نانوحباب‌ها در صنایع غذایی و کشاورزی: اصول، کاربردها و چالش‌ها

مسعود نجف نجفی *

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

چکیده

نانوحباب‌ها با قطری در محدوده تقریبی ۱ تا ۲۰۰ نانومتر، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر سطح ویژه بسیار بالا، ماندگاری طولانی‌مدت در فاز مایع، توان تولید گونه‌های اکسیدکننده فعال و قابلیت نفوذ به ریزساختارهای پیچیده، در سال‌های اخیر موردتوجه پژوهشگران صنایع غذایی و کشاورزی قرار گرفته‌اند. در این مقاله، ابتدا تعریف، انواع و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوحباب‌ها و سپس روش‌های اصلی تولید آن‌ها معرفی و مزایا و محدودیت‌های هر یک بررسی شده است. در ادامه، کاربردهای نانوحباب‌ها در حوزه‌های مختلف صنایع غذایی از جمله فرآوری لبنیات، بهبود بقای پروبیوتیک‌ها، حفاظت از ترکیبات زیست‌فعال، انجماد مواد غذایی، شست‌وشو و ضدعفونی محصولات تازه، تصفیه و بازیافت آب و حذف بیوفیلم‌های میکروبی و باقی‌مانده آفت‌کش‌ها و نیز کاربردهای کشاورزی به‌ویژه در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و زیرسطحی مورد بحث قرار گرفته است. با وجود شواهد امیدوارکننده، این فناوری با چالش‌های مهمی از جمله عدم استانداردسازی روش‌های تولید و مشخصه‌یابی، دشواری تفکیک اثر مستقل نانوحباب از عوامل همراه (نظیر نوع گاز و انرژی مکانیکی فرایند تولید)، نبود مطالعات هزینه—فایده در مقیاس صنعتی و ابهامات ایمنی مصرف‌کننده روبه‌رو می‌باشد. بر اساس یافته‌های این مقاله، انجام مطالعات پایلوت، طراحی آزمایش‌های کنترل‌شده برای تفکیک مکانیسم‌های اثرگذار و تدوین دستورالعمل‌های استاندارد ضروری است تا زمینه بهره‌برداری ایمن و مؤثر از این فناوری نوظهور در زنجیره غذا فراهم شود.

واژه‌های کلیدی: *نانوحباب؛ پایداری؛ صنایع غذایی؛ کشاورزی*

ایمیل نویسنده مسئول: Mnajafi.mhd@gmail.com

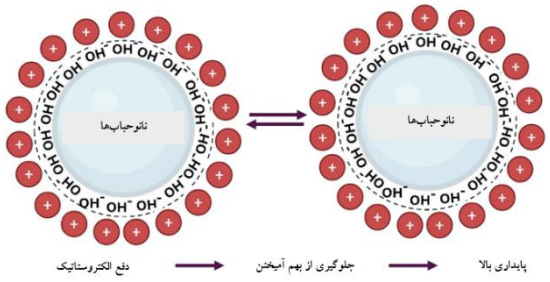
تاریخ دریافت : ۱۴۰۵/۰۳/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

۱- مقدمه

نانومواد از دیدگاه فناوری و تجاری اهمیت بسیار زیادی دارند و بر بخش‌های گوناگون اثر چشمگیری می‌گذارند. واژه «نانو» به معنای «بسیار ریز» از زبان یونانی گرفته شده است. در سال ۱۹۷۴، نوریو تانیگوچی[1] اصطلاح نانوفناوری را پیشنهاد کرد؛ این اصطلاح به استفاده از هر نوع ماده در ابعاد نانومتری اشاره دارد و رفتار یا ویژگی‌هایی از خود نشان می‌دهد که وابسته به همین ابعاد کوچک است [۱]. یکی از فناوری‌های نوینی که موردتوجه پژوهشگران حوزه کشاورزی و فرآوری مواد غذایی قرار گرفته است، استفاده از فناوری حباب‌های گازی در مقیاس‌های نانو است.حباب‌های گاز با اندازه‌های مختلف به طور معمول در زندگی روزمره دیده می‌شوند؛ مانند حباب‌های ریز گاز که هنگام مخلوط‌شدن هوا با آب سرد شیر ایجاد می‌شوند یا حباب‌های هوا در نوشیدنی‌های گازدار. حباب‌های معمولی، قطر بیشتری دارند، بنابراین به‌سرعت در محلول‌های آبی به سمت سطح بالا می‌آیند، فرومی‌ریزند یا می‌ترکند و ناپدید می‌شوند. در مقابل، نانوحباب‌ها می‌توانند برای مدت طولانی در فاز مایعِ حجمی پایدار بمانند [۲]. نانوحباب‌ها به‌عنوان حفره‌های گازی بسیار ریز در مایع تعریف می‌شوند که قطر آن‌ها تقریباً در دامنه ۱ تا ۲۰۰ نانومتر قرار دارد. در مقایسه با حباب‌های در مقیاس ماکرو، یک واحد حجم از نانوحباب‌ها به دلیل اندازه بسیار کوچک هر حباب، دارای سطح کل بسیار بزرگ‌تری است [۳]. به‌عبارت‌دیگر، بین شعاع حباب‌های پراکنده‌شده و سطح آن‌ها رابطه معکوس وجود دارد. نسبت بالای سطح به حجم در نانوحباب‌ها می‌تواند با افزایش کارایی انتقال جرم گاز - مایع، به بهبود فرایندهای تولید مواد غذایی کمک کند. این ویژگی می‌تواند به هوادهی بهتر محیط مایعِ حاوی نانوحباب‌ها منجر شود. همچنین سطح ویژه زیاد نانوحباب‌ها می‌تواند عامل کلیدی برای ایجاد مزایا در پایدارسازی امولسیون‌های غذایی، تغییر بافت مواد غذایی و بهبود فرایندهای تخمیر باشد؛ در کنار این موارد، در سایر عملیات مرتبط با تولید غذا مانند تمیزکاری، تصفیه فاضلاب و آبیاری کشاورزی نیز می‌تواند نقش مؤثری داشته باشد [۴ و ۵].

بر اساس نظریه کلاسیک، حباب‌های گازی در مقیاس نانو از نظر ترمودینامیکی پایدار نیستند، زیرا بین فشار گاز داخل نانوحباب و فشار گاز حل‌شده در محیط بیرون آن تعادل وجود ندارد. بااین‌حال، نانوحباب‌ها می‌توانند در عین اندازه بسیار کوچک، برای مدت طولانی در محلول پایدار بمانند؛ پدیده‌ای که با پیش‌بینی مدل‌های کلاسیک انحلال حباب هم‌خوان نیست و همین موضوع بحث‌های نظری گسترده‌ای را درباره مکانیسم پایداری آن‌ها برانگیخته است [۲، ۳ و ۵]. نانوحباب‌ها به دلیل جذب یون‌های هیدروکسیل (OH^-) در فصل مشترک گاز - مایع خود، دارای بار منفی سطحی هستند [۶]. این بار منفی سبب ایجاد دافعه الکترواستاتیک بین نانوحباب‌های مجاور می‌شود که از نزدیک‌شدن کافی سطوح آن‌ها برای غلبه بر نیروهای جاذبه واندروالسی جلوگیری می‌کند؛ در نتیجه، احتمال هم‌جوشی حباب‌ها کاهش‌یافته و به افزایش ماندگاری آن‌ها در مایعات منجر می‌شود (شکل ۱) [۶ و ۷]. لازم به ذکر است که دافعه الکترواستاتیک تنها یکی از مکانیسم‌های پیشنهادی برای پایداری غیرمنتظره نانوحباب‌های حجمی است و عواملی نظیر تعادل دینامیکی میان نفوذ گاز به درون و بیرون از حباب نیز در تبیین این پدیده مورد بحث قرار گرفته‌اند.

پایداری بسیار خوب نانوحباب‌ها سبب می‌شود مدت‌های طولانی در محیط مایع به‌صورت معلق باقی بمانند. این ویژگی یکی از عوامل کلیدی است که بستر تعداد زیادی از کاربردهای امیدبخش نانوحباب‌ها در سامانه‌های غذایی را فراهم می‌کند [۶ و ۸].



