاده شد و دما در طی این

نتایج بررسی با روش سطح پاسخ^{۱۴} (RSM) که در شکل ۳ ارائه شده است، نشان می‌دهد که دما مهم‌ترین عامل محیطی مؤثر بر ویژگی‌های کیفیت تخم‌مرغ است و سپس به ترتیب زمان ذخیره‌سازی و رطوبت نسبی عوامل مؤثر بعدی هستند [۲۳]. بنابراین، فراوری غیرحرارتی تخم‌مرغ بسیار مهم است. تحقیقات زیادی در مورد افزایش پایداری کیفیت تخم‌مرغ تازه با روش‌های غیرحرارتی مانند فشار هیدرواستاتیک بالا ۱۵ (HHP) [۲۴]، فراصوت (US) [۹، ۹، ۲۵]، اشعه ماوراء بنفش (UV) [۲۶، ۲۷]، میدان‌های الکتریکی پالسی^{۱۷} [۲۸، ۲۹] و استفاده از ازن^{۱۸} [۳۰]، برای جلوگیری از تغییرات منفی ناشی از گرما در مواد غذایی فاسد شدنی انجام شده است [۹]. همچنین، نیاز به وجود روش‌های قابل اعتماد، سریع و غیرمخرب برای فراوری غیرحرارتی و ارزیابی هم‌زمان کیفیت تخم‌مرغ منجر به توسعه بسیاری از این روش‌های پیشنهادی شده است [۳۱]. فراصوت یکی از فناوری‌های جدید، پایدار و سبز است که محبوبیت فزاینده‌ای در فراوری مواد غذایی به‌ویژه در تجزیه بافت، استخراج

کانتینرهای حمل و نقل و ذخیره‌سازی که دارای رطوبت و درجه حرارت بالا هستند، می‌توانند منجر به فساد و خسارات اقتصادی یا ایجاد خطر برای سلامت عمومی شوند. اشرشیاکلی، سالمونلا و استافیلوکوکوس اورئوس^{۲۱} اصلی‌ترین عوامل بیماری‌زایی هستند که می‌توانند از طریق تخم‌مرغ منتقل شوند [۳۶]. تخم‌مرغ کامل مایع (LWE)^{۲۲} طبق مقررات فعلی باید در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر برای مدت حداقل ۳/۵ دقیقه گرم شود. از طرفی محققان دریافته‌اند که عملکرد سفیده تخم‌مرغ پس از گرم شدن چند دقیقه‌ای در دمای بالاتر از ۵۷ درجه سانتی‌گراد، ضعیف می‌شود و به دلیل انعقاد پروتئین‌های سفیده باید دماهای پایین‌تر برای نگهداری انتخاب شود. همچنین، شیوع سالمونلا^{۲۳} می‌تواند به دلیل پاستوریزاسیون ناقص میکروب‌های بیماری‌زا در دمای پایین اتفاق بیفتد. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که پاستوریزاسیون دمای بالا برای تخم‌مرغ کاربرد ندارد و بنابراین دستیابی به فناوری‌های غیرحرارتی جایگزین برای اطمینان از ایمنی مواد غذایی مانند تخم‌مرغ و نیز حفظ ویژگی‌های کیفیت تخم‌مرغ کامل مایع ضروری است [۳۷]. به همین دلیل، از دهه‌های گذشته توسعه سریع روش‌های جدید نگهداری و حذف آلودگی به دلیل تقاضای مصرف‌کنندگان مواد غذایی تازه و حداقل فراوری شده با ماندگاری طولانی آغاز شده است.

علاوه‌براین، تحقیقات زیادی درمورد بهبود یا حفظ کیفیت تخم‌مرغ تازه با استفاده از ترکیب روش‌های غیرحرارتی انجام شده است [۳۸]. فراصوت با شدت بالا به‌عنوان فناوری غیرفعال‌سازی غیرحرارتی برای محصولات مثل تخم‌مرغ مورد توجه تولیدکنندگان مواد غذایی قرار گرفته است. از مزایای فراصوت با شدت بالا می‌توان به حفظ کیفیت محصول، طراوت، همگن‌سازی محصول و همچنین غیرفعال‌سازی هم‌زمان عوامل بیماری‌زا اشاره کرد. علاوه‌براین، این شیوه فراوری و میکروبی‌زدایی ساده و نسبتاً ارزان است و به‌راحتی با اکثر محیط‌ها سازگار می‌شود.

پژوهش، به دقت کنترل شد. این مدل پیشنهادی با محاسبه سرعت فاز فراصوت در داخل ماده تخم‌مرغ قادر به تعیین مقدار آلبومین، ارتفاع سلول هوا و برخی پارامترهای کیفیت تخم است. نتایج نشان داد که دامنه قله‌های اصلی سیگنال فراصوت در طی زمان و با تعداد روزهای انبار تخم‌مرغ افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، تفاوت قابل‌توجهی بین مقادیر میانگین سرعت فاز امواج صوتی در تخم‌مرغ در روزهای مختلف انبارداری مشاهده شد. مقایسه نتایج آزمایش بر روی تخم‌مرغ‌های انبار شده در دمای اتاق و یخچال نشان داد که این تغییرات برای تخم‌مرغ‌های انبار شده در دمای اتاق با اهمیت‌تر است. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد که سرعت فاز می‌تواند به‌عنوان معیار مناسبی برای اندازه‌گیری آلبومین و ارتفاع سلول هوا و بنابراین کیفیت تخم‌مرغ باشد [۱]. علاوه‌براین، مقایسه نتایج این شیوه تشخیص با نتایج تعیین ارتفاع سلول هوا، ضخامت آلبومین، واحد هاو و شاخص زرده تخم‌مرغی که با شیوه‌های مخرب اندازه‌گیری شد، مؤید تطابق بسیار مناسب نتایج این دو شیوه بود [۱].

۲-۳- میکروبی‌زدایی تخم‌مرغ

۱-۲-۳ پاستوریزاسیون تخم‌مرغ کامل

تخم‌مرغ به‌عنوان غذایی کامل و طبیعی در نظر گرفته می‌شود. سفیده تخم‌مرغ منبع طبیعی بسیار خوب از پروتئین با کیفیت بالا است که سرشار از اسیدهای آمینه ضروری است. زرده منبع آنتی‌اکسیدان‌ها، اسیدهای آمینه معطر، کاروتنوئیدها، ویتامین‌ها، فسفولیپیدها و پروتئین‌ها است، که نه تنها نیاز تغذیه‌ای را تأمین می‌کند بلکه برای سلامتی نیز مفید است و می‌تواند از بروز برخی بیماری‌ها نظیر بیماری قلبی جلوگیری کند. همچنین، مواد موجود در پوسته تخم‌مرغ مخصوصاً کلسیم به خوبی جذب مواد معدنی بدن انسان می‌شود [۳۵]. سطح تخم‌مرغ می‌تواند قبل از تخم‌گذاری یا بعد از تخم‌گذاری با پرندگان به انواع میکروارگانیسم‌ها آلوده شود. مواد مدفوع، مواد لانه‌سازی، گرد و غبار، مواد غذایی،

باعث از بین رفتن قابل توجه تخم مرغ در هنگام ذخیره سازی و حمل و نقل در بازار خواهد شد [۴۳]. لذا لازم است در مورد اثر هم افزایی درمان فراصوت به همراه استفاده از پوشش های خوراکی برای دستیابی به استحکام پوسته، کیفیت تخم مرغ و میکروبی زدایی بررسی های بیشتری انجام شود.