شکل ۱. لایه‌ی یونیِ پیرامون نانوحباب‌های حجمی به جلوگیری از هم‌جوشی آن‌ها کمک می‌کند [۶]

نانوحباب‌ها، می‌توانند در قسمت‌های مختلف زنجیره تولید غذا، از تولید و برداشت تا فرآوری و تصفیه پساب، نقش مؤثری داشته باشند [۴ و ۹]. استفاده از آب غنی از نانوحباب در شست‌وشوی میوه و سبزی، می‌تواند به کاهش بار میکروبی و افزایش ماندگاری محصول کمک کند؛ درحالی‌که به مصرف کمتر مواد شیمیایی و ضدعفونی‌کننده نیاز است [۴ و ۱۰]. در مواد غذایی

1 Norio Taniguchi

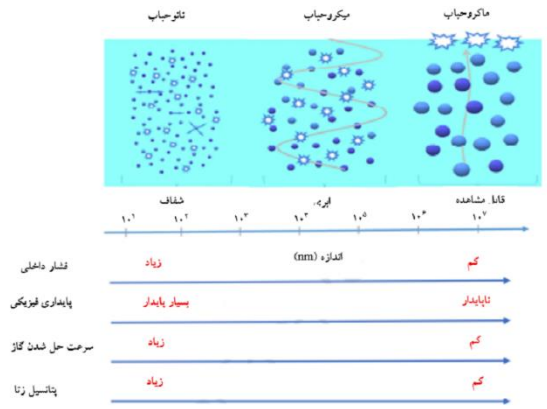
مایع، مانند فراورده‌های لبنی و نوشیدنی‌ها، حضور نانوحباب‌ها می‌تواند روی رئولوژی، انحلال‌پذیری، تشکیل کف و رفتار انتقال جرم اثر بگذارد و فرایندهایی مانند فیلتراسیون، خشک‌کردن و انجماد را کارآمدتر کند [۱۱ و ۱۲]. در بخش کشاورزی، استفاده از آب آبیاری حاوی نانوحباب به‌عنوان راهکاری برای افزایش اکسیژن محلول، بهبود وضعیت رطوبت خاک، ارتقای فعالیت میکروبی مفید و در نهایت، افزایش عملکرد و کیفیت محصول مطرح شده است [۱۳، ۱۴ و ۱۵]. باوجوداین شواهد امیدوارکننده، همچنان پرسش‌های مهمی درباره سازوکار دقیق پایداری نانوحباب‌ها، استانداردسازی روش‌های تولید و اندازه‌گیری و ارزیابی ایمنی و پایداری آن‌ها در تماس طولانی‌مدت با مواد غذایی مطرح است. علاوه بر این، بسیاری از نتایج موجود در مقیاس آزمایشگاهی یا نیمه‌صنعتی به دست آمده‌اند و انتقال آن‌ها به مقیاس صنعتی، چه در خطوط فرآوری غذا و چه در سامانه‌های آبیاری کشاورزی، نیازمند مطالعات پایلوت و تحلیل‌های دقیق اقتصادی است.

براین‌اساس، در این مقاله ابتدا ویژگی‌ها، انواع و مدل‌های پایداری نانوحباب‌ها مرور شد. سپس روش‌های اصلی تولید آن‌ها معرفی گردید. در ادامه، برخی از کاربردهای مهم نانوحباب‌ها در صنایع غذایی و کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، مهم‌ترین چالش‌ها و مسیرهای پیشنهادی برای تحقیق‌وتوسعه آینده این فناوری نوظهور بیان گردید.

۲- تعریف، انواع و ویژگی‌های نانوحباب‌ها

۲-۱- تعریف

نانوحباب‌ها، حباب‌های گازی با قطر کمتر از ۲۰۰ نانومتر تعریف می‌شوند [۲ و ۹]. این ابعاد نانومتری به نانوحباب‌ها امکان می‌دهد به شکاف‌ها و حفرات ریز سطح مواد غذایی، میکروکانال‌های غشاها و فضای بین ذرات جامد نفوذ کنند. ازاین‌رو، انتظار می‌رود این ویژگی به افزایش سطح تماس گاز – مایع و در نتیجه بهبود انتقال جرم گاز به درون مایع کمک کند. [۸ و ۱۰].



شکل ۲. مقایسه ویژگی‌های انواع حباب‌ها بر اساس اندازه[۸]

شکل ۲، به مقایسه شماتیک نانو، میکرو و ماکرو حباب‌ها بر اساس اندازه و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی می‌پردازد. با کاهش اندازه حباب از مقیاس ماکرو به نانو، ظاهر حباب‌ها در مایع از حالت قابل‌مشاهده به کدر و سرانجام شفاف تغییر می‌کند، درحالی‌که فشار داخلی، سرعت انحلال گاز و پتانسیل زتای سطحی افزایش، و ناپایداری فیزیکی کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که نانوحباب‌ها در مقایسه با ماکرو حباب‌ها از پایداری فیزیکی بسیار بیشتری در مایع برخوردارند [۸].

۲-۲- انواع

نانوحباب‌ها معمولاً به دودسته اصلی تقسیم می‌شوند:

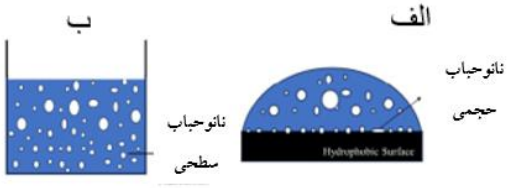
نانوحباب‌های سطحی: حباب‌هایی که روی سطح مشترک جامد/مایع قرار دارند. به شکل کلاهک کروی (ازیک‌طرف صاف و از طرف دیگر محدب) مشاهده می‌شوند (شکل ۳-الف).

نانوحباب‌های حجمی: حباب‌های کروی یا نزدیک به کروی که به طور معلق در حجم مایع توزیع شده‌اند (شکل ۳-ب) [۲ و ۱۵]. در کاربردهای غذایی و کشاورزی، تمرکز عمده بر نانوحباب‌های حجمی است؛ زیرا این حباب‌ها در آب مورداستفاده در فرآیند تولید، محلول‌های غذایی، فراورده‌های لبنی و آب آبیاری حضور دارند و می‌توانند بر رئولوژی، انتقال جرم، واکنش‌های اکسیداسیون و شرایط میکروبی محیط اثر بگذارند [۸ و ۱۰].

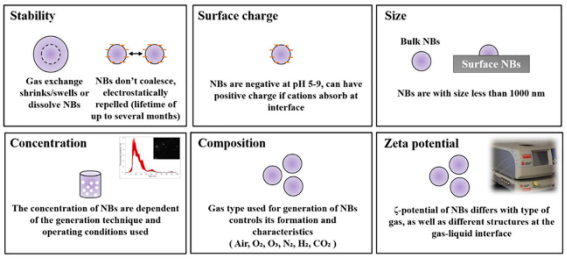
۲-۳- ویژگی‌ها

نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که اندازه متوسط نانوحباب‌ها معمولاً در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر است و غلظت آن‌ها می‌تواند در برخی سامانه‌ها به حدود 10^{16} حباب در لیتر برسد. غلظت نانوحباب‌ها، به روش تولید و شرایط عملیاتی مورداستفاده وابسته است. از منظر ترکیب، نوع گاز به‌کاررفته در فرآیند تولید (مانند هوا، اکسیژن، ازن، نیتروژن، هیدروژن یا دی‌اکسیدکربن) نحوه شکل‌گیری و ویژگی‌های نهایی نانوحباب‌ها

را کنترل می‌کند. [۳ و ۸]. پتانسیل زتای این حباب‌ها غالباً منفی و در محدوده ۲۰- تا ۴۰- میلی‌ولت گزارش شده است؛ این بار سطحی منفی با تشکیل لایه دوگانه الکتریکی، منجر به ایجاد نیروی دافعه کلوئیدی قوی بین حباب‌ها می‌شود [۵ و ۸]. ازسوی‌دیگر، به دلیل ابعاد بسیار ریز نانوحباب‌ها، نیروی شناوری وارد بر آن‌ها (که طبق قانون استوکس متناسب با مجذور شعاع حباب است) بسیار ناچیز خواهد بود؛ ازاین‌رو چگالی ظاهری سوسپانسیون حاوی نانوحباب اندکی کمتر از آب خالص است و حباب‌ها به‌جای صعود سریع، به طور بسیار آهسته به سطح مایع می‌آیند (شکل ۴) [۳ و ۱۶].



شکل ۳. انواع نانوحباب‌ها: الف سطحی و ب حجمی [۱۶]



شکل ٤. شماتیک کلی از ویژگی‌های نانوحباب‌ها [۸]

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نانوحباب‌ها به دلیل مبادله گاز با محیط اطراف ممکن است به‌تدریج منقبض شده یا محو شوند، اما دافعه الکترواستاتیکی بین آن‌ها می‌تواند از به هم پیوستن حباب‌ها جلوگیری کرده و طول عمر آن‌ها را تا چند ماه افزایش دهد. از نظر بار سطحی، نانوحباب‌ها معمولاً در دامنه pH ۵ تا ۹ دارای بار منفی هستند، هرچند در صورت جذب کاتیون‌ها در فصل مشترک گاز - مایع، می‌توانند بار مثبت نیز پیدا کنند [۳].

۳- روش‌های تولید نانوحباب‌ها

به‌طورکلی، روش‌های تولید نانوحباب‌ها را می‌توان در چند گروه اصلی دسته‌بندی کرد: کاویتاسیون هیدرودینامیکی، کاویتاسیون فراصوت، روش‌های غشایی و نازل‌های متخلخل و روش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی. مطالعات نشان می‌دهد که هر یک از این روش‌ها، محدوده اندازه، غلظت و توزیع ویژه‌ای از نانوحباب‌ها را تولید می‌کنند و از نظر مقیاس‌پذیری و هزینه برای کاربردهای صنایع غذایی و کشاورزی، مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند [۳، ۹، ۱۶ و ۱۷].

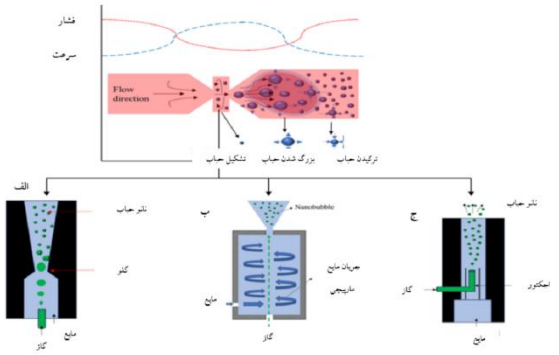
۳-۱- کاویتاسیون هیدرودینامیکی

در این روش، مایع از میان اجزایی مانند سیستم ونتوری (شکل ۵ - الف)، جریان مارپیچ مایع (شکل ۵ - ب) و سیستم اجکتور (شکل ۵ - ج) عبور داده می‌شود. کاهش ناگهانی فشار موضعی باعث تشکیل حباب‌های گازی و فروپاشی متناوب آن‌ها می‌شود و بخشی از این حباب‌ها در اثر برش شدید و ناپایداری تا مقیاس نانو ریز می‌شوند. نوع گاز تزریقی، اختلاف فشار، دبی جریان، هندسه نازل و تعداد سیکل‌های گردش، از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که اندازه و غلظت نانوحباب‌ها را در این روش کنترل می‌کنند [۳ و ۱۸]. به دلیل امکان استفاده از تجهیزات نسبتاً ساده و قابلیت مقیاس‌پذیری، این روش یکی از گزینه‌های مناسب برای خطوط فرآوری مایعات غذایی و سامانه‌های آبیاری به شمار می‌رود.

۳-۲- کاویتاسیون فراصوت

از امواج فراصوت با فرکانس و توان مشخص (معمولاً حدود ۲۰ kHz و بالاتر) استفاده می‌شود. ایجاد و فروپاشی چرخه‌ای حباب‌های کاویتاسیونی، منجر به تشکیل نانوحباب‌ها در فاز مایع می‌گردد. اگرچه کنترل دقیق اندازه و توزیع نانوحباب‌ها در این روش چالش‌برانگیز است، اما امکان ترکیب آن با سایر فناوری‌ها (مانند غشا یا نازل‌های متخلخل) وجود دارد و در کاربردهایی مانند استخراج ترکیبات زیست فعال و بهبود انجماد مواد غذایی به‌کارگرفته‌شده است (شکل ۶) [۲ و ۹].

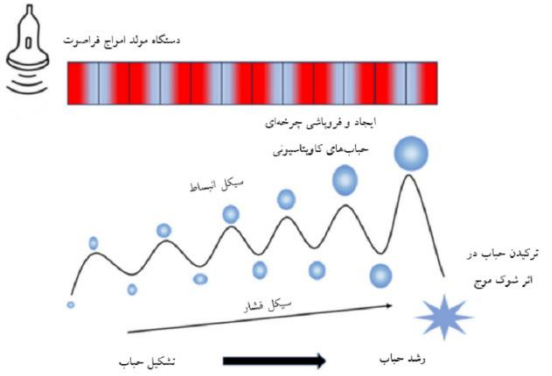
شکل ۵. تولید نانوحباب با استفاده از کاویتاسیون



هیدرودینامیکی: (الف) سیستم ونتوری، (ب) جریان مارپیچی مایع و (ج) سیستم اجکتور [۱۸]

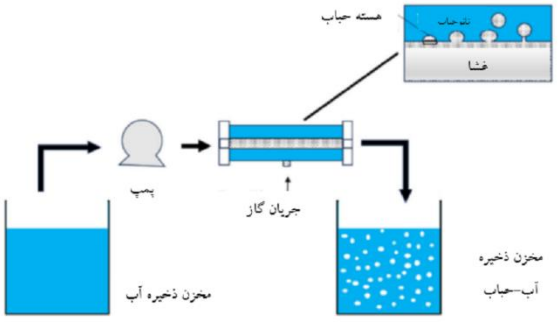
۳-۳- روش‌های غشایی و نازل‌های متخلخل

اساس این روش، عبور کنترل‌شده گاز از منافذ ریز غشاهای پلیمری یا سرامیکی و انتشار آن به درون مایع می‌باشد. فاز گاز تحت‌فشار از یک سمت غشا و فاز مایع از سمت دیگر جریان می‌یابد؛ گاز از میان منافذ عبور کرده و در نقطه جدایش از سطح، حباب‌های بسیار ریز تا مقیاس نانو تشکیل می‌شود. با تنظیم فشار گاز، دبی مایع، ساختار و اندازه حفرات غشا، می‌توان توزیع اندازه نانوحباب‌ها را تا حدودی تعیین کرد (شکل ۷) [۱۷ و ۱۸].



شکل ٦. تولید نانوحباب با استفاده از کاویتاسیون فراصوت [۱۸]

این روش برای کاربردهای پیوسته در تصفیه آب، شناورسازی و نیز در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار و برخی فرایندهای صنایع غذایی پیشنهاد شده است.



شکل ۷. تولید نانوحباب با استفاده از غشا [۱۸]

٤-۳- روش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی

در این روش‌ها، گاز به‌صورت درجا در مایع تولید می‌شود. به‌عنوان نمونه، در روش الکتروشیمیایی، تجزیه آب در سطح الکترودها (تولید H_2 و O_2) می‌تواند در شرایط فوق‌اشباع منجر به تشکیل نانوحباب‌ها شود. در روش‌های شیمیایی نیز از واکنش‌هایی استفاده می‌شود که محصولات گازی ایجاد می‌کنند. در این دسته از روش‌ها، کنترل میزان تولید گاز و جلوگیری از تشکیل نانوذرات یا قطرات مایع که ممکن است از نظر اندازه‌گیری با نانوحباب‌ها اشتباه گرفته شوند، اهمیت ویژه‌ای دارد [۳ و ۱۵]. این روش‌ها بیشتر در مقیاس آزمایشگاهی، پزشکی و سامانه‌های کوچک بررسی شده‌اند و توسعه کاربرد صنعتی آن‌ها همچنان در حال پیشرفت است.

درعین‌حال، هیچ‌یک از روش‌های تولید نانوحباب به‌تنهایی برای کاربردهای غذایی و کشاورزی ایده‌آل نیست و انتخاب روش تولید باید بر اساس نوع محصول، شرایط فرایند، نوع گاز، الزامات بهداشتی و هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی انجام شود [۹، ۱۱ و ۱۹]. همچنین در برخی کاربردها، استفاده از رویکردهای ترکیبی (مانند کاویتاسیون هیدرودینامیکی همراه با غشا یا فراصوت) می‌تواند غلظت نانوحباب‌ها و پایداری و کارایی آن‌ها را در محیط‌های پیچیده غذایی و کشاورزی بهبود بخشد [۶ و ۱۷].

٤- رفتار و پایداری نانوحباب‌ها در محیط‌های غذایی و کشاورزی

٤-۱- پارادوکس لاپلاس و مدل‌های پایداری

پیش از بررسی رفتار نانوحباب‌ها در محیط‌های پیچیده غذایی و کشاورزی، لازم است ابتدا پایداری بنیادی این حباب‌ها در سامانه‌های ساده‌تر (مانند آب خالص) از منظر ترمودینامیکی مرور شود. طبق معادله لاپلاس و مدل‌های کلاسیک انحلال حباب (مانند مدل اپستین – پلست)، فشار داخلی بالای یک حباب با شعاع حدود ۱۰۰ نانومتر باید موجب انحلال کامل آن در بازه زمانی بسیار کوتاه در حد میکروثانیه تا چند میلی‌ثانیه در آب شود. بااین‌حال، مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که نانوحباب‌ها می‌توانند ساعت‌ها و حتی روزها پایدار باقی بمانند؛ گفتنی است که این مشاهدات تجربی خود متکی بر روش‌های اندازه‌گیری (مانند DLS یا NTA هستند که به گفته برخی مطالعات، دقت و توان تفکیک محدودی در تمایز نانوحباب از سایر ذرات کلوئیدی دارند (به بخش ۷-۱ مراجعه شود). باوجوداین محدودیت‌های اندازه‌گیری، تناقض بین پیش‌بینی نظری و مشاهدات تجربی که به پارادوکس لاپلاس شناخته می‌شود همچنان پابرجا و پایه بسیاری از بحث‌های نظری حل‌نشده در این حوزه است [۳ و

۱۵]. برای توضیح این پدیده، چند مکانیسم مختلف به شرح ذیل پیشنهاد شده است که هیچ‌یک به‌تنهایی مورد اجماع کامل قرار نگرفته و به‌احتمال زیاد به‌صورت هم‌زمان در سامانه‌های واقعی عمل می‌کنند:

۴-۱-۱- بار سطحی و لایه دوگانه الکتریکی:

جذب انتخابی یون‌ها بر سطح نانوحباب باعث ایجاد لایه دوگانه الکتریکی و فشار الکترواستاتیکی می‌شود که بخشی از فشار داخلی حباب را خنثی کرده و از هم‌جوشی حباب‌ها جلوگیری می‌کند [۳، ۵ و ۱۵].

۴-۱-۲- وجود لایه غنی از مواد فعال سطحی یا آلودگی‌ها:

حضور ترکیبات آلی یا معدنی در فصل مشترک گاز/مایع می‌تواند لایه‌ای با نفوذپذیری پایین تشکیل دهد که خروج گاز را کند کرده و پایداری را افزایش دهد [۵، ۷ و ۱۵].

۴-۱-۳- تشکیل خوشه‌های نانوحباب[۲]:

بر اساس این مکانیسم، نانوحباب‌ها در خوشه‌هایی با آرایش ویژه تجمع می‌یابند که در آن‌ها تعادل میان انتشار و بازترکیب گاز برقرار می‌شود و فشار مؤثر کاهش می‌یابد [۵ و ۱۶].

بر اساس تحلیل‌های ترمودینامیکی و دینامیکی موجود، هیچ‌کدام از این مدل‌ها به‌تنهایی تمام مشاهدات تجربی را توضیح نمی‌دهد و احتمالاً ترکیبی از این مکانیسم‌ها در پایداری نانوحباب‌ها نقش دارد [۵].