۲-۳-۲ پاستوریزاسیون زرده و سفیده تخم مرغ

همان طور که گفته شد، پروتئین ها برای تغذیه انسان ضروری هستند و تخم مرغ یکی از بهترین منابع پروتئین است که دارای خواص مفید و بی شماری است [۴۴]. سفیده تخم مرغ مایع زیستی چسبناکی است که به دلیل ویژگی های فیزیکی و شیمیایی و پروتئین های ضد میکروبی خاصیت ضد باکتری دارد. اوالبومین^{۲۶}، که حدود ۵۴٪ از کل پروتئین سفیده تخم مرغ را تشکیل می دهد، مسئول اصلی ژل سازی است [۴۵]. زرده تخم مرغ تقریباً از ۵۰٪ آب، ۳۰٪ چربی و ۱۶٪ پروتئین تشکیل شده است [۴۶]. محتوای زیاد و تنوع پروتئین و لیپید در زرده تخم مرغ، اساس تشکیل ژل است [۴۷]. این ماده به دلیل خواص تغذیه ای، حسی و فراسودمندی آن به صورت گسترده در محصولات غذایی مختلف به کار می رود [۴۸]. همچنین تخم مرغ مایع به طور گسترده برای تولید غذاهای فرآوری شده، استفاده می شود. با این حال، ماندگاری این محصولات مایع بسیار کم است و فرایندهای مختلفی برای افزایش ماندگاری این ماده انجام می شود. تغییرات پروتئین های تخم مرغ در طی فرآوری های حرارتی صنعتی می توانند منجر به کاهش عملکرد مطلوب آن شوند [۴۹]. بنابراین، انعقاد پروتئین ها در دمای بالا باعث محدود شدن فرایند پاستوریزاسیون تخم مرغ به دماهای پایین تر و در نتیجه زمان های طولانی تر می شود [۵۰]. این محدودیت فرآوری در دمای پایین نیز به نوبه خود می تواند خطرات بیماری زا بی مانند آلودگی با اشرشیاکلی ایجاد کند [۵۱]. بنابراین، تقاضای زیادی برای فناوری های سازگار با محیط زیست برای پردازش مواد غذایی ایجاد شده است.

محققین اثر فراصوت با شدت بالا بر غیرفعال سازی سالمونلا انتریتیدیس^{۲۴} در محیط کشت و تخم مرغ کامل مایع (LWE) را بررسی کردند. علاوه بر این، نمونه ها از نظر رنگ و خواص رئولوژیکی^{۲۵} نیز بررسی شدند. این مطالعه نشان داد که به کارگیری فراصوت با شدت بالا می تواند کنترل سریع سالمونلا در LWE و سایر غذاهای مایع را به دنبال داشته باشد و این روش یک روش ایمن سازی مناسب است [۳۹]. فراصوت و ازن نیز در بین فرآوری های غیرحرارتی به دلیل پتانسیل بالقوه آنها در بهبود کیفیت و ایمنی مواد غذایی فاسد شدنی بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. تحقیقات زیادی در مورد استفاده از فراصوت برای حفظ کیفیت غذاهای فاسد شدنی نظیر تخم مرغ انجام شده است [۴۰]. اما بیشتر تحقیقاتی که در مورد فراصوت انجام شده، بر روی جنبه میکروبیولوژیکی محصولات متمرکز شده است [۴۱] و متأسفانه مطالعات کمی در مورد یافتن بهترین روش تیمار درمانی برای حفظ کیفیت داخلی تخم مرغ انجام شده است. در سال ۲۰۱۹ تحقیقی برای یافتن بهترین روش فرآوری با استفاده از فراصوت انجام شد. در این روش در ابتدا تخم مرغ ها در آب مقطر غوطه ور شدند و سپس امواج فراصوت ۴۵۰ وات به مدت ۴ دقیقه به آنها اعمال و بعد در انباری با دمای ۲۴ درجه سانتی گراد به مدت ۵ هفته نگهداری شدند. سپس این تخم مرغ ها برای بررسی تأثیر تیمار بر پارامترهای کیفیت داخلی تخم مرغ های با پوسته (مثلاً مقدار pH، شاخص زرده، ویسکوزیته آلبومین، جامدات محلول، pH آلبومین و زرده) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که فراصوت می تواند به عنوان گزینه مناسب و جدید درمان غیرحرارتی برای حفظ ثبات تخم مرغ ها به کار گرفته شود [۴۲].

اگرچه تحقیقات انجام شده نشان می دهد که فراصوت به حفظ کیفیت تخم مرغ از نظر باکتریولوژیکی کمک می کند، اما متأسفانه بر استحکام پوسته به دلیل سازوکار حفره، تأثیر نامطلوبی دارد [۲۲] و این اثرات نامطلوب بر مقاومت پوسته

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج بررسی‌ها مؤید تأثیر قابل توجه فرکانس، توان، دوز انرژی و مدت زمان اعمال فراصوت بر تعداد اشرشیاکلی است.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که فراوری با فراصوت در فرکانس فراصوت ۴۰ کیلوهرتز و توان فراصوت ۶/۹ وات منجر به کاهش $\log \text{CFU/ml}$ ۰/۵ در آلبومین، $\log \text{CFU/ml}$ ۰/۷ زرده و $\log \text{CFU/ml}$ ۰/۵ در تخم‌مرغ کامل مایع می‌شود. بنابراین، نتایج بیانگر مفید بودن فراصوت به‌عنوان روشی مکمل برای کاهش تعداد میکروارگانیسم‌ها در محصولات تخم‌مرغ است [۵۱]. همچنین تحقیقاتی درمورد فراوری ترکیبی فراصوت و لیزوزیم^{۲۹} (US + Lys) برای غیرفعال کردن سالمونلا تیفی موریوم ۳۰ در تخم‌مرغ کامل مایع (LWE) انجام شد. غیرفعال‌سازی سالمونلا تیفی موریوم تحت تیمار با فراصوت با توان 6.5 W/cm^2 و در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد بسیار قابل توجه بود و تعداد سالمونلا تیفی موریوم در طی اولین ۲۰ دقیقه فراوری به‌طور قابل توجهی کاهش یافت ($P < 0.05$)، اما تغییر قابل توجهی در طی فراوری در بازه ۲۰-۳۰ دقیقه مشاهده نشد. نتایج غیرفعال‌سازی سالمونلا تیفی موریوم با استفاده هم‌زمان از فراصوت و لیزوزیم نیز منجر به نتایجی مشابه مورد قبل شده و این یعنی سلول‌های حساس به فراوری فراصوت در مدت زمان کوتاهی پس از قرار گرفتن در معرض فراصوت تخریب می‌شوند، درحالی‌که به آرامی مقاومت در برابر فراصوت ایجاد می‌شود و این امر منجر به زنده ماندن سالمونلا تیفی موریوم در منحنی تغییرات تعداد می‌شود.