۴-۲- تأثیر ترکیب شیمیایی محیط غذایی و کشاورزی

محلول‌های غذایی معمولاً حاوی یون‌های معدنی، پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها، لیپیدها و ذرات کلوئیدی هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نوع و غلظت یون‌ها، pH، حضور ترکیبات فعال سطحی و غلظت مواد آلی محلول می‌تواند اندازه، پتانسیل زتا و پایداری نانوحباب‌ها را به‌طورجدی تحت‌تأثیر قرار دهد؛ برای نمونه، افزایش قدرت یونی محلول معمولاً با کاهش دافعه الکترواستاتیک بین حباب‌ها، پایداری آن‌ها را کاهش داده و هم‌جوشی را تسریع می‌کند [۳ و ۵]. ازسوی‌دیگر، جذب پروتئین‌ها یا پلی‌ساکاریدها بر سطح نانوحباب می‌تواند، علاوه بر دافعه الکترواستاتیک، از طریق ایجاد ممانعت فضایی (استریک) مشابه مکانیسم پایدارسازی امولسیون‌ها، به تشکیل لایه‌ای پایدار کمک کرده و از هم‌جوشی حباب‌ها جلوگیری کند؛ این مسئله به‌ویژه در سامانه‌های لبنی و نوشیدنی‌های پروتئینی اهمیت دارد [۶ و ۸].

در محیط‌های کشاورزی نیز، حضور مواد آلی محلول، ذرات خاک و جمعیت میکروبی در رفتار نانوحباب‌ها نقش دارد. در برخی مطالعات گزارش شده است که نانوحباب‌ها می‌توانند به بهبود ساختار خاک، افزایش اکسیژن محلول در ناحیه ریشه و تحریک فعالیت میکروبی مفید کمک کنند، برای نمونه در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی یا کشت گلخانه‌ای. بااین‌حال، خواص شیمیایی آب آبیاری (سختی و قدرت یونی) و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (بافت و pH) بر پایداری و حرکت نانوحباب‌ها در پروفیل خاک مؤثر است [۲۰ و ۲۱].

۵- کاربردهای نانوحباب‌ها در صنایع غذایی

استفاده‌های مختلف نانوحباب‌ها در صنایع غذایی در شکل ۸ و جدول ۱ خلاصه شده است.

توان بالقوه نانوحباب‌های بسیار ریز در ایجاد انتقال جرم مؤثر گاز - مایع می‌تواند زمینه‌ساز بهبود برخی شاخص‌های کیفی محصولات غذایی مانند حفظ بهتر ترکیبات حساس به اکسیداسیون یا افزایش دسترسی‌پذیری بسترهای آنزیمی، باشد. بااین‌حال، ارزیابی اثرات احتمالی این فناوری بر زیست‌فراهمی مواد مغذی و پیامدهای تغذیه‌ای آن برای مصرف‌کننده مستلزم انجام مطالعات تخصصی تکمیلی مانند بررسی‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی گوارش و مطالعات بالینی می‌باشد. در ادامه به برخی از مطالعات و پیامدهای ناشی از آن پرداخته شده است.

۵-۱- بهبود بقا و زنده‌مانی پروبیوتیک‌ها

مزایای پروبیوتیک‌ها در بهبود هضم، سلامت روده و تقویت سیستم ایمنی ثابت شده است که این امر می‌تواند به کاهش رشد باکتری‌های مولد عفونت و کاهش خطر بروز اختلالات سلامت در میزبان منجر شود. برای‌آنکه پروبیوتیک‌ها بتوانند نقش سودمند خود را در سلامت ایفا کنند، لازم است تعداد آن‌ها در محصولات غذایی یا مکمل‌ها در حد کافی حفظ شود. بااین‌حال، در طول دوره‌ی نگهداری، تعداد موردنیاز پروبیوتیک‌ها در یک محصول تخمیری ممکن است به طور قابل‌توجهی کاهش یابد؛ عواملی مانند سطح اکسیژن در محصول، pH و دمای پایین، تجمع پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و اسیدلاکتیک از جمله این عوامل بیرونی و درونی هستند [۲۲].

شارما[۳] و همکاران [۲۲] نشان دادند که تزریق نانوحباب‌های CO_2 و نانوحباب‌های N_2+H_2 (در فشار گاز کنترل‌شده ۵ psi، دبی ورود گاز ۰٫۶ لیتر بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه) به شیر (در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد) اثر مثبتی بر تعداد بقای پروبیوتیک‌ها در نمونه‌ها داشته است. این روش می‌تواند روشی بالقوه مقرون‌به‌صرفه برای کنترل زنده‌مانی پروبیوتیک‌ها در ماتریس‌های غذایی مختلف در طول نگهداری باشد.

2 Bubble clusters

3 Sharma



شکل ۸. کاربرد نانوحباب‌ها در صنایع غذایی] ۱۲]

۲-۵- حفاظت از ترکیبات زیست فعال

پلی‌فنول‌ها باوجود فعالیت‌های زیستی قابل‌توجه، معمولاً از زیست‌فراهمی پایینی در بدن انسان برخوردارند. این محدودیت عمدتاً ناشی از انحلال‌پذیری ضعیف، زمان اقامت کوتاه در معده و متابولیسم سریع کبدی این ترکیبات است. نانوحباب‌ها، در کنار سایر حامل‌های نانومقیاس مانند نانوذرات جامد، به‌عنوان یکی از رویکردهای نانو فناورانه برای افزایش زیست‌فراهمی پلی‌فنول‌ها معرفی شده‌اند [۲۴]. باتوجه‌به ماهیت پلی الکترولیتی نیمه آب‌گریز و بار سطحی بالای نانوحباب‌ها، این ساختارها می‌توانند اتصالات محکم بین سلول‌های اپیتلیال روده را موقتاً تحت‌تأثیر قرار داده و جذب پلی‌فنول‌های ریزپوشانی‌شده توسط سلول‌های روده و بافت لنفاوی مرتبط با روده را افزایش دهند [۲۴]. علاوه بر این، پوشش‌دهی نانوحباب‌ها با ترکیباتی مانند پلی‌ساکاریدهای سولفاته می‌تواند زیست‌فراهمی برخی پلی‌فنول‌ها (مانند کورکومین) را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد [۲۴].

بااین‌حال، لازم به تأکید است که وضعیت میکروبیوم روده در هر فرد می‌تواند بر میزان جذب این حامل‌های نانومقیاس اثر بگذارد؛ و اگرچه مطالعات حیوانی (به‌ویژه در مدل‌های موش) نتایج بسیار امیدوارکننده‌ای از این رویکرد نشان داده‌اند، کارآزمایی‌های بالینی انسانی تاکنون نتایج به‌مراتب محدودتری داشته‌اند.

۳-۵- افزایش بازده استخراج و فعالیت آنتی‌اکسیدانی

اتومی[4] و همکاران [۲۵] دریافتند که واردکردن نانوحباب‌های نیتروژن با اندازه ۸۰-۹۰ نانومتر به درون محلول نمک یونی با استفاده از فراصوت، می‌تواند کارایی استخراج پلی‌فنول‌ها از پوسته گردو را افزایش دهد. در نمونه پودر پوسته گردویی که با محلول یونیِ حاوی نانوحباب تیمار شده بود، تغییرات فیزیکی بیشتری مشاهده شد؛ از جمله حفره‌های بیشتر، زبری بالاتر و تخریب شدیدتر دیواره سلولی. این پدیده می‌تواند با اثر فروپاشی نانوحباب‌ها در اثر امواج فراصوت توضیح داده شود. تخریب مورفولوژیک بافت گیاهی در اثر فروپاشی نانوحباب‌ها می‌تواند انتقال جرم پلی‌فنول‌ها از بافت پوسته به محیط استخراج را افزایش داده و در نتیجه بازده استخراج را بهبود بخشد.