علاوه‌براین، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که غلظت‌های بالای پروتئین مانع از گسترش امواج فراصوت می‌شود و این امر باعث کاهش اثر فراصوت و حتی بی‌تأثیر شدن امواج فراصوت در ناحیه‌ای از تخم‌مرغ و بنابراین کاهش تأثیر فراصوت در غیرفعال کردن میکروب‌ها می‌شود. در هر حال، نتایج این بررسی‌ها به‌طور کلی نشان می‌دهد که US +

روش‌هایی که بتوانند به‌طور هم‌زمان هم کیفیت و پایداری تخم‌مرغ را تضمین کنند و هم میکروبی‌زدایی محصول را انجام دهند [۷]. تحقیقات زیادی با هدف استفاده از فناوری‌های فراوری غیرحرارتی یا استفاده از فرایندهای حداقل حرارتی برای هدف قرار دادن میکروارگانیسم‌ها در مواد غذایی انجام شده است. نتایج نشان داده است که این روش‌های غیرحرارتی حساسیت بیشتری نسبت به فرایندهای غیرگرمایی دارند [۵۲]. این نتایج منجر به مطالعات گسترده درمورد اثربخشی فناوری‌های غیرحرارتی مثل فراصوت و بررسی سازوکارهای غیرفعال‌سازی آنها شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که فراصوت به تنهایی یا همراه با فرایندهای دیگر دارای پتانسیل بالایی برای جایگزینی با فراوری حرارتی یا کمک به فراوری حرارتی سنتی است.

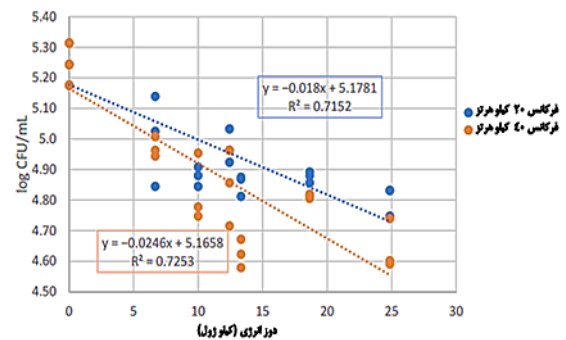
در تحقیقاتی که در سال ۲۰۲۰ انجام شد در ابتدا تخم‌مرغ مایع، آلبومین و زرده تخم‌مرغ را به‌طور مصنوعی با اشرشیاکلی آلوده کردند. در این مطالعه تجهیزات فراصوت با فرکانس‌های ۲۰ و ۴۰ کیلوهرتز، توان‌های ۱۸۰ و ۳۰۰ وات و زمان تابش ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین سامانه خنک‌کننده چرخشی برای کاهش واحدهای کلنی تشکیل شده^{۲۷} (CFU) نمونه‌های اشرشیاکلی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحقیقات نشان داد که سطح توان جذب شده تأثیر قابل توجهی بر تعداد اشرشیاکلی دارد و توان‌های ۳/۷ و ۶/۹ وات برای دستیابی به کاهش قابل توجه تعداد اشرشیاکلی در مقایسه با نمونه کنترل کفایت می‌کند. همچنین اعمال فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و ۴۰ کیلوهرتز باعث کاهش قابل توجه تعداد اشرشیاکلی نسبت به نمونه کنترل شد.

علاوه‌براین، تأثیر فراصوت حتی در دوز انرژی فراصوتی به پایینی ۶/۶۶ کیلوژول مشخص و واضح بود. آزمون گیمز هاول^{۲۸} نشان داد که نتایج تابش دوزهای بالا و پایین با هم متفاوت است. این نتایج در شکل ۴ ارائه شده است.

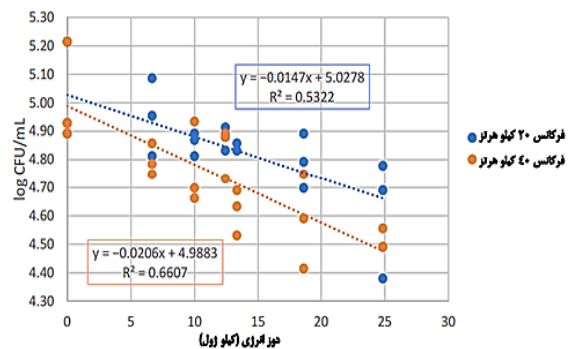
ضدمیکروبی ارتباط نزدیکی با توان و مدت زمان فراصوت دهی نشان داد. فراوری هم‌زمان با فراصوت و امولسیون اسانس آویشن^{۳۱} نیز منجر به اثرات غیرفعال‌کننده هم‌افزاینده حیرت‌انگیزی در طی فراوری شد که نشان می‌دهد، فراصوت باعث افزایش حساسیت سلول‌ها به ترکیبات ضدباکتری می‌شود. در شکل ۵ تصاویر TEM^{۳۳} اثرات تخریبی فراصوت بر مورفولوژی و فراساختار سلول از نظر تشکیل منافذ، نشت محتوای سلول داخلی و تجزیه سلول نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، امواج فراصوت باعث نفوذپذیری غشای خارجی و داخلی، کاهش سیالیت غشا و غیرقطبی شدن پتانسیل غشا می‌شود. علاوه‌براین تغییرات قابل‌توجهی در چربی‌ها، پروتئین‌ها و فسفولیپیدها مشاهده می‌شود [۵۳].

این تصاویر نشان می‌دهد که سلول‌های اشرشیاکلی گروه کنترل یا شاهد (غیرفراوری) در شکل ۵-الف دارای غشا سلولی سالم و چگالی الکترونی همگن در سیتوپلاسم^{۳۳} هستند. همچنین نتایج فراوری با توان فراصوت W/cm² ۱۹۱ به مدت ۹ دقیقه در شکل ۵-ب- نشانگر کمی در رفتگی و کوچک شدن غشای سیتوپلاسمی است. در شکل ۵-ج نتایج درمان فراصوت اشرشیاکلی با شدت بالاتر W/cm² ۵۷۳ ارائه شده که بیانگر آسیب بیشتر است. افزایش زمان درمان منجر به از بین رفتن یکپارچگی غشای سلولی، تغییر شکل سلول، نشت مواد تشکیل‌دهنده داخلی سلول و تخریب سلول‌ها می‌شود. به‌طور خاص، این مطلب در شکل ۵-ج و ۵-د مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها، قطعاتی از بقایای دیواره سلولی به همراه سلول‌های نسبتاً آسیب دیده وجود دارد. افزایش زمان فراوری به ۲۷ دقیقه باعث ایجاد تغییرات شدیدتری در ساختارهای سلولی می‌شود. تصاویر شکل‌های ۵-ه و ۵-و نشانگر اعوجاج^{۳۴} برگشت‌ناپذیر سلول، واکوتل‌های^{۳۵} عظیم^{۳۶}، توزیع یکنواخت محتوای سیتوپلاسمی و تراکم الکترون ناهمگن است. در این شرایط حدی، انبوهی از بقایای سلولی با سلول‌های لیز شده مشاهده

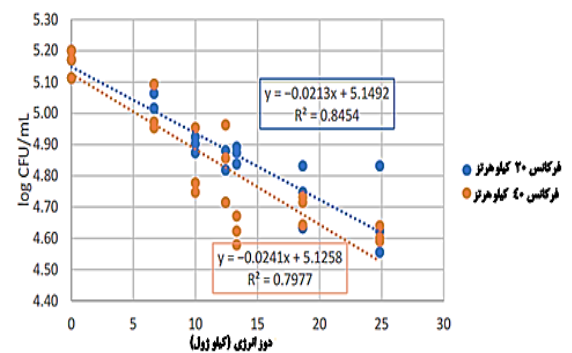
Lys فناوری است که می‌تواند برای فراوری پاستوریزاسیون سریع در LWE به کار گرفته شود [۳۷].



(الف)



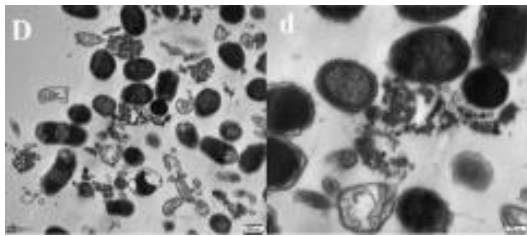
(ب)



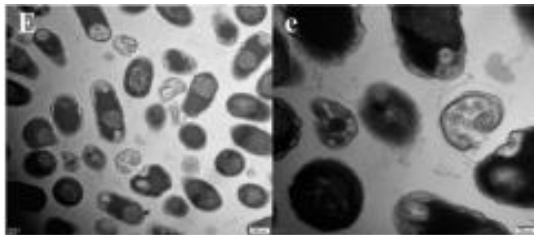
(ج)

شکل ۴. رگرسیون خطی log CFU/mL بر حسب دوز انرژی به ازای دو فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و ۴۰ کیلوهرتز برای (الف) آلومین، (ب) زرده و (ج) تخم‌مرغ مایع [۵۱]

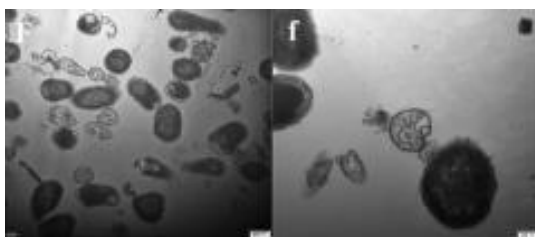
همچنین اخیراً فعالیت ضدمیکروبی فراوری فراصوت مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات ناشی از فراصوت در غشای سلولی اشرشیاکلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. رفتار



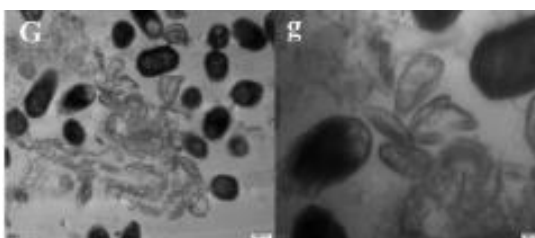
(د)



(ه)



(و)



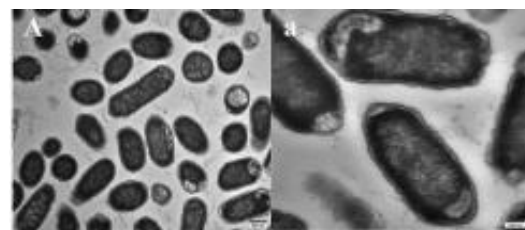
(ز)

شکل ۵. تصاویر TEM اشرشیاکلی در طی فراوری‌های مختلف با فراصوت در دو بزرگ‌نمایی ۱ و ۲ میکرون. الف) گروه کنترل و بدون فراصوت ب-د-و) فراصوت 191 W/cm^2 به مدت ۹ و ۱۸ و ۲۷ دقیقه ج-ه-ز) فراصوت 573 W/cm^2 به مدت ۹ و ۱۸ و ۲۷ دقیقه [۵۳].

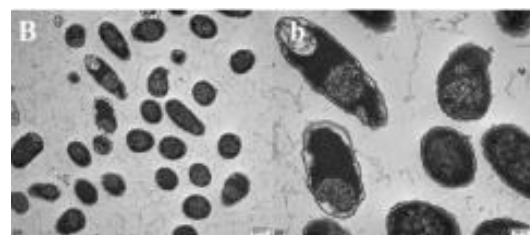
۳. مقایسه تأثیر روش‌های مختلف غیر حرارتی در ساختار پروتئین تخم مرغ

می‌شود که به دلیل جریان شدید اجزا سلولی خارج شونده است. نتایج تحقیقات نشان داد که سطوح مختلف تخریب با توجه به زمان و توان فراوری با فراصوت توسط سلول‌ها درک خواهند شد.

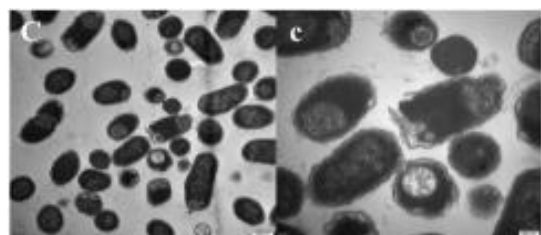
این نتایج به وضوح تأیید می‌کند که فراصوت با جداسازی نامنظم غشای سیتوپلاسمی از دیواره‌های سلول، شکستن دیواره‌های سلولی و تجزیه ساختارهای داخلی سلول منجر به آسیب شدید فیزیکی به سلول‌های اشرشیاکلی و انتشار محتوای سلولی می‌شود [۵۳].



(الف)



(ب)



(ج)

از امواج فراصوت با شدت بالا در مواد غذایی ممکن است باعث تجزیه، اکسید شدن چربی‌ها، دپلمریزه شدن پلی‌ساکاریدها یا دناتوره شدن پروتئین شود [۵۴]. مکانیسمی که فراصوت بر مبنای آن عمل می‌کند شامل اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از حباب صوتی مانند افزایش دما، فشار زیاد، نیروی برشی زیاد و تشکیل رادیکال‌های واکنش‌دهنده و در نتیجه باز شدن پروتئین است [۲].