4 Ettoumi

جدول ۱ – تعدادی از کاربرد های نانو حباب ها در صنایع غذایی و کشاورزی

کاربرد	محصول	تأثیر بارز	منبع
کاهش ویسکوزیته و افزایش کارایی فیلتراسیون	شیر تغلیظ شده	تزریق نانوحباب‌های هوا به شیر قبل از فرایند اولترافیاتراسیون سبب کاهش ویسکوزیته و جدایی مؤثر ترکیبات غیرپروتئینی شیر می‌شود، فراهم‌آوردن خشک‌کردن پاششی شیر با غلظت مواد جامد بالاتر	[۱۹]
چاشنی‌دار غذا	تخم‌مرغ آب‌پز بدون پوست	نانوحباب‌های هوا نفوذ ترکیبات چاشنی مایع را به داخل محصولات غذایی در زمان کوتاه‌تری بهبود بخشیدند	[۸]
آب غنی‌شده با گاز به‌عنوان مکمل سلامتی	آب آشامیدنی غنی‌شده با H_2 و O_2	H_2 یا O_2 در حامل‌های نانومقیاس، آب را به طور قابل‌توجهی فوق‌اشباع می‌کند و باعث افزایش کاربردهای تغذیه‌ای – سلامتی این آب‌ها می‌شود	[۱۱]
بهبود فرآیند انجماد غذا	محلول‌های ساکارز و مالتودکسترین	پراکندگی نانوحباب‌های هوا در محلول‌های ساکارز و مالتودکسترین منجر به کاهش چشمگیر درجه فوق سرمایش و زمان انجماد فرآیند شد.	[۲۶]
تسهیل تبلور اجزای شیر	چربی شیر و لاکتوز	افزودن حباب‌های گاز CO_2 و N_2 به بهبود هسته‌زایی کریستال‌های لاکتوز، افزایش بازده تبلور و کاهش اندازه کریستال‌ها کمک کرد. تزریق گاز CO_2 تعداد کریستال‌های چربی و سفتی چربی شیر بدون آب را افزایش داد.	[۲۶]
کمک در تخلیص پروتئین	هیدروفوبین	با تغذیه نانوحباب‌های CO_2 (کمتر از ۱۰۰ نانومتر)، خلوص هیدروفوبین‌های به‌دست‌آمده روی سطح مایع بهبود یافت.	[۱۶]
جلوگیری از گرفتگی غشا	غشای سرامیکی با گرفتگی آلی شبیه‌سازی‌شده	منافذ غشا به طور مؤثری باز شدند و سطح اولیه شار تراوایی با اعمال نانوحباب‌های هوا بازیابی گردید.	[۱۹]
شست‌وشو و ضدعفونی	میوه و سبزی تازه	تزریق نانوحباب‌های ازن به آب شستشو، باعث کاهش بار میکروبی و افزایش ماندگاری با استفاده از حداقل مواد شیمیایی شد.	[۲۸]
آبیاری قطره‌ای	آب کشاورزی	اکسیژن‌رسانی با نانوحباب‌های اکسیژن، افزایش کارایی مصرف آب و کود، بهبود رطوبت و میکروبیوم خاک را دربر داشت.	[۱۳]
آبیاری زیرسطحی	سامانه‌های زیرسطحی	تزریق آب هوادهی شده سبب حفظ عملکرد و کیفیت در عین کاهش مصرف آب و کود گردید.	[۱۵]

٤-٥- حفظ کیفیت در مواد غذایی منجمد

کنترل تبلور آب و بهبود کارایی انجماد، برای صنعت مواد غذایی منجمد از اهمیت زیادی برخوردار است. هیو و همکاران عنوان کردند که برخی ویژگی‌های فیزیکی گاز هیدروژن، از جمله رسانش حرارتی نسبتاً بالا نسبت به سایر گازهای رایج، مبنای نظری برای بررسی نانوحباب‌های هیدروژن در فرایندهای انجماد بوده است. آنها به بررسی اثر حباب‌های از پیش موجود با گستره اندازه‌ای تا مقیاس میکرومتر در محلول‌های ساکارز و مالتودکسترین در مقایسه با نانوحباب هیدروژن با ابعاد کاملاً نانومتری پرداختند. مطالعات آنها نشان داد که این تلفیق حباب‌ها می‌تواند از طریق فراهم‌کردن مراکز هسته‌زایی، اثر مثبتی بر فرآیندهای انجماد در مواد غذایی داشته باشد [۲۶].

٥-٥- کاربردهای لبنی

صنایع لبنی یکی از مهم‌ترین حوزه‌های بالقوه برای استفاده از نانوحباب‌ها به شمار می‌رود. در مطالعات مروری و تجربی نشان‌داده‌شده است که نانوحباب‌ها می‌توانند در چند محور کلیدی نقش داشته باشند [۷، ۸ و ۱۸]:

- بهبود بازترکیب و حلالیت کنسانتره‌های پروتئینی شیر از طریق ایجاد حباب‌های بسیار ریز هنگام اختلاط؛
- کاهش ویسکوزیته سامانه‌های غلیظ و در نتیجه، کاهش انرژی پمپاژ و بهبود کارایی فرایندهای غشایی؛
- بهبود تشکیل و پایداری فوم در نوشیدنی‌های قهوه، دسرها و بستنی؛
- کاهش رسوب‌گذاری و گرفتگی غشاها در فرایندهای اولترافیلتراسیون و اسمز معکوس.

کنسانتره پروتئین شیر[5] (MPC) در محصولاتی مانند نوشیدنی‌ها و بارهای پرپروتئین، شیرخشک نوزاد، پنیر، ماست و ... استفاده می‌شود؛ بااین‌حال، استفاده از این پودرها به دلیل حلالیت و روان جریانی ضعیف آن‌ها محدود است. ویسکوزیته بالا پس از اولترافیلتراسیون و تغلیظ (تبخیر) یکی از مشکلات اصلی است که تولیدکنندگان MPC در حین فرآیند با آن روبه‌رو هستند. کاهش ویسکوزیته و کمک به افزایش ماده خشک پیش از خشک‌کردن پاششی می‌تواند به صرفه‌جویی قابل‌توجه در انرژی در تولید پودر منجر شود. بابو و همکاران [۱۹]، تأثیر تزریق میکرو و نانوحباب‌های هوا تولیدشده با روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی از نوع ونتوری را بر ویژگی‌های رئولوژیکی و ساختاری ماست یونانی[6] غنی‌شده با کنسانتره کازئین میسلی بررسی کردند. نتایج نشان داد که ویسکوزیته ظاهری (در نرخ برشی ۱۰۰ بر ثانیه) نمونه‌های تیمار شده با نانوحباب، پیش از دوره نگهداری، به طور معنی‌داری کمتر از نمونه شاهد بود (۰,۷۱ در برابر ۱,۰۹ پاسکال ثانیه). این کاهش ویسکوزیته در طول دوره نگهداری چهارهفته‌ای نیز حفظ شد، به‌طوری که در هفته‌های دوم، سوم و چهارم، به ترتیب حدود ۵۸، ۴۳ و ۵۰ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد مشاهده گردید. همچنین تعداد دانه‌های ساختاری در نمونه‌های حاوی نانوحباب به طور چشمگیری کمتر بود. این کاهش از حدود ۷۳ درصد بلافاصله پس از تیمار تا حدود ۹۸ درصد در پایان هفته چهارم افزایش یافت که نشان‌دهنده اثر پایدار و فزاینده نانوحباب‌ها بر یکنواختی ساختار ژل در طول زمان است. در میزان آب‌اندازی نیز پیش از دوره نگهداری، نمونه حاوی نانوحباب حدود ۳۷ درصد کمتر از نمونه شاهد بود؛ بااین‌حال، بر اساس تحلیل آماری کلی مطالعه، اثر تیمار بر آب‌اندازی و ظرفیت نگهداری آب در طول کل دوره نگهداری معنی‌دار نبود. نویسندگان این یافته‌ها را به نقش نانوحباب‌ها در ایجاد یک ساختار میانی بین ذرات پروتئینی شیر، ممانعت از تجمع پروتئینی و اصلاح شبکه ژل کازئین نسبت دادند. آن‌ها همچنین این روش را فرآیندی نسبتاً ساده، کم‌هزینه و قابل‌اجرا در واحدهای تولیدی موجود توصیف کردند.

٦-٥- شست‌وشو و ضدعفونی محصولات تازه

یکی از چالش‌های اصلی در زنجیره تأمین میوه و سبزی، آلودگی میکروبی و کاهش کیفیت حسی در طول نگهداری و عرضه است. استفاده گسترده از محلول‌های کلردار، اگرچه کارآمد است، اما نگرانی‌هایی درباره تشکیل ترکیبات جانبی مضر و باقی‌ماندن مواد شیمیایی بر سطح محصول به دنبال دارد [۱۱ و ۲۸].

در پژوهش‌های اخیر، استفاده از آب حاوی نانوحباب‌های ازن یا اکسیژن به‌عنوان جایگزینی با ریسک شیمیایی کمتر برای شست‌وشو و ضدعفونی پیشنهاد شده است؛ بااین‌حال، لازم است این دو گاز به طور مجزا در نظر گرفته شوند، زیرا خاصیت ضدمیکروبی آن‌ها یکسان نیست. گزارش شده است که تیمار با آب حاوی نانوحباب‌های ازن، به دلیل خاصیت اکسیدکننده و ضدمیکروبی قوی و شناخته‌شده گاز ازن، می‌تواند کاهش معنی‌دار و در برخی موارد چند لگاریتمی در بار میکروبی سطحی محصولات تازه ایجاد کند [۴، ۱۱ و ۲۸]. در مقابل، نانوحباب‌های اکسیژن عمدتاً با اثرات فیزیولوژیک مرتبط دانسته شده‌اند از جمله کاهش سرعت نرم‌شدن بافت و تأخیر در واکنش قهوه‌ای شدن آنزیمی که احتمالاً بیشتر ناشی از تغییر شرایط اکسیژن‌رسانی سطحی و مهار نسبی آنزیم پلی‌فنول اکسیداز می‌باشد [۴ و ۲۸].

5 Milk Protein Concentrate

6 Greek-style yogurt

نتایج حاصل از مطالعات موردی روی محصولاتی مانند کاهو، اسفناج، توت‌فرنگی و گوجه‌فرنگی، کاهش قابل‌توجه جمعیت میکروبی در تیمار با نانوحباب‌های ازن را در کنار حفظ کیفیت حسی و مقبولیت مصرف‌کننده نشان داده‌اند [۴ و ۲۸]. لازم به ذکر است که در بسیاری از این مطالعات، سهم مستقل ساختار نانوحبابی (در برابر صرفاً حضور گاز ازن یا اکسیژن محلول در آب، بدون مقیاس نانومتری) به طور کامل تفکیک نشده است؛ بنابراین مقایسه مستقیم بین نانوحباب و حباب معمولی حاوی گاز یکسان، برای تعیین دقیق سهم اختصاصی فناوری نانوحبابی ضروری می‌باشد.

ترکیب نانوحباب‌های ازن و اکسیژن با سه اثر هم‌زمان مرتبط دانسته شده است: افزایش اکسیژن محلول، تولید گونه‌های اکسیژن فعال هنگام فروپاشی حباب‌ها و تخریب اتیلن. بااین‌حال، لازم به تأکید است که خاصیت ضدمیکروبی و اکسیدکننده قوی گاز ازن به‌خودی‌خود (مستقل از مقیاس نانومتری حباب) در ادبیات علمی شناخته‌شده است؛ بنابراین بخشی از اثرات گزارش‌شده ممکن است ناشی از خودِ گاز ازن باشد، نه لزوماً ویژگی‌های اختصاصی ساختار نانوحبابی. مطالعات مقایسه‌ای مستقیم بین نانوحباب ازن و حباب‌های معمولی ازن با غلظت گازی معادل، برای تفکیک این دو اثر ضروری است [۴ و ۷].

۷-۵- تصفیه و بازیافت آب

صنایع غذایی حجم زیادی از آب را در واحدهای شست‌وشو، گرمایش و سرمایش، تمیزکاری و سیستم‌های شست‌وشوی در جا[7] (CIP) مصرف می‌کنند. مطالعات مختلف نشان داده است که تزریق نانوحباب‌ها به سامانه‌های تصفیه آب‌وفاضلاب، به دلیل سطح ویژه بالا و پایداری کلوئیدی این حباب‌ها، می‌تواند کارایی شناورسازی ذرات معلق و امولسیون‌های چربی را افزایش دهد؛ این فرآیند همچنین با تسهیل اکسیداسیون مواد آلی (از طریق افزایش سطح تماس گاز – مایع و تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن حین فروپاشی حباب‌ها)، به حذف رنگ، بو و آلاینده‌های آلی و همچنین کاهش گرفتگی غشا کمک می‌کند [۹، ۱۱ و ۱۲].

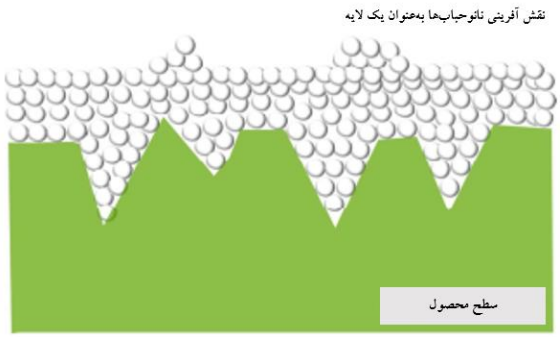
علاوه بر این، از آب نانوحبابی در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و حذف فلزات سنگین نیز استفاده می‌شود که این امر می‌تواند به کاهش مصرف مواد شیمیایی گندزدا و منعقدکننده در سامانه تصفیه منجر شود [۵ و ۹].

۸-۵- ایمنی مواد غذایی

ایمنی مواد غذایی به مجموعه اقدامات و فرآیندهای علمی اطلاق می‌شود که باهدف اطمینان از عاری بودن مواد غذایی از عوامل زیان‌آور برای سلامت عمومی انجام می‌گیرد. یکی از چالش‌های رایج در این حوزه، باقی‌ماندن بقایای مواد شیمیایی ضدعفونی‌کننده و آفت‌کش پس از فرآوری مواد غذایی است که می‌تواند پیامدهای نامطلوبی برای مصرف‌کننده به همراه داشته باشد؛ همین موضوع پژوهشگران را به سمت بررسی فناوری نانوحباب‌ها به‌عنوان یک راهکار جایگزین هدایت کرده است. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که آب حاوی نانوحباب در حذف بقایای آفت‌کش از سطح محصولات غذایی مؤثر است. این اثربخشی از طریق کاهش زاویه تماس آب نانوحبابی با سطح محصول، سبب افزایش ترشوندگی و نفوذپذیری آن شده و امکان دسترسی بهتر به آلاینده‌های سطحی و بیوفیلم‌های میکروبی را فراهم می‌کند. این ترشوندگی بهبودیافته، در کنار فروپاشی حباب‌ها و آزادسازی موضعی انرژی، به تخریب ساختار بیوفیلم و حذف مواد آلی متصل به سطح کمک می‌کند (شکل ۹) [۱۳ و ۱۷].

۱-۸-۵- حذف بیوفیلم‌های میکروبی

یکی از مشکلات اصلی در ایمنی مواد غذایی، تشکیل بیوفیلم‌ها بر سطوح تجهیزات فرآوری است. بیوفیلم‌ها، در مقایسه با سلول‌های باکتریایی در حالت پلانکتونیک (شناور آزاد)، به دلیل وجود ماتریکس محافظ پلی‌ساکاریدی خارج سلولی، مقاومت به‌مراتب بیشتری در برابر ضدعفونی‌کننده‌ها از خود نشان می‌دهند [۹].



شکل ۹. کاربرد نانوحباب‌ها در صنایع غذایی با ایجاد یک‌لایه محافظتی] ۱۳]

نانوحباب‌ها از طریق برهم‌کنش‌های مکانیکی و شیمیایی متعدد به تخریب این ساختار کمک می‌کنند.

از نظر مکانیکی، فروپاشی نانوحباب‌ها در مجاورت سطح بیوفیلم، نیروی برشی موضعی ایجاد می‌کند که همراه با کاهش زاویه تماس و بهبود ترشوندگی سطح، به کاهش نیروی چسبندگی باکتری‌ها به سطح و نفوذ بهتر آب به لایه‌های زیرین بیوفیلم

[7] Cleaning In Place

منجر می‌شود [۱۳]. ز نظر شیمیایی، گونه‌های فعال اکسیژن (مانند رادیکال‌های هیدروکسیل) که هنگام فروپاشی نانوحباب‌ها یا در تعامل با گازهای خاص مانند ازن تولید می‌شوند، با ایجاد تنش اکسیداتیو به آسیب دیواره سلولی پاتوژن‌ها و غیرفعال‌سازی آن‌ها مرتبط دانسته شده‌اند [۹ و ۱۵]. لازم به ذکر است که در مواردی که از گاز ازن استفاده می‌شود، بخش قابل‌توجهی از اثر اکسیداتیو ممکن است ناشی از خاصیت ذاتی این گاز باشد، نه لزوماً از مقیاس نانومتری حباب؛ در مقابل، برهم‌کنش مکانیکی (نیروی برشی حاصل از فروپاشی) با اندازه و تراکم عددی حباب‌ها مرتبط‌تر است. تفکیک آزمایشی این دو مسیر (با مقایسه نانوحباب هوا در برابر نانوحباب ازن در غلظت گازی معادل) می‌تواند تصویر دقیق‌تری از سهم هر مکانیسم ارائه دهد.

۲-۸-۵- حذف باکتری‌ها از سطح محصولات تازه

باکتری‌ها را می‌توان از سطح محصولات غذایی تازه با کمک نانوحباب‌ها از بین برد. حضور نانوحباب‌ها، موجب کاهش نیروهای بین سطحی می‌شود که این امر فرآیند تجمع ذرات را مهار کرده و نیروی موییگی را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه جداسازی و حذف باکتری‌ها تسهیل می‌گردد. نانوحباب‌ها، همچنین می‌توانند به درون مواد آلی نفوذ کرده و ساختارهای بیوشیمیایی را تخریب کنند. علاوه بر این، با کاهش کشش سطحی احتمال جداشدن باکتری‌ها را افزایش می‌دهند [۴].

۳-۸-۵- حذف مواد آلی

آلاینده‌های آلی پایدار، به دلیل توانایی ماندگاری طولانی‌مدت در محیط، تجمع در زیست‌بوم‌ها و اثرات زیان‌بار بر سلامت انسان و محیط‌زیست، یک نگرانی جهانی محسوب می‌شوند. سطح تماس بیشتر و بار سطحی منفی نانوحباب‌ها، تجزیه آلاینده‌های آلی را از طریق تقویت فرآیندهای اکسایشی تسهیل می‌کند. افزون بر این، گونه‌های فعال اکسیژن تولیدشده توسط نانوحباب‌ها، آلاینده‌های آلی را از طریق هیدروکسیلاسیون و معدنی‌سازی حذف می‌کنند [۱۵].

٤-۸-۵- حذف باقی‌مانده آفت‌کش‌ها

باقی‌مانده آفت‌کش‌های موجود در میوه‌ها و سبزی‌ها می‌تواند منجر به ممنوعیت صادرات آن‌ها شود؛ ازاین‌رو، حذف مؤثر این باقی‌مانده‌ها از محصولات تازه، اهمیت ویژه‌ای دارد. بااین‌حال، شست‌وشوی معمول با آب معمولاً برای حذف کامل آفت‌کش‌ها کافی نیست. ویژگی‌های نانوحباب‌ها، از جمله جذب سطحی قوی، بازدهی بالای انتقال جرم و توانایی تولید گونه‌های فعال اکسیژن، به این حباب‌ها امکان می‌دهد باقی‌مانده آفت‌کش‌ها را در میوه‌ها و سبزی‌ها تازه به طور مؤثر حذف و تجزیه کنند [۱۹].