۴. بحث و نتیجه‌گیری

تحولات فعلی صنایع غذایی به سمت غذاهای طبیعی کمتر فرآوری شده، بدون مواد افزودنی و استفاده از فناوری‌های سازگار با محیط زیست می‌رود. بنابراین به روش‌های جدید فراوری برای تضمین ایمنی و کیفیت محصولات غذایی نیاز است. فرایند حرارتی رایج‌ترین روش برای دستیابی به محصولات ایمن از جمله تخم‌مرغ است. در صنایع غذایی تخم‌مرغ برای تولید بسیاری از محصولات غذایی استفاده می‌شود و به‌عنوان بخشی از رژیم‌های روزانه در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، درجه حرارت بالا باعث تأثیرات مضر بر ترکیبات مغذی مانند انعقاد پروتئین و همچنین تغییر در طعم و مزه و بافت آن می‌شود. انعقاد پروتئین‌ها در دماهای بالا، پاستوریزاسیون تخم‌مرغ را به دمای پایین‌تر و مدت زمان طولانی‌تر محدود می‌کند و این محدودیت می‌تواند خطرات میکروبیولوژیکی مانند آلودگی اشرشیاکلی ایجاد کند. بنابراین، تقاضای فزاینده‌ای برای فناوری‌های سازگار با محیط زیست برای فرایند تخم‌مرغ وجود دارد که حداکثر غیرفعال‌سازی میکروبی با حداقل تغییرات در خواص فیزیکی، شیمیایی و عملکردی آن فراهم کند. فراوری فراصوت برای بهبود ایمنی میکروبی تخم‌مرغ و محصولات مشتق شده از تخم‌مرغ مورد توجه خاص قرار گرفته است و می‌تواند به تنهایی و یا به همراه سایر روش‌های فراوری جایگزین مناسبی برای پاستوریزاسیون حرارتی باشد. بهینه‌سازی فرکانس، توان و مدت زمان تیمار

تخم‌مرغ به دلیل مشخصات آمینو اسید ضروری کاملاً متعادل و قابلیت هضم بالایی که دارد، به‌عنوان منبع کامل پروتئین شناخته شده است. پروتئین‌های تخم‌مرغ به دلیل خاصیت کف‌کنندگی، امولسیون و ژل‌زایی زیاد در طیف گسترده‌ای از محصولات از جمله کیک، مایونز و محصولات گوشتی فرایند شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که تخم‌مرغ حاوی پروتئین‌های حساس به گرما است، بنابراین فرایندهای حرارتی مثل پاستوریزاسیون می‌تواند به راحتی باعث تجزیه و انعقاد پروتئین شده و در نتیجه افزایش قابل توجه ویسکوزیته، حذف پروتئین‌های محلول، تغییر رنگ و نقص عملکردی را به دنبال داشته باشد [۴۴]. به همین دلیل محققان زیادی بر استفاده از انواع روش‌های جدید غیرحرارتی یا روش‌های مبتنی بر دمای پایین در انواع مختلف محصولات تخم‌مرغ تحقیق کردند و این روش‌ها را با روش پاستوریزاسیون حرارتی متداول مقایسه کردند. آثار فرایند غیرحرارتی و کم‌حرارتی بر ساختار پروتئین تخم‌مرغ در جدول ۱ جمع‌آوری شده است. نتایج کاربرد این روش‌های جدید بر تخم‌مرغ نشان می‌دهد که این روش‌ها علاوه بر غیرفعال‌سازی میکروبی باعث به حداقل رساندن کاهش کیفیت محصولات تخم‌مرغ (به‌عنوان مثال انعقاد پروتئین) می‌شوند. این درحالی است که کاهش کیفیت در طی پاستوریزاسیون حرارتی متداول حتما اتفاق می‌افتد و اجتناب‌ناپذیر است. همچنین، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این روش‌های غیرحرارتی برای غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌های موجود در محصولات تخم‌مرغ منجر به حفظ یا تقویت برخی خصوصیات عملکردی محصولات می‌شوند که این اثرات تقویت‌کننده در واقع نتایج مفید ثانویه به حساب می‌آیند. همچنین آزمایش‌ها ثابت کردند که فناوری فراصوت با توجه به نوع ماده غذایی و شرایط اعمال شده (نوع پروب یا حمام فراصوت، فرکانس، دامنه، زمان، انرژی صوتی و دما) باعث دناتوراسیون و تجمع پروتئین می‌شود [۴۴]. لازم به ذکر است که استفاده طولانی مدت

تخم مرغ هنگام ذخیره سازی پس از تخم گذاری منجر به از دست دادن تازگی تخم مرغ می شود. همچنین ارزیابی تازه بودن تخم مرغ که با کیفیت آن در ارتباط است، کاری اساسی در صنایع غذایی است. ارزیابی کیفیت تخم مرغ با استفاده از فراصوت به دلیل هزینه کمتر، قابلیت حمل دستگاه و مهم تر از همه ماهیت غیرمخرب آن نسبت به سایر روش های تشخیصی مطلوبیت بیشتری دارد. نتایج آزمایش محققان نشان داده است که اگر سیگنال های فراصوت کم انرژی برای تشخیص تازگی به کار روند، بررسی کاملاً غیرمخرب بوده و هیچگونه تأثیر منفی بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد بیولوژیکی ندارند. افزایش دانش ما در مورد پتانسیل های فراصوت در فراوری تخم مرغ می تواند منجر به افزایش سودآوری در صنعت تولید تخم مرغ، بهبود کیفیت و ماندگاری محصولات نهایی شود.

بسیار مهم است، زیرا این فناوری علاوه بر تأثیر بر آلودگی میکروبیولوژیکی می تواند باعث تغییرات ساختاری تخم مرغ شود. مطالعات نشان می دهند که فناوری سبز فراصوت با قدرت بالا می تواند خواص فیزیکوشیمیایی پروتئین سفیده تخم مرغ را با افزایش قابل توجه حلالیت، ظرفیت کف سازی و کاهش اندازه ذرات، که به دلیل اثر سونوشیمیایی امواج بر ساختار مولکولی آن است، بهبود بخشد.

فراصوت در دو زمینه میکروبیولوژی و تشخیص تازگی تخم مرغ می تواند مورد استفاده قرار گیرد، که در مورد دوم از تعامل بین امواج فراصوت و محیطی که از آن عبور می کند برای دستیابی به اطلاعاتی در مورد ترکیب ساختار و ابعاد محیط تخم مرغ استفاده می شود. خصوصیات فیزیکی تخم مرغ تأثیر مستقیمی بر سرعت انتشار فراصوت از طریق تخم مرغ دارد. تغییرات حیاتی و فیزیکی-شیمیایی موجود در

جدول ۱. اثرات فرایند غیرحرارتی و کم حرارتی بر ساختار پروتئین تخم مرغ

روش های فرایند مواد غذایی	پارامترهای اصلی فرایند	سازوکارهای پیشنهادی اصلاح پروتئین	تغییرات ساختاری پروتئین	محصولات تخم مرغ فراوری شده	منابع
فشار هیدرواستاتیک بالا (HHP)	فشار، زمان، دما	نفوذ آب به ترکیب پروتئین و در نتیجه باز شدن مولکول پروتئین	دنا تورا سیون ^{۳۷} ، تجمع یا ژلاتینه شدن بسته به پروتئین و شرایط اعمال شده	مایع	[۵۶، ۴۵]
میدان های الکتریکی پالسی (PEF)	توان میدان الکتریکی، شکل موج پالسی، زمان، فرکانس و دما	تغییر شکل یا بسط تدریجی یک مولکول پروتئین در امتداد محور میدان الکتریکی و در نتیجه باز شدن پروتئین	دنا تورا سیون و تجمع پروتئین، بسته به سیستم پروتئین و شرایط اعمال شده	مایع	[۵۷، ۵۶]
تابش یونیزه کننده	نوع تابش (اشعه گاما، اشعه X یا پرتو الکترون) و دوز	حمله به مولکول های پروتئین توسط رادیکال های اکسیداتیو تولید شده از طریق رادیولیز آب، یا جذب مستقیم انرژی تابش	تجزیه و تجمع پروتئین، بسته به سیستم پروتئین و دوز تابش	مایع، منجمد و کم آب و تخم مرغ با پوسته	[۵۸، ۴۴]
اشعه فرابنفش (UV - C) و نور پالسی	تابش، زمان و دما	فتواکسیداسیون مستقیم یا غیرمستقیم مولکول های پروتئین عمدتاً با استفاده از تابش نور UV - C، همراه با اثرات گرمایی یا فوتوفیزیکی	تجزیه و تجمع پروتئین، بسته به سیستم پروتئین و دوز تابش	محصولات مایع، کم آب و تخم مرغ با پوسته	[۵۹، ۲۷]
فراصوت	منبع فراصوت (فراصوت از نوع پروپ یا حمام فراصوت)، فرکانس، دامنه، زمان، انرژی صوتی و دما	اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از رمبش حباب صوتی مانند افزایش دما، فشار زیاد، نیروی برشی زیاد و تشکیل رادیکال های واکنشی و در نتیجه باز شدن پروتئین	دنا تورا سیون و تجمع پروتئین بسته به سیستم پروتئین و شرایط اعمال شده	محصولات مایع و تخم مرغ با پوسته	[۶۰، ۴۱]
ازن	دوز و زمان ازن	اکسیداسیون گروه های سولفیدریل به دلیل واکنش پذیری و نفوذ پذیری زیاد ازن	اکسیداسیون گروه های سولفیدریل بسته به دوز مصرفی	محصولات مایع و تخم مرغ با پوسته	[۶۲، ۶۱]
فشار قوی همگن (HPH)	فشار، مسیر عبور، سرعت جریان و دما	حفره، تنش برشی، تلاطم و افزایش دمای ناشی از فشار و نیرو. در نتیجه تجزیه و تجمع پروتئین	دنا تورا سیون و تجمع پروتئین، بسته به شرایط اعمال شده	محصولات مایع	[۶۴، ۶۳]

- [1] Aboonajmi, M., S. K. Setarehdan, A. Akram, T. Nishizu, and N. Kondo, "Prediction of poultry egg freshness using ultrasound", *International Journal of food properties*, 2014, Vol.17, no.9, 1889-1899.
- [2] Jun, Sun, Mu Yaoyao, Jing Hui, Mohammed Obadi, Chen Zhongwei, and Xu Bin, "Effects of single- and dual-frequency ultrasound on the functionality of egg white protein", *Journal of Food Engineering*, 2020, Vol.277, p.109902.
- [3] Shevchenko, Rostislav V., Stuart L. James, and S. Elizabeth James, "A review of tissue-engineered skin bioconstructs available for skin reconstruction", *Journal of the royal Society Interface*, 2010, Vol.7, no.43, pp.229-258.
- [4] Fraeye, Ilse, Charlotte Bruneel, Charlotte Lemahieu, Johan Buyse, Koenraad Muylaert, and Imogen Foubert, "Dietary enrichment of eggs with omega-3 fatty acids: A review", *Food Research International*, 2012, Vol.48, no.2, pp.961-969.
- [5] Velazquez, Ramon, Wendy Winslow, and Marc A. Mifflin, "Choline as a prevention for Alzheimer's disease", *Aging (Albany NY)*, 2020, Vol.12, no.3, p.2026.
- [۶] فائز، م.، حمیدی اصفهانی، ز.، "تاثیر امواج فراصوت در کیفیت مواد غذایی"، *اولین کنگره بین المللی و بیست و چهارمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران*، ۱۳۹۵، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.
- [7] Afraz, Muhammad Talha, Moazzam Rafiq Khan, Ume Roobab, Mohd Adzahan Noranizan, Brijesh K. Tiwari, Muhammad Tayyab Rashid, Muhammad Inam- ur- Raheem, Seyed Mohammad Bagher Hashemi, and Rana Muhammad Aadil, "Impact of novel processing techniques on the functional properties of egg products and derivatives: A review", *Journal of Food Process Engineering*, 2020, Vol.43, no.12, p. e13568.
- [۸] فائز، م.، حمیدی اصفهانی، ز.، "استفاده از فراصوت قوی در نگهداری میوه ها و سبزیجات"، *اولین کنگره بین المللی و بیست و چهارمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران*، ۱۳۹۵، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.
- [9] Yüceer, M., and C. Caner, "Ultrasound; a novel and innovative processing method for egg and egg products preservation", *Journal of Chemical Biology and Pharmaceutical Chemistry*, 2018, Vol.1, no.1, p.4.
- [10] Naderi, Nassim, James D. House, Yves Pouliot, and Alain Doyen, "Effects of high hydrostatic pressure processing on hen egg compounds and egg products", *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2017, Vol.16, no.4, pp.707-720.
- [11] O'sullivan, Jonathan, Brian Murray, Cal Flynn, and Ian Norton, "The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins", *Food hydrocolloids*, 2016, Vol.53, pp.141-154.
- [12] Liu, Linlin, Jianhua Zeng, Bingyu Sun, Na Zhang, Yinyuan He, Yanguo Shi, and Xiuqing Zhu, "Ultrasound-Assisted Mild Heating Treatment Improves the Emulsifying Properties of 11S Globulins", *Molecules*, 2020, Vol.25, no.4, p.875.
- [13] Chemat, Farid, Natacha Rombaut, Anne-Gaëlle Sicaire, Alice Meullemiestre, Anne-Sylvie Fabiano-Tixier, and Maryline Abert-Vian, "Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review", *Ultrasonics sonochemistry*, 2017, Vol.34, pp.540-560.
- [14] Yimenu, Samuel M., J. Y. Kim, and B. S. Kim, "Prediction of egg freshness during storage using electronic nose", *Poultry science*, 2017, Vol.96, no.10, pp.3733-3746.