Zhang و همکاران [۱۱]، تأثیر نانوحباب‌های تولیدشده با هوا/ازن را بر حذف فوزیم، کلروتالونیل و یون Cr^{+3} از باقی‌مانده کلم‌برگ موردمطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تیمار با جریان نانوحباب‌های ریز حاوی هوا یا ازن، ۲ تا ۴ برابر کارآمدتر از روش شست‌وشوی متعارف با آب بود. علاوه بر این، تیمار با نانوحباب‌های ریز حاوی ازن، تأثیر منفی بر رنگ سطح سیب‌ها نداشت. پتانسیل بالای حذف آلاینده در روش شست‌وشوی گازی نانوحباب‌های ریز را می‌توان به سه عامل مرتبط نسبت داد: فرکانس بالای برخورد بین ذرات آفت‌کش و نانوحباب‌ها (که به سطح ویژه زیاد نانوحباب مربوط است)، اثر اکسیداتیو گاز ازن، و غلظت بالای رادیکال‌های آزاد تولیدشده [۱۱]. باتوجه‌به این‌که در مطالعه یادشده، کارایی نانوحباب‌های حاوی هوا نیز (هرچند کمتر از ازن) گزارش شده، به نظر می‌رسد بخشی از اثر به ساختار نانوحبابی (مستقل از نوع گاز) و بخشی دیگر به خاصیت اکسیدکننده اختصاصی ازن مربوط باشد؛ بااین‌حال، طراحی آزمایشی موجود امکان تفکیک کمّی دقیق این دو سهم را فراهم نمی‌کند.

٦- کاربردهای نانوحباب‌ها در کشاورزی

٦-١- استفاده از نانوحباب‌ها در آبیاری گیاه

در بخش کشاورزی، استفاده از آب آبیاری غنی از نانوحباب به‌عنوان فناوری مکمل آبیاری دقیق مطرح شده است .آب نانوحبابی می‌تواند با افزایش اکسیژن‌رسانی به ناحیه ریشه و بهبود رطوبت مؤثر خاک، فعالیت میکروبی سودمند را تقویت کند؛ این اثرات در نهایت می‌تواند به کاهش مصرف آب و نهاده‌های کشاورزی و بهبود کیفیت محصولات منجر شود [۱۳، ۱۴ و ۱۵]. نتایج مطالعات گلخانه‌ای در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نشان داده است که تغییر سطح نانوحباب‌ها در آب آبیاری می‌تواند بر عملکرد گیاه، کارایی مصرف آب، کیفیت میوه و ساختار جامعه میکروبی خاک اثر بگذارد؛ در برخی شرایط، افزایش عملکرد به همراه بهبود شاخص‌هایی نظیر محتوای ویتامین C مشاهده شده است [۱۵]. در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی نیز گزارش شده است که استفاده از آب نانوحبابی، با کاهش هم‌زمان مصرف آب و کود، می‌تواند عملکرد و کیفیت محصولاتی مانند هندوانه، طالبی و توت‌فرنگی را حفظ یا حتی بهبود بخشد و کارایی مصرف آب و نیتروژن را به طور معنی‌داری افزایش دهد [۱۴].

این نتایج نشان می‌دهد که آب نانوحبابی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای افزایش بهره‌وری آب و کود و بهبود کیفیت محصول در سیستم‌های گلخانه‌ای و فضای باز مطرح شود. [۲۰ و ۲۱].

۷. چالش‌ها، ملاحظات ایمنی و خلأهای پژوهشی

باوجود پتانسیل بالای نانوحباب‌ها در صنایع غذایی و کشاورزی، چند چالش اساسی همچنان وجود دارد:

۷-۱- استانداردسازی روش‌های اندازه‌گیری و تعریف کمّی

اندازه‌گیری اندازه، غلظت و پتانسیل زتا در حضور ذرات کلوئیدی، قطرات چربی و ترکیبات پیچیده غذایی دشوار است و می‌تواند به‌اشتباه گرفتن نانوحباب‌ها با نانوذرات یا قطرات روغنی منجر شود [۳، ۵ و ۷]. در مطالعات مختلف تأکید شده است که توسعه دستورالعمل‌های استاندارد شامل ترکیبی از روش‌های فیزیکی (مانند DLS[8]، NTA[9] و میکروسکوپی) و سنجش‌های شیمیایی، برای گزارش مشخصات نانوحباب‌ها ضروری است [۹ و ۱۶].

۷-۲- تناقض میان پیش‌بینی‌های نظری و مشاهدات تجربی در پایداری

اگرچه مدل‌های گوناگونی برای توضیح پایداری نانوحباب‌ها پیشنهاد شده است، هنوز اجماع کاملی درباره‌ی مکانیسم غالب وجود ندارد و بررسی‌های مولکولی و شبیه‌سازی‌ها ادامه دارند [۳، ۵، ۱۵ و ۱۶]. تا زمانی که درک عمیق‌تری از این مکانیسم‌ها حاصل نشود، طراحی سامانه‌های پایدار و مقیاس‌پذیر برای شرایط عملیاتی متغیر (دما، pH و ترکیبی از آن‌ها) با عدم قطعیت همراه خواهد بود [۹، ۱۶ و ۲۴].

۷-۳- ملاحظات ایمنی و کیفیت در کاربردهای غذایی

ترکیب شیمیایی نانوحباب‌ها به‌خودی‌خود مشابه حباب‌های معمولی است، اما تولید گونه‌های اکسیژن فعال، تغییرات پتانسیل اکسیداسیون و احیا و pH در حین و پس از تیمار می‌تواند در صورت کنترل‌نشدن، به اکسیداسیون بیش از حد و کاهش کیفیت حسی یا تغذیه‌ای محصول منجر شود [۱۶ و ۱۹]؛ بنابراین لازم است برای هر محصول، محدوده‌های بهینه شدت تیمار (شامل غلظت نانوحباب، زمان تماس، نوع گاز و شرایط فرایند) تعیین و در قالب دستورالعمل‌های صنعتی و استانداردها تدوین شود.

۷-۴- اقتصاد فرایند و مهندسی

هرچند گزارش‌هایی از کاهش مصرف مواد شیمیایی، صرفه‌جویی در آب و بهبود کیفیت در نتیجه استفاده از نانوحباب‌ها ارائه شده است، تحلیل‌های کامل هزینه – فایده در مقیاس صنعتی هنوز با محدودیت مواجه می‌باشد [۷، ۱۰ و ۱۹]. طراحی و ساخت ژنراتورهای نانوحباب با مصرف انرژی پایین، قابلیت کار مداوم، تمیزکاری آسان و مقاومت در برابر رسوب و آلودگی برای استفاده در محیط‌های غذایی و کشاورزی یکی از نیازهای اساسی به شمار می‌رود [۶، ۱۹ و ۲۰].

۷-۵- نیاز به مطالعات پایلوت در مقیاس صنعتی

بخش قابل‌توجهی از نتایج موجود در مقیاس آزمایشگاهی یا نیمه‌صنعتی به‌دست‌آمده است. انتقال این نتایج به خطوط صنعتی، مانند شست‌وشوی چند تن محصول در ساعت، برج‌های خشک‌کن بزرگ یا سامانه‌های آبیاری چند ده هکتاری، نیازمند پروژه‌های پایلوت و همکاری نزدیک میان پژوهشگران، صنعت و نهادهای تنظیم‌گر است [۵، ۷ و ۹].

۷-۶- تفکیک اثر مستقل نانوحباب‌ها

در بسیاری از مطالعات موجود، اثرات گزارش‌شده برای نانوحباب‌ها به طور هم‌زمان با اثر نوع گاز به‌کاررفته (مانند ازن یا اکسیژن)، انرژی مکانیکی حاصل از فراصوت یا کاویتاسیون و تغییرات pH یا اکسیژن محلول همراه است. در غالب موارد، طرح آزمایشی به‌گونه‌ای نیست که بتوان سهم مستقل ساختار نانوحبابی (در برابر صرفاً حضور گاز محلول یا تنش مکانیکی) را از یکدیگر تفکیک کرد. این محدودیت باید در تفسیر نتایج این مقاله مدنظر قرار گیرد.

۸- نتیجه‌گیری

نانوحباب‌ها به‌عنوان سامانه‌های گازی نانومقیاس، مجموعه‌ای کم‌نظیر از ویژگی‌ها مانند سطح ویژه بسیار بالا، زمان ماندگاری طولانی در مایع، توان تولید گونه‌های اکسیدکننده فعال و قابلیت نفوذ به ریزساختارهای پیچیده مواد غذایی و ماتریس خاک را در اختیار مهندسان غذا و کشاورزی قرار می‌دهند. بررسی‌های انجام‌شده در این مقاله نشان داد که از دیدگاه بنیادی، مدل‌های جدید پایداری – مانند نقش بار سطحی، پوسته سخت، خوشه‌بندی و ساختار ویژه آب – تصویر کامل‌تری از رفتار نانوحباب‌ها ارائه می‌کنند، اما هنوز نیاز به تکمیل و آزمون تجربی دارند.

بااین‌حال، عدم استانداردسازی روش‌های تولید و مشخصه‌یابی، تفاوت قابل‌توجه در طراحی سامانه‌ها (هیدرودینامیکی، فراصوتی، غشایی و...) و پیچیدگی ماتریس‌های غذایی و کشاورزی، مقایسه‌پذیری نتایج و تعمیم آن‌ها از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی را دشوار می‌سازد. علاوه بر چالش‌های علمی – فنی، هزینه بالای تجهیزات تولید نانوحباب در مقیاس صنعتی و محدودیت دسترسی به این فناوری در واحدهای کوچک و متوسط کشاورزی و غذایی نیز از موانع بالقوه گسترش کاربردی آن به شمار می‌روند. ازسوی‌دیگر، اگرچه نانوحباب‌ها از نظر ماهیت

[8] Dynamic light scattering

[9] Nanoparticle Tracking Analysis

فیزیکی و ریسک انباشت در بافت‌های زیستی با نانوذرات جامد متفاوت هستند، ارزیابی نظام‌مند اثرات احتمالی آن‌ها بر کیفیت تغذیه‌ای، پایداری ترکیبات حساس و ایمنی مصرف‌کننده ضروری است.