- [15] Arivazhagan, S., R. Newlin Shebiah, Hariharan Sudharsan, R. Rajesh Kannan, and R. Ramesh, "External and internal defect detection of egg using machine vision", *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 2013, Vol.4, no.3, pp.257-262.
- [۱۶] فاتر، م، علیان نژادی، م، نادری، ل، "بررسی ساز و کار استخراج ترکیبات غذایی و دارویی با کمک فراصوت". نشریه علمی صوت و ارتعاش. ۱۳۹۸، دوره ۸، شماره ۱۶: ۲۶-۴۲
- [17] Perera, Conrad O., and Mona Ahmed J. Alzahrani, "Ultrasound as a pre-treatment for extraction of bioactive compounds and food safety: A review", *LWT*, 2021, Vol.142, p.111114.
- [۱۸] شیرزائی، ش، شیخ الاسلامی، ز، صالحی، ا، "بررسی امکان مشروط نمودن دانه گندم با امواج فراصوت و تاثیر آن بر خصوصیات فارینوگرافی خمیر و تصویری نان بربری"، *علوم و صنایع غذایی/ایران*، ۱۳۹۶، دوره ۱۴، شماره ۷۱: ۲۹۱-۲۹۸.
- [19] Jirangrat, Wannita, Damir Dennis Torrico, June No, Hong Kyoon No, and Witoon Prinyawiwatkul, "Effects of mineral oil coating on internal quality of chicken eggs under refrigerated storage", *International Journal of food science & technology*, 2010, Vol.45, no.3, pp.490-495.
- [20] Aboonajmi, M., A. Akram, T. Nishizu, N. Kondo, S. K. Setarehdan, and A. Rajabipour, "An ultrasound based technique for the determination of poultry egg quality", *Research in Agricultural Engineering*, 2010, Vol.56, no.1, pp.26-32.
- [21] Li, Jiating, Susu Zhu, Shui Jiang, and Jun Wang, "Prediction of egg storage time and yolk index based on electronic nose combined with chemometric methods", *LWT-Food Science and Technology*, 2017, Vol.82, pp.369-376.
- [22] Yüceer, Muhammed, and Cengiz Caner, "The effects of ozone, ultrasound and coating with shellac and lysozyme–chitosan on fresh egg during storage at ambient temperature. Part II: microbial quality, eggshell breaking strength and FT- NIR spectral analysis", *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, Vol.55, no.4, pp.1629-1636.
- [23] Malfatti, Luciano Heusser, Aline Zampar, Alessandro Cazonatto Galvão, Weber da Silva Robazza, and Marcel Manente Boiago, "Evaluating and predicting egg quality indicators through principal component analysis and artificial neural networks," *LWT*, 2021, Vol.148, pp.111720.
- [24] Aganovic, Kemal, Christian Hertel, Rudi F. Vogel, Reimar Johne, Oliver Schlüter, Uwe Schwarzenbolz, Henry Jäger et al., "Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021.
- [25] Ai, Minmin, Zheng Zhang, Hong Fan, Yuanyuan Cao, and Aimin Jiang, "High-intensity ultrasound together with heat treatment improves the oil-in-water emulsion stability of egg white protein peptides", *Food Hydrocolloids*, 2021, Vol.111, p.106256.
- [26] Jahangir Esfahani, Hamid, Iman Shahabi-Ghahfarrokhi, and Rahmatollah Pourata, "Investigation into the shelf life extending of chicken eggs using UV-C irradiated starch-oleic acid coating solutions", *Journal of Food Research*, 2021, Vol.31, no.1, pp.67-81.
- [27] Mattioli, Simona, Roberta Ortenzi, Stefania Scuota, A. Cartoni Mancinelli, Alessandro Dal Bosco, Elisa Cotozzolo, and Cesare Castellini, "Impact of ozone and UV irradiation sanitation treatments on the survival of Salmonella and the physical–chemical characteristics of hen eggs", *Journal of Applied Poultry Research*, 2020, Vol.29, no.2, pp.409-419.
- [28] Vanga, Sai Kranthi, Jin Wang, Shesha Jayaram, and Vijaya Raghavan, "Effects of Pulsed Electric Fields and Ultrasound Processing on Proteins and Enzymes: A Review", *Processes*, 2021, Vol.9, no.4, p.722.
- [29] Rano, Urazova, "About quality of pulsed electric fields processed milk and egg products", *Евразийский Союз Ученых*, 2021, Vol.2-2, no.83, pp.13-16.

- [30] Sujayasree, O. J., A. K. Chaitanya, R. Bhoite, R. Pandiselvam, Anjineyulu Kothakota, Mohsen Gavahian, and Amin Mousavi Khaneghah, "Ozone: An Advanced Oxidation Technology to Enhance Sustainable Food Consumption through Mycotoxin Degradation", *Ozone: Science & Engineering*, 2021, pp.1-21.
- [31] Aboonajmi, Mohammad, and Hamideh Faridi, "Quality Assessment Methods and Postharvest Handling of Fresh Poultry Eggs", In *Handbook of Food Preservation*, 2020, pp.169-188. CRC Press.
- [32] Poojary, Mahesha M., Nicolo Dellarosa, Shahin Roohinejad, Mohamed Koubaa, Urszula Tylewicz, Federico Gómez- Galindo, Jorge A. Saraiva, Marco Dalla Rosa, and Francisco J. Barba, "Influence of innovative processing on γ -aminobutyric acid (GABA) contents in plant food materials", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017, Vol.16, no.5, pp.895-905.
- [33] Zarezadeh, Mohammad Reza, and Mohammad Aboonajmi, "Diagnostic Ultrasound, a non-destructive approach for quality evaluation of Agro-food products", *NDT Technology*, 2019, Vol.2, no.3, pp.32-41.
- [34] Putra, Yudi Eka, Sri Ratna Sulistiyanti, and Ahmad Saudi Samosir, "Characteristics of Ultrasonic Velocity in Eggs Using HC-SR04 Module", 2020.
- [35] Lesnierowski, Grzegorz, and Jerzy Stangierski, "What's new in chicken egg research and technology for human health promotion?-A review", *Trends in food science & technology*, 2018, Vol.71, pp.46-51.
- [36] AM, EL-Kholy, Saadia H EL-Shinawy, Hemmat Seliem, and Mohamed MA Zeinoh, "Potential risk of some pathogens in table eggs", *Journal of Veterinary Medical Research*, 2020.
- [37] Bi, Xiufang, Xiaoqiong Wang, Yan Chen, Liyi Chen, Yage Xing, and Zhenming Che, "Effects of combination treatments of lysozyme and high power ultrasound on the Salmonella typhimurium inactivation and quality of liquid whole egg", *Ultrasonics sonochemistry*, 2020, Vol.60, pp.104763.
- [38] Clímaco, Winnie Luiza dos Santos, Érica de Faria Melo, Diego Pereira Vaz, Mariana Masseur Saldanha, Maria Fernanda Vieira da Silva Pinto, Letícia Carolina Cleto Fernandes, Nelson Carneiro Baião et al., "Eggshell microbiology and quality of hatching eggs subjected to different sanitizing procedures", *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2018, Vol.53, pp.1177-1183.
- [39] Techathuvanan, Chayapa, and Doris Helen D'Souza, "High intensity ultrasound for Salmonella Enteritidis inactivation in culture and liquid whole eggs", *Journal of food science*, 2018, Vol.83, no.6, pp.1733-1739.
- [40] Sheng, Long, Yibo Wang, Jiahui Chen, Jie Zou, Qi Wang, and Meihu Ma, "Influence of high-intensity ultrasound on foaming and structural properties of egg white", *Food Research International*, 2018, Vol.108, pp.604-610.
- [41] Sert, Durmus, Ali Aygun, Emrah Torlak, and Emin Mercan, "Effect of ultrasonic treatment on reduction of Esherichia coli ATCC 25922 and egg quality parameters in experimentally contaminated hens' shell eggs", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, Vol.93, no.12, pp.2973-2978.
- [42] Yüceer, Muhammed, and Cengiz Caner, "The effects of ozone, ultrasound and coating with shellac and lysozyme-chitosan on fresh egg during storage at ambient temperature-part 1: interior quality changes", *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, Vol.55, no.1, pp.259-266.
- [43] Caner, Cengiz, and Muhammed Yüceer, "Efficacy of various protein-based coating on enhancing the shelf life of fresh eggs during storage", *Poultry Science*, 2015, Vol.94, no.7, pp.1665-1677.

- [44] Liu, Ya- Fei, Indrawati Oey, Phil Bremer, Alan Carne, and Pat Silcock, "Modifying the functional properties of egg proteins using novel processing techniques: A review", *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2019, Vol.18, no.4, pp.986-1002.
- [45] Arzeni, Carolina, Oscar E. Pérez, and Ana MR Pilosof, "Power ultrasound assisted design of egg albumin nanoparticles", *Food Biophysics*, 2015, Vol.10, no.4, pp.439-446.
- [46] Wang, Ruihong, Yanqiu Ma, Zihong Ma, Qingpu Du, Ying Zhao, and Yujie Chi, "Changes in gelation, aggregation and intermolecular forces in frozen-thawed egg yolks during freezing", *Food Hydrocolloids*, 2020, Vol.108, p.105947.
- [47] Zhao, Yan, Feng Feng, Yuan Yang, Chunhong Xiong, Mingsheng Xu, and Yonggang Tu, "Gelation behavior of egg yolk under physical and chemical induction: A review", *Food Chemistry*, 2021, p.129569.
- [48] Anton, Marc, "Egg yolk: structures, functionalities and processes", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, Vol.93, no.12, pp.2871-2880.
- [49] Monfort, Silvia, Pilar Mañas, Santiago Condón, Javier Raso, and Ignacio Álvarez, "Physicochemical and functional properties of liquid whole egg treated by the application of pulsed electric fields followed by heat in the presence of triethyl citrate", *Food Research International*, 2012, Vol.48, no.2, pp.484-490.
- [50] Chandrapala, Jayani, Bogdan Zisu, Martin Palmer, Sandra Kentish, and Muthupandian Ashokkumar, "Effects of ultrasound on the thermal and structural characteristics of proteins in reconstituted whey protein concentrate", *Ultrasonics sonochemistry*, 2011, Vol.18, no.5, pp.951-957.
- [51] Nagy, David, Jozsef Felfoldi, Andrea Taczmanne Bruckner, Csilla Mohacsi-Farkas, Zsanett Bodor, Istvan Kertesz, Csaba Nemeth, and Viktoria Zsom-Muha, "Determining Sonication Effect on E. coli in Liquid Egg, Egg Yolk and Albumen and Inspecting Structural Property Changes by Near-Infrared Spectra", *Sensors*, 2021, Vol.21, no.2, p.398.
- [52] Gómez- Sánchez, Diana Laura, Oscar Antonio- Gutiérrez, Andrea Selene López- Díaz, Enrique Palou, Aurelio López- Malo, and Nelly Ramírez- Corona, "Performance of combined technologies for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Escherichia coli* in pomegranate juice: The effects of a continuous- flow UV- Microwave system", *Journal of Food Process Engineering*, 2020, Vol.43, no.12, p.e13565.
- [53] He, Qiao, Donghong Liu, Muthupandian Ashokkumar, Xingqian Ye, Tony Z. Jin, and Mingming Guo, "Antibacterial mechanism of ultrasound against *Escherichia coli*: Alterations in membrane microstructures and properties", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, Vol.73, p.105509.
- [54] پاک باطن، س.، کریمی، م.، الهامی راد، ا.، شیخ الاسلامی، ز.، "تأثیر امواج فراصوت و امولسیفایر مونو دی گلیسرید بر کیفیت کیک فنجانی"، پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۳۹۴، دوره ۱۱، ش. ۱، صص. ۳۱-۴۰.
- [55] Buzrul, Sencer, "High hydrostatic pressure applications on liquid whole egg", *World's Poultry Science Journal*, 2021, Vol.77, no.1, pp.71-90.
- [56] Baba, Kazuma, Taiga Kajiwara, Shogo Watanabe, Sunao Katsuki, Ryo Sasahara, and Kazuyuki Inoue, "Low- Temperature Pasteurization of Liquid Whole Egg using Intense Pulsed Electric Fields", *Electronics and communications in Japan*, 2018, Vol.101, no.2, pp.87-94.
- [57] Monfort, S., Elisa Gayán, G. Saldaña, E. Puértolas, S. Condón, J. Raso, and I. Álvarez, "Inactivation of *Salmonella Typhimurium* and *Staphylococcus aureus* by pulsed electric fields in liquid whole egg", *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, Vol.11, no.2, pp.306-313.
- [58] Vazirov, Ruslan, Sergey Sokovnint, Alisa Romanova, and Ksenia Moiseeva, "Analysis of radiation effects on chicken eggs and meat irradiated by nanosecond electron beams", 2020.

- [59] Lasagabaster, Amaia, Juan Carlos Arbolea, and Inigo Martinez De Maranon, "Pulsed light technology for surface decontamination of eggs: impact on Salmonella inactivation and egg quality", *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, Vol.12, no.2, pp.124-128.
- [60] Geng, Fang, Yunxiao Xie, Yi Wang, and Jinqiu Wang, "Depolymerization of chicken egg yolk granules induced by high-intensity ultrasound", *Food Chemistry*, 2021, Vol.354, p.129580.
- [61] Braun, P. G., N. Fernandez, and H. Fuhrmann, "Investigations on the effect of ozone as a disinfectant of egg surfaces", *Ozone: science & engineering*, 2011, Vol.33, no.5, pp.374-378.
- [62] Yüceer, Muhammed, and Cengiz Caner, "The impact of coatings and novel processing techniques on the functionality of table eggs during extended storage period at ambient temperature", *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, Vol.45, no.3, p.e15261.
- [63] Patrignani, Francesca, Lucia Vannini, Sylvain L. Sado Kamdem, Isabel Hernando, Raquel Marco-Molés, M. Elisabetta Guerzoni, and Rosalba Lanciotti, "High pressure homogenization vs heat treatment: Safety and functional properties of liquid whole egg", *Food microbiology*, 2013, Vol.36, no.1, pp.63-69.
- [64] Chi, YuJie, HaoKai Zhang, Yuan Chi, and JunTong Wang, "Effect of high pressure homogenization cooperated with high acyl gellan gum on stability and rheological properties of liquid egg with green pepper juice", *Shipin Kexue/Food Science*, 2019, Vol.40, no.9, pp.91-98.

پی نوشت:

1. Escherichia coli
2. Salmonella
3. Pasteurisation
4. Biosensor
5. Choline
6. Carotenoid
7. Émulsion
8. Sonochemical
9. Globulin
10. Cavitation
11. Haugh Unit
12. Yolk Index
13. Viscosity
14. Response Surface Methodology
15. High Hydrostatic Pressure
16. Ultrasound (US)
17. Pulsed Electric Fields
18. Ozonation
19. Non Destructive Testing
20. Giga Samples/sec
21. Staphylococcus Aureus
22. Liquid Whole Egg
23. Salmonella
24. Salmonella Enteritidis
25. Rheological
26. Ovalbumin
27. Colony Forming Unit
28. Games-Howell
29. Lysozyme
30. S. Typhimurium
31. Teon
32. Transmission Electron Microscopy
33. Cytoplasm
34. Distortion
35. Vacuole

- 36. Huge Vacuoles
- 37. Denaturation