براین‌اساس، توسعه دستورالعمل‌های استاندارد برای تولید، اندازه‌گیری و گزارش‌دهی ویژگی‌های نانوحباب‌ها، انجام آزمون‌های پایلوت و نیمه‌صنعتی در خطوط واقعی فرآوری غذا و سامانه‌های آبیاری، و طراحی مطالعات جامع هزینه – فایده از ملزومات گسترش این فناوری است. همچنین، رویکردهای ترکیبی که در آن نانوحباب‌ها در کنار دیگر فناوری‌های نوظهور مانند فراصوت، پلاسما، پالس الکتریکی و فناوری‌های غشایی به کار گرفته می‌شوند، می‌تواند مسیر تازه‌ای برای افزایش کارایی و پایداری فرایندها ایجاد نماید.

در صورت غلبه بر چالش‌های علمی، فنی و اقتصادی یادشده، نانوحباب‌ها می‌توانند به یکی از محورهای کلیدی نوآوری در حوزه نانو در صنایع غذایی و کشاورزی کشور تبدیل شوند و به ارتقای ایمنی، کیفیت و پایداری زنجیره غذا کمک کنند.

تضاد منافع

هیچ‌گونه تضاد منافع علمی یا مالی مرتبط با این مقاله وجود ندارد.

۹- منابع

1. Jeevanandam J, Barhoum A, Chan YS, Dufresne A, Danquah MK. Review on nanoparticles and nanostructured materials: History, sources, toxicity and regulations. Beilstein Journal of Nanotechnology. 2018;9:1050–1074. https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98

2. Jan Nethari M, Akhavan O, Madah Hosseini HR. An Introduction to nanobubbles their properties and applications. Donyaye Nano. 2019;55:36-48.

3. Ohgaki K, Khanh NQ, Joden Y, Tsuji A, Nakagawa T. Physicochemical approach to nanobubble solutions. Chemical Engineering Science. 2010;65 [3]:1296–1300. https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.10.003

4. Khayum A, Harshitha SB, Swami DV, Shekar RR, Siddiqua A, Bisen M. Application of nanobubbles in post-harvest management: A comprehensive review. International Journal of Advanced Biochemistry Research. 2025;9 [S-9]:773–781. https://doi.org/10.33545/26174693.2025.v9.i9SJ.5593

5. Nirmalkar N, Pacek AW, Barigou M. On the existence and stability of bulk nanobubbles. Langmuir. 2018;34 [37]:10964–10973. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01163

6. Phan K, Bhandari B. Nanobubbles to create enhanced functionalities of food-related products. Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2025;80:101955. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2025.101955

7. Ushikubo FY, Furukawa T, Nakagawa R, Enari M, Makino Y, Kawagoe Y, et al. Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2010;361:31–37. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.03.005

8. Phan KKT, Truong T, Wang Y, Bhandari B. Nanobubbles: Fundamental characteristics and applications in food processing. Trends in Food Science & Technology. 2020;98:157–174. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.019

9. Foudas AW, Kosheleva RI, Favvas EP, Kostoglou M, Mitropoulos AC, Kyzas GZ. Fundamentals and applications of nanobubbles: A review. Chemical Engineering Research and Design. 2022;189:64–86. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.11.013

10. Malahlela HK, Belay ZA, Mphahlele RR, Caleb OJ. Micro-nano bubble water technology: Sustainable solution for the postharvest quality and safety management of fresh fruits and vegetables—A review. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2024;94:103665. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103665

11. Zhang ZH, Wang S, Cheng L, Ma H, Gao X, Brennan CS, Yan JK. Micro-nano-bubble technology and its applications in food industry: A critical review. Food Reviews International. 2023;39 [1]:1–23. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2023172

12. Javed M, Matloob A, Ettoumi F, Sheikh AR, Zhang R, Xu Y. Novel nanobubble technology in food science: Application and mechanism. Food Innovation and Advances. 2023;2 [2]:1–10. https://doi.org/10.48130/FIA-2023-0014

13. Zhou Y, Bastida F, Liu Y, et al. Impacts and mechanisms of nanobubbles level in drip irrigation system on soil fertility, water use efficiency and crop production: The perspective of soil microbial community. Journal of Cleaner Production. 2021;333:130050. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130050

14. He J, Liu Y, Wang T, et al. Effects of nanobubble in subsurface drip irrigation on the yield, quality, irrigation water use efficiency and nitrogen partial productivity of watermelon and muskmelon. International Agrophysics. 2022;36 [3]:163–171. https://doi.org/10.31545/intagr/150413

15. Zheng Z, He Y, He Y, et al. Micro-nano bubble water subsurface drip irrigation affects strawberry yield and quality by modulation of microbial communities. Agricultural Water Management.

2025;307:109228.https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109228

16. Favvas EP, Kyzas GZ, Efthimiadou EK, Mitropoulos AC. Bulk nanobubbles, generation methods and potential applications. Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2021;54:101455. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101455

17. Wang Y, Wang T. Preparation method and application of nanobubbles: A review. Coatings. 2023;13 [9]:1510. https://doi.org/10.3390/coatings13091510

18. Mallesham P, Parveen S, Naik R. Nano-bubbles: The next potential drive to advance technologies in food industry—A review. ACS Food Science & Technology. 2025; 5 [2]:428-443. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00810

19. Babu KS, Amamcharla JK. Generation methods, stability, detection techniques, and applications of bulk nanobubbles in agro-food industries: A review and future perspective. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023;63 [28]:9262–9281. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2067119

20. Arablousabet Y, Povilaitis A. The impact of nanobubble gases in enhancing soil moisture, nutrient uptake efficiency and plant growth: A review. Water. 2024;16 [21]:3074. https://doi.org/10.3390/w16213074

22. Sharma S, Sekhon AS, Unger P, Lampien A, Galland AT, Bhavnani K, et al. Impact of ultrafine bubbles on the survivability of probiotics in fermented milks. International Dairy Journal. 2023;140:105591. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105591

23. Najaf Najafi M, Arianmehr A, Sani AM. Preparation of Barije (Ferula gummosa) essential oil–loaded liposomes and evaluation of physical and antibacterial effect on Escherichia coli O157:H7. Journal of Food Protection. 2020;83 [3]:511–517. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-19-285

24. Colic M, Pavelic SK, Persuric Z, Agaj A, Bulog A, Pavelic K. Enhancing the bioavailability and activity of natural antioxidants with nanobubbles and nanoparticles. Redox Report. 2024;29 [1]:2196653. https://doi.org/10.1080/13510002.2024.2333619

25. Ettoumi FE, Zhang RY, Belwal T, Javed M, Xu YQ, Li L, et al. Generation and characterization of nanobubbles in ionic liquid for a green extraction of polyphenols from Carya cathayensis Sarg. Food Chemistry. 2022;369:130932. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130932

26. Hu F, Sun DW, Gao WH, Zhang ZH, Zeng XA, Han Z. Effects of pre-existing bubbles on ice nucleation and crystallization during ultrasound-assisted freezing of water and sucrose solution. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2013;20:161–166. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.08.002

27. Babu KS, Liu DZ, Amamcharla JK. Application of Micro- and Nano-Bubbles as a Tool to Improve the Rheological and Microstructural Properties of Formulated Greek-Style Yogurts. Foods. 2022;11 [4]:619. https://doi.org/10.3390/foods11040619

28. Jin Y, Adhikari A. Emerging and innovative technologies for the sanitization of fresh produce: Advances, mechanisms, and applications for enhancing food safety and quality. Foods. 2025;14 [11]:1924. https://doi.org/10.3390/foods14111924

Nanobubbles in Agro-Food Industries: Principles, Applications, and Challenges

Masoud Najaf Najafi*
Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

Abstract
Nanobubbles, with diameters typically ranging from about 1 to 200 nm, have attracted growing attention from food and agricultural researchers in recent years owing to distinctive properties such as an exceptionally high specific surface area, prolonged persistence in the liquid phase, capacity to generate reactive oxidizing species, and ability to penetrate complex microstructures. In this paper, the definition, types, and physicochemical properties of nanobubbles are first introduced, followed by the main production methods, along with the advantages and limitations of each. The paper then discusses applications of nanobubbles across various areas of the food industry, including dairy processing, enhancement of probiotic survival, protection of bioactive compounds, food freezing, washing and sanitization of fresh produce, water treatment and reclamation, and removal of microbial biofilms and pesticide residues, as well as agricultural applications, particularly in drip and subsurface irrigation systems. Despite this promising evidence, the technology faces significant challenges, including the lack of standardized production and characterization methods, the difficulty of isolating the independent effect of nanobubbles from co-occurring factors (such as gas type and the mechanical energy of the generation process), the absence of industrial-scale cost–benefit studies, and unresolved consumer-safety concerns. Based on the findings of this paper, conducting pilot-scale studies, designing controlled experiments to disentangle the underlying mechanisms, and developing standardized guidelines are essential to enable the safe and effective deployment of this emerging technology across the food supply chain.

Keywords: Nanobubbles; Stability; Food industry; Agriculture

Corresponding Author. Email: Mnajafi.mhd@gmail.com

Received: 2026-06-01 Revised: 2026-08-16 Accepted: 2026-09-